

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

PAR
Bienvenu Thierry MBOG TOWADA

MÉTHODOLOGIE DE RÉHABILITATION DES CHAUSSÉES AU POINT DE VUE
TECHNIQUE, ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL
POUR L'AFRIQUE SUBSAHARIENNE

MONTRÉAL, LE 8 AOÛT 2016



Bienvenu Thierry Mbog Towada, 2016



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. Michael J. McGuffin, président du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Yannic A. Éthier, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Claude Bruxelles, membre externe indépendant
Directeur de projets au centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines

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

LE 15 JUILLET 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Au terme de trois ans de recherche scientifique initiée en 2013, qu'il me soit permis de remercier toutes les personnes qui ont fait de cette expérience une aventure mémorable.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Monsieur Gabriel Assaf qui m'a fait confiance tout au long de cette thèse. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir donné l'opportunité de mener à bien ce projet. Merci Gabriel pour ton soutien inconditionnel, ton implication personnelle, ta disponibilité, les idées scientifiques, la rigueur et le temps consacré à la lecture de mes travaux dans les plus brefs délais. Je vous suis profondément reconnaissant.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury pour m'avoir judicieusement conseillé notamment pour concentrer ma recherche sur l'Afrique sub-saharienne ainsi que tous leurs autres conseils, commentaires et suggestions.

J'aimerais également remercier mes compagnons de fortune de l'ÉTS: Jean-Philippe Roy, Landry Mballa, Barthélemy Ate-me-Nguema, Ghislaine Etoua, Arsène Missanda, Jules Kouam, Francis Baeni, Christian Bakena, Hilaire Douanla ainsi que mes amis et connaissances pour leurs conseils et encouragement: Christophe Amoussou, Marthe Gnimassou, Franck Hervé Mpondo, Joelle Mbindi, Magloire Deuthtio, Jean Pierre Assouan, Yves Amos Bell, Stéphane Nama, Patrick Emaleu, Guy Mvoolo, Mathurin Koundi, Lamine Diallo, Alphonse Mbei, Simon Pierre Mpeck Makon, Romeo Njila, Justin Fotué, Gisèle Nguendap, Eustache Goore, Daniel Levry, Jeff Nzé, Emil Tagne, Simplicite N'gratier, Cynthia Meledje, Albert Kone, Chimène Aboua, Raoul Ayobele, sans oublier la communauté scientifique de l'École de Technologie Supérieure (ETS) de Montréal.

Je ne peux terminer sans remercier bien évidemment mes parents, mes frères et sœurs, la grande famille Towada, la grande famille Njebes, et la grande famille Ebame pour leur soutien indéfectible.

VI

Enfin, je voudrais associer à ces remerciements mon fils Enzo-Manel Mbog pour son amour et sa patience. Sois rassuré fiston papa sera toujours disponible pour toi. Je remercie naturellement ma conjointe Ariane Rolande Ebame qui sait plus que quiconque quelles difficultés ont dû être surmontées pour achever ce projet. Je la remercie évidemment pour son indéfectible soutien, sa patience, son endurance et l'aide qu'elle m'a apportée tout au long du projet.

Je dédie cette thèse à mon papa décédé qui n'a pas pu voir son fils parachever son parcours académique.

MÉTHODOLOGIE DE RÉHABILITATION DES CHAUSSÉES AU POINT DE VUE TECHNIQUE, ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL POUR L'AFRIQUE SUBSAHARIENNE

Bienvenu Thierry MBOG TOWADA

RÉSUMÉ

Les activités associées à la réhabilitation des chaussées constituent un processus de gestion intégrée dont le but est d'améliorer l'état de leur surface, de renforcer leur structure multicouche, *lorsque cela est nécessaire*, et de prolonger leur durée de vie utile.

Étant donné que tout réseau routier est soumis toujours aux effets néfastes du vieillissement, *défini ici comme étant une combinaison des effets de la circulation cumulée et du climat avec le temps*, force est d'admettre que la littérature, rapporte une dégradation avancée du réseau routier mondial, et particulièrement en Afrique sub-saharienne pour ne citer que les travaux de Heggie de la Banque Mondiale.

Cette dégradation a évidemment des implications importantes pour les sociétés subsahariennes, non seulement sur la satisfaction des usagers, mais aussi sur les coûts d'exploitation de leurs véhicules ainsi que sur les coûts de remise en état de ces chaussées qui sont absorbés par l'administration ou éventuellement requis, et bien sûr, en corolaire, sur l'économie en général. Elle a enfin des implications sur l'environnement qui sont loin d'être négligeables, que ce soit au niveau du bruit, du réchauffement climatique ou des gaz à effet de serre.

C'est dans ce cadre bien précis, que l'objectif poursuivi dans cette thèse consiste à intégrer les nécessités techniques, les exigences économiques et nos responsabilités environnementales en matière de réhabilitation des chaussées, sur une plateforme décisionnelle qui permettrait de poser l'ensemble de ces considérations dans un référentiel analytique multidimensionnel compatible, en l'occurrence l'analyse dite multicritère.

Cet objectif se justifie en effet puisque le but ultime de l'administration doit viser, en général, de maximiser la rentabilité de l'investissement, pour évidemment dégager un bénéfice pour réaliser d'autres projets. L'objectif se justifie également car il aidera les ingénieurs à choisir les interventions les plus techniquement appropriées car Ô combien de routes sont réhabilitées en Afrique sub-saharienne sans que la cause de détérioration ne soit même identifiée. Enfin l'objectif se justifie par le souhait, voire la volonté de tous les gouvernements et la responsabilité de tous les ingénieurs de réduire l'empreinte environnementale des projets d'infrastructure sur le cycle de vie de la route.

Dans cet esprit, une méthodologie tridimensionnelle est proposée, articulée et justifiée. Elle repose sur une triple analyse: technique, économique et environnementale. L'approche technique s'articule autour d'une arborescence structurée autour de quatre tableaux clefs, qui

VIII

fournit les causes de détérioration les plus plausibles à partir de chacun des défauts observés et des essais supplémentaires à effectuer pour les confirmer dans un contexte subsaharien.

L'analyse économique et environnementale s'appuie sur l'outil HDM-4 de l'Association mondiale de la route pour le choix de la solution dite la plus rentable au niveau économique et la moins polluante au niveau environnemental. Le tout est suivi d'une analyse multicritère hiérarchique des priorités dites AHP.

La thèse présente ensuite une validation de l'applicabilité de la méthodologie sur un tronçon de près de 120 km de la route RN2 au Sénégal pour identifier la cause de détérioration, et comparer au point de vue économique et environnemental, plusieurs options d'intervention.

Les résultats obtenus de la partie validation de la thèse démontrent d'abord l'applicabilité de l'approche mais surtout aussi son utilité en faisant ressortir la cause de sa détérioration qui n'avait pas été déterminée selon la démarche classique de l'ingénieur conseil retenu. Son intérêt technique est donc indéniable, au moins pour le projet de la RN-2.

Pour ce qui concerne la question économique, *et sur la base des prix unitaires soumissionnés dans le bordereau des prix du contrat d'exécution de la RN-2 et d'une consultation locale avec les autorités de l'Agence routière du Sénégal*, force est d'admettre que les résultats de l'analyse économique soulèvent l'importance de recourir aux routes recouvertes de béton de ciment dans le contexte régional de l'Afrique subsaharienne. Ceci découle évidemment d'une part des activités d'entretien minimales qui sont associées aux chaussées rigides en milieu non gélif de l'Afrique subsaharienne, et d'autre part au bon comportement prédit de ces chaussées dans ce contexte climatique.

Il ressort des différentes analyses techniques, économiques et environnementales que la route en béton de ciment procure:

- un excellent confort au roulement entre 1 et 2,1mm/m tout le long de la période d'analyse de 20 ans, ce qui est louable;
- un gain de 266 667 USD par km de route pour la RN2 par rapport à l'option sans intervention;
- une économie d'énergie pour la route RN2 d'environ 30% par rapport aux autres options;
- une diminution des émissions de CO₂ d'environ 32%, ce qui représente un gain considérable en matière de lutte contre le changement climatique.

Dans tous les cas, l'option du revêtement en béton est plus avantageuse que l'option en enrobé.

Mots clés: Réhabilitation des chaussées, nécessités techniques, exigences économiques, contraintes environnementales, changement climatique.

METHODOLOGY OF PAVEMENT REHABILITATION AT THE TECHNICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL LEVEL FOR SUB-SAHARAN AFRICA

Bienvenu Thierry MBOG TOWADA

ABSTRACT

Rehabilitation is an integrated management process with a goal to maintain adequate road conditions structurally, reinforce their structures as needed and extend their service lives.

Given that any road network is subject to the adverse effects of normal ageing combined to heavy traffic and weathering, commonly noted worldwide is the deterioration of the world highway system in general.

This deterioration has important implications not only on user satisfaction but also on vehicle operating costs, on agency costs, and consequently on the economy in general. This has also equally important implications on the environmental footprint of our road infrastructure.

This thesis aims at integrating technical and economical requirements and environmental constraints related to pavement rehabilitation, on a systems decision platform which would enable to place all considerations under the same multidimensional referential.

This is justified in order to maximize the return on the investment, so that: benefits may be used to invest in other profitable projects, to help engineers identify the most appropriate intervention and to reduce greenhouse gas effects and energy use per vehicle, which would enable to fight efficiently against climate change.

A validation study is carried out to compare many rehabilitation options on a stretch of almost 120 km of the RN2 road in the north of Senegal, according to this triple bottom line approach which involves a technical analysis based on the cause of deterioration and an economic and environmental analysis based on HDM-4 of the Permanent International Association of Road Congresses (PIARC) for the choice of the optimal economic and sustainable solution.

The validation process demonstrated the applicability of the technical portion of the methodology and its usefulness by highlighting why the pavement had failed, a determining factor that was overlooked by the consulting engineer hired to design the solution and prepare the bidding documents.

The results of the validation also highlighted the importance to use concrete roads in sub-Saharan Africa as they provide:

- a better ride (IRI of 1 to 2,1mm/m over 20 years) than an asphalt pavement over time which is higher than that obtained with an asphalt pavement;
- a savings of a USD 266 667 USD/km over the do-nothing strategy;

X

- an energy saving of about 30% over the do-nothing strategy;
- and CO₂ emission reduction of about 32% over the do-nothing strategy.

All of these represent a considerable gain in technical and economic terms and in the joint fight against climate change.

Keywords: Pavement rehabilitation, technical and economical requirements, environmental constraints, climate change.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
1.1 Évaluation et prévision du comportement de la chaussée	7
1.2 Analyse économique dans la gestion des routes	9
1.2.1 Analyse du coût ou bénéfice uniforme annuel équivalent	10
1.2.2 Méthode de la valeur actuelle nette	10
1.2.3 Méthode du taux de rentabilité interne	12
1.2.4 Méthode bénéfiques / coûts	12
1.2.5 Méthode d'analyse de rentabilité	13
1.3 Intégration de la dimension environnementale en gestion des routes	13
1.3.1 Quantification des impacts environnementaux pour le changement climatique	16
1.4 État actuel des routes des pays d'Afrique subsaharienne	17
1.4.1 Reflet de la qualité de gouvernance sur l'état des routes par pays en Afrique subsaharienne	19
1.4.2 Dépenses dans le réseau routier en Afrique subsaharienne	21
1.5 Le logiciel HDM-4	23
1.5.1 But du logiciel	23
1.5.2 Données requises pour l'exploitation de HDM-4	24
1.5.3 Modèle pour la conception et l'entretien des routes dans HDM-4	27
1.5.3.1 But visé	27
1.5.3.2 Perspective historique	27
1.5.3.3 Portée	29
1.6 Conclusion	38
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE INTÉGRÉE	39
CHAPITRE 3 INTÉGRATION DE LA CAUSE DE DÉTÉRIORATION DES ROUTES EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE	45
3.1 Résumé	45
3.2 Abstract	46
3.3 Introduction	46
3.3.1 Problématique	46
3.3.2 État de l'art	47
3.3.2.1 Revue de la littérature	47
3.3.2.2 État actuel des routes des pays d'Afrique subsaharienne	50
3.3.2.3 État futur des routes dégradées des pays d'Afrique subsaharienne	51
3.4 Méthodologie	52
3.5 Résultats et discussion	60

3.5.1	Étude au nord du Sénégal	60
3.5.1.1	Données du projet	60
3.5.1.2	Option retenue pour l'appel d'offres par le bureau d'études	60
3.5.1.3	Option résultant de l'application de l'approche proposée dans cet article.....	61
3.5.1.4	Méthode et paramètres utilisés pour l'étude	62
3.5.1.5	Données d'identification du projet avant la réalisation	63
3.5.1.6	Données d'identification du projet après la réalisation.....	64
3.5.1.7	Les paramètres de l'analyse de sensibilité	65
3.5.1.8	Les différents défauts et les causes de détérioration du projet de la RN2	66
3.5.1.9	Les hypothèses prises en compte lors de la simulation sur HDM-4	68
3.5.2	Résultat de l'étude au nord du Sénégal.....	69
3.5.2.1	Identification de la démarche.....	69
3.5.2.2	Présentation et interprétation des résultats.....	70
3.6	Conclusion	79
CHAPITRE 4 INTÉGRATION DE L'ANALYSE ÉCONOMIQUE DANS LA GESTION DES ROUTES EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE.....		
4.1	Résumé.....	81
4.2	Abstract.....	81
4.3	Introduction.....	82
4.3.1	Problématique	82
4.3.2	État de l'art.....	83
4.3.2.1	Revue de la littérature	83
4.3.2.2	La situation du réseau routier en Afrique subsaharienne.....	84
4.4	Méthodologie	86
4.4.1	Méthodologie d'intégration de l'analyse économique dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne.....	86
4.5	Résultats et discussions.....	87
4.5.1	Étude de la route RN2 au Sénégal	90
4.5.1.1	Données du projet	90
4.5.1.2	Option retenue pour l'appel d'offres par le bureau d'études	90
4.5.1.3	Option résultant de l'application de l'approche proposée dans cet article	91
4.5.1.4	Données d'identification du projet avant la réhabilitation.....	92
4.5.1.5	Données d'identification du projet après la réhabilitation.....	93
4.5.1.6	Les paramètres de l'analyse de sensibilité.....	94
4.5.1.7	Les différents défauts et les causes de détériorations du projet de la RN2	95
4.5.1.8	Les hypothèses prises en compte lors de notre simulation sur HDM-4	97
4.5.2	Présentation et interprétation des résultats de l'étude de la RN2 au Sénégal.....	98

4.5.2.1	L'analyse économique	98
4.6	Conclusion	105
CHAPITRE 5 INTÉGRATION DE LA DIMENSION ENVIRONNEMENTALE EN GESTION DES ROUTES DANS LES PAYS D'AFRIQUE SUBSAHARIENNE.....		
		107
5.1	Résumé.....	107
5.2	Abstract.....	107
5.3	Introduction.....	108
5.3.1	Problématique	108
5.3.2	État de l'art.....	109
5.3.2.1	Revue de la littérature	109
5.3.2.2	Les indicateurs d'impacts entre la route et l'environnement	110
5.4	Méthodologie	114
5.4.1	Méthodologie d'intégration de la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne.....	114
5.5	Résultats et discussion	115
5.5.1	Étude expérimentale.....	115
5.5.1.1	Données du projet	115
5.5.1.2	Les différentes options retenues dans ce projet	116
5.5.1.3	Méthode de l'étude	117
5.5.1.4	Les différents défauts et les causes de détériorations du projet de la RN2	120
5.5.2	Résultat expérimentaux et discussion	123
5.5.2.1	Les émissions de gaz.....	123
5.5.2.2	La consommation d'énergie.....	128
5.6	Conclusion	130
CHAPITRE 6 DISCUSSION		
		133
6.1	Analyse multicritère.....	133
6.1.1	Analyse multicritère du projet RN2 au Sénégal	137
6.2	Synthèse des principaux résultats des articles	139
6.2.1	Identification des courbes de détérioration de la chaussée selon l'IRI dans le projet RN2 au Sénégal.....	140
6.2.2	Analyse économique dans le projet RN2 au Sénégal	140
6.2.3	Émissions de gaz dans le projet RN2 au Sénégal	141
6.2.4	Consommation d'énergie dans le projet RN2 au Sénégal	142
6.2.5	Conclusion	142
6.3	Limites de la recherche	142
CONCLUSION.....		
		145
ANNEXE 1		
		149
LES MODELES DE COMPORTEMENT DES CHAUSSÉES SELON HDM-4		
		149

Chaussée flexible	149
Chaussée rigide	161
LISTE DES PUBLICATIONS	171
Articles publiés ou soumis dans les revues internationales avec comité de lecture	171
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	173

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Modèles du système HDM-431
Tableau 3.1	Défauts de fissuration53
Tableau 3.2	Défauts touchant à la sécurité54
Tableau 3.3	Défauts de cohésion de surface.....55
Tableau 3.4	Défauts de déformation.....56
Tableau 3.5	Pourcentage de particules fines autorisées en fondation supérieure.....57
Tableau 3.6	Données d'identification du projet avant la réhabilitation63
Tableau 3.7	Données d'identification du projet après la réhabilitation64
Tableau 3.8	Les différentes sections de la route, leurs dégradations et leurs profils en travers type.....66
Tableau 3.9	Variation de l'IRI dans les différentes options du projet71
Tableau 4.1	Processus de l'analyse du cycle de vie des projets en HDM-489
Tableau 4.2	Données d'identification du projet avant la réhabilitation (RN2).....92
Tableau 4.3	Données d'identification du projet après la réhabilitation (RN2)93
Tableau 4.4	Différentes sections de la route, leurs dégradations et leurs profils en travers type.....95
Tableau 4.5	Option 1 comparée à l'option de base (RN2).....98
Tableau 4.6	Option 2 comparée à l'option de base (RN2).....99
Tableau 4.7	Option 3 comparée à l'option de base (RN2).....99
Tableau 4.8	Option 4 comparée à l'option de base (RN2).....100
Tableau 4.9	Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par croissance du trafic (RN2)101
Tableau 4.10	Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par coût d'investissement (RN2)102

Tableau 4.11	Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par TJMA (RN2).....	104
Tableau 5.1	Données d'identification du projet avant la réhabilitation.....	118
Tableau 5.2	Données d'identification du projet après la réhabilitation.....	119
Tableau 5.3	Les différentes sections de la route, leurs dégradations et leurs profils en travers type.....	121
Tableau 5.4	Les émissions de gaz par options durant 20 ans.....	123
Tableau 5.5	La consommation d'énergie par options durant 20 ans.....	129
Tableau 6.1	Critères pris en compte dans l'analyse multicritère HDM-4.....	134
Tableau 6.2	La liste des différents poids relatifs.....	136
Tableau 6.3	La liste des différents critères.....	136
Tableau 6.4	Poids relatif des experts.....	137
Tableau 6.5	Critères utilisés et leurs poids relatif (RN2).....	137
Tableau 6.6	Analyse multicritère et poids relatif (RN2).....	138

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Structure de la thèse4
Figure 1.1	Courbe de décision de la valeur actuelle nette.....11
Figure 1.2	Distribution de la longueur du réseau routier en fonction des catégories d'état des routes par pays Tirée de Gwilliam et al.(2008)19
Figure 1.3	Dépense moyenne annuelle dans le transport routier par pays Tirée de Briceño-Garmendia et al.(2008)21
Figure 1.4	Dépense en réhabilitation et entretien par rapport aux normes Tirée de Briceño-Garmendia et al.(2008)22
Figure 2.1	Plateforme tridimensionnelle de décision.....42
Figure 3.1	Arborescence structurée pour l'étude technique d'une réhabilitation.....59
Figure 3.2	Évolution de l'uni de chaque option selon le scénario de base72
Figure 3.3	Évolution de l'uni selon le scénario du coût d'investissement +25%.....73
Figure 3.4	Évolution de l'uni selon le scénario du coût d'investissement -25%.....74
Figure 3.5	Évolution de l'uni selon le scénario de croissance du trafic faible -70%...75
Figure 3.6	Évolution de l'uni selon le scénario de croissance du trafic fort +70%76
Figure 3.7	Évolution de l'uni selon le scénario du TJMA faible -25%77
Figure 3.8	Évolution de l'uni selon le scénario du TJMA fort +25%.....78
Figure 4.1	Arborescence structurée pour l'étude économique d'une réhabilitation.....87
Figure 4.2	Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par croissance du trafic (RN2)101
Figure 4.3	Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par coût d'investissement (RN2)103
Figure 4.4	Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par TJMA (RN2)104
Figure 5.1	Influence des routes sur l'environnement et les usagers.....111

XVIII

Figure 5.2	Les mécanismes d'impact des routes sur leur environnement.....	112
Figure 5.3	Arborescence structurée pour l'étude environnementale d'une réhabilitation.....	115
Figure 5.4	Graphique des émissions d'hydrocarbures (HC) par option durant 20 ans.....	124
Figure 5.5	Graphique des émissions du monoxyde de carbone (CO) par option durant 20 ans.....	124
Figure 5.6	Graphique des émissions d'oxydes d'Azote (NO _x) par option durant 20 ans.....	125
Figure 5.7	Graphique des émissions du dioxyde de Soufre (SO ₂) par option durant 20 ans.....	126
Figure 5.8	Graphique des émissions du dioxyde de Carbone (CO ₂) par option durant 20 ans.....	126
Figure 5.9	Graphique des émissions de Particules (Par) par option durant 20 ans.....	127
Figure 5.10	Graphique des émissions du Plomb (Pb) par option durant 20 ans.....	128
Figure 5.11	Graphique de la consommation d'énergie par option durant 20 ans.....	129
Figure 5.12	Graphique de la consommation d'énergie par option durant 20 ans.....	130
Figure 6.1	Analyse multicritère BA et TRI de la RN2.....	139

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AADT	Annual Average Daily Traffic (Débit journalier moyen annuel)
AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State Highway Transportation Officials
ACC	Association Canadienne du Ciment.
ACCV	Analyse des coûts sur le cycle de vie
ACV	Analyse du cycle de vie
AGEPAR	Association des Gestionnaires et Partenaires Africains de la Route
AGEROUTE	Agence des Travaux et de Gestion des Routes
AICD	Africa Infrastructure Country Diagnostic
AIPCR	Association Internationale Permanente des Congrès de la Route
AL	Analyses linéaires
ANL	Analyses Non Linéaires
ASS	Afrique Sub-Saharienne
B	Économies en matière de coûts aux usagers par rapport à l'option sans intervention
C	Surcoûts à l'administration, C = coûts des investissements actualisés à l'administration – les économies d'entretien résultant de l'intervention
CAP	Coûts des investissements actualisés à l'administration
CBA	Analyse coûts-bénéfices (Cost-Benefit Analysis)
CBR	California Bearing Ratio
CEA	Commission Économique de l'Afrique
CEBTP	Centre Expérimental et de Recherches du Bâtiment et les Travaux Publics

XX

CEDEAO	Communauté Économique et Douanière de l’Afrique de l’Ouest
CEEAC	Communauté Économique des États de l’Afrique Centrale
CEV	Coût d’exploitation des véhicules
CRCP	Continuously Reinforced Concrete Pavements
COMESA	Communauté Monétaire et Économique au Sud de l’Afrique
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
C-SHRP	Canadian Strategic Highway Research Program
DJMA	Débit Journalier Moyen Annuel
E	Avantages exogènes
EGTOT	La consommation de l’énergie totale annuelle
ENTOT	L’utilisation de l’énergie totale annuelle
FHWA	Administration fédérale des routes (Federal Highway Administration)
FQRNT	Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies
GNT	Grave Non Traitée
GTR	Guide de Terrassement Routier
HC	Hydrocarbures
HDM-4	Highway Development and Management (Système de développement et de gestion des routes)
IRI	Indice de rugosité international
LCA	Life Cycle Analysis (Analyse du cycle de vie)
LCCA	Life Cycle Cost Analysis (Analyse des coûts sur le cycle de vie)
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

MCA-Sénégal	Millennium Challenge Account - Sénégal
MCC	Millennium Challenge Corporation
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NOx	Oxyde d'azote
NPV	Net Present Value (Valeur actuelle nette)
ONU	Organisation des Nations Unies
PM	Particule de matière
PMS	Pavement Management System
RAC	Coûts totaux actualisés administration (Road Agency Costs)
RBC	Ratio bénéfices-coûts
SETRA	Services des Études Techniques des Routes et Autoroutes
SO2	Dioxyde de soufre
SSA	Sub-Saharan Africa
TRI	Taux de rentabilité interne
UN	United Nations (Nations Unies)
USD	Dollars américains
VAN	Valeur actuelle nette
VOC	Vehicle operating costs
VPN	Bénéfice actualisé, $VPN=B+E-C$
VPN/CAP	Indicateur de rentabilité d'investissement relatif
VPN/RAC	Indicateur de rentabilité relatif

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte

La route est considérée, à juste titre, comme l'un des principaux moteurs de développement d'un pays, et l'état de son réseau routier, une des références pour estimer le potentiel de son développement économique. Actuellement plus d'un tiers du réseau routier mondial nécessite des travaux de réhabilitation résultant principalement de l'inexistence de systèmes efficaces de gestion de ces réseaux ou de contraintes budgétaires (Mondiale, 2009). Si dans le passé, on se contentait juste de la conception et de la construction des routes, de nos jours, les nouveaux concepts de gestion vont plus loin et englobent aussi l'entretien, la réhabilitation et le suivi du comportement avec l'effet du trafic et du temps (Assaf, 2010). La dégradation avancée du réseau routier mondial en général, et d'Afrique subsaharienne en particulier, a évidemment des implications importantes non seulement sur la satisfaction des usagers et sur l'économie, mais aussi sur le niveau d'investissement à venir. À ce titre, *et vu les montants importants en jeu*, il faut intervenir de la façon la plus réfléchie possible à l'aide d'une méthodologie articulée multicritère *ou multidimensionnelle* afin d'identifier la stratégie de réhabilitation des chaussées la plus appropriée. Celle-ci nécessite, bien sûr, le recours à des données pertinentes mais aussi fiables d'une part mais aussi la prise des décisions éclairées, orientées vers la protection du patrimoine d'autre part. En effet, chacune des décisions prises à un instant donné, aura des effets significatifs à long terme sur les coûts d'exploitation des véhicules, les coûts d'entretien et de réhabilitation futurs que l'administration aura à défrayer et certainement l'empreinte environnementale. Les activités de réhabilitation doivent donc découler d'une gestion intégrée multidimensionnelle ou multicritère dont le but est de préserver les chaussées en bon état, au moindre coût économique et environnemental sur le cycle de vie. La solution réside dans l'accroissement des budgets d'entretien et de réhabilitation des chaussées et des systèmes de gestion des chaussées qui optimisent les décisions. A ce titre, le Guide national pour des infrastructures municipales durables précise bien que la gestion rentable des chaussées passe nécessairement par une judicieuse prise de décision et un entretien préventif. En gros, un seul dollar engagé pour une réfection en temps opportun permettra d'économiser 5 \$ en coûts de reconstruction, et un dollar consacré à une judicieuse prévention permettra d'épargner 5 \$ en frais de réfection.

Cadre

Les routes revêtues représentent la plus grande valeur des actifs de transports dans la plupart des pays (Mondiale, 2009). Maintenir cet actif qui se déprécie rapidement sur 10 ans ou 20 ans tout en assurant un niveau de service souhaité par les usagers de la route et en respectant leur capacité de payer pour ce service essentiel (*impôts, péages, immatriculation, taxe d'essence, etc.*) est un défi majeur pour les élus, les administrateurs et les ingénieurs. Le défi est essentiellement celui de la détermination de la nature et du calendrier d'application de l'entretien périodique et de la réhabilitation aux endroits ciblés, de façon à minimiser le coût total sur le cycle de vie. Cette gestion nécessite des données pertinentes et fiables pour prendre des décisions éclairées des divers aléas techniques, économiques et environnementaux, parce qu'elles ont des effets significatifs à long terme sur les coûts d'exploitation des véhicules, les coûts des travaux pour l'administration et l'empreinte environnementale. Les administrations routières en Afrique subsaharienne réalisent chaque année sur leur réseau routier, de nombreuses interventions dont certaines ont un caractère innovateur ou font appel à de nouvelles technologies (Mondiale, 2009). La performance de ces interventions dans le temps et les analyses coûts-avantages ne sont pas bien connues, car les données ne sont pas toujours saisies, ne sont pas toujours fiables ou sont mal conservées. Pour remédier à cette situation, certaines administrations ont entrepris d'implanter une procédure de suivi de la performance des interventions dans le but de fournir les routes au niveau de service donné au moindre coût possible (Mondiale, 2009). A cet effet, la Banque Mondiale rapporte dans plusieurs études les causes suivantes à l'état de dégradation des réseaux routiers dans les pays d'Afrique subsaharienne (Mondiale, 2009):

- des conceptions non optimisées, résultant en des gaspillages substantiels, dont par exemple l'absence de recyclage;
- un manque d'évaluation périodique et l'absence des travaux d'entretien aboutissant à la nécessité d'intervenir tardivement mais de façon beaucoup plus substantielle (réhabilitation coûteuse);
- l'ignorance du comportement à long terme, à l'image d'un gestionnaire sans aucun modèle prédictif;

- l'ignorance des causes de détérioration résultant en des interventions qui ne répondent pas à l'origine du problème;
- les obstacles bureaucratiques et administratifs.

Ces constatations donnent la mesure du problème et le ton de la solution à envisager. En effet, plusieurs de ces administrations ont cru pouvoir différer les interventions au-delà d'un délai raisonnable, il en est résulté des désordres graves, tel que des coûts élevés pour les citoyens et des dépenses très lourdes d'entretien et de réhabilitation des chaussées (Assaf, 2004). De telles dépenses peuvent atteindre plusieurs fois le coût d'entretien préventif qui aurait été suffisant s'il avait été appliqué au bon moment (Mazoyer, Roudart et Mayaki, 2008). Vu ce qui précède, notre expérience et notre intérêt pour la question subsaharienne, il nous est apparu judicieux d'avoir comme objectif général de cette thèse, la mise sur pied d'une méthodologie innovante et multicritère pour la réhabilitation des chaussées en Afrique subsaharienne.

But

De façon spécifique, la thèse a pour but d'introduire le concept de la cause de détérioration des routes et comment les déterminer, et l'intégrer dans une plateforme d'analyse économique et environnementale en Afrique subsaharienne.

Objectif

L'objectif principal de cette thèse est de mettre sur une même plateforme décisionnelle les nécessités techniques, les exigences économiques et nos responsabilités environnementales en matière de réhabilitation des chaussées en Afrique subsaharienne.

Structure (Description des étapes)

Le présent document est structuré en six parties qui constituent les différents chapitres de la thèse (Figure 0.1).

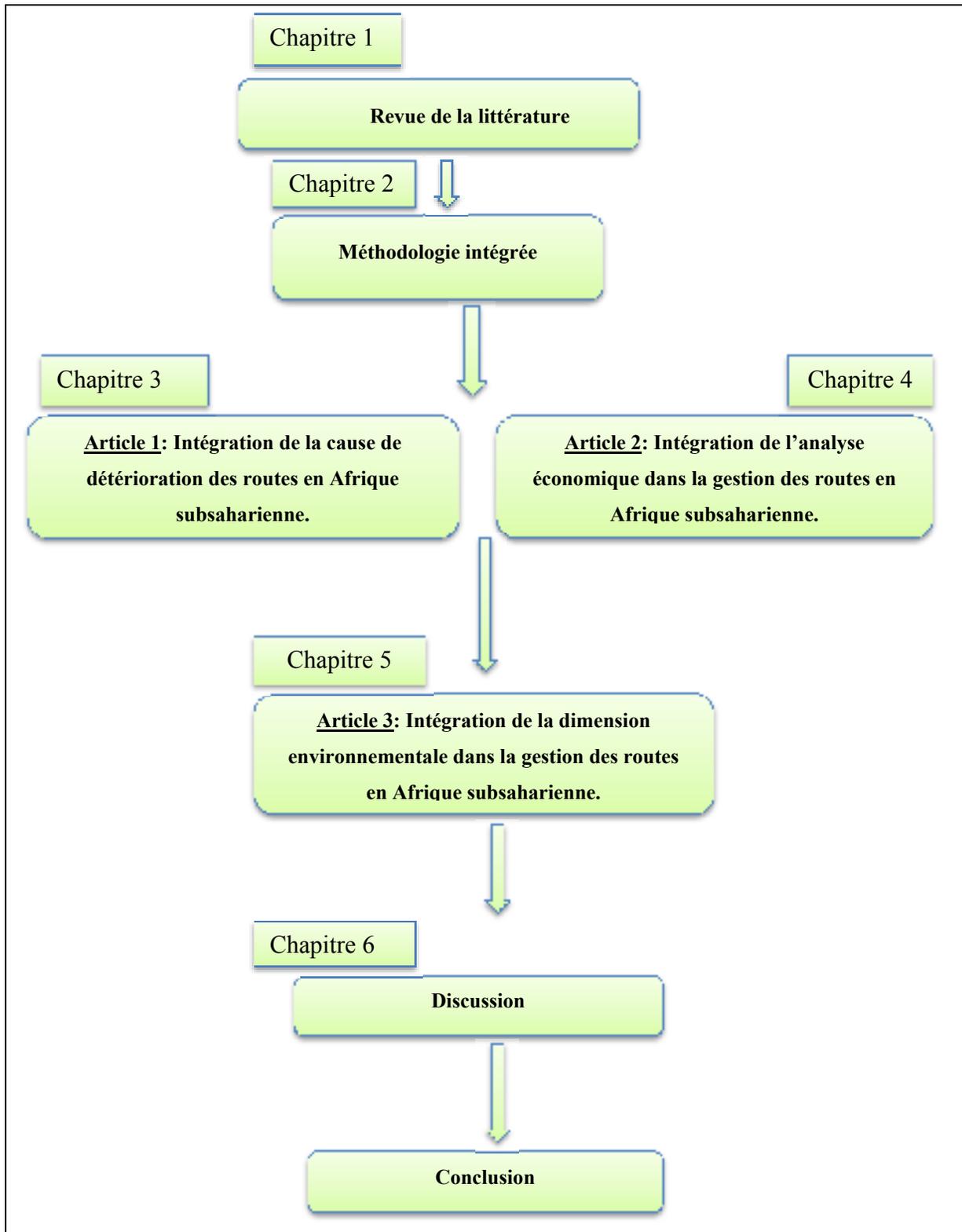


Figure 0.1 Structure de la thèse

Le chapitre 1 dresse une brève synthèse de la revue littéraire, laquelle porte sur l'évaluation et la prévision du comportement de la chaussée, l'analyse économique dans la gestion des routes, l'intégration de la dimension environnementale en gestion des routes et l'état actuel des routes des pays d'Afrique subsaharienne.

Le chapitre 2 présente une méthodologie intégrée des trois concepts: technique, économique et environnemental.

Les trois chapitres qui suivent sont destinés aux résultats des travaux présentés dans des articles scientifiques publiés au cours du projet.

Le chapitre 3, dédié à l'article 1, présente une approche technique permettant d'identifier la cause de détérioration des chaussées flexibles en Afrique subsaharienne dans le but d'orienter ou de guider les ingénieurs vers les interventions qui répondent à la source du problème.

Par la suite, le chapitre 4 qui est dédié à l'article 2, *et qui manifestement suit l'article 1 puisque la question technique prime sur la question économique, un peu comme un prérequis*, présente le processus d'intégration de l'analyse économique dans la gestion des routes dans le contexte de l'Afrique subsaharienne. Le but recherché est de permettre aux gestionnaires de bien comprendre les enjeux, d'établir les solutions les plus appropriées et de choisir les interventions optimales. Tout ceci dans le but de maximiser le retour sur l'investissement en vue de maximiser les bénéfices économiques.

Le chapitre 5, dédié à l'article 3, présente une intégration de la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne, afin de prioriser les options d'intervention qui diminuent la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule, ce qui contribuera à lutter contre le changement climatique.

Enfin, le chapitre 6 consacré à une discussion dresse une synthèse générale des principaux résultats des trois articles, effectue une analyse multicritère selon la méthode AHP pour

évaluer les impacts techniques, économiques et environnementaux que génère le projet et souligne une contribution originale de cette thèse dans le domaine de la recherche par ce travail ainsi que les limitations.

Une conclusion complète la thèse.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Évaluation et prévision du comportement de la chaussée

Le développement économique d'une nation passe entre autres par l'état de ses routes. L'entité responsable de la gestion de celles-ci se doit de mettre en œuvre des programmes qui assurent la pérennité des infrastructures afin qu'elles demeurent profitables à la société (Assaf, 1998). Ces programmes reposent sur la connaissance de l'état des sections du réseau, le diagnostic des causes de détériorations relevées et la prédiction de l'évolution de chacun des tronçons dans le but de prioriser les interventions (Pehlivanidis, 1994). La revue de la littérature, dans le domaine de l'évaluation et la gestion des chaussées flexibles, pointe rapidement vers les ouvrages de référence tels que ceux de Robert Tessier (Tessier, 1990) et ceux de l'Association des transports du Canada ainsi que de l'American Association of State Highway and Transportation Officials. La littérature dans ce domaine s'articule alors sur trois principales thématiques inter reliées, soit: 1) le relevé des dégradations et du confort au roulement qui qualifient la qualité fonctionnelle de la chaussée, 2) l'évaluation de la capacité portante qui qualifie la qualité structurale de la chaussée et 3) l'analyse de la durée de vie d'une structure qui ouvre la porte bien sûr à l'analyse économique sur le cycle de vie, l'optimisation, la détermination des budgets etc. Une approche fort louable pour l'époque qui détermine les principes qui doivent régir la conception d'une structure flexible au niveau projet, sur sa durée de vie (Bruxelle, 2005). Les revues spécialisées qui traitent des sujets qui touchent de près ou de loin au diagnostic de la cause de détérioration des chaussées flexibles, des essais réalisables et leur potentiel de vérification sont quasi inexistantes; à l'exception de l'OCDE (OCDE, 1978), du SHRP (SHRP, 1990), des travaux de Gabriel Assaf (Assaf, 1993), du MTQ (MTQ, 1993) et des travaux de Pehlivanidis (Pehlivanidis, 1994). Les recherches approfondies pour mieux gérer les chaussées flexibles démontrent qu'au XXI^e siècle, le développement de logiciels utiles et pragmatiques représente la solution préconisée pour rentabiliser le budget d'entretien d'un réseau entier (Boucher, 1994). Objectivement, il est tout à fait impossible d'optimiser la rentabilité des sommes nécessaires à la correction des

défauts sur l'ensemble d'un réseau routier sans avoir recours à un système de gestion des chaussées (SGC) (Haas et Hudson, 1978). Les innombrables possibilités engendrées par la diversité des caractéristiques de chacun des tronçons, ainsi que le nombre toujours grandissant d'options d'entretien réalisables, demandent une approche systémique pour en assurer l'analyse complète car l'étendue des possibilités offertes par les systèmes est impressionnante (Systematics et al., 2006). Force est toutefois d'admettre que les modèles doivent être calibrés (St-Laurent, 2004) pour bien refléter la réalité des mécanismes de détérioration issus du climat par exemple dans un contexte québécois (MTQ, 2006). Les essais à réaliser pour confirmer la présence d'une cause relèvent d'un procédé d'évaluation qualitative, quantitative ou typologique des caractéristiques et des propriétés physico-chimiques des matériaux (Assaf, 2010). D'après Gabriel Assaf (Assaf, 1993), les symptômes ou défauts sont intimement liés aux causes qui engendrent les mécanismes de détérioration grâce aux agents comme le trafic, le froid et la chaleur. L'apparition de défauts à la surface d'un tronçon est due à la présence de certains agents qui agissent sur la structure de la chaussée. Cet état engendre les causes qui déclenchent le mécanisme de détérioration produisant ainsi la dégradation de surface initialement relevée (Assaf, 1987). L'action d'une cause permet d'affirmer la présence du mécanisme responsable de l'éruption des défauts (Assaf, 2010). Malgré l'exécution d'essais spécifiques pour la confirmation des causes, la diversité des résultats est accentuée en raison du caractère spécifique d'une structure flexible et des changements internes que subit la chaussée dans le temps (St-Laurent, 2004). En effet, l'imprécision des résultats accroît l'incertitude de l'analyse cognitive et provoque le doute sur la fiabilité du diagnostic rendu (Cook et al., 2004). Pour y remédier, il est primordial de contre-vérifier l'affirmation de la cause par l'identification du lien de causalité entre les causes présentes et les défauts originalement ciblés par l'analyse (Assaf, 2010). Alors, le procédé systémique doit comprendre: l'observation des défauts, l'analyse permettant de cibler les causes possibles, l'affirmation de la présence de chaque cause par la réalisation d'essais ainsi que la validation de ces dernières auprès des défauts qui ont conduit à leur réalisation en laboratoire ou sur site (Assaf, 1993). Enfin, le regroupement des causes par famille entraîne une importante réduction du nombre de liens inductifs qui ciblent, affirment et valident les causes de détérioration à travers un projet (Assaf, 1993).

Li, Xie et Haas (1996) allèguent que la prévision de la détérioration de la chaussée est le facteur le plus important dans la détermination du moment le plus opportun pour programmer l'entretien du réseau routier. Dans le contexte de leur justification au niveau d'un état américain, Morian et al. (2003) expliquent comment l'État de la Pennsylvanie est confronté à la détérioration de ses infrastructures routières et consacre des sommes importantes à la réhabilitation des routes au même titre d'ailleurs comme plusieurs administrations publiques nord-américaines. Plusieurs techniques d'intervention économiques avantageuses à base d'enrobés améliorés, de fondations stabilisées ou encore de béton haute performance peuvent être alors avantageées sur la base de la prévision de leur comportement sur une base empirique ou mécanistique, et des analyses sur leur cycle de vie.

Ces modèles de comportement font également ressortir l'intérêt de l'entretien périodique lequel donne des résultats satisfaisants à court et long termes, par des interventions minimales de pavage superficiel. Beg, Zhang et Hudson (2000a) soumettent une approche pour justement déterminer les choix d'intervention sur le réseau routier sur la base des options d'entretien périodique et de réhabilitation, qui minimisent le coût sur la durée de vie de la chaussée. Ils estiment que les coûts déboursés par les administrations routières, les coûts d'exploitation des véhicules, voire les coûts générés par les retards des utilisateurs lors des travaux et les niveaux des performances attendus ou désirés sont les facteurs les plus importants pour comparer alors les diverses stratégies d'intervention sur les chaussées.

1.2 Analyse économique dans la gestion des routes

L'analyse économique est un outil d'aide à la décision qui suit un processus analytique rigoureux et crédible. Elle fournit une plateforme qui permet de choisir et de justifier les décisions ou stratégies de réhabilitation. Elle intègre les coûts d'exploitation des véhicules, voire les coûts des retards lors des travaux (Laplante, 2010). Les méthodes d'analyse économique applicables à la réhabilitation des chaussées reposent généralement sur: 1) le coût uniforme annuel équivalent d'une option de réhabilitation, 2) la valeur actuelle nette de tous les coûts et bénéfices ramenés à l'année de référence, qui est généralement l'année de

décision, 3) le taux de rentabilité interne de l'option de réhabilitation qui égalise les coûts et les bénéfices, 4) la méthode bénéfices/coûts, 5) l'analyse de rentabilité.

1.2.1 Analyse du coût ou bénéfice uniforme annuel équivalent

La méthode du coût ou bénéfice uniforme annuel équivalent est utile pour comparer deux alternatives séparées dans le temps et qui ont des durées de vie différentes. Le coût ou bénéfice uniforme annuel équivalent représente le flux net (bénéfices moins coûts) encourus annuellement sur la durée de vie du projet. Les bénéfices représentent les économies aux usagers en matière d'exploitation des véhicules entre l'option de réhabilitation considérée versus l'option de base de ne pas intervenir. Les coûts représentent le coût de la réhabilitation et d'entretien de chaque option. La récupération du capital futur est utilisée pour déterminer le coût uniforme annuel équivalent de chaque coût d'item donné dont la valeur actuelle nette (VAN) de l'item est déjà connue (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994).

1.2.2 Méthode de la valeur actuelle nette

Un des buts de la gestion de chaussée est d'identifier le meilleur moment pour intervenir et comment. La méthode de la valeur actuelle nette (VPN) permet de comparer du point de vue économique, deux scénarios d'intervention ou deux options de réhabilitation d'une chaussée à un instant donnée, mais qui ont le même début et la même fin pour ce qui concerne la période d'analyse. La VPN fournit alors la valeur en devises d'aujourd'hui de tous les coûts et bénéfices (économies aux usagers par rapport à l'option de ne rien faire) durant toute la période d'analyse désirée. Cette méthode est de plus en plus utilisée dans le domaine de la gestion de chaussée. La VPN peut être présentée comme les coûts moins les bénéfices ou par l'équation suivante:

$$VPN = \sum_{i=1}^n \frac{V_i - B_i}{(1+a)^{i-1}} \quad (1.1)$$

Le calcul consiste à évaluer année par année, jusqu'à l'année n, le bilan des bénéfices A_i et les coûts C_i pour une variante donnée :

$$V_i = A_i - C_i$$

On compare la valeur V_i obtenue à une solution de référence dont le bilan est B_i .

D'autres indicateurs peuvent également être utilisés, notamment:

- le taux de rentabilité interne (TRI) est le taux d'actualisation qui annule le bénéfice actualisé: solution de l'équation $VPN(a) = 0$ (voir figure 1.1);
- le taux de rentabilité interne moyen (TRIm), c'est le rapport entre le bilan de l'année qui suit l'investissement et le coût de celui-ci;
- le rapport entre le bénéfice actualisé $VPN(a)$ et le coût d'investissement C : VPN/C .

La figure 1.1 donne la courbe de décision de la valeur actuelle nette (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994).

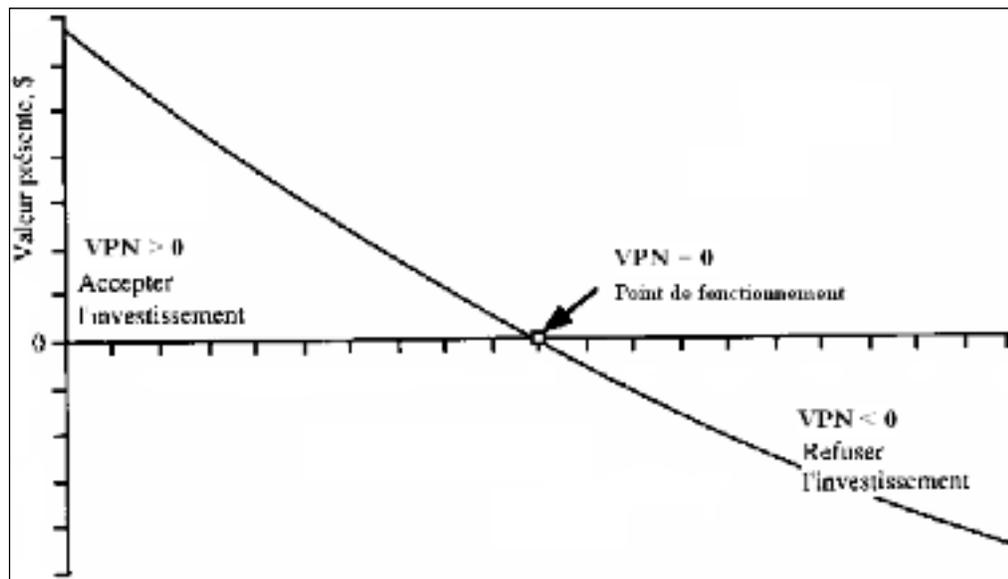


Figure 1.1 Courbe de décision de la valeur actuelle nette

L'équation ci-dessus et la figure 1.1 montrent que des projets qui ont des apports financiers identiques à la fin du projet, mais des quantités d'investissement différentes durant les périodes du projet, peuvent basculer du gain à la perte selon le moment et le coût de l'intervention. Ces exemples simples montrent l'importance de l'application de la méthode de la VPN dans la gestion de chaussée. La méthode de la valeur actuelle nette présente

également un autre avantage pour comparer la rentabilité des scénarios d'entretien et de réhabilitation même s'ils ont le même résultat final (même VPN). En effet, elle permet de distinguer celui ayant les bénéfices les plus élevés à court terme ou le retour des biens le plus tôt que possible. Dans le cas de l'entretien routier, le terme investissement est impropre et les séquences sont souvent complexes, en conséquence le TRI n'a plus de sens (parfois l'équation n'a pas de solution ou en a plusieurs), pas plus que le TRIm. En revanche, le rapport VPN/C est souvent utilisé pour trier les propositions de travaux (retenir toutes les opérations ayant un meilleur VPN/C et compatibles entre elles, revient à optimiser la VPN total pour un budget donné) (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994).

1.2.3 Méthode du taux de rentabilité interne

C'est la méthode introduite également dans la section précédente (*notamment dans le graphique précédent, lorsque la VPN est nulle*) et qui est très utilisée en gestion routière. Elle détermine le taux d'actualisation lorsque les coûts et avantages du projet sont égaux.

$$AC_{X_1 \cdot n} = AB_{X_1 \cdot n} \quad (1.2)$$

$AC_{X_1 \cdot n}$ = le coût annuel équivalent uniforme pour des projets alternatifs pour une période de n années d'analyse;

$AB_{X_1 \cdot n}$ = l'avantage annuel équivalent uniforme pour des projets alternatifs pour une période de n années d'analyse.

La méthode de rendement possède l'avantage d'être bien comprise par la plupart des personnes. Il est facile de comprendre un retour sur investissement en raison de la familiarité des termes d'affaires (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994).

1.2.4 Méthode bénéfices / coûts

La méthode comparée aux autres méthodes d'analyse économique, a connu une utilisation assez répandue dans le domaine des chaussées. Elle met en évidence le rapport de la valeur actuelle des bénéfices à la valeur actuelle des coûts, ou le rapport des avantages annuels

uniformes équivalents aux coûts annuels uniformes équivalents. Les bénéfices sont établis par la comparaison des options considérées versus l'option de ne rien faire. Elle s'exprime comme suit:

$$BCR_{xj,xk,n} = (TPWB_{xj} - TPWB_{xk}) / (TPWC_{xj} - TPWC_{xk}) \quad (1.3)$$

$BCR_{xj,xk,n}$ = représente le rapport bénéfice / coûts d'un scénario xj comparé au scénario xk sur une période d'analyse de n années;

$TPWB_{xj,n}$, $TPWC_{xj,n}$ = valeur présente totale des bénéfices et des coûts pour le scénario xj .

Cette méthode a beaucoup été utilisée aux États-Unis (Beg, Zhang et Hudson, 2000b). L'un des inconvénients de cette méthode est le côté abstrait du rapport bénéfice/coût (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994).

1.2.5 Méthode d'analyse de rentabilité

L'analyse de rentabilité peut être utilisée pour comparer des variantes où les flux monétaires sont importants (Barish, 1962). Elle comporte une détermination des avantages et des coûts en termes subjectifs. En cas d'utilisation de plus d'une mesure d'efficacité, des coefficients doivent être assignés à chaque mesure. Ceci exigera un bon jugement. La méthode de rentabilité, par elle-même, ne peut pas être la méthode la plus applicable dans le domaine de la gestion des chaussées, mais elle peut être utilisée pour compléter d'autres méthodes. Par exemple, on sait que l'aspect des chaussées a un effet sur des utilisateurs. Si une certaine mesure d'esthétique d'aspect était développée, celle-ci pourrait être employée dans une analyse de rentabilité avec les résultats de l'analyse de valeur nette. Une telle approche pourrait être particulièrement utile où l'analyse de valeur nette indique peu de différence parmi plusieurs solutions de rechange (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994).

1.3 Intégration de la dimension environnementale en gestion des routes

Ces deux dernières décennies, sous la pression du public, les administrations routières se sont engagées sur la voie du développement durable et adaptent graduellement leurs systèmes de gestion afin d'intégrer dans leurs processus de prise de décision les principes sous-jacents du

concept de développement durable. Toutefois, il apparaît que les administrations pionnières sur cette voie éprouvent des difficultés à bien cerner les implications d'une telle intégration, (Zhang, Keoleian et Lepech, 2013).

Afin d'assurer une perspective de développement durable et des pratiques de gestion des chaussées optimales pour la société, il convient d'identifier de quelle façon la gestion des chaussées influe sur le développement de la société. Dans ce contexte, les impacts de la gestion des chaussées sur la société sont qualifiés d'environnementaux, dans le sens systémique du terme. La pollution atmosphérique, le réchauffement planétaire et le bruit sont les trois principaux types de nuisances environnementales recensés dans la littérature qui peuvent induire des impacts environnementaux significatifs (Pellecuer, 2014). La pollution atmosphérique et le réchauffement planétaire sont les nuisances les plus fréquemment incorporées dans les études sur la gestion des chaussées tandis que le bruit l'est très rarement (McKone et al., 2011). Par contre, le bruit, la pollution atmosphérique et le réchauffement planétaire sont les coûts sociaux et environnementaux engendrés par la route (Pellecuer, 2014). Le bruit routier est un élément environnemental bien couvert par la FHWA (*Federal Highway Administration*). C'est une nuisance importante pour les riverains de la route car le bruit provient essentiellement des frottements de l'air sur les véhicules, des moteurs des véhicules et l'interface pneumatique/chaussée (Bernhard et McDaniel, 2005). Il est d'ailleurs déjà pris en compte dans tous les projets routiers américains (Hasselmann, 1995). Mais il reste rarement utilisé dans les analyses de coûts et bénéfices lors de la gestion des routes (Lambert, Kail et Quinet, 1998). En ce qui concerne les émissions de gaz atmosphériques, leur accroissement est en grande partie dû à la consommation d'essence et l'arrachement de matières aux pneumatiques des véhicules qui augmentent avec la rugosité du revêtement (Bennett et Greenwood, 2001). Pour limiter cela, il faut faire une bonne planification afin de limiter les travaux à réaliser, choisir les matériaux appropriés pour une conception durable et maintenir à long terme un bon IRI (indice de rugosité international). Le réchauffement planétaire quant à lui est dû en grande partie aux gaz à effet de serre (CO₂) émis dans l'atmosphère et permet aux gestionnaires d'infrastructures routières de quantifier monétairement l'impact sur l'état des chaussées (Schreyer et al., 2004). Lors de la gestion

des routes, il sera important de prendre en compte l'émission de gaz à effet de serre liée au mauvais état des chaussées et l'émission de gaz à effet de serre due aux travaux d'entretien et de réhabilitation des chaussées et aux congestions liées à ces travaux (Pellecuer, 2014).

Contrairement aux pays d'Afrique subsaharienne, les pays développés ont commencé à intégrer les impacts environnementaux dans la gestion de leurs routes. La prise en compte de ces impacts environnementaux permet d'intégrer la gestion des routes dans un contexte plus global et d'établir les choix techniques concernant les chaussées qui se feront bien plus durables pour la société dans son ensemble (Amekudzi et al., 2005). Les impacts environnementaux sont souvent intégrés dans la réflexion sur les projets routiers, on parle alors d'internaliser les effets externes du transport. Mais ce n'est que récemment que les premières études faisant appel à la monétarisation de ces effets ont été utilisées dans le cadre de la gestion d'infrastructures routières (Pellecuer, 2014). L'avantage de la monétarisation est que l'impact environnemental de la route est intégré dans le calcul même des coûts et bénéfices qui la concernent (Friedrich, Rabl et Spadaro, 2001). Dès à présent, la prise en compte de l'estimation de l'impact environnemental et social des projets routiers par les organismes internationaux est une réalité (Racioppi et Dora, 2005). Les Nations Unies proposent aujourd'hui d'évaluer en continu l'impact des projets routiers sur leur environnement en mettant à contribution la participation de la population et des professionnels (Pellecuer, 2014). Cela est assuré au Québec depuis 1978 par le BAPE (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement) visant à évaluer les préoccupations environnementales sur les projets routiers en faisant appel à la participation du public. Malgré cette nécessité généralement admise, il n'en demeure pas moins que peu de gestionnaires des chaussées tiennent compte des impacts environnementaux dans leurs décisions. En effet, rares sont les administrations routières qui n'ont pas encore pris conscience de la nécessité de l'intégration des impacts environnementaux dans la gestion des routes mais qu'ils ne l'appliquent réellement sur le terrain (Chan, Keoleian et Gabler, 2008). Afin d'aider ces gestionnaires dans leur projet routier, certains auteurs en l'occurrence Pellecuer (2014), Lidicker et al. (2012), Zhang, Keoleian et Lepech (2012) ont développé des outils pour quantifier les impacts environnementaux. Toutefois, comme l'indique Pellecuer

(2014) ces nouveaux outils de gestion ne se concentrent chacun uniquement que sur certains impacts tels que le bruit (Ahammed et Tighe, 2010), les émissions de gaz atmosphérique (Yu et Lu, 2012) et les changements climatiques (Wang et al., 2012). Par ailleurs, Hubert (2004) montre qu'il existe un lien direct entre les émissions des gaz à effet de serre par les véhicules et la consommation en carburant de ces mêmes véhicules. Bennett et Greenwood (2001) quant à eux montrent que plus l'uni de la chaussée est mauvais plus il y a de gaz à effet de serre émis par les véhicules qui y circulent. Basé sur ces constatations et efforts, il est aisé de conclure qu'il est nécessaire d'intégrer la dimension environnementale dans les projets routiers entrepris en Afrique subsaharienne.

1.3.1 Quantification des impacts environnementaux pour le changement climatique

Les émissions de plusieurs gaz en occurrence le CO₂ émis dans l'atmosphère, va augmenter l'effet de serre, ce qui est considéré comme la principale cause du changement climatique (Gordon, 2011). Ce changement climatique pourrait avoir des conséquences néfastes notamment sur les chaussées, lesquelles vont s'observer par:

- l'augmentation prévu des précipitations extrêmes¹ qui vont forcément causer un affaiblissement des structures de chaussée en enrobé mais plus encore celles en gravier ou en terre et donc une durée de vie nécessairement plus courte. Ce qui nécessitera un accroissement des interventions d'entretien et possiblement des interventions de réhabilitation;
- en corollaire de la constatation précédente, l'augmentation de l'écoulement des eaux pourrait provoquer plus d'inondations, donc de l'érosion voire des emportements et des pertes d'accès. Ce qui nécessitera la conception de systèmes de drainage pour des

¹ Note d'information de l'auteur: Dans un échange de courriel du 15 mars 2016 avec le professeur François Brissette de l'école de technologie supérieure, il appert qu'en Afrique sub-saharienne, la précipitation totale annuelle va augmenter ou diminuer selon les zones. Toutefois l'augmentation des extrêmes fait consensus pour tous ces pays, et ce sont ces derniers qui causent le plus de dommages, d'où la référence aux températures extrêmes dans le texte.

- inondations importantes et donc de facto causera l'augmentation des coûts de construction;
- l'augmentation de la température qui va nécessairement provoquer le ramollissement des bitumes qui composent les couches de roulement en enrobé bitumineux, l'accroissement des ornières, des bourrelets et du ressuage en corollaire. Ceci nécessitera la sélection de bitumes à plage d'utilisation plus large pour réduire la sensibilité desdits bitumes à la température. En corollaire il en résultera nécessairement une prochaine intervention plus fréquente et plus coûteuse pour ce qui concerne les couches de roulement en enrobé. Il est à noter, qu'a priori, les chaussées avec revêtement en béton seront comparativement épargnées.

1.4 État actuel des routes des pays d'Afrique subsaharienne

Le réseau routier en Afrique subsaharienne est peu dense en comparaison avec celui d'autres régions développées voire même en développement, *tel qu'en Asie par exemple*, et ne couvre environ que 4,2 km/km² de la superficie disponible (Pambou, 2013). Cependant, étant donné le revenu moyen peu élevé de la population de la région et donc sa maigre capacité à supporter financièrement les coûts d'entretien, force est d'admettre que la densité du réseau routier commence à apparaître élevée. Ceci se manifeste déjà par le déficit d'entretien chronique observé dans les pays d'Afrique subsaharienne et rapporté par plusieurs organisations internationales (Pambou, 2013). L'entretien est toutefois d'autant plus nécessaire que, selon les résultats du diagnostic national des infrastructures routières en Afrique subsaharienne, 16% seulement des 1,8 million de kilomètres de routes étaient revêtues en 2007 (Kumar et Barrett, 2008). La nécessité de l'entretien est évidemment plus critique pour des routes non revêtues, et le fardeau également plus grand. Nivelier régulièrement et recharger 10 cm de matériaux granulaire périodiquement sur toute la route revient plus cher que boucher quelques trous après 10 ans. Il faut toutefois rajouter dans la balance qu'il s'agit principalement de routes à faible débit qui représentent plus de 75 % du réseau routier subsaharien (Pinard et al., 2003) et qu'à ce titre, le bitumage n'est pas économiquement justifié. Pour ce qui concerne leur classification fonctionnelle, et de façon

générale, les routes en Afrique subsaharienne peuvent être réparties en quatre catégories: routes nationales, routes principales, routes secondaires et routes de desserte. Le choix des caractéristiques de ces routes est généralement fonction de la circulation (Zilioniene et al., 2007).

En termes de volume de trafic, et de façon très générale, on a:

- les routes national avec généralement plus de 5 000 véhicules par jour et qui sont bien sûr bitumées;
- les routes principales avec 100 à 5 000 véhicules par jour et qui sont généralement bitumées, rien qu'à cause de leur classification fonctionnelle de routes principales, *ce qui leur assure de facto une reconnaissance politico-sociale et donc le bitumage*;
- les routes secondaires avec 50 à 800 véhicules par jour, qui sont souvent en gravier ou en terre, ou parfois recouvertes d'un enduit superficiel;
- les pistes carrément rurales dites de desserte associées au désenclavement des régions éloignées et qui desservent moins de 100 véhicules par jour. Celles-ci ne sont pas toujours adéquatement répertoriées et sont même parfois gérées par une cellule soit locale (direction régionale) ou encore centrale mais séparée, dite direction des pistes rurales.

Alors que les chaussées représentent un actif important dans les pays d'Afrique subsaharienne, qu'il faut manifestement préserver, force est toutefois d'admettre que l'absence d'entretien, faute de moyens, demeure le principal défi de la durée de vie de ces chaussées, autant pour les autorités administratives, politiques et les bailleurs de fonds. En effet, l'évolution des dégradations de surface s'accélère généralement dès lors qu'on atteint un certain niveau de détérioration par suite de l'action généralement conjuguée de l'eau, qui fait chuter la portance des couches constitutives (Pambou, 2013). Ceci est d'autant plus grave que les charges lourdes qui s'exercent sur ces chaussées sont extrêmement élevées par manque de contrôle, laxisme, pouvoir politique prépondérant des transporteurs pour qui il est plus rentable de surcharger, ou encore carrément la corruption des gendarmes et opérateurs des stations de pesées lorsque les essieux sont surchargés selon l'UEMOA (Union Économique Monétaire Ouest Africaine) (Trade et Hub, 2012) et la CEMAC (Communauté

Économique et Monétaire de l'Afrique Centrale) (Cabanius, 2003) qui recommandent, en vain, de limiter les charges sur essieux.

1.4.1 Reflet de la qualité de gouvernance sur l'état des routes par pays en Afrique subsaharienne

Selon des études réalisées dans plusieurs pays d'Afrique subsaharienne et résumées par Gwilliam et al. (2008), il ressort que plus de la moitié voire le deux-tiers du réseau principal n'est pas en bon état et le trois-quarts du réseau rural n'est pas en bon état (Gwilliam et al., 2008). La figure 1.2 donne ces distributions de la longueur du réseau routier en fonction des catégories d'état des routes par pays.

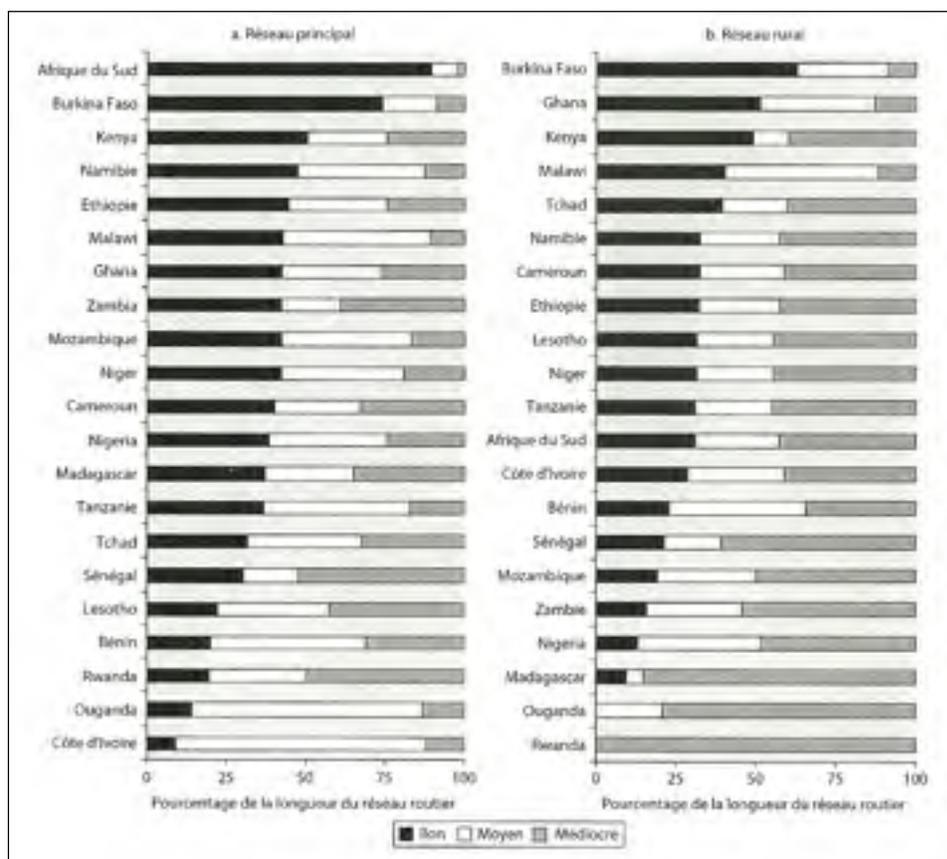


Figure 1.2 Distribution de la longueur du réseau routier en fonction des catégories d'état des routes par pays
Tirée de Gwilliam et al. (2008)

Les différences qui existent dans la qualité des routes sont dues à plusieurs facteurs, entre autres, les budgets qui y sont accordés, la présence ou non d'un fond routier autonome de deuxième génération géré par un conseil d'administration indépendant de l'état et qui perçoit directement la taxe sur l'essence sans qu'elle passe par le trésor public (*qui autrement va la détourner à d'autres besoins*), l'existence ou non d'une agence routière autonome (*AGEROUTE*) qui gère les routes et enfin la qualité de leur système de gestion des routes et la compétence de leurs gestionnaires (Pambou, 2013). Selon leur produit intérieur brut (PIB), les pays d'Afrique subsaharienne ont, *tels que nous l'avions précédemment indiqué*, un vaste territoire mal desservi par un réseau routier insuffisant d'une part mais déjà lourd à entretenir d'autre part.

En effet, le PIB par habitant est généralement lié avec la densité du réseau routier principal en bon état. Toutefois, dans certains de ces pays, la valeur patrimoniale du réseau routier est supérieure à 30% du produit intérieur brut (PIB), ce qui donne une idée de l'importance du poids économique de l'entretien exigeant de ce réseau routier (Bosker et Garretsen, 2012). Ensuite, il y a des influences topographiques et climatiques fondamentales, car les pays montagneux et humides pour des raisons liées au climat plutôt qu'au trafic ont généralement des routes en moins bon état sur leurs réseaux principaux et ruraux (Gwilliam et al., 2008). Les différences de qualité des routes des différents pays sont observées en fonction de la compétence des gestionnaires de l'administration, de leur relation avec les bailleurs de fonds et de la crédibilité des pouvoirs politiques dans la gestion saine de l'état qui affecte fortement la disposition des bailleurs de fonds à financer la remise en état des infrastructures routières.

En conclusion, les pays ayant à la fois, des fonds routiers et des agences routières bien gérés, ont des routes en bien meilleur état que ceux qui n'en ont pas (Foster et Benitez, 2011). Force est toutefois d'admettre que dans ce contexte, l'Afrique du Sud fait exception en ne disposant pas de fonds routier mais en ayant d'excellentes routes principales. Ceci est le fruit d'un engagement stable du gouvernement sud-africain envers le financement adéquat de la réhabilitation des routes (Foster, Briceño-Garmendia et Cecilia, 2010).

1.4.2 Dépenses dans le réseau routier en Afrique subsaharienne.

En Afrique subsaharienne, les dépenses des pays pour les réseaux des routes principales sont en moyenne de 9 000 dollars US par kilomètre, soit presque 2% du PIB, contre plutôt 1% dans les pays industrialisés et 2 à 3% dans les économies émergentes à croissance rapide (Briceño-Garmendia et al., 2008). La figure 1.3 illustre pour référence les dépenses moyennes annuelles dans le transport routier par pays d'Afrique subsaharienne.

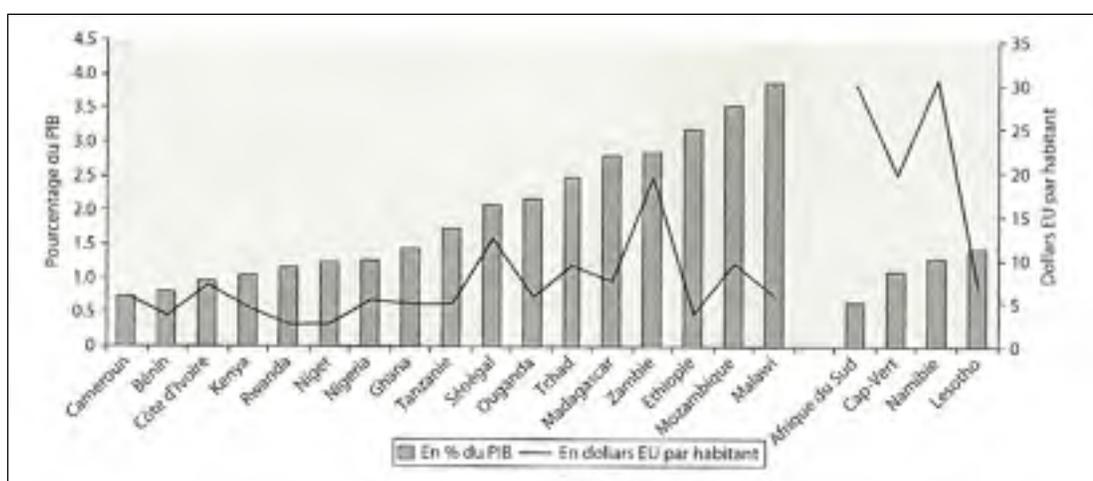


Figure 1.3 Dépense moyenne annuelle dans le transport routier par pays
Tirée de Briceño-Garmendia et al. (2008)

Les pays les plus riches ont tendance à dépenser plus en réhabilitation contrairement aux pays plus pauvres. Les dépenses des pays à faible revenu ne dépassent pas plus de 7 dollars US par habitant et par an. La dépense d'entretien et de réhabilitation par kilomètre dans le réseau principal atteint en général le double de celle du réseau rural et varie de 200 dollars US par kilomètre au Tchad à plus de 6000 dollars US par kilomètre en Zambie. Aussi, les pays à faible revenu dépensent 50% de plus par kilomètre que les pays à revenu intermédiaire probablement à cause d'une mauvaise gestion réactive en lieu d'une gestion préventive et proactive. Enfin, les pays ayant des agences routières et des taxes élevées sur le carburant, qui sont donc mieux gérés, ont des réseaux de routes principales d'une qualité supérieure et dépensent un peu moins que ceux qui n'en ont pas (Foster, Briceño-Garmendia et Cecilia,

2010). Une dépense d'investissement élevée peut être justifiée par de grands travaux de réhabilitation. Sauf dans certains cas, la dépense d'investissement de plusieurs pays étudiés est nettement moindre ou proche de ce qui est nécessaire pour rectifier voire rattraper les retards de réhabilitation sur une période raisonnable de cinq ou dix ans. La figure 1.4 montre les dépenses en réhabilitation et entretien par rapport aux normes.

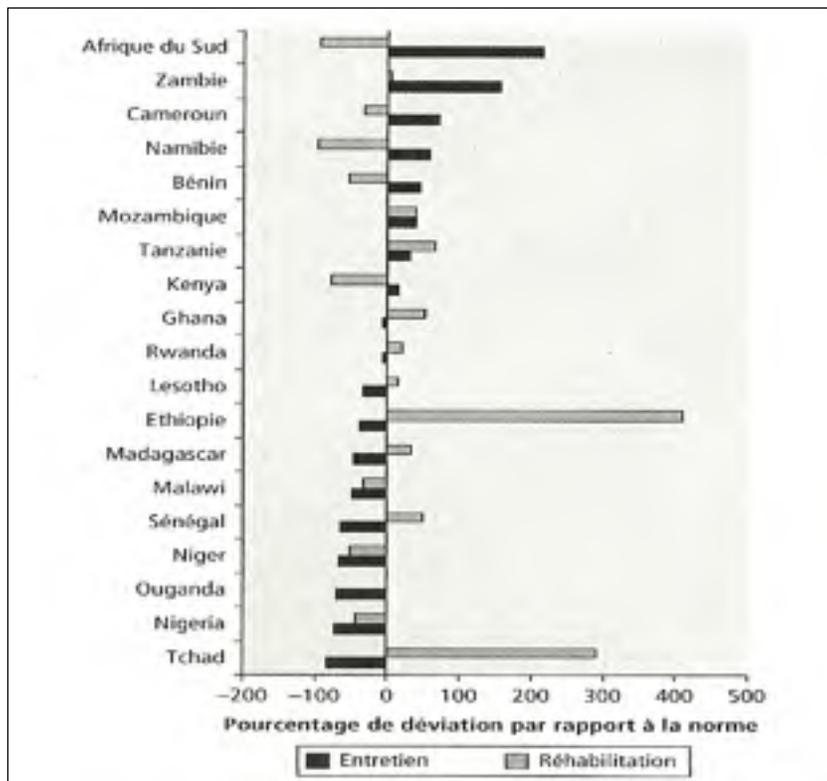


Figure 1.4 Dépense en réhabilitation et entretien par rapport aux normes
Tirée de Briceño-Garmendia et al. (2008)

En effet, les niveaux de dépense élevés dans la réhabilitation des routes n'ont du sens que lorsqu'une politique plus large est mise en place pour garantir l'entretien adéquat de ces routes après leur réhabilitation. C'est ce que plusieurs bailleurs de fonds tentent d'imposer (Pambou, 2013). Dans la pratique, la plupart des pays faisant partie de l'échantillon ne consacrent pas de ressources suffisantes à l'entretien du réseau des routes principales et environ la moitié de ce sous-groupe ne dépense même pas suffisamment pour l'entretien de routine (Briceño-Garmendia et al., 2008).

1.5 Le logiciel HDM-4

Face à une conjoncture économique restrictive, l'ampleur des moyens nécessaires à la réhabilitation des réseaux routiers amène les autorités politiques et les responsables des administrations publiques à s'interroger sur le bien-fondé des décisions en matière d'entretien et de réhabilitation des réseaux routiers (Pambou, 2013), à savoir:

- quelle enveloppe budgétaire faut-il allouer à l'entretien et la réhabilitation? quand faut-il intervenir sur les routes revêtues et non revêtues? Quelles sont les interventions qui ont la meilleure rentabilité dans diverses conditions?
- dans quelle mesure réduit-on les exigences d'entretien futur et les coûts d'exploitation des véhicules en intervenant adéquatement aujourd'hui? Cette stratégie est-elle économique, quand et dans quel ordre de grandeur l'est-elle?
- dans quelle mesure les contraintes budgétaires affectent-elles les décisions? Faut-il alors accorder une priorité à l'entretien préventif, palliatif ou curatif, sur quelle base logique et de bonne pratique?
- quelles sont les conséquences techniques et économiques du report des interventions requises?
- vu l'état de détérioration avancée d'un réseau et les multiples contraintes à surmonter, quelles stratégies globales faut-il adopter et dans quelles conditions pour optimiser le bénéfice global à toute la société?

Afin de répondre à ces questions, la Banque Mondiale et diverses autres organisations ont développé un outil flexible (HDM-4) qui permet d'évaluer la rentabilité des projets (Kerali, Odoki et Stannard, 2005).

1.5.1 But du logiciel

Le logiciel HDM-4 permet d'évaluer la rentabilité des projets routiers économiquement. Selon Cook (1987) HDM-4 indique que l'entretien périodique est généralement justifié, par les économies qu'il dégage dans les coûts aux usagers, lorsque le trafic dépasse 100

véhicules/jour sur les routes revêtues et 50 véhicules/jour sur les routes non revêtues. Cook (1987) établit également, *sur la base de son expérience en Afrique subsaharienne et d'un modèle analytique simple*, que l'entretien périodique devient justifié lorsque son coût est de moins de deux fois la valeur ajoutée dans le secteur agricole, qui est généralement le premier bénéficiaire des investissements routiers en Afrique subsaharienne, dès lors qu'on sort des villes principales.

1.5.2 Données requises pour l'exploitation de HDM-4

Les paramètres requis pour utiliser HDM-4 sont brièvement définis dans cette section. Ces définitions visent à rendre plus aisée la compréhension du HDM-4 et non à se substituer aux documents de référence indispensables dont en particulier le volume descriptif fondamental du HDM-4 (Watanatada et al., 1987) et le volume de référence sur les modèles de comportement rhéologique des matériaux et les modèles de détérioration des chaussées (Assaf, 2010). Les paramètres requis par le système HDM-4 sont relatifs à :

- la géométrie de la section de route considérée;
- la structure de la section de route considérée;
- la nature des sols d'assise;
- la nature des dégradations;
- l'environnement;
- l'ensemble des caractéristiques de la circulation;
- la grille de coûts des différentes prestations entrant dans le cadre de l'entretien périodique.

Certains paramètres sont communs aux routes revêtues et aux routes non revêtues. Il s'agit de la longueur de la section exprimée en km ainsi que des largeurs de la voie carrossable et d'un accotement en m. Il en est de même du nombre effectif de voies d'une section, qui désigne le nombre de voies réellement utilisées par les usagers. Ce paramètre peut: a) soit être spécifié ou b) laissé en blanc et en conséquence déduit par le logiciel HDM-4 selon cette règle simple:

- nombre effectif de voies = 1,0 si la largeur carrossable < 4,5 mètres;
- nombre effectif de voies = 1,5 si $4,5 < \text{largeur carrossable} < 6,0$ mètres;
- nombre effectif de voies = 2,0 si $6,5 < \text{largeur carrossable} < 8,0$ mètres;
- nombre effectif de voies = 3,0 si $8,0 < \text{largeur carrossable} < 11,0$ mètres;
- nombre effectif de voies = 4,0 si $\text{largeur carrossable} > 11,0$ mètres.

La dénivelée est requise pour les sections revêtues ainsi que pour les sections non revêtues. Elle indique la somme absolue des variations strictement verticales R_i et F_i divisée par la longueur de la section en km. Exprimée en m/km, elle agrège la totalité des mouvements ascendants et descendants du véhicule selon l'axe vertical des z , par kilomètre de route. On observe généralement les valeurs suivantes:

- dénivelée nulle si terrain parfaitement plat;
- dénivelée de l'ordre de 10 si terrain nivelé par des remblais/déblais;
- dénivelée de l'ordre de 20 si terrain vallonné;
- dénivelée de l'ordre de 50 si terrain légèrement escarpé;
- dénivelée de l'ordre de 80 si terrain montagneux.

La sinuosité est requise pour les sections revêtues ainsi que pour les sections non revêtues. Elle désigne en °/km, la somme absolue des déviations ou mouvements angulaires des deux tangentes de chaque courbe divisée par la longueur de la section. Les angles additionnés en valeur absolue sont les angles extérieurs formés par les deux tangentes de chaque courbe. On observe généralement les valeurs suivantes:

- sinuosité nulle si terrain parfaitement plat;
- sinuosité de l'ordre de 50 si terrain nivelé par des remblais/déblais;
- sinuosité de l'ordre de 150 si terrain vallonné;
- sinuosité de l'ordre de 300 si terrain légèrement escarpé;
- sinuosité de l'ordre de 500 si terrain montagneux.

L'altitude moyenne en m, réfère à l'élévation moyenne des sections, par rapport au niveau de la mer. Elle n'a pas d'effet bien significatif sur l'évolution des dégradations ou les coûts

globaux. La précipitation mensuelle indique la moyenne annuelle des précipitations exprimée sur une base mensuelle. Elle n'a pas d'effet bien significatif sur les résultats. On suggère de se tenir dans les ordres de grandeur suivants:

- zone aride, valeur suggérée de l'ordre de 0,002 mm/mois;
- zone semi-aride, valeur suggérée de l'ordre de 0,02 mm/mois;
- zone sub-humide, valeur suggérée de l'ordre de 0,08 mm/mois;
- zone humide, valeur suggérée de l'ordre de 0,150 mm/mois.

Les paramètres de l'analyse dans HDM-4 sont les suivants:

- la codification du type de revêtement;
- l'épaisseur du dernier revêtement;
- les épaisseurs des revêtements précédents;
- le type de fondation;
- le CBR du sol support;
- l'épaisseur de la fondation si elle est stabilisée au ciment;
- le module de résilience de la fondation stabilisée au ciment;
- le nombre structural de l'AASHTO (AASHTO, 1991);
- la déflexion obtenue à partir de la poutre de Benkelman sous un essieu arrière de 13 tonnes;
- l'indice de Rugosité International (IRI);
- le pourcentage de désintégration;
- la moyenne et l'écart type de la profondeur des ornières;
- l'âge du dernier revêtement;
- le pourcentage de fissuration du précédent revêtement;
- la date de la construction de la chaussée.

1.5.3 Modèle pour la conception et l'entretien des routes dans HDM-4

1.5.3.1 But visé

Le Modèle choisi pour la conception et la gestion des routes dans (HDM-4) a pour but de faciliter l'analyse comparée des choix d'entretien et d'investissement. Il s'intéresse à l'analyse technique et économique des *projets routiers*, à l'élaboration des *programmes* d'investissements routiers et à l'analyse des *stratégies* des réseaux routiers (Schutte, 2008). Le modèle propose année par année, pour chaque section de route et pour chaque stratégie une simulation de l'état de la route et des ressources utilisées pour l'entretien, ainsi que les vitesses des véhicules et les ressources physiques utilisées dans l'exploitation des véhicules. Après que les quantités physiques requises pour la construction, les travaux routiers et l'exploitation des véhicules aient été estimés, les prix et coûts unitaires spécifiés par l'utilisateur sont appliqués pour calculer les coûts financiers et économiques. Les avantages relatifs sont ensuite calculés pour les différentes variantes, ainsi que les coûts actualisés et les taux de rentabilité (Kerali, Odoki et Stannard, 2005).

1.5.3.2 Perspective historique

Les premières études pour la production d'un « modèle d'évaluation des projets routiers » ont été lancées en 1968 par la Banque mondiale. Le premier modèle a été élaboré selon des termes de référence s'appliquant à une étude de conception des routes, formulés par la Banque mondiale conjointement avec le *Transport and Road Research Laboratory (TRRL)* et le *Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC)*. Par la suite, le *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* a réalisé, sur demande de la Banque mondiale, une étude bibliographique et un modèle fondé sur les connaissances alors disponibles. Le Modèle d'estimation des coûts de la route (*Highway Cost Model-HCM*) est le produit de cette étude (Schutte, 2008).

Ensuite, entre 1971-1975, le TRRL a entrepris au Kenya, en collaboration avec la Banque mondiale, une étude de grande envergure sur le terrain qui s'est concentrée sur la dégradation

des routes revêtues et non revêtues, ainsi que sur les facteurs qui influent sur les coûts d'exploitation des véhicules dans un pays en développement. Les résultats de cette étude ont permis au TRRL de produire la première version du Modèle d'investissement dans le transport routier (*Road Transport Investment Model - RTIM*). En 1976, la Banque mondiale a financé des études supplémentaires sur le modèle HCM au MIT qui a produit la première version du Modèle pour la conception et l'entretien des routes (*Highway Design and Maintenance Standards Model-HDM*) (Kerali, Odoki et Stannard, 2005).

Des travaux supplémentaires ont été entrepris dans différents pays comme suit (Schutte, 2008) :

- étude aux Caraïbes par le TRRL (1982), portant sur les effets de la géométrie de la route sur les coûts d'exploitation des véhicules;
- étude en Inde par l'Institut central de recherche routière (CRRI) en 1983, portant sur les problèmes particuliers d'exploitation des routes indiennes en raison de l'étroitesse des chaussées et de la forte proportion de transports non motorisés;
- étude au Brésil financée par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) en 1984, portant sur l'extension de la validité de toutes les relations du modèle.

Les résultats des études du TRRL ont permis de mettre au point le modèle RTIM2, tandis que la Banque mondiale a développé un modèle plus complet reprenant les résultats de toutes les études antérieures, qui ont débouché sur le HDM-III. Ces deux modèles ont d'abord été conçus pour fonctionner sur les ordinateurs de forte puissance. Avec les progrès réalisés dans l'informatique, des versions pour micro-ordinateur ont ensuite vu le jour. La mise à jour de RTIM2 a donné naissance en 1993 à RTIM3, version conviviale du logiciel fonctionnant comme une feuille de calcul (Schutte, 2008). En 1994, deux versions supplémentaires de HDM-III ont été produites : HDM-Q (intégrant les effets de congestion de la circulation dans le programme HDM) et HDM Manager (interface de menus d'accès à HDM-III) (Kerali, Odoki et Stannard, 2005).

En 1996 et en 2000, les études ont été effectuées au Chili et dans le sud des États-Unis (Texas et Californie) et ont permis d'introduire dans l'amélioration de HDM-4 version 1, les chaussées en béton de ciment (Kerali, Odoki et Stannard, 2005)

HDM-4, version 1 a été conçue pour répondre à un nombre de besoins (Kerali, Odoki et Stannard, 2005):

- une remise à jour fondamentale des différents modèles, qui tient compte d'une gamme plus étendue de chaussées et conditions d'usages et qui s'adapte à l'informatique moderne, était nécessaire;
- besoin de mettre à jour les relations techniques (concernant le coût d'exploitation des véhicules) pour refléter les techniques de pointe;
- nécessité d'appliquer le modèle dans les pays industrialisés en faisant appel à des fonctionnalités additionnelles qui tiennent compte :
 - des effets de l'encombrement des routes;
 - des effets des climats froids;
 - d'une gamme plus étendue de types et structures de chaussée;
 - de la sécurité routière;
 - des effets sur l'environnement (consommation d'énergie, bruit et émissions des véhicules par exemple).

1.5.3.3 Portée

Le fonctionnement de HDM-4 est fondé sur le concept d'analyse du «cycle de vie de la route» et fait appel à un ensemble de modèles destinés à prévoir les différents aspects de la route (Schutte, 2008):

- **modèle relatif à la dégradation des routes.**

Ce modèle permet de formuler des prévisions de dégradation des routes bitumineuses et en béton. Pour ce faire, il est tenu compte des conséquences d'impacts tels que le volume de

circulation, la dégradation de la route causée par les intempéries et les systèmes de drainage inadéquats. L'annexe 1 présente les modèles de comportement des chaussées flexibles et rigides.

- **modèle relatif aux conséquences de l'usage des routes.**

Ce modèle permet de déterminer les coûts d'exploitation des véhicules, des accidents de la route et du temps de trajet. Dans le logiciel HDM-4, on définit le coût aux usagers de la route pour une option d'investissement quelconque comme la somme des coûts de tous les usagers circulant sur un tronçon considéré. Beaucoup de modèles sont utilisés pour calculer les coûts d'exploitation des véhicules, le temps de trajet et les vitesses des véhicules. Ils fournissent une vue d'ensemble sur la logique des modélisations et une description des relations existantes entre les différents modèles et les valeurs des paramètres par défaut pour chaque composante des véhicules représentatifs dans le logiciel HDM-4.

Le tableau 1.1 donne les modèles du système HDM-4 d'après Kerali et Odoki (2006)

Tableau 1.1 Modèles du système HDM-4

Modèle général mécanique Forces sur le véhicule
Modèles de vitesse et de déplacement Vitesse libre Effet du volume sur le débit
Modèles de coûts d'exploitation des véhicules Consommation de carburant Consommation de l'huile du moteur Consommation des pneus Consommation des pièces de rechange et main d'œuvre d'entretien Utilisation et vie utile Capital (dépréciation et intérêts)
Modèles du temps Temps du conducteur Temps des passagers Temps d'attente de la marchandise
Modèle des effets de travaux Effets des travaux
Modèles des accidents Coûts des accidents
Modèles des effets sur l'environnement Émissions des véhicules Impacts du bruit Analyse de la consommation d'énergie

- **Coûts d'exploitation des véhicules**

Le logiciel HDM-4 définit 16 types de véhicules motorisés représentatifs. Ceci permet à l'utilisateur de ce modèle d'assigner les caractéristiques fondamentales de chaque type de véhicules, à savoir (Noël, 2005):

- le nombre d'essieux et de pneus, la surface frontale projetée, etc.;
- les caractéristiques de la performance telles que la force motrice et la force de freinage;
- la durée de vie et la valeur résiduelle.

Les données de base qui se regroupent en différentes caractéristiques de véhicules pour la modélisation des effets aux usagers peuvent être représentées comme suit (Kerali et Odoki, 2006):

- les données de la géométrie de la route telles que les alignements, les vitesses, les facteurs de frictions latérales, la longueur et la largeur des sections et le nombre de voies;
- les rapports entre la circulation et les vitesses, auxquels s'ajoutent la capacité de la route et les paramètres déterminant des vitesses d'exploitation des véhicules y compris les caractéristiques de la circulation à différents niveaux de trafic;
- un schéma du réseau de trafic dans lequel est incluse l'utilisation routière en termes de la distribution du trafic horaire et les espaces équivalents en voitures passagères (PCSE/h) durant la période de trafic;
- les données de l'uni et la texture de la surface de la chaussée, qui sont obtenues à partir des résultats du modèle de la dégradation de la route; le trafic spécifié en termes de TJMA, de sa composition et de ses taux d'accroissement pour chaque section de route;
- pour les coûts unitaires, il y a des coûts pour toutes les composantes des véhicules par exemple, le coût du carburant par litre, le prix de nouveaux véhicules, le prix des pneus et le prix de main-d'œuvre.

- **Temps de trajet**

HDM-4 tient compte de trois types de passagers en ce qui concerne le calcul de la valeur du temps utilisé dans les transports (Kerali et Odoki, 2006):

- les passagers effectuant leur déplacement dans le cadre de leurs activités professionnelles, les membres de l'équipage;
- les passagers occupant un emploi et dont le déplacement est lié à leurs activités professionnelles, les travailleurs et les étudiants;
- les passagers dont le déplacement se fait dans le cadre d'activités de loisirs ou pour des raisons personnelles.

La valeur du temps des passagers est calculée à partir du nombre de passagers à bord du véhicule, de la proportion de passagers se déplaçant dans le cadre d'activités professionnelles et de la vitesse de déplacement du véhicule sur la section. Les coûts unitaires de la valeur du temps de déplacement reliés au travail et aux loisirs peuvent être déterminés selon la disposition à payer des employeurs et des citoyens. C'est l'approche suggérée par la littérature pour déterminer la valeur du temps de déplacement (Kerali et Odoki, 2006). La valeur du temps pour l'équipage doit tenir compte des salaires, des avantages sociaux et des allocations de voyage, nourriture et hébergement, et être définie par l'utilisateur. Le calcul du temps de l'équipage tient compte de cette valeur et de la vitesse moyenne du véhicule sur la section.

D'après Kerali et Odoki (2006), la procédure informatisée pour la modélisation des vitesses de véhicules motorisés, des coûts d'exploitation, du temps de voyages sur une section alternative par un type de véhicules dans une année d'analyse, peut être résumée la façon suivante:

- le calcul des composantes de vitesse du véhicule comme les données pour déterminer les coûts d'exploitation des véhicules et le temps de passages sur une section donnée doit se faire en considérant les valeurs suivantes :
 - la vitesse à vide;

- la vitesse de congestion c'est-à-dire les vitesses à différents niveaux de circulation;
- la vitesse d'exploitation moyenne annuelle;
- la vitesse du trafic moyen annuel sollicitée comme les données du modèle de dégradation de la route.
- le calcul des ressources d'exploitation des véhicules se fait en utilisant les composantes suivantes :
 - le carburant;
 - l'huile lubrifiante;
 - les pneus;
 - les pièces de rechange;
 - les heures de travail;
 - les coûts capitaux (incluant la dépréciation et l'intérêt);
 - la main-d'œuvre;
 - les frais généraux.
- le calcul des heures de voyages durant le temps de travail;
- les coûts de ressources de véhicules en appliquant les coûts unitaires aux quantités prévues des ressources consommées;
- le calcul de l'augmentation du coût d'exploitation dû aux réductions de voyages à cause des routes endommagées;
- la récapitulation, le stockage et le reportage des données pour les analyses subséquentes.
- **modèle relatif aux effets socioéconomiques et environnementaux.**

Ce modèle permet de déterminer les conséquences des émissions provenant des véhicules et de l'énergie consommée.

- **Les émissions provenant des véhicules**

D'après Kerali et Odoki (2006), les différents modèles de prédiction des émissions intégrés à HDM-4 découlent d'une évaluation qui a été faite à partir des modèles développés par les

administrations suédoise (SNRA34), britannique (ETSU35) et états-unienne (EPA). Dans un premier temps, le modèle suédois a été adapté pour la première version de l'outil HDM-4 et, par la suite, a été modifié afin d'inclure des équations provenant des modèles de l'ETSU et d'études menées par le Transport Research Board aux États-Unis. Les modèles pour les émissions de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures (HC) et d'oxydes d'azote (NO_x) proviennent de ces dernières tandis que ceux concernant les émissions de dioxyde de soufre (SO₂), de plomb (Pb) et de dioxyde de carbone (CO₂) sont inspirés de ceux de l'ETSU. Les matières particulaires (PM) sont également considérées par HDM-4. Il existe deux types de modèles : les modèles dépendant de la consommation de carburant et celui reposant sur une certaine stabilité chimique des matières émises. La structure des équations pour les émissions sortant du système d'échappement des véhicules est la même pour tous les types d'émissions directement dépendantes du carburant consommé. Cette équation de base (équation 1.1) consiste en une multiplication des émissions provenant du moteur par la fraction d'émissions non traitée par le catalyseur (équation 1.2). Dans la plupart des cas, cette fraction est dépendante du taux de consommation de carburant déterminé à partir du modèle présenté dans le chapitre portant sur les coûts d'exploitation des véhicules.

$$TPE_i = EOE_i CPF_i \quad (1.1)$$

TPE_i: émissions du système d'échappement (émission de type i)

EOE_i: émissions du moteur (émission de type i)

CPF_i: fraction non traitée par le catalyseur (émission de type i)

$$CPF_i = [1 - \epsilon_i \exp(-b_i IFC \text{ MassFuel})] \min \left[\left(1 + \frac{\tau_i}{100} LIFE\right), MDF_i \right] \quad (1.2)$$

CPF_i: fraction non traitée par le catalyseur (émission de type i)

ε_i: efficacité maximale du catalyseur pour l'émission i

b_i: coefficient stoechiométrique (catalyseur)

IFC: consommation instantanée de carburant (ml/s)

MassFuel: masse du carburant (g/ml)

r_i : facteur de détérioration relié à l'âge pour l'émission i (%/an)

LIFE: âge du véhicule (année)

MDF_i : facteur maximum de détérioration pour l'émission i

La prédiction des émissions en dioxyde de carbone (CO_2) est basée sur une hypothèse reposant sur des notions de stoechiométrie (i.e. balance du carbone). En effet, on considère que, pour une partie des émissions de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures et de matières particulaires, les atomes de carbone se fixent à ceux d'oxygène pour produire du CO_2 . L'équation 1.3 sert au calcul des émissions de dioxyde de carbone à la sortie du système d'échappement tandis que l'équation 1.4 modélise la consommation instantanée de carburant.

$$TPE_{CO_2} = 44.011 \left(\frac{FC}{12.011 + 1.008 \alpha_{CO_2}} - \frac{TPE_{CO}}{28.011} - \frac{TPE_{HC}}{13.018} - \frac{TPE_{PM}}{12.011} \right) \quad (1.3)$$

FC: consommation de carburant (ml/km)

TPE_{CO_2} : émissions en CO_2 du système d'échappement

TPE_{CO} : émissions en CO du système d'échappement

TPE_{HC} : émissions en HC du système d'échappement

TPE_{PM} : émissions en PM du système d'échappement

α_{CO_2} : paramètre représentant un ratio d'atomes d'hydrogène par rapport au carbone dans le carburant.

$$FC = \frac{IFC \text{ MassFuel} \cdot 1000}{V} \quad (1.4)$$

IFC: consommation instantanée de carburant (ml/s)

MassFuel: masse du carburant (g/ml)

V: vitesse du véhicule (m/s)

Comme il est possible de le constater à partir des équations précédentes, les quantités d'émissions des différents polluants sont tributaires de la vitesse des véhicules. Les modèles

pour les différents types d'émissions nécessite l'emploi de coefficients qui proviennent d'études empiriques. Des valeurs pour ces coefficients sont incluses par défaut dans le logiciel HDM-4 mais elles peuvent être modifiées. Toutefois, les émissions étant principalement tributaires des véhicules, ces coefficients n'ont pas à être adaptés en fonction de la géographie ou du climat puisque ces paramètres sont pris en compte par les autres modèles du HDM-4.

- **Consommation d'énergie**

D'après Kerali et Odoki (2006), la méthodologie du modèle d'estimation de la consommation de carburant qui est intégrée dans le HDM-4 repose sur des notions mécanistes liées 1) aux forces de résistance au déplacement du véhicule (roulement, aérodynamisme, inertie, etc.), 2) à l'efficacité énergétique (transmission de l'énergie, utilisation des accessoires) ainsi 3) qu'aux caractéristiques mécaniques (rapports de la transmission et du groupe motopropulseur). Donc, l'influence de la géométrie et l'état de la route, la masse du véhicule, la puissance et les caractéristiques du moteur sont intégrés implicitement dans les estimations fournies par le modèle. En raison de la nature mécaniste du modèle, l'étalonnage porte sur quatre paramètres, particuliers au modèle, tributaires à la vitesse de révolution du moteur. En corrélant la vitesse de révolution du moteur à celle du véhicule, ces paramètres permettent d'éviter les irrégularités dans l'estimation des valeurs de la consommation relative aux changements de rapports. Ce lien entre la vitesse de révolution du moteur et celle du véhicule, repose sur une analyse de régression de type Monte-Carlo et a pour effet de réaliser un lissage du modèle. Ces analyses peuvent être effectuées à l'aide d'un outil distribué par une firme néozélandaise (HDM-RUE) sur la base d'une revue des caractéristiques mécaniques typiques du groupe motopropulseur 65 de chaque véhicule représentatif. Le traitement de cet aspect distinct de l'étalonnage n'a pas été jugé nécessaire. D'autre part, les résultats de consommation d'essence obtenus semblent concorder avec les données fournies par le SMST. Les valeurs attribuées à plusieurs autres paramètres du modèle ne sont pas remises en question du fait de la nature universelle de ces dernières (l'efficacité du groupe motopropulseur (EDT), l'efficacité de base du moteur et des

accessoires (PENG), le coefficient de décroissance de la puissance à haut régime (EHP), l'efficacité énergétique du carburant (ξ), etc.).

1.6 Conclusion

Hormis le logiciel HDM-4, qui s'adresse à la question économique et environnementale, il ressort de la revue de la littérature qu'il n'existe pas de méthodologie de réhabilitation des chaussées en Afrique subsaharienne qui met sur une même plateforme décisionnelle l'aspect technique, économique et environnemental. Ceci est d'autant préoccupant que dans le contexte actuel, les principes du développement durable, les techniques utilisées et les budgets sont appelés à intégrer les pratiques de gestion de la route.

Il est donc utile de développer une méthodologie de réhabilitation des chaussées qui prenne en compte l'aspect technique, économique et environnemental lors de la réhabilitation des chaussées en Afrique subsaharienne afin d'aider les gestionnaires à choisir des solutions techniquement justifiées et qui sont à long terme les moins coûteuses tout en diminuant l'empreinte environnementale.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE INTÉGRÉE

Cette thèse dresse une méthodologie de réhabilitation des chaussées pour l'Afrique subsaharienne qui repose sur trois critères essentiels: technique, économique et environnemental. Elle illustre également son applicabilité sur un cas.

L'approche débute par le critère technique qui prime en identifiant la cause de détérioration de la chaussée à partir des défauts qui établissent un diagnostic et les essais subséquents qui en découlent. Sur la base de la cause confirmée, on identifie les options d'intervention à long terme qui répondent à la cause. La démarche se poursuit par l'analyse économique et environnementale des options qui sont techniquement acceptables et se termine par une analyse multicritère (AHP). Cette AHP dresse un bilan des impacts dans les domaines technique, économique et environnemental, afin d'éclairer les décideurs dans le choix d'une solution techniquement viable, qui soit économiquement rentable et environnementalement acceptable.

Les étapes de cette méthodologie sont les suivantes:

- recueillir les informations du projet;
- évaluer parmi la liste des défauts présentée aux tableaux 3.1 à 3.4 les défauts de la route à réhabiliter et sectionner la route en zones homogènes de trafic, topographie, état de la route et profil en travers type;
- identifier la cause de détérioration la plus probable qui revient le plus fréquemment à partir de ces mêmes tableaux;
- confirmer la cause de détérioration par des vérifications appropriées qui s'imposent afin de confirmer la cause telles que par exemple:
 - caractérisation de la formule du bitume (oxydation, teneur en vides, forme de granulats, teneur en bitume, susceptibilité du bitume à la température, etc.);
 - remontée des fissures sur carottes d'un ancien revêtement;

- qualité du drainage;
- test d'arrachement sur l'enrobé de surface;
- caractérisation des matériaux granulaires (granulométrie,...);
- potentiel de gonflement des sols sous-jacents voire les matériaux de la fondation;
- essai de portance au déflectomètre à boulet ou à la poutre Benkelman;
- accotements non revêtus permettant l'infiltration d'eau.
- choisir et définir les différentes options de réhabilitation de la route;
- ressortir le prix unitaire du km de route de chaque option à partir des prix unitaires de l'estimation de travaux;
- réaliser les simulations à l'aide de l'outil HDM-4 de l'AIPCR (Association Mondiale des routes) afin d'évaluer et de comparer pour chaque option techniquement justifiée:
 - les courbes de détérioration;
 - le bénéfice actualisé (VPN);
 - le taux de rendement interne (TRI);
 - la consommation d'énergie;
 - les émissions de gaz.
- effectuer une analyse de sensibilité avec la méthode essai-erreur et définir les scénarios examinés qui font varier les paramètres suivants, pris individuellement:
 - coûts d'investissement des travaux (+/-25%);
 - croissance du trafic normal (+/-70%);
 - TMJA du trafic normal post-travaux (+/-25%).
- effectuer une analyse multicritère (AHP) afin d'aider les décideurs à choisir l'option la plus viable, c'est-à-dire celle qui répond en même temps aux critères technique, économique et environnemental. Cette option est celle où:
 - les courbes de détériorations de l'IRI sont les plus faibles;
 - le bénéfice actualisé (VPN) est le plus grand;
 - le taux de rendement interne (TRI) est le plus grand et supérieur au taux d'actualisation;
 - la consommation d'énergie est plus faible;
 - les émissions de gaz à effet de serre sont plus faibles.

- dégager les interventions appropriées à partir de l'option retenue.

La figure 2.1 ci-dessous représente la plateforme tridimensionnelle de décision des projets en Afrique Subsaharienne en intégrant la dimension technique, économique et environnementale afin de choisir l'intervention la plus appropriée.

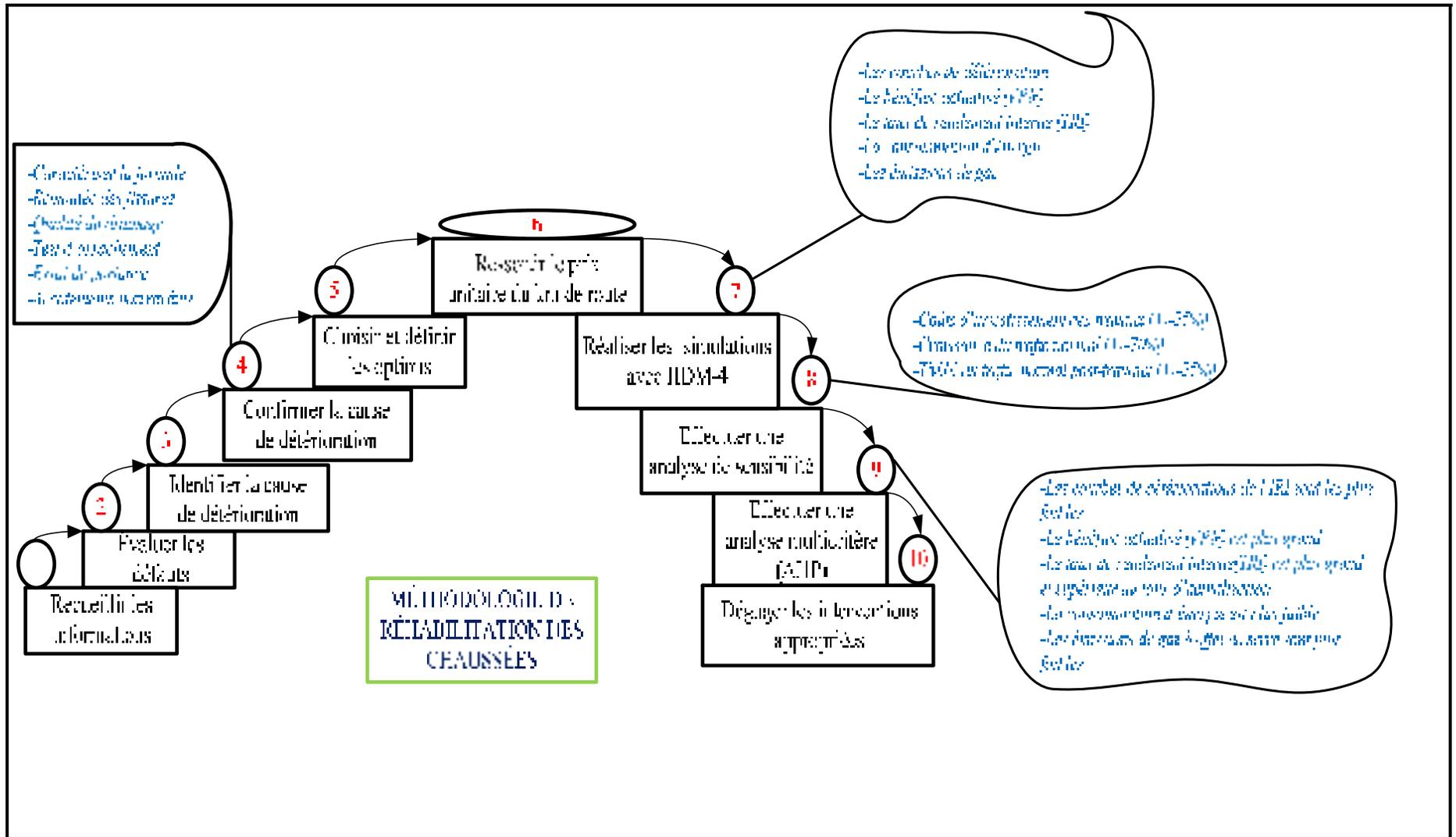


Figure 2.1 Plateforme tridimensionnelle de décision

L'article 1 (chapitre 3) présente une approche technique permettant d'identifier la cause de détérioration des chaussées flexibles en Afrique subsaharienne dans le but d'orienter ou de guider les ingénieurs vers les interventions qui répondent à la source du problème.

L'article 2 (chapitre 4) présente le processus d'intégration de l'analyse économique dans la gestion des routes dans le contexte de l'Afrique subsaharienne. Le but recherché est de permettre aux gestionnaires de bien comprendre les enjeux, d'établir les solutions les plus appropriées et de choisir les interventions optimales. Tout ceci dans le but de maximiser le retour sur l'investissement en vue de maximiser les bénéfices économiques.

L'article 3 (chapitre 5) présente une intégration de la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne, afin de prioriser les options d'intervention qui diminuent la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule, ce qui contribuera à lutter contre le changement climatique.

Le chapitre 6 consacré à une discussion dresse une synthèse générale des principaux résultats des trois articles, effectue une analyse multicritère selon la méthode AHP pour évaluer les impacts techniques, économiques et environnementaux que génère le projet et souligne les contributions originales de cette thèse dans le domaine de la recherche.

Une conclusion complète la thèse.

CHAPITRE 3

INTÉGRATION DE LA CAUSE DE DÉTÉRIORATION DES ROUTES EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

Bienvenu Thierry Mbog Towada¹, Gabriel J. Assaf²

^{1,2}Département de génie de la construction, École de technologie supérieure,
1100, Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis en Novembre 2015 à la revue les « Annales du Bâtiment et des Travaux
Publics ».

Les Annales du BTP sont avant tout une revue technique francophone s'adressant à un public d'ingénieurs et de décideurs œuvrant dans les multiples secteurs du BTP au sens le plus large du terme, à savoir la construction, le bâtiment, les travaux publics, l'ingénierie, les infrastructures urbaines et territoriales.

Les grands enjeux sous-tendus dans tout article pouvant paraître dans la revue sont à mettre en regard avec les problématiques d'aujourd'hui, progrès et innovation technologiques, développement économique dans le respect de l'environnement, valorisation des produits de la recherche dans le monde professionnel, défense du secteur de la construction dans l'économie mondiale.

Les auteurs sont invités à prendre en considération ces aspects dans toute leur diversité. Beaucoup d'articles en effet ne manqueront pas de se baser sur une présentation de travaux de recherche, qu'elle soit fondamentale ou appliquée.

3.1 Résumé

Cet article développe une approche simple permettant d'identifier la cause de détérioration des chaussées flexibles en Afrique subsaharienne dans le but d'aider les ingénieurs à choisir les interventions les plus appropriées. Cette approche permet d'associer à chaque défaut de surface l'ensemble des causes possibles, de choisir les essais de confirmation pertinents et les interventions appropriées. Le choix du type de réhabilitation à effectuer tiendra alors compte de la solution optimale tout en respectant des niveaux de qualité acceptable au point de vue technique, environnemental et sociétal. Afin d'illustrer l'approche proposée, une étude d'une route du nord du Sénégal est effectuée. Cette étude vise à comparer l'option d'intervention

retenue par l'ingénieur-conseil selon un dimensionnement structural conventionnel sur un tronçon de près de 120 km de la route RN2 au Sénégal à l'approche proposée dans cet article. L'approche proposée repose sur l'évaluation de la cause de détérioration, la confirmation de celle-ci par des vérifications d'essais, suivie d'une analyse des courbes de détérioration avec l'outil HDM-4 de l'AIPCR (Association Mondiale des routes) en support pour le choix de la solution optimale.

Mots clés: chaussée, détérioration, cause, réhabilitation, Afrique subsaharienne.

3.2 Abstract

This paper presents a simple approach to identify the cause of deterioration of flexible pavements in Sub-Saharan Africa (SSA) in order to help engineers select the most appropriate interventions. This approach associates each distress to potential causes, in order to select relevant tests so that the cause may be confirmed and then the appropriate intervention representing the cheapest long-term solution, *while meeting acceptable levels from a technical, environmental and societal point of views*, is selected. A 120 km highway section in the north of Senegal is analysed with the proposed approach. This study compares the intervention option chosen by the consulting engineer according a conventional structural design with the approach proposed in this paper. The proposed approach is based on the assessment of the cause of deterioration, and the confirmation of the cause with tests, followed by the HDM-4 flexible pavement deterioration models of PIARC (World Road Association) to support the choice of the optimal solution.

Keywords: pavement, deterioration, Cause, rehabilitation, sub-Saharan Africa

3.3 Introduction

3.3.1 Problématique

Étant donné que la plupart des routes en Afrique subsaharienne sont bosselées, ravinées, mal entretenues, la Banque Mondiale, principal bailleur de fonds dans le secteur, estimait qu'il faudrait investir 5 milliards de dollars chaque année pendant au moins dix ans pour les

réhabiliter (Heggie, 1995). Elle veut depuis des années coordonner la recherche de la conception des routes et établir les normes d'entretien et de réhabilitation en vue de comparer des projets d'investissement des routes dans les différents pays. C'est pour cette raison que cet article propose une approche logique qui repose sur la prémisse que la meilleure intervention doit être celle qui répond et traite la cause de détérioration au moindre coût possible à long terme (Assaf, 1993). Cet article fait d'abord ressortir l'état de l'art dans lequel il sera question d'une revue de la littérature et de l'état actuel des routes en Afrique subsaharienne. Dans un deuxième temps, il présente une approche simple en pointant les causes de détérioration des chaussées dans ces pays ainsi que les tableaux des différentes dégradations et les causes couramment rencontrées sur ces chaussées. Enfin il présente une validation de l'approche sur un tronçon de près de 120 km de la route RN2 au Sénégal.

3.3.2 État de l'art

3.3.2.1 Revue de la littérature

Le développement économique d'une nation passe entre autres par l'état de ses routes. L'entité responsable de la gestion de celles-ci se doit de mettre en œuvre des programmes qui assurent la pérennité des infrastructures afin qu'elles demeurent profitables à la société (Assaf, 1998). Ces programmes reposent sur la connaissance de l'état des sections du réseau, le diagnostic des causes de détériorations relevées et la prédiction de l'évolution de chacun des tronçons dans le but de prioriser les interventions (Pehlivanidis, 1994). La revue de la littérature, dans le domaine de l'évaluation et la gestion des chaussées flexibles, pointe rapidement vers les ouvrages de référence tels que ceux de Robert Tessier (Tessier, 1990) et ceux de l'Association des transports du Canada ainsi que de l'American Association of State Highway and Transportation Officials. La littérature dans ce domaine s'articule alors sur trois principales thématiques inter-reliées, soit: 1) le relevé des dégradations et du confort au roulement qui qualifie la qualité fonctionnelle de la chaussée, 2) l'évaluation de la capacité portante qui qualifie la qualité structurale de la chaussée et 3) l'analyse de la durée de vie d'une structure qui ouvre la porte bien sûr à l'analyse économique sur le cycle de vie, l'optimisation, la détermination des budgets, etc. Une approche fort louable pour l'époque qui

détermine les principes qui doivent régir la conception d'une structure flexible au niveau projet, sur sa durée de vie (Bruxelle, 2005). Les revues spécialisées qui traitent des sujets qui touchent de près ou de loin au diagnostic de la cause de détérioration des chaussées flexibles, des essais réalisables et leur potentiel de vérification sont quasi inexistantes; à l'exception de l'OCDE (1978), des travaux de Gabriel Assaf (1993), du MTQ (1993) notamment ceux de Pehlivanidis (1994). Les recherches approfondies pour mieux gérer les chaussées flexibles démontrent qu'au XXI^e siècle, le développement de logiciels utiles et pragmatiques représente la solution préconisée pour rentabiliser le budget d'entretien d'un réseau entier (Boucher, 1994). Objectivement, il est tout à fait impossible d'optimiser la rentabilité des sommes nécessaires à la correction des défauts sur l'ensemble d'un réseau routier sans avoir recours à un système de gestion des chaussées (SGC) (Haas et Hudson, 1978). Les innombrables possibilités engendrées par la diversité des caractéristiques de chacun des tronçons, ainsi que le nombre toujours grandissant d'options d'entretien réalisables, demandent une approche systémique pour en assurer l'analyse complète car l'étendue des possibilités offertes par les systèmes est impressionnante (Systematics et al., 2006). Force est toutefois d'admettre que les modèles doivent être calibrés (St-Laurent, 2004) pour bien refléter la réalité des mécanismes de détérioration issus du climat par exemple dans un contexte québécois (MTQ, 2006). Les essais à réaliser pour confirmer la présence d'une cause relèvent d'un procédé d'évaluation qualitative, quantitative ou typologique des caractéristiques et des propriétés physico-chimiques des matériaux (Assaf, 2010). D'après Gabriel Assaf (Assaf, 1993), les symptômes ou défauts sont intimement liés aux causes qui engendrent les mécanismes de détérioration grâce aux agents comme le trafic, le froid, la chaleur, etc.. L'apparition de défauts à la surface d'un tronçon est due à la présence de certains agents qui agissent sur la structure de la chaussée. Cet état engendre les causes qui déclenchent le mécanisme de détérioration produisant ainsi la dégradation de surface initialement relevée (Assaf, 1987). L'action d'une cause permet d'affirmer la présence du mécanisme responsable de l'éruption des défauts (Assaf, 2010). Malgré l'exécution d'essais spécifiques pour la confirmation des causes, la diversité des résultats est accentuée en raison du caractère spécifique d'une structure flexible et des changements internes que subit la chaussée dans le temps (St-Laurent, 2004). En effet, l'imprécision des résultats accroit

l'incertitude de l'analyse cognitive et provoque le doute sur la fiabilité du diagnostic rendu (Cook et al., 2004). Pour y remédier, il est primordial de contrevérifier l'affirmation de la cause par l'identification du lien de causalité entre les causes présentes et les défauts originalement ciblés par l'analyse (Assaf, 2010). Alors, le procédé systémique doit comprendre: l'observation des défauts, l'analyse permettant de cibler les causes possibles, l'affirmation de la présence de chaque cause par la réalisation d'essais ainsi que la validation de ces dernières auprès des défauts qui ont conduit à leur réalisation en laboratoire ou sur site (Assaf, 1993). Enfin, le regroupement des causes par famille entraîne une importante réduction du nombre de liens inductifs qui ciblent, affirment et valident les causes de détérioration à travers un projet (Assaf, 1993).

Li, Xie et Haas (1996) allèguent que la prévision de la détérioration de la chaussée est le facteur le plus important dans la détermination du moment le plus opportun pour programmer l'entretien du réseau routier. Dans le contexte de leur justification au niveau d'un état américain, Morian et al. (2003) expliquent comment l'État de la Pennsylvanie est confronté à la détérioration de ses infrastructures routières et consacre des sommes importantes à la réhabilitation des routes au même titre d'ailleurs comme plusieurs administrations publiques nord-américaines. Plusieurs techniques d'intervention économiques avantageuses à base d'enrobés améliorés, de fondations stabilisées ou encore de béton haute performance peuvent être alors avantageuses sur la base de la prévision de leur comportement sur une base empirique ou mécanistique, et des analyses sur leur cycle de vie.

Ces modèles de comportement font également ressortir l'intérêt de l'entretien périodique lequel donne des résultats satisfaisants à court et long termes, par des interventions minimales de pavage superficiel. Beg, Zhang et Hudson (2000a) soumettent une approche pour justement déterminer les choix d'intervention sur le réseau routier sur la base des options d'entretien périodique et de réhabilitation, qui minimisent le coût sur la durée de vie de la chaussée. Ils estiment que les coûts déboursés par les administrations routières, les coûts d'exploitation des véhicules, voire les coûts générés par les retards des utilisateurs lors des travaux et les niveaux des performances attendus ou désirés sont les facteurs les plus importants pour comparer alors les diverses stratégies d'intervention sur les chaussées.

3.3.2.2 État actuel des routes des pays d'Afrique subsaharienne

Le réseau routier en Afrique subsaharienne est peu dense en comparaison avec celui d'autres régions développées voire même en développement, *tel qu'en Asie par exemple*, et ne couvre environ que 4,2 km/km² de la superficie disponible (Pambou, 2013). Cependant, étant donné le revenu moyen peu élevé de la population de la région et donc sa maigre capacité à supporter financièrement les coûts d'entretien, force est d'admettre que la densité du réseau routier commence à apparaître élevée. Ceci se manifeste déjà par le déficit d'entretien chronique observé dans les pays d'Afrique subsaharienne et rapporté par plusieurs organisations internationales (Pambou, 2013). L'entretien est toutefois d'autant plus nécessaire que, selon les résultats du diagnostic national des infrastructures routières en Afrique subsaharienne, 16% seulement des 1,8 million de kilomètres de routes étaient revêtues en 2007 (Kumar et Barrett, 2008). La nécessité de l'entretien est évidemment plus critique pour des routes non revêtues, et le fardeau également plus grand. Nivelier régulièrement et recharger 10 cm de matériau granulaire périodiquement sur toute la route revient plus cher que boucher quelques trous après 10 ans. Il faut toutefois rajouter dans la balance qu'il s'agit principalement de routes à faible débit qui représentent plus de 75 % du réseau routier subsaharien (Pinard et al., 2003) et qu'à ce titre, le bitumage n'est pas économiquement justifié. Pour ce qui concerne leur classification fonctionnelle, et de façon générale, les routes en Afrique subsaharienne peuvent être réparties en quatre catégories: routes nationales, routes principales, routes secondaires et routes de desserte. Le choix des caractéristiques de ces routes est généralement fonction de la circulation (Zilioniene et al., 2007).

En termes de volume de trafic, et de façon très générale, on a:

- les routes nationale avec généralement plus de 5 000 véhicules par jour et qui sont bien sûr bitumées;
- les routes principales avec 100 à 5 000 véhicules par jour et qui sont généralement bitumées, rien qu'à cause de leur classification fonctionnelle de routes principales, *ce qui leur assure de facto une reconnaissance politico-sociale et donc le bitumage*;

- les routes secondaires avec 50 à 800 véhicules par jour, qui sont souvent en gravier ou en terre, ou parfois recouvertes d'un enduit superficiel;
- les pistes carrément rurales dites de desserte associées au désenclavement des régions éloignées et qui desservent moins de 100 véhicules par jour. Celles-ci ne sont pas toujours adéquatement répertoriées et sont même parfois gérées par une cellule soit locale (direction régionale) ou encore centrale mais séparée, dite direction des pistes rurales.

Alors que les chaussées représentent un actif important dans les pays d'Afrique subsaharienne, qu'il faut manifestement préserver, force est toutefois d'admettre que l'absence d'entretien, faute de moyens, demeure le principal défi de la durée de vie de ces chaussées, autant pour les autorités administratives, politiques et les bailleurs de fonds. En effet, l'évolution des dégradations de surface s'accélère généralement dès lors qu'on atteint un certain niveau de détérioration par suite de l'action généralement conjuguée de l'eau, qui fait chuter la portance des couches constitutives (Pambou, 2013). Ceci est d'autant plus grave que les charges lourdes qui s'exercent sur ces chaussées sont extrêmement élevées par manque de contrôle, laxisme, pouvoir politique prépondérant des transporteurs pour qui il est plus rentable de surcharger, ou encore carrément la corruption des gendarmes et opérateurs des stations de pesées lorsque les essieux sont surchargés selon l'UEMOA (Union Économique Monétaire Ouest Africaine) (Trade et Hub, 2012) et la CEMAC (Communauté Économique et Monétaire de l'Afrique Centrale) (Cabanius, 2003) qui recommandent, en vain, de limiter les charges sur essieux.

3.3.2.3 État futur des routes dégradées des pays d'Afrique subsaharienne

Si l'adaptation économique des modèles des pays développés aux besoins du développement des pays émergents est une nécessité, l'adaptation des techniques en est tout autant. En effet, les ingénieurs ont à rechercher comment ils peuvent adapter et utiliser au mieux les éléments qu'ils ont à leur disposition. Les analyses des données de dégradation des chaussées routières dans les pays d'Afrique subsaharienne ont fait ressortir de graves endommagements, précoces et coûteux pour l'administration et les usagers (Pambou, 2013). Ces observations

ont révélé les limites des outils utilisés pour le dimensionnement structural des chaussées et la compréhension du comportement rhéologique des matériaux utilisés. Aujourd'hui, vu le prix très variable du pétrole, les défis économiques, les enjeux environnementaux et l'épuisement des gisements naturels de granulats, il devient important pour les pays d'Afrique subsaharienne de recourir au revêtement en béton qui peut être produit avec des granulats de moindre qualité (França et Corté, 1994). En ce qui concerne cette technique du revêtement en béton, l'introduction de la dalle de béton a contribué à l'amélioration des capacités portantes des structures de chaussées (Huang, 1993). Pour une même épaisseur de revêtement, les travaux de Shackel cités par (Pierre, Bresson et Juneau, 2008) ont révélé que la couche en béton (cas des pavés) présente une résistance largement supérieure par rapport à celle de l'enrobé bitumineux. De nombreux documents dont le guide technique des chaussées rigides du LCPC (França et Corté, 1994) et le Pavement Analysis and Design (Huang, 1993) présentent les avantages indéniables des chaussées en béton pour soutenir les poids lourds. Ceci est d'autant plus utile qu'en Afrique subsaharienne l'essieu de référence est de 13 tonnes au lieu de 8 tonnes comme en Amérique du Nord et que les surcharges atteignant 15 voire 20 tonnes par essieu sont courantes tel qu'au Sénégal (Assaf, 2010).

3.4 Méthodologie

En général, avant de mettre sur pied une méthodologie pour le choix de l'intervention des chaussées en enrobé en Afrique subsaharienne, il convient dans un premier temps de ressortir les causes de dégradations couramment rencontrées. Ces dégradations et leurs causes sont illustrées dans les tableaux 3.1 à 3.4 qui ont été créés à partir d'une adaptation du manuel de conception routier pour l'Évaluation des Techniques d'Entretien pour les routes en Afrique subsaharienne (CRETE) (Assaf, 1986), du manuel du Ministère des transports du Québec (MTQ) (Jean et al., 2007), du manuel de l'OCDE (OCDE, 2001) et une consultation avec des experts en routes actifs dans la région, provenant du Cameroun, de la Côte d'Ivoire et de la Guinée équatoriale.

Tableau 3.1 Défauts de fissuration

SYMPTÔME	DESCRIPTION	MÉCANISMES DE DÉTÉRIORATION POSSIBLE
Fissure en mailles	Fissures en forme de peau de crocodile formant une série de petits polygones.	<ul style="list-style-type: none"> - mouvement thermique de retrait du mélange; - mouvement hydraulique de retrait des couches stabilisées; - rupture par fatigue du mélange bitumineux; - oxydation et vieillissement naturel du bitume; - surchauffage du bitume lors de l'épandage.
Fissure rectiligne	Fissure simple longitudinale dans le sens du trafic.	<ul style="list-style-type: none"> - retrait thermique des couches inférieures; - mauvaise construction du joint longitudinal.
Fissure dans les traces de roues	Fissure simple ou polygonale accompagnée d'ornièrè dans les traces de roues.	<ul style="list-style-type: none"> - rupture par fatigue du mélange bitumineux; - retrait thermique des couches inférieures; - mauvaise construction du joint longitudinal; - Compactage déficient de la fondation.
Fissures en rives	Fissure simple ou polygonale en bordure.	<ul style="list-style-type: none"> - infiltration d'eau par les côtés; - mouvement vertical des couches mal compactées; - tassement causé par un glissement de terrain; - instabilité latérale en rive et largeur étroite; - mauvais fonctionnement du système de drainage.
Fissure transversale	Fissure simple ou polygonale perpendiculaire au sens du trafic.	<ul style="list-style-type: none"> - mouvement thermique de retrait du mélange; - mouvement hydraulique de retrait des couches stabilisées; - retrait thermique des couches inférieures.

Tableau 3.2 Défauts touchant à la sécurité

SYMPTÔME	DESCRIPTION	MÉCANISMES DE DÉTÉRIORATION POSSIBLE
Présence d'eau en surface	Présence d'eau stagnante sur la chaussée trop longtemps après une pluie.	<ul style="list-style-type: none"> - succion de l'eau du sol vers la structure; - infiltration d'eau à travers les fissures; - infiltration d'eau par les côtés; - mauvais fonctionnement du système de drainage; - devers insuffisants, dénivellations.
Ressuage	Remontée localisée de liant à la surface de la chaussée donnant un aspect noir et brillant.	<ul style="list-style-type: none"> - bitume trop mou; - surdosage en bitume.
Glaçage	Usure de la couche de roulement par arasement progressif des gravillons au niveau du mastic fines-bitume, sans arrachement de ceux-ci.	<ul style="list-style-type: none"> - granulats trop polissables; - usure du revêtement.

Tableau 3.3 Défauts de cohésion de surface

SYMPTÔME	DESCRIPTION	MÉCANISMES DE DÉTÉRIORATION POSSIBLE
Désintégration et trou	Perte progressive de matériaux de la chaussée. Désenrobage ou séparation du bitume en présence d'eau.	<ul style="list-style-type: none"> - succion de l'eau du sol vers la structure; - érosion en période de pluie; - infiltration de l'eau à travers les fissures; - infiltration de l'eau par les côtés; - couche latéritique comprenant trop de fins; - rupture par fatigue du mélange bitumineux; - oxydation et vieillissement naturel du bitume; - dosage déficient en bitume; - surchauffage du bitume lors de l'épandage; - séparation du bitume et des granulats par l'eau.
Pelade	Arrachement par plaques de mélange bitumineux.	<ul style="list-style-type: none"> - épaisseur insuffisante de la couche d'usure; - manque d'adhérence à l'interface.

Tableau 3.4 Défauts de déformation

SYMPTÔME	DESCRIPTION	MÉCANISMES DE DÉTÉRIORATION POSSIBLE
Affaissement	Abaissement ou enfoncement localisé du niveau de la chaussée pouvant créer des dénivelés importants et brutaux.	<ul style="list-style-type: none"> - succion de l'eau du sol vers la structure; - infiltration de l'eau à travers les fissures; - infiltration de l'eau par les côtés; - couche latéritique comprenant trop de fins; - mouvement vertical des couches mal compactées; - rupture d'une canalisation souterraine; - tassement causé par un glissement de terrain; - instabilité latérale en rive et largeur étroite; - capacité de support insuffisant de la fondation.
Ornière	Dépression dans les traces.	<ul style="list-style-type: none"> - couche latéritique comprenant trop de fins; - mouvement vertical des couches mal compactées; - granulats du mélange trop arrondis (peu anguleux); - usure du mélange; - bitume trop mou en été; - dosage déficient en bitume; - surdosage en bitume.
Soulèvement	Soulèvement très localisé de la chaussée.	<ul style="list-style-type: none"> - succion de l'eau du sol vers la structure; - infiltration de l'eau à travers les fissures; - infiltration de l'eau à travers les côtés; - gonflement à l'eau d'une latérite argileuse; - rupture d'une canalisation souterraine.

SYMPTÔME	DESCRIPTION	MÉCANISMES DE DÉTÉRIORATION POSSIBLE
Ondulation	Vagues ou succession de vagues, transversales, régulières et rapprochées.	<ul style="list-style-type: none"> - freinages fréquents; - mauvaise mise en œuvre du mélange bitumineux; - surdosage en bitume; - bitume trop mou; - inadhérence à l'interface.

Tel que montré dans les tableaux précédents, les dégradations couramment rencontrées en Afrique subsaharienne sont souvent dues en grande partie à l'eau en période de pluies, laquelle ne s'évacue pas facilement du corps de la chaussée. Ceci est dû au fait que les matériaux utilisés renferment généralement beaucoup de matériaux fins. En effet, il est courant que des teneurs en matériaux fins se situant entre 5% à 15% voire beaucoup plus, soient observées dans cette zone, comparativement au Canada par exemple où la norme de matériaux fins est généralement de l'ordre de 7%. A titre d'information, le tableau 3.5 indique le pourcentage des matériaux fins recommandé en Afrique subsaharienne selon Osti (Osti, 1993).

Tableau 3.5 Pourcentage de particules fines autorisées en fondation supérieure

Tamis (mm)	Pourcentage total en masse de passage au tamis.		
	Taille maximale de particules nominale		
	37,5 mm	20 mm	10 mm
50	100	-	-
37,7	80-100	100	-
20	60-80	80-100	100
10	45-65	55-80	80-100
5	30-50	40-60	50-70
2,36	20-40	30-50	35-50
0,425	10-25	12-27	12-30
0,075	5-15	5-15	5-15

L'eau joue un rôle important dans l'affaiblissement de la portance des couches qu'elle imbibe (OCDE, 2001). Elle peut s'infiltrer à travers un revêtement fissuré ou à travers des accotements non revêtus. Elle peut aussi remonter des couches profondes de la plateforme par capillarité. Cet accroissement du taux d'humidité est d'autant plus grave que le revêtement gêne l'évaporation. Il convient donc au moment de la construction, de choisir impérativement les matériaux de fondation en fonction de leur capacité à drainer et de leur faible susceptibilité à l'eau. Il faut également rendre les revêtements étanches et écarter l'eau stagnante des abords de la chaussée (OCDE, 2001).

Lors d'une étude de réhabilitation, il est alors essentiel de bien caractériser les propriétés des différentes couches de la chaussée dégradée à traiter, de définir la cause de dégradation observée et de dimensionner une réhabilitation économiquement optimale à long terme.

Dans le cas d'une gestion préventive et sous réserve de l'application de la méthode proposée dans cet article, il faut définir les zones à traiter dès la manifestation des premiers défauts par l'application des solutions d'entretien périodique à moindre coût telles que le tapis mince lequel va redonner à l'enrobé sa souplesse et à la chaussée un bel uni.

Pour réhabiliter une chaussée en assurant son confort au roulement (*un bon IRI*) tout au long du cycle de vie de la route, il faut identifier la cause de détérioration et trouver les solutions appropriées. Cette méthodologie s'articule donc comme suit:

- recueillir les informations du projet;
- évaluer parmi la liste des défauts présentée aux tableaux 3.1 à 3.4, les défauts de la route à réhabiliter et sectionner la route en zones homogènes de trafic, topographie, état de la route et profil en travers type;
- identifier la cause de détérioration la plus probable qui revient le plus fréquemment à partir des tableaux 3.1 à 3.4;
- confirmer la cause de détérioration par des vérifications d'essais appropriées qui s'imposent afin de confirmer la cause tel que:
 - caractérisation de la formule du bitume (oxydation, teneur en vides, forme de granulats, teneur en bitume, susceptibilité du bitume à la température, etc.);
 - remontée des fissures sur carottes d'un ancien revêtement;

- qualité du drainage;
 - test d'arrachement sur l'enrobé de surface;
 - caractérisation des matériaux granulaires (granulométrie,...);
 - potentiel de gonflement des sols sous-jacents voire les matériaux de la fondation;
 - essai de portance au déflectomètre à boulet ou à la poutre Benkelman;
 - accotements non revêtus permettant l'infiltration d'eau.
- dégager les interventions qui seront retenues après avoir confirmé la cause de détérioration par des vérifications d'essais, suivie d'une analyse des courbes de détérioration avec l'outil HDM-4 de l'AIPCR (Association Mondiale des routes) en support pour le choix de la solution optimale c'est-à-dire, la solution qui traite la cause de détérioration et qui assure tout au long de la durée de vie de la route un très grand confort au roulement (un bon IRI).

La figure 3.1 ci-dessous représente l'arborescence structurée pour l'étude technique d'une réhabilitation.

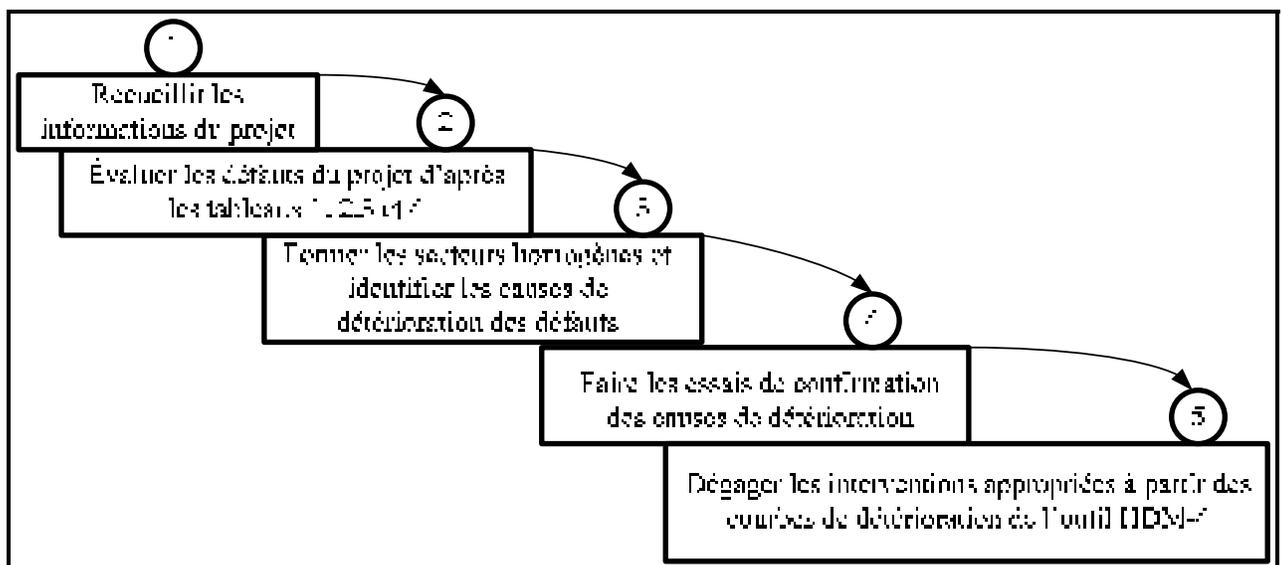


Figure 3.1 Arborescence structurée pour l'étude technique d'une réhabilitation

3.5 Résultats et discussion

3.5.1 Étude au nord du Sénégal

3.5.1.1 Données du projet

Dans le cadre de la mise en œuvre d'un nouveau programme d'aide aux pays émergents qui répondent à certains critères (Soederberg, 2004), le gouvernement des États-Unis d'Amérique a créé le Millennium Challenge Corporation (MCC), le 23 janvier 2004. La mission du MCC consiste à réduire la pauvreté en appuyant la croissance économique durable et transformative dans les pays en voie de développement. Le 16 septembre 2009, le MCC et le gouvernement du Sénégal ont signé un accord de subvention de cinq (5) ans d'un montant de 540 millions de dollars US, pour financer un programme conçu pour réduire la pauvreté à travers des interventions ciblées portant sur l'agriculture, le transport et les infrastructures sociales. C'est ainsi que pour l'exécution de ce Compact, le Millennium Challenge Account - Sénégal (MCA-Sénégal) a été créé pour mettre en œuvre les travaux de réhabilitation de la route RN2 entre les villes de Richard Toll et de N'Dioum d'un linéaire de près de 120 km.

Les principaux acteurs de ce projet sont :

- le Millennium Challenge Account-Sénégal (MCA-Sénégal) à titre de Maître d'Ouvrage;
- l'Agence des Travaux et de Gestion des Routes (AGEROUTE) à titre d'Assistant technique du Maître d'Ouvrage;
- le Bureau d'Études qui a fait les études d'ingénierie;
- l'entreprise qui a exécuté les travaux;
- le MCC qui a financé l'opération par un don.

3.5.1.2 Option retenue pour l'appel d'offres par le bureau d'études

L'option proposée par le bureau d'études est l'option 1. Elle consiste à un élargissement de la chaussée existante par un décaissement de 40 cm de matériaux puis un apport de 15 cm de

nouveaux matériaux de caractéristique d'une couche de fondation, la mise en œuvre d'une couche de base de 20 cm de latérite-ciment sur la largeur de la plateforme et la mise en œuvre d'un revêtement en béton bitumineux de 5 cm. Dans cette option, le bureau d'études a utilisé la méthode CEBTP (Dione, 2011) combinaison des indices de qualité avec le trafic pour déterminer une structure de renforcement. Les vérifications ont été faites par le logiciel Alizé (Duhamel et al., 2005) pour s'assurer que les contraintes ainsi que les déformations enregistrées sont inférieures aux limites admissibles. Un entretien périodique est prévu au moins tous les 10 ans tout dépendant de la dégradation de la chaussée.

3.5.1.3 Option résultant de l'application de l'approche proposée dans cet article

Dans cet article, trois options ont été proposées en dehors de l'option de base (option de non intervention majeure) pour l'application de l'approche proposée à savoir l'option 2, 3 et 4. Rappelons que l'option 1 est celle du bureau d'études.

En ce qui concerne l'option de base, elle consiste à faire un entretien courant durant toute la durée de vie de la chaussée en réalisant les réparations mineures telles que la réparation des rives, le scellement des fissures et le rapiéçage des nids de poule sur la chaussée.

L'option 2, quant à elle, consiste à pulvériser sur une épaisseur de l'ordre de 35 cm, valoriser les matériaux retirés sur la route avec un ajout de 2,5% à 3% de ciment sur 30 cm avec ou sans correction granulométrique pour réduire la teneur des fines au besoin par l'apport de la pierre nette. Ceci aura pour conséquence de stabiliser 30 cm de couche de base afin d'augmenter la résistance structurale de la route. Le CBR amélioré à 95% OPM doit être supérieur ou égal à 160 pour la couche de base et le module entre 1000 et 2000 MPa max (CEBTP, 1984). Un nouveau revêtement de 5 cm de béton bitumineux est posé à la fin. Un entretien périodique est effectué tous les 10 ans dès l'apparition de dégradation sur la surface de la chaussée.

L'option 3 consiste à maintenir la structure existante comme fondation, puis de mettre une couche de 20 cm de béton de ciment (dalles courtes goudonnées) comme revêtement. Selon les modèles de comportement développés par Luc Rens (Rens, 2013) du centre de recherche routière en Belgique, cette opération peut jusqu'à tripler la durée de vie de la route à cause des lois de comportement de béton et son entretien sera réduit selon les observations rapportées.

Enfin l'option 4, consiste à enlever 5 cm d'enrobé au maximum sur la route principale, de réparer les trous, de corriger le profil et de faire un rechargement d'enrobé neuf de 5 cm. Un entretien périodique qui va consister à procéder au renouvellement du revêtement en béton bitumineux selon une épaisseur qui dépendra du trafic ou tous les 10 ans dès l'apparition de dégradations prononcées sur la surface de la chaussée.

3.5.1.4 Méthode et paramètres utilisés pour l'étude

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé le logiciel HDM-4 (Kerali, Odoki et Stannard, 2005) pour permettre d'évaluer la rentabilité des projets. HDM-4 est un outil flexible qui permet de modéliser la détérioration des chaussées dans le temps selon les interventions qui y sont appliquées, d'évaluer la viabilité économique de diverses alternatives de réhabilitation et les stratégies d'entretien des chaussées à moyen et long termes (Watanatada et al., 1987). Il a été développé par la Banque Mondiale et diverses autres organisations sous l'égide de l'Association Internationale Permanente des Congrès de la Route (AIPCR) par l'équipe de l'Université de Birmingham pour justifier le choix de la méthodologie de réhabilitation des chaussées. Dans le cadre de ce travail, HDM-4 a permis d'utiliser les modèles empiriques basés sur des expériences réelles réalisées sur la route RN2 au Sénégal pour simuler l'évolution du comportement des chaussées selon diverses options de réhabilitation. Il a aussi permis d'effectuer une analyse de sensibilité pour voir l'effet de l'écart entre les données fournies au système ainsi que des hypothèses retenues, par rapport aux données réelles. De mesurer la robustesse des recommandations qui demeurent sujettes aux estimations des paramètres d'entrées significatifs, et cela par rapport à chacun des paramètres, tels le coût

d'investissement des travaux, la croissance du trafic normal des véhicules et le trafic moyen journalier annuel (TJMA) post-travaux.

Pour justifier le choix de la méthodologie de réhabilitation de la RN-2, une comparaison a été effectuée entre diverses options retenues pour ce projet de réhabilitation à l'option de base (option de non intervention majeure) et à l'option 1 (option retenue initialement par le bureau d'études).

3.5.1.5 Données d'identification du projet avant la réalisation

Le tableau 3.6 ci-dessous fournit les données d'identification du projet avant la réhabilitation, à savoir par exemple que la longueur est de 120 km, la largeur est de 4 à 6 m, le nombre de voies est de 2 et l'IRI moyen est de 2,9 m/km. Cet IRI a été mesuré avec un analyseur du profil en long (APL) et étalonné par huit sections de 200m à la mire et au niveau. L'exactitude et la répétabilité sur l'APL sont de moins de 10%.

Tableau 3.6 Données d'identification du projet avant la réhabilitation

Identification du projet	RN2
Longueur du projet	120 km
Largeur de la chaussée sur tout le projet	4 à 6 m
Nombre de voies	2,00
Nombre de trottoirs	2 x 1,00 m
TJMA (2009), véhicules par jour	876
Sens du trafic	2 sens
Vitesse limite	80 km/h

Identification du projet	RN2
Climat de type sahélien	9 à 10 mois (octobre-Juillet) saison sèche
	2 à 3 mois (fin Juillet-Début octobre) saison pluvieuse
Pluviométrie moyenne annuelle	265 mm
Pluviométrie maximale journalière	47 mm
IRI moyen	2,9 m/km
Épaisseur des couches de la chaussée existante	Fondation: 400 mm
	Base: 200 mm
	Revêtement: 50 mm
Capacité de portance du sol, CBR	Sol de plateforme: CBR 21%

3.5.1.6 Données d'identification du projet après la réalisation

Le tableau 3.7, fournit quelques données du projet après la réhabilitation, par exemple que la largeur moyenne en section courante est de 7,20 m et celle en agglomération est de 11 m et l'IRI moyen est de 1,5 m/km.

Tableau 3.7 Données d'identification du projet après la réhabilitation

Caractéristique de la nouvelle route à aménager et à réhabiliter	RN2
Vitesse de référence	80 km/h et (60 km/h en agglomération)
Pente minimale des talus en remblais	3/2 (3 horizontale, 2 verticale)
Pente minimale des talus en déblais	1/2 (1 horizontale, 2 verticale)
Charge maximale à l'essieu	13t (tonnes)
Mise hors d'eau	obligatoire

Caractéristique de la nouvelle route à aménager et à réhabiliter	RN2
Largeur de la chaussée en section courante et en agglomération	2 x 3,60 m = 7,20 m
Largeur des accotements	Section courante: 2 x 1,50 m = 3 m
	En agglomération: 2 x 2,00 m = 4 m
Largeur de la chaussée dans l'agglomération de N'Dioum	4 x 2,75 m = 11 m
Largeur des accotements dans l'agglomération de N'Dioum	2 x 1,75 m = 3,5 m
IRI post-travaux	1,5 m/km
Longueur de la chaussée	Section courante: 110,5 km
	En agglomération: 6,45 km
Longueur de la chaussée dans l'agglomération de N'Dioum	3,05 km
Taux de croissance	Trafic normal : 3,5% - 4,55%
	Trafic induit : 30% (15% grâce au projet routier RN2 et 15% grâce à d'autres projets dans la zone du projet.
Période d'analyse du projet	20 ans
Durée des travaux de réhabilitation du projet	24 mois
Date du début des travaux de réhabilitation du projet	13 janvier 2013
Date de mise en œuvre du projet	13 janvier 2015

3.5.1.7 Les paramètres de l'analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour examiner la robustesse des conclusions de l'étude: le coût d'investissement des travaux, la croissance du trafic normal des véhicules et

le trafic moyen journalier annuel (TJMA) post-travaux. Pour le choix des paramètres, la méthode utilisée a été la méthode essai-erreur qui est caractérisée par des essais divers qui sont continus jusqu'au succès de la recherche. Les scénarios examinés ici font varier les paramètres suivants, pris individuellement:

- coûts d'investissement des travaux (+/- 25%);
- croissance du trafic normal (+/- 70%);
- TMJA du trafic normal post-travaux (+/- 25%).

3.5.1.8 Les différents défauts et les causes de détérioration du projet de la RN2

En accord avec la méthodologie proposée dans cet article à la section précédente, le projet a été divisé en 11 sections toute dépendantes des dégradations et des profils en travers types de chaque section. Le tableau 3.8 tabule les différentes sections, leurs dégradations ainsi que leurs profils en travers type.

Tableau 3.8 Les différentes sections de la route, leurs dégradations et leurs profils en travers type

PKi	PKf	Profil en travers type	section	Dégradations
0+000	29+350	PT1	1	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages fins à mailles larges sans arrachements, faïençages, fissures transversales, âge (plumage ponctuel), épaufrures de rive.
29+350	30+550	PT2	2	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, pelade, âge (plumage ponctuel), épaufrures de rive, fissures transversales, désenrobage, peignage, plumage.

PKi	PKf	Profil en travers type	section	Dégradations
30+550	48+750	PT1	3	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
48+750	50+200	PT2	4	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
50+200	62+550	PT1	5	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
62+550	64+750	PT2	6	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
64+750	89+050	PT1	7	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
89+050	90+650	PT2	8	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
90+650	111+700	PT1	9	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.

PKi	PKf	Profil en travers type	section	Dégradations
111+700	114+750	PT3	10	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
114+750	120+000	PT1	11	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.

Les profils en travers types PT1, PT2 et PT3 correspondent aux cas ci-après:

PT1:

profil en travers à deux voies en rase campagne (chaussée: 2 x 3,60 m et accotements: 2 x 1,50 m).

PT2:

profil en travers à deux voies en agglomération (chaussée: 2 x 3,60 m et accotements: 2 x 2,00 m).

PT3:

profil en travers en 4 voies en agglomération (Chaussée: 4 x 2,75 m et accotements: 2 x 1,75 m).

Concernant les causes de détérioration qu'il est nécessaire d'établir conformément à la section précédente, celles-ci sont dues en grande partie à l'eau qui s'infiltré à travers le revêtement ou les accotements dont l'étanchéité est défailante et remonte dans les couches profondes de la plateforme par capillarité et à l'érosion causée par l'eau de pluie mal drainée en pluie hivernale (période de pluie en Afrique subsaharienne).

3.5.1.9 Les hypothèses prises en compte lors de la simulation sur HDM-4

Un appel d'offres pour effectuer les travaux selon l'option 1 proposée par le bureau d'étude a permis de sélectionner un entrepreneur général. Les niveaux de prix pratiqués au Sénégal et

spécifiquement dans la zone du projet ont également permis au consultant d'arrêter les prix unitaires qui seront utilisés dans le cadre de l'estimation des travaux. Les coûts de la réhabilitation proposée ont été estimés à partir des quantités de l'avant métré détaillé des travaux sortis du logiciel de conception du projet (Piste) et des plans présentés dans le dossier des pièces graphiques du dossier d'appel d'offres (APD).

Les différents aménagements des autres options retenues dans cet article ont été évalués d'abord quantitativement, ensuite nous avons appliqué les prix unitaires de l'entrepreneur retenu pour le projet y compris pour le béton pour aboutir à un coût global pour l'aménagement de chaque option.

Option 1:

option du bureau d'étude: le prix du km de route est de 601 682 \$.

Option 2:

option de pulvo-stabilisation/correction granulométrique et resurfçage: le prix du km de route est de 592 170 \$.

Option 3:

option béton de ciment de 20 cm: le prix du km de route est de 718 952 \$.

Option 4:

option resurfçage direct en enrobé. Épaisseur: 5 cm: le prix du km de route est de 464 446 \$.

3.5.2 Résultat de l'étude au nord du Sénégal

3.5.2.1 Identification de la démarche

En accord avec la méthodologie d'identification de la cause de détérioration proposée pour le choix de l'intervention dans cet article à la section précédente, les courbes de détérioration des figures 3.2 à 3.8 sont analysées. Celle qui traite la cause de détérioration et qui assure tout au long de la durée de vie de la route, un très grand confort au roulement (un bon IRI) est retenue.

3.5.2.2 Présentation et interprétation des résultats

Les critères à considérer pour l'évaluation des résultats portent sur les modèles des courbes d'exploitation des véhicules sur la route RN2 au Sénégal entre Richard Toll et N'Dioum en se basant sur l'uni exprimé en IRI. Les critères de qualification de l'uni retenus pour cette route nationale reposent sur celles de l'OCDE (OCDE, 2001) et sont les suivantes:

- $IRI < 1,6$ m/km Excellent;
- $1,6 < IRI < 2,6$ m/km Bon;
- $2,6 < IRI < 3,6$ m/km Moyen;
- $3,6 < IRI < 4,6$ m/km Pauvre;
- $4,6 < IRI$ Très pauvre.

Pour maintenir la chaussée toujours en bon état, il faut que l'IRI reste inférieur à 2,6 m/km jusqu'au prochain entretien périodique en choisissant une option optimale de réhabilitation qui sera rentable sur le cycle de vie.

Dans cette étude, on a fait ressortir sur sept (7) figures, l'évolution de l'uni en fonction du temps pour les différentes options de réhabilitation. L'option la plus intéressante est celle qui maintient un IRI le plus bas possible tout le long de la durée de l'analyse. Le tableau 3.9 liste la variation de l'IRI selon les différentes options considérées.

Tableau 3.9 Variation de l'IRI dans les différentes options du projet

Analyse	IRI	Figures	Option de base	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
1	Analyse des options selon le scénario de base	3.2	2,9m/km à 6,1m/km	1,2m/km à 3,6m/km	1m/km à 3,4m/km	1m/km à 2,1m/km	1,1m/km à 3,5m/km
2	Analyse des options selon le scénario du coût d'investissement +25%	3.3	2,9m/km à 6,1m/km	1,2m/km à 3,6m/km	1m/km à 3,4m/km	1m/km à 2,1m/km	1,1m/km à 3,5m/km
3	Analyse des options selon le scénario du coût d'investissement -25%	3.4	2,9m/km à 6,1m/km	1,2m/km à 3,6m/km	1m/km à 3,4m/km	1m/km à 2,1m/km	1,1m/km à 3,5m/km
4	Analyse des options selon le scénario de croissance du trafic faible -70%	3.5	2,9m/km à 5,9m/km	1,2m/km à 3,4m/km	1m/km à 3,1m/km	1m/km à 2,0m/km	1,1m/km à 3,3m/km
5	Analyse des options selon le scénario de croissance du trafic fort +70%	3.6	2,9m/km à 6,6m/km	1,2m/km à 4,2m/km	1m/km à 3,9m/km	1m/km à 2,1m/km	1,1m/km à 4,1m/km
6	Analyse des options selon le scénario du TJMA faible -25%	3.7	2,9m/km à 5,9m/km	1,2m/km à 3,4m/km	1m/km à 3,2m/km	1m/km à 2,0m/km	1,1m/km à 3,3m/km
7	Analyse des options selon le scénario du TJMA faible +25%	3.8	2,9m/km à 6,4m/km	1,2m/km à 4,0m/km	1m/km à 3,8m/km	1m/km à 2,1m/km	1,1m/km à 3,9m/km

Les figures 3.2 à 3.8 illustrent la progression de la valeur annuelle moyenne de l'IRI sur la période d'analyse, selon les quatre (4) options d'intervention décrites à la section 3.5.1.3. Il en ressort que seule l'option 3 a un IRI inférieur ou égal à 2,1 m/km sur tout l'ensemble du projet et sur les différentes figures de l'analyse de sensibilité, si on se réfère aux critères de qualification de l'uni proposés par l'OCDE pour une route nationale. Il n'y a donc que l'option 3, c'est-à-dire un revêtement en béton, qui maintienne la chaussée en bon état sur 20 ans.

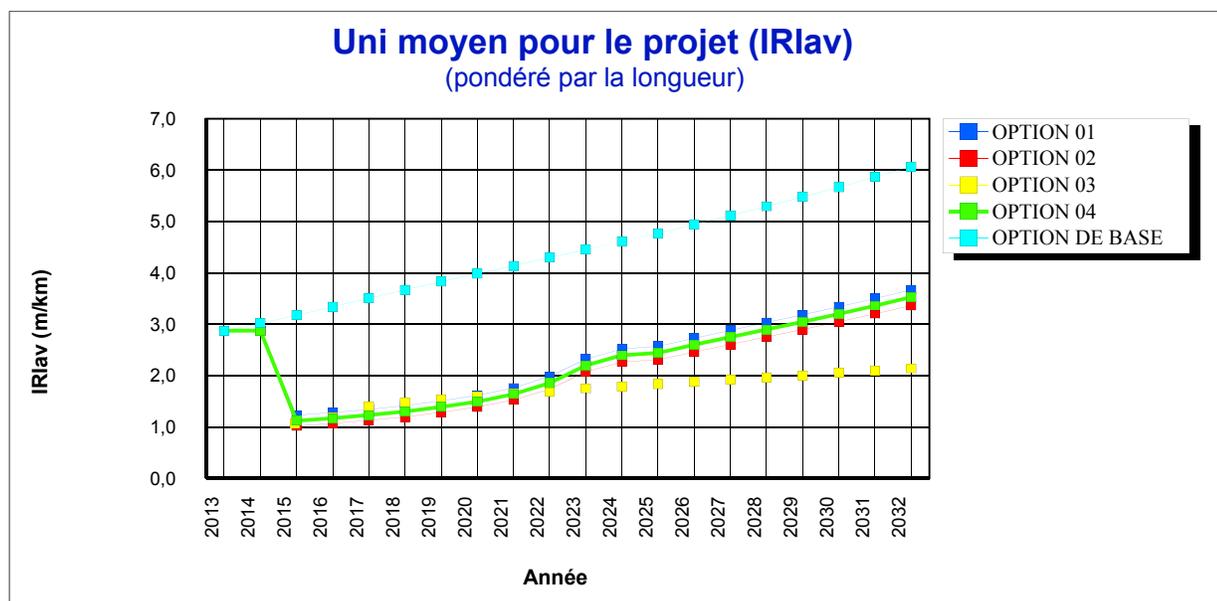


Figure 3.2 Évolution de l'uni de chaque option selon le scénario de base

D'après la figure 3.2, l'option de base a un IRI qui varie entre 2,9m/km à 6,1m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1,2m/km pour l'option 1, 1,1m/km pour l'option 2 et 1,1m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 3,6m/km pour l'option 1, 3,4m/km pour l'option 2 et 3,5m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2,1m/km.

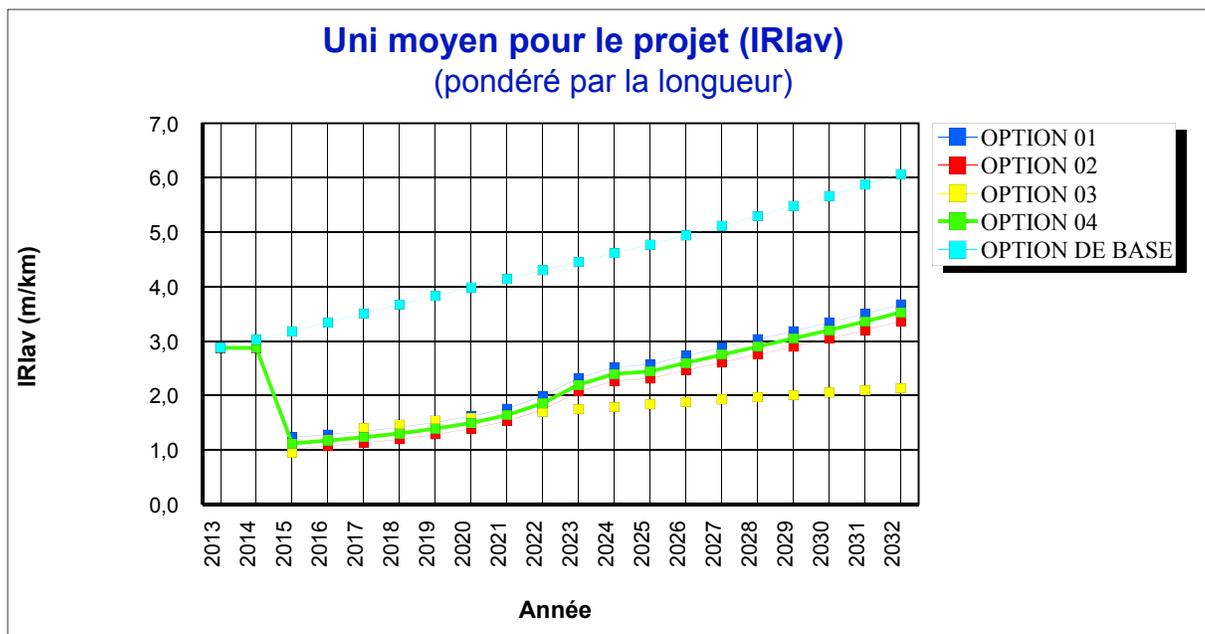


Figure 3.3 Évolution de l'uni selon le scénario du coût d'investissement +25%

D'après la figure 3.3, l'option de base a un IRI qui varie entre 2,9m/km à 6,1m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1,2m/km pour l'option 1, 1,1m/km pour l'option 2 et 1,1m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 3,6m/km pour l'option 1, 3,4m/km pour l'option 2 et 3,5m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, elle a un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1m/km après les travaux et elle croît au fil des années pour atteindre 2,1m/km.

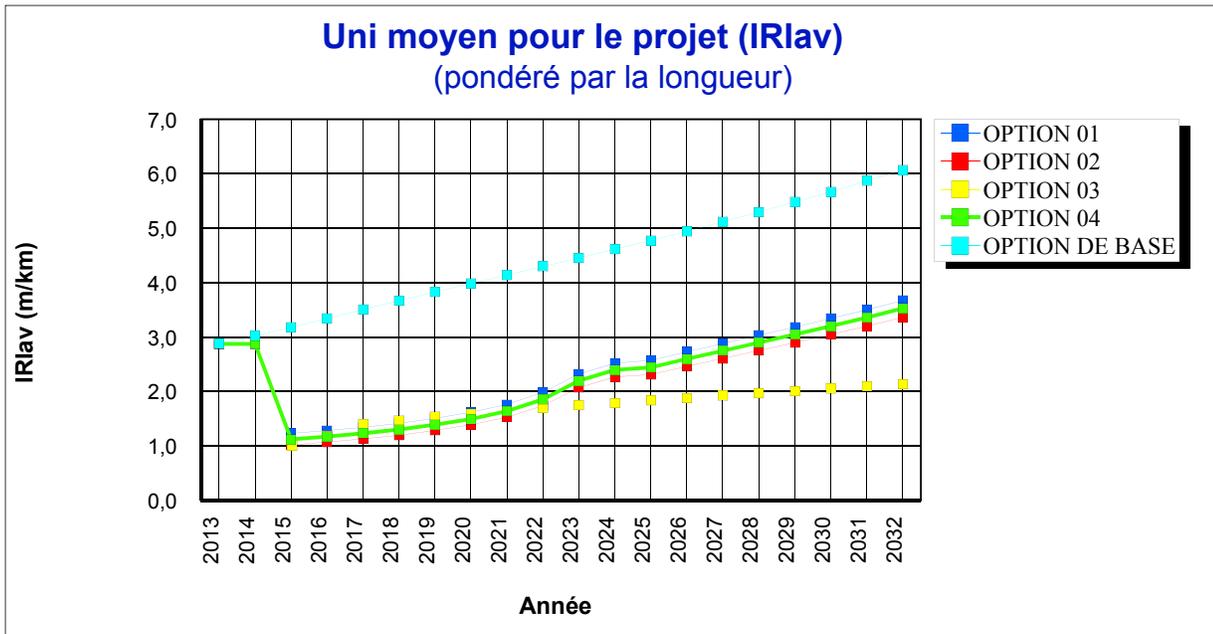


Figure 3.4 Évolution de l'uni selon le scénario du coût d'investissement -25%

D'après la figure 3.4, l'option de base a un IRI qui varie entre 2,9m/km à 6,1m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1,2m/km pour l'option 1, 1,1m/km pour l'option 2 et 1,1m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 3,6m/km pour l'option 1, 3,4m/km pour l'option 2 et 3,5m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2,1m/km.

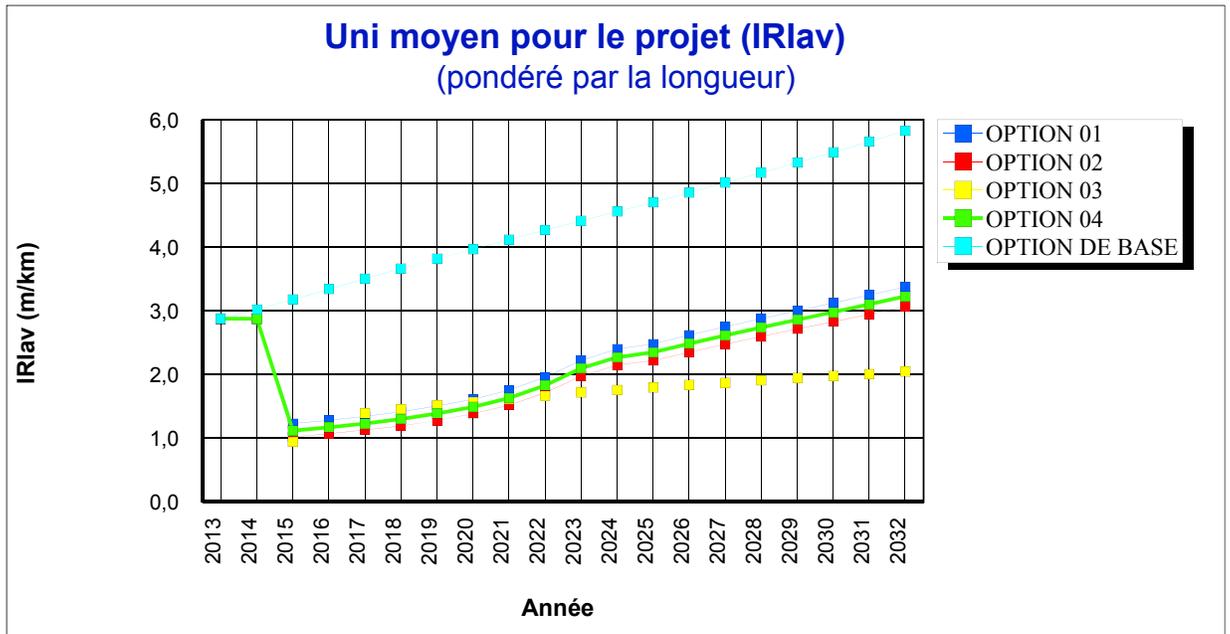


Figure 3.5 Évolution de l'uni selon le scénario de croissance du trafic faible -70%

D'après la figure 3.5, l'option de base a un IRI qui varie entre 2,9m/km à 5,9m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1,2m/km pour l'option 1, 1,1m/km pour l'option 2 et 1,1m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 3,4m/km pour l'option 1, 3,1m/km pour l'option 2 et 3,3m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2,0m/km.

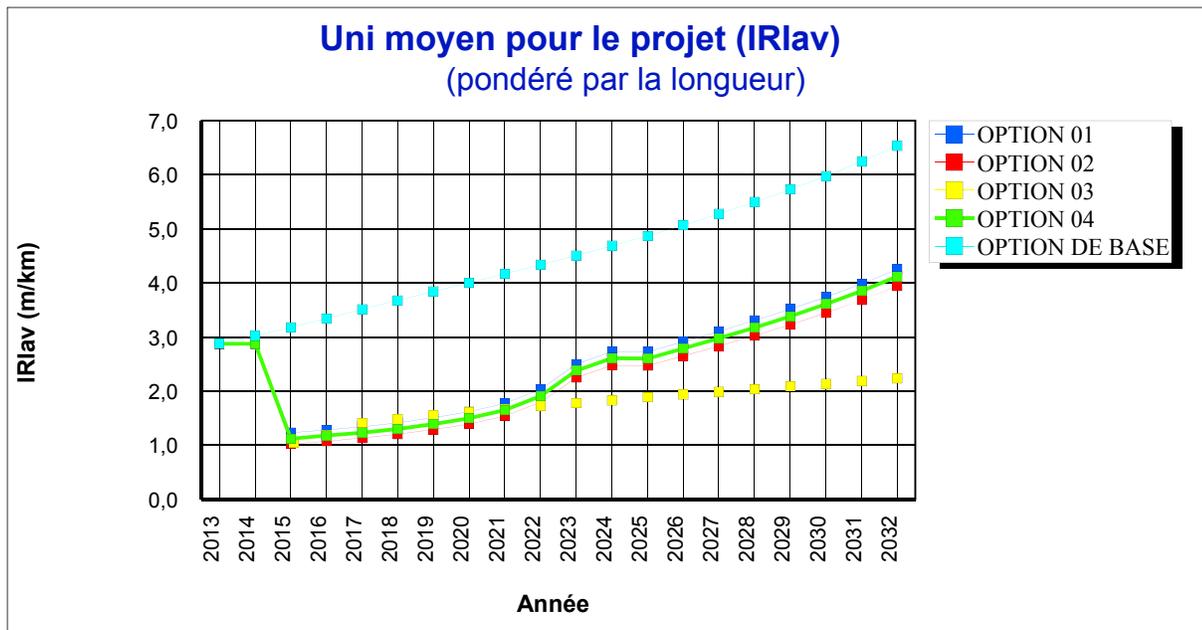


Figure 3.6 Évolution de l'uni selon le scénario de croissance du trafic fort +70%

D'après la figure 3.6, l'option de base a un IRI qui varie entre 2,9m/km à 6,6m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1,2m/km pour l'option 1, 1,1m/km pour l'option 2 et 1,1m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 4,2m/km pour l'option 1, 3,9m/km pour l'option 2 et 4,1m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2,1m/km.

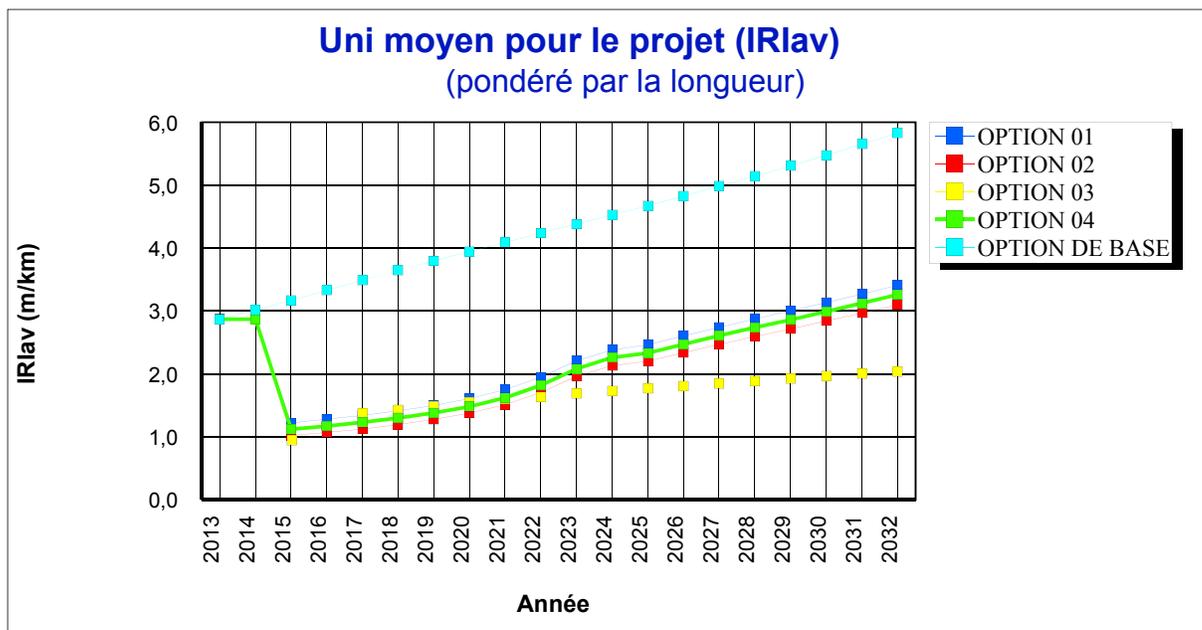


Figure 3.7 Évolution de l'uni selon le scénario du TJMA faible -25%

D'après la figure 3.7, l'option de base a un IRI qui varie entre 2,9m/km à 5,9m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1,2m/km pour l'option 1, 1,1m/km pour l'option 2 et 1,1m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 3,4m/km pour l'option 1, 3,2m/km pour l'option 2 et 3,3m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2,0m/km.

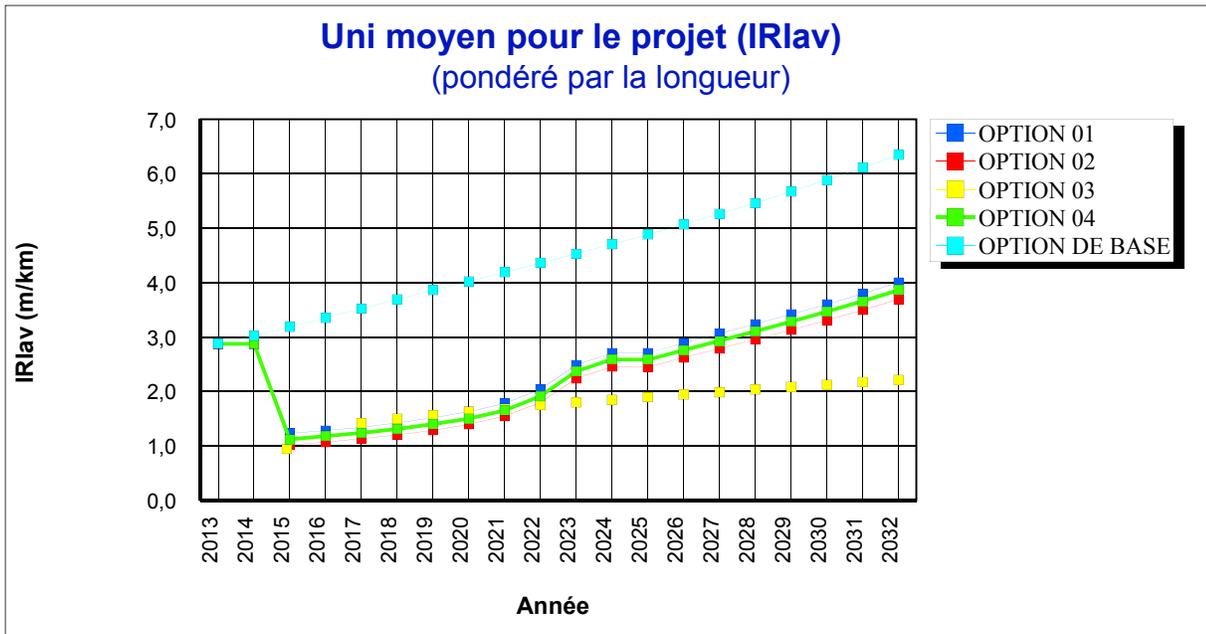


Figure 3.8 Évolution de l'uni selon le scénario du TJMA fort +25%

D'après la figure 3.8, l'option de base a un IRI qui varie entre 2,9m/km à 6,4m/km ce qui maintient à un état médiocre la chaussée tout au long du projet. Les options 1, 2 et 4 ont un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1,2m/km pour l'option 1, 1,1m/km pour l'option 2 et 1,1m/km pour l'option 4 après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 4,0m/km pour l'option 1, 3,8m/km pour l'option 2 et 3,9m/km pour l'option 4. En ce qui concerne l'option 3, il a un IRI qui décroît de 2,9m/km avant le début des travaux jusqu'à presque 1m/km après les travaux et il croît au fil des années pour atteindre 2,1m/km.

D'après l'interprétation des courbes de détérioration de l'IRI de ce projet, il ressort que, les différentes options de bitumage améliorent l'uni à la date des travaux, avec par la suite une lente détérioration. L'option 3 est en termes de confort au roulement (IRI), l'option la plus avantageuse techniquement et la plus rentable sur les 7 figures de la courbe d'évolution de l'uni avec un IRI variant de (1m à 2,1m/km) tout au long de la durée de vie de la route. Cette option coûte plus cher par rapport aux autres options, mais donne bien un IRI plus faible et moins d'entretien ce qui est un avantage considérable pour l'Afrique Subsaharienne car selon

la banque mondiale, le problème des routes en Afrique Subsaharienne est le manque d'entretien (Heggie, 1995).

3.6 Conclusion

L'approche développée dans cet article permet de mettre en évidence une méthodologie de réhabilitation des chaussées en Afrique subsaharienne basée sur l'identification de la cause de détérioration. Celle-ci vise à établir la meilleure intervention qui traite la cause de détérioration au moindre coût possible à long terme. Grâce à l'étude effectuée sur la route RN2 au Sénégal à l'aide de l'outil HDM-4 pour comparer les options d'intervention retenues, il en ressort que l'option 3 est la plus rentable en terme de confort au roulement (un bon IRI). Le béton représente une solution avantageuse dans le cadre de revêtements routiers pour soutenir les poids lourds en Afrique Subsaharienne car dans ces pays, les surcharges atteignent souvent 15 voire 20 tonnes par essieu contre 13 tonnes pour l'essieu de référence. Il est aussi important de noter que cette option de revêtement en béton coûte plus cher par rapport aux autres options, mais donne bien un IRI plus faible et moins d'entretien ce qui est un avantage considérable pour l'Afrique Subsaharienne car selon Heggie de la Banque Mondiale, le problème des routes en Afrique subsaharienne est le manque d'entretien.

CHAPITRE 4

INTÉGRATION DE L'ANALYSE ÉCONOMIQUE DANS LA GESTION DES ROUTES EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

Bienvenu Thierry Mbog Towada¹, Gabriel J. Assaf²

^{1,2}Département de génie de la construction, École de technologie supérieure,
1100, Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis en Mars 2016 à la revue les «Annales du Bâtiment et des Travaux Publics»

4.1 Résumé

D'après la Banque Mondiale, les pays d'Afrique subsaharienne sont à la traîne par rapport à ceux du monde en développement en ce qui concerne l'analyse économique dans la gestion des infrastructures routières. Ce constat nous amène dans cet article à intégrer une analyse économique dans la gestion des routes dans ces pays. Le but recherché est de permettre aux gestionnaires de bien comprendre les enjeux, d'établir les solutions les plus appropriées et de faire les interventions optimales. Tout ceci dans le but de maximiser le retour sur l'investissement en vue d'augmenter les gains en matière de croissance économique. Pour illustrer l'approche proposée, une étude de projet est effectuée. Cette étude vise à comparer plusieurs options d'intervention retenue sur un tronçon de près de 120 km de la route RN2 au Sénégal selon une approche qui repose sur une double analyse: structurale et économique en s'appuyant sur l'outil HDM-4 de l'AIPCR (Association Mondiale des routes) pour le choix de la solution dite optimale.

Mots clés: Croissance économique, analyse économique, réhabilitation des routes, Afrique subsaharienne.

4.2 Abstract

According to the World Bank, sub-Saharan African (SSA) countries are lagging behind the developing world in terms of economic analysis in the management of road infrastructure. This paper presents an integration of economic analysis in the management of roads in SSA.

The objective is to help managers to understand this issue, establish the most appropriate solutions and make optimal interventions. This is in order to maximize the return on investment for increasing the gains in economic growth. To illustrate the proposed approach, a project study is performed. This study aims to compare several intervention options chosen on RN2 road in Senegal over distance of 120 km with an approach based on a dual analysis: structural and economic analysis based on the tool HDM-4 PIARC (World Road Association) to choose the optimal solution.

Keywords: Economic growth, economic analysis, rehabilitation of roads, sub-Saharan Africa.

4.3 Introduction

4.3.1 Problématique

La géographie économique difficile de l'Afrique subsaharienne représente un défi majeur pour le développement des routes dans la région, car la plupart de ces pays n'intègrent pas l'analyse économique dans la gestion de leurs infrastructures routières. Cette situation amène les gestionnaires de la route à choisir des solutions qui s'avèrent très coûteuses pour l'administration et les usagers de la route et qui ont un impact négatif sur la croissance économique.

C'est dans ce contexte que cet article propose comme objectif, une intégration de l'analyse économique dans chaque projet afin de permettre aux gestionnaires de choisir la solution à long terme la moins coûteuse qui permettra d'atteindre sa durée de vie attendue. Celle-ci permettra la construction de nouvelles routes, leur entretien ainsi que la réhabilitation des infrastructures existantes ou des nouvelles fraîchement aménagées, le tout à des prix raisonnables afin d'augmenter les gains en matière de croissance économique.

4.3.2 État de l'art

4.3.2.1 Revue de la littérature

Peu d'études et d'articles font état de l'analyse économique dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne d'où la nécessité d'en faire l'intégration dans cet article. L'analyse économique a pour philosophie d'être un outil d'aide à la décision, d'avoir les résultats et les non décisions et d'être un processus analytique rigoureux et crédible (Laplante, 2010). Contrairement aux pays d'Afrique subsaharienne, les pays développés intègrent l'analyse économique dans la gestion des infrastructures routières, ce qui leurs procurent les bénéfices suivants (Assaf, 2010):

- une meilleure information pour les décisions;
- les stratégies de réhabilitation améliorées;
- une intégration des coûts d'exploitation des véhicules;
- un soutien pour argumenter les options;
- la réduction au minimum des coûts à long terme;
- l'augmentation au maximum des bénéfices à long terme;
- le choix de la meilleure solution pour un projet routier.

Les analyses économiques les plus fréquentes sont l'analyse des retombées économiques, avantages-coûts et bénéfices-coûts. Ces analyses permettent aux gestionnaires de bien comprendre les enjeux et de prendre les décisions financières dans l'intérêt du projet. Sans aller en profondeur dans chacune de ces analyses, voici les définitions des trois principales analyses économiques. L'analyse des retombées économiques consiste à mesurer l'impact économique de cette dépense sur la création d'emplois, la valeur ajoutée au prix de base, la fiscalité et la parafiscalité (Laplante, 2010). L'analyse avantages-coûts (AAC) est une technique visant à mesurer la valeur d'un projet, d'un programme, d'une politique ou d'une réglementation du point de vue de l'ensemble de la société. Il prend en compte le bien-être des individus pour calculer le bénéfice net qu'en retire la société et sert à déterminer si le projet est viable du point de vue de la société et s'il doit être financé (Laplante, 2010).

L'analyse des bénéfices et des coûts et l'analyse de rentabilité financière visent à comparer, sur une base monétaire commune, les projets ou les solutions possibles d'un projet, en mesurant les bénéfices et les coûts économiques occasionnés par chacun d'entre eux, en vue d'établir celui qui sera le plus rentable économiquement (Laplante, 2010).

4.3.2.2 La situation du réseau routier en Afrique subsaharienne

Le réseau routier en Afrique subsaharienne est peu dense en comparaison avec celui d'autres régions développées voire même en développement, *tel qu'en Asie par exemple*, et ne couvre environ que 4,2 km/km² de la superficie disponible (Pambou, 2013). Cependant, étant donné le revenu moyen peu élevé de la population de la région et donc sa maigre capacité à supporter financièrement les coûts d'entretien, force est d'admettre que la densité du réseau routier commence à apparaître élevée. Ceci se manifeste déjà par le déficit d'entretien chronique observé dans les pays d'Afrique sub-saharienne et rapporté par plusieurs organisations internationales (Pambou, 2013). L'entretien est toutefois d'autant plus nécessaire que, selon les résultats du diagnostic national des infrastructures routières en Afrique subsaharienne, 16% seulement des 1,8 million de kilomètres de routes étaient revêtues en 2007 (Kumar et Barrett, 2008). La nécessité de l'entretien est évidemment plus critique pour des routes non revêtues, et le fardeau également plus grand. Nivelier régulièrement et recharger 10 cm de granulaire périodiquement sur toute la route revient plus cher que boucher quelques trous après 10 ans. Il faut toutefois rajouter dans la balance qu'il s'agit principalement de routes à faible débit qui représentent plus de 75 % du réseau routier subsaharien (Pinard et al., 2003) et qu'à ce titre, le bitumage n'est pas économiquement justifié. Pour ce qui concerne leur classification fonctionnelle, et de façon générale, les routes en Afrique subsaharienne peuvent être réparties en quatre catégories: routes nationales, routes principales, routes secondaires et routes de desserte. Le choix des caractéristiques de ces routes est généralement fonction de la circulation (Zilioniene et al., 2007).

En termes de volume de trafic, et de façon très générale, on a:

- les routes nationales avec généralement plus de 5 000 véhicules par jour et qui sont bien sûr bitumées;

- les routes principales avec 100 à 5 000 véhicules par jour et qui sont généralement bitumées, rien qu'à cause de leur classification fonctionnelle de routes principales, *ce qui leur assure de facto une reconnaissance politico-sociale et donc le bitumage*;
- les routes secondaires avec 50 à 800 véhicules par jour, qui sont souvent en gravier ou en terre, ou parfois recouvertes d'un enduit superficiel;
- les pistes carrément rurales dites de desserte associées au désenclavement des régions éloignées et qui desservent moins de 100 véhicules par jour. Celles-ci ne sont pas toujours adéquatement répertoriées et sont même parfois gérées par une cellule soit locale (direction régionale) ou encore centrale mais séparée, dite direction des pistes rurales.

Alors que les chaussées représentent un actif important dans les pays d'Afrique subsaharienne, qu'il faut manifestement préserver, force est toutefois d'admettre que l'absence d'entretien, faute de moyens, demeure le principal défi de la durée de vie de ces chaussées, autant pour les autorités administratives, politiques et les bailleurs de fonds. En effet, l'évolution des dégradations de surface s'accélère généralement dès lors qu'on atteint un certain niveau de détérioration par suite de l'action généralement conjuguée de l'eau, qui fait chuter la portance des couches constitutives (Pambou, 2013). Ceci est d'autant plus grave que les charges lourdes qui s'exercent sur ces chaussées sont extrêmement élevées par manque de contrôle, laxisme, pouvoir politique prépondérant des transporteurs pour qui il est plus rentable de surcharger, ou encore carrément la corruption des gendarmes et opérateurs des stations de pesées lorsque les essieux sont surchargés selon l'UEMOA (Union Économique Monétaire Ouest Africaine) (Trade et Hub, 2012) et la CEMAC (Communauté Économique et Monétaire de l'Afrique Centrale) (Cabanius, 2003) qui recommandent, en vain, de limiter les charges sur essieux.

4.4 Méthodologie

4.4.1 Méthodologie d'intégration de l'analyse économique dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne

Pour réhabiliter une chaussée en assurant un faible coût de travaux tout au long du cycle de vie de la route, il faut effectuer, avant le début des travaux, une analyse économique et trouver les solutions appropriées. Cette méthodologie s'articule comme suit:

- évaluer les défauts de la route à réhabiliter et sectionner la route en zones homogènes de trafic, topographie, état de la route et profil en travers type;
- choisir et définir les différentes options de réhabilitation de la route;
- ressortir le prix unitaire du km de route de chaque option à partir des prix unitaire de l'estimation des travaux;
- effectuer à l'aide de l'outil HDM-4, une analyse économique, une analyse de sensibilité avec la méthode essai-erreur et définir les scénarios examinés ici qui font varier les paramètres suivants, pris individuellement:
 - Coûts d'investissement des travaux (+/-25%);
 - Croissance du trafic normal (+/-70%);
 - TMJA du trafic normal post-travaux (+/-25%).
- dégager les interventions qui seront retenues en choisissant la solution qui a le plus grand bénéfice actualisé (VPN) et le plus grand taux de rendement interne (TRI) supérieur au taux d'actualisation.

La figure 4.1 ci-dessous représente l'arborescence structurée pour l'étude économique d'une réhabilitation.

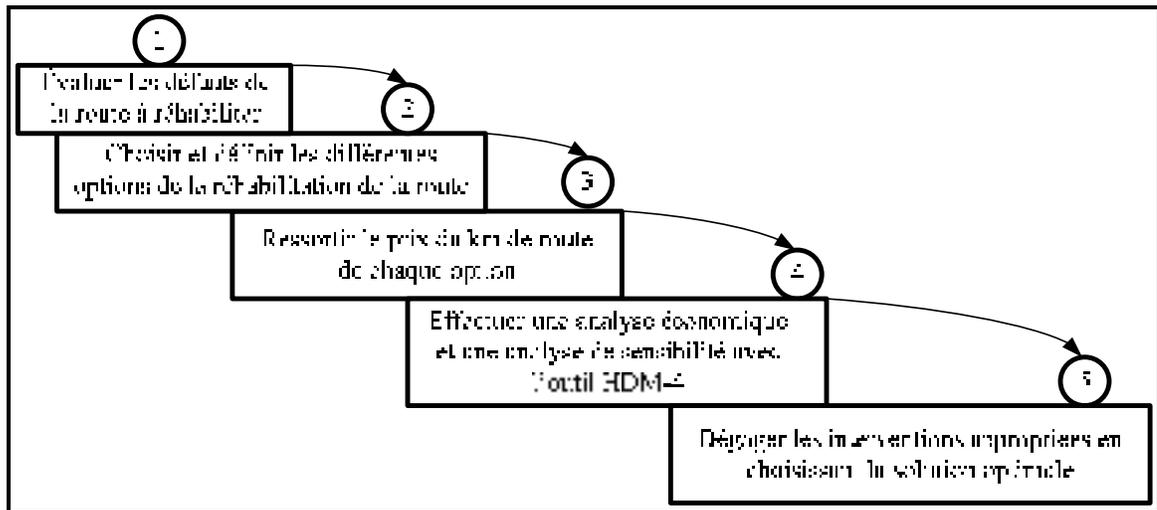


Figure 4.1 Arborescence structurée pour l'étude économique d'une réhabilitation

4.5 Résultats et discussions

L'analyse économique devrait être utilisée pour la conception de n'importe quel projet de construction ou de réhabilitation. L'exemple suivant fait allusion à une étude expérimentale qui a été effectuée dans un pays d'Afrique subsaharienne à savoir le Sénégal en Afrique de l'ouest. Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé le logiciel HDM-4 (Kerali, Odoki et Stannard, 2005) pour permettre d'évaluer les choix d'investissement et aider les gestionnaires à prévoir les bénéfices économiques des investissements concernant ces infrastructures et comparer les bénéfices de chaque option. Pour justifier le choix de la méthodologie de réhabilitation des chaussées, une comparaison a été effectuée entre diverses options retenues pour ce projet de réhabilitation à l'option de base (option de non intervention majeure).

HDM-4 est un outil flexible qui permet de modéliser la détérioration des chaussées dans le temps selon les interventions qui y sont appliquées, d'évaluer la viabilité économique de diverses alternatives de réhabilitation et les stratégies d'entretien des chaussées à moyen et long termes (Watanatada et al., 1987). Il a été développé par la Banque Mondiale et diverses autres organisations sous l'égide de l'Association Internationale Permanente des Congrès de la Route (AIPCR) par l'équipe de l'Université de Birmingham pour justifier le choix de la méthodologie de réhabilitation des chaussées. Dans le cadre de ce travail, HDM-4 a permis

d'utiliser les modèles empiriques basés sur des expériences réelles réalisées sur la route RN2 au Sénégal pour simuler l'évolution du comportement des chaussées selon diverses options de réhabilitation. Il a aussi permis d'effectuer une analyse de sensibilité pour voir l'effet de l'écart entre les données fournies au système ainsi que des hypothèses retenues, par rapport aux données réelles. De mesurer la robustesse des recommandations qui demeurent sujettes aux estimations des paramètres d'entrées significatifs, et cela par rapport à chacun des paramètres, tels le coût d'investissement des travaux, la croissance du trafic normal des véhicules et le trafic moyen journalier annuel (TJMA) post-travaux.

Le tableau 4.1 donne le processus de l'analyse du cycle de vie des projets en HDM-4.

Tableau 4.1 Processus de l'analyse du cycle de vie des projets en HDM-4

INTRANTS	MODÈLES	EXTRANTS
Type de véhicule, volume, taux d'accroissement, chargement, paramètres physiques, terrain, précipitation, géométrie de la chaussée, coûts unitaires	Début du cycle d'analyse	
Type de chaussée, capacité portante, âge, condition, ECAS	↓ Détérioration de la route	Fissures, arrachement, nids de poules, ornières (chaussée); propriétés des matériaux, uni (IRI).
Géométrie de la route et IRI, vitesse de véhicule, paramètres de congestion, coûts unitaires Travaux routiers et stratégies	↓ Effets aux usagers de la route	Carburant, huile, pneu, entretien, coûts fixes, vitesse, temps de voyage, coûts aux usagers routiers.
Géométrie de la route, texture, caractéristiques de véhicules	↓ Effets des travaux	Fissures, arrachement, nids de poule, ornière, chaussée, qualité de travaux, coûts à l'administration.
Développement, accident, bénéfices et coûts exogènes, environnement	↓ Effets socio-environnementaux	Niveaux des émissions, bilan énergétique, nombre d'accidents.
	↓ Analyse économique	Coûts et bénéfices y compris les bénéfices exogènes.
	↓ Fin du cycle d'analyse	Coûts totaux des composants; VPN et TRI par section.

4.5.1 Étude de la route RN2 au Sénégal

4.5.1.1 Données du projet

Dans le cadre de la mise en œuvre d'un nouveau programme d'assistance étrangère, le gouvernement des États-Unis d'Amérique a créé le Millennium Challenge Corporation (MCC), le 23 janvier 2004. La mission du MCC consiste à réduire la pauvreté en appuyant la croissance économique durable et transformative dans les pays en voie de développement. Le 16 septembre 2009, le MCC et le gouvernement du Sénégal ont signé un accord de subvention de cinq (5) ans d'un montant de 540 millions de dollars US, pour financer un programme conçu pour réduire la pauvreté à travers des interventions ciblées portant sur l'agriculture, le transport et les infrastructures sociales. C'est ainsi que pour l'exécution de ce compact, le Millennium Challenge Account - Sénégal (MCA-Sénégal) a été créé pour mettre en œuvre les travaux de réhabilitation de la route RN2 entre Richard Toll et N'Dioum d'un linéaire total de 120 km.

Les principaux acteurs de ce projet sont :

- le Millennium Challenge Account – Sénégal (MCA-Sénégal) est le Maître d'Ouvrage;
- l'Agence des Travaux et de Gestion des Routes (AGEROUTE) agit comme Assistant du Maître d'Ouvrage;
- le Consultant est identifié comme le Bureau d'Études CIRA – Ingénieurs Conseils;
- l'entreprise qui exécute les travaux et le groupement CSE/SOSETER;
- le financement est assuré par le Millennium Challenge Corporation (MCC).

4.5.1.2 Option retenue pour l'appel d'offres par le bureau d'études

L'option proposée par le bureau d'études est l'option 1. Elle consiste à un élargissement de la chaussée existante par un décaissement de 40 cm de matériaux puis un apport de 15 cm de nouveaux matériaux de caractéristique d'une couche de fondation, la mise en œuvre d'une couche de base de 20 cm de latérite-ciment sur la largeur de la plateforme et la mise en œuvre d'un revêtement en béton bitumineux de 5 cm. Dans cette option, le bureau d'études a

utilisé la méthode CEBTP (Dione, 2011) combinaison des indices de qualité avec le trafic, pour déterminer une structure de renforcement. Les vérifications ont été faites par le logiciel Alizé (Duhamel et al., 2005) pour s'assurer que les contraintes ainsi que les déformations enregistrées sont inférieures aux limites admissibles. Un entretien périodique est prévu au moins tous les 10 ans tout dépendant de la dégradation de la chaussée.

4.5.1.3 Option résultant de l'application de l'approche proposée dans cet article

Dans cet article, trois options ont été proposées en dehors de l'option de base (option de non intervention majeure) pour l'application de l'approche proposée à savoir les options 2, 3 et 4. Rappelons que l'option 1 est celle du bureau d'études laquelle fut détaillée à la section 4.5.1.2.

En ce qui concerne l'option de base, elle consiste à faire un entretien courant durant toute la durée de vie de la chaussée en réalisant les réparations mineures telles que la réparation des rives, le scellement des fissures et le rapiéçage des nids de poule sur la chaussée.

L'option 2, quant à elle, consiste à pulvériser l'enrobé sur une épaisseur de l'ordre de 35 cm, valoriser les matériaux retirés sur la route avec un ajout de 2,5% à 3% de ciment sur 30 cm avec ou sans correction granulométrique pour réduire la teneur des fines au besoin par l'apport de la pierre nette. Ceci aura pour conséquence de stabiliser 30 cm de couche de base afin d'augmenter la résistance structurale de la route. Le CBR amélioré à 95% OPM doit être supérieur ou égal à 160 pour la couche de base et le module entre 1000 et 2000 MPa max (CEBTP, 1984). Un nouveau revêtement de 5 cm de béton bitumineux est posé à la fin. Un entretien périodique est effectué tous les 10 ans dès l'apparition de dégradation sur la surface de la chaussée.

L'option 3 consiste à maintenir la structure existante comme fondation, puis de mettre une couche de 20 cm de béton de ciment (dalles courtes goujonnées) comme revêtement. Selon les modèles de comportement développés par Luc Rens (Rens, 2013) du centre de recherche

routière en Belgique, cette opération peut jusqu'à tripler la durée de vie de la route à cause des lois de comportement de béton et son entretien sera réduit selon les observations rapportées.

Enfin l'option 4, consiste à enlever 5 cm d'enrobé au maximum sur la route principale, de réparer les trous, de corriger le profil et de faire un rechargement d'enrobé neuf de 5 cm. Un entretien périodique qui va consister à procéder au renouvellement du revêtement en béton bitumineux selon une épaisseur qui dépendra du trafic ou tous les 10 ans dès l'apparition de dégradations prononcées sur la surface de la chaussée.

4.5.1.4 Données d'identification du projet avant la réhabilitation

Le tableau 4.2 ci-dessous fournit les données d'identification du projet avant la réhabilitation, à savoir par exemple que la longueur est de 120 km, la largeur est de 4 à 6 m, le nombre de voies est de 2 et l'IRI moyen est de 2,9 m/km. Cet IRI a été mesuré avec un analyseur du profil en long (APL) et étalonné par huit sections de 200 m à la mire et au niveau. L'exactitude et la répétabilité sur l'APL sont de moins de 10%.

Tableau 4.2 Données d'identification du projet avant la réhabilitation (RN2)

Identification du projet	RN2
Longueur du projet	120 km
Largeur de la chaussée sur tout le projet	4 à 6 m
Nombre de voies	2,00
Nombre de trottoirs	2 x 1,00 m
TJMA (2009), véhicules par jour	876
Sens du trafic	2 sens
Vitesse limite	80 km/h

Identification du projet	RN2
Climat de type sahélien	9 à 10 mois (octobre-Juillet) saison sèche
	2 à 3 mois (fin Juillet-Début octobre) saison pluvieuse
Pluviométrie moyenne annuelle	265 mm
Pluviométrie maximale journalière	47 mm
IRI moyen	2,9 m/km
Épaisseur des couches de la chaussée existante	Fondation: 400 mm
	Base: 200 mm
	Revêtement: 50 mm
Capacité de portance du sol, CBR	Sol de plateforme: CBR 21%

4.5.1.5 Données d'identification du projet après la réhabilitation

Le tableau 4.3, fournit quelques données du projet après la réhabilitation, par exemple que la largeur moyenne en section courante est de 7,20 m et celle en agglomération est de 11 m.

Tableau 4.3 Données d'identification du projet après la réhabilitation (RN2)

Caractéristique de la nouvelle route à aménager et à réhabiliter	RN2
Vitesse de référence	80 km/h et (60 km/h en agglomération)
Pente minimale des talus en remblais	3/2 (3 horizontal, 2 vertical)
Pente minimale des talus en déblais	1/2 (1 horizontal, 2 vertical)
Charge maximale à l'essieu	13t (tonnes)
Mise hors d'eau	obligatoire

Caractéristique de la nouvelle route à aménager et à réhabiliter	RN2
Largeur de la chaussée en section courante et en agglomération	2 x 3,60 m = 7,20 m
Largeur des accotements	Section courante: 2 x 1,50 m = 3 m
	En agglomération: 2 x 2,00 m = 4 m
Largeur de la chaussée dans l'agglomération de N'Dioum	4 x 2,75 m = 11 m
Largeur des accotements dans l'agglomération de N'Dioum	2 x 1,75 m = 3,5 m
IRI post-travaux	1,5 m/km
Longueur de la chaussée	Section courante: 110,5 km
	En agglomération: 6,45 km
Longueur de la chaussée dans l'agglomération de N'Dioum	3,05 km
Taux de croissance	Trafic normal : 3,5% - 4,55%
	Trafic induit : 30% (15% grâce au projet routier RN2 et 15% grâce à d'autres projets dans la zone du projet.
Période d'analyse du projet	20 ans
Durée des travaux de réhabilitation du projet	24 mois
Date du début des travaux de réhabilitation du projet	13 janvier 2013
Date de mise en œuvre du projet	13 janvier 2015

4.5.1.6 Les paramètres de l'analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour examiner la robustesse des conclusions de l'étude: le coût d'investissement des travaux, la croissance du trafic normal des véhicules et

le trafic moyen journalier annuel (TJMA) post-travaux. Pour le choix des paramètres, la méthode utilisée a été la méthode essai-erreur qui est caractérisée par des essais divers qui sont continus jusqu'au succès de la recherche. Les scénarios examinés ici font varier les paramètres suivants, pris individuellement:

- coûts d'investissement des travaux (+/- 25%);
- croissance du trafic normal (+/- 70%);
- TMJA du trafic normal post-travaux (+/- 25%).

4.5.1.7 Les différents défauts et les causes de détériorations du projet de la RN2

Le projet a été divisé en 11 sections toutes dépendantes des dégradations et des profils en travers types de chaque section. Le tableau 4.4 tabule les différentes sections, leurs dégradations ainsi que leurs profils en travers type.

Tableau 4.4 Différentes sections de la route, leurs dégradations et leurs profils en travers type

PKi	PKf	Profil en travers	section	Dégradations
0+000	29+350	PT1	1	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages fins à mailles larges sans arrachements, faïençages, fissures transversales, âge (plumage ponctuel), épaufrures de rive.
29+350	30+550	PT2	2	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, pelade, âge (plumage ponctuel), épaufrures de rive, fissures transversales, désenrobage, peignage, plumage.
30+550	48+750	PT1	3	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.

PKi	PKf	Profil en travers	section	Dégradations
48+750	50+200	PT2	4	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
50+200	62+550	PT1	5	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
62+550	64+750	PT2	6	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
64+750	89+050	PT1	7	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
89+050	90+650	PT2	8	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
90+650	111+700	PT1	9	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
111+700	114+750	PT3	10	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.
114+750	120+000	PT1	11	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuaage, épaufrures de rives.

Les profils en travers types PT1, PT2 et PT3 correspondent aux cas ci-après:

PT1:

profil en travers à deux voies en rase campagne (chaussée: 2 x 3,60 m et accotements: 2 x 1,50 m).

PT2:

profil en travers à deux voies en agglomération (chaussée: 2 x 3,60 m et accotements: 2 x 2,00 m).

PT3:

profil en travers en 4 voies en agglomération (Chaussée: 4 x 2,75 m et accotements: 2 x 1,75 m).

4.5.1.8 Les hypothèses prises en compte lors de notre simulation sur HDM-4

Un appel d'offre pour effectuer les travaux selon l'option 1 proposée par le bureau d'étude a permis de sélectionner un entrepreneur général. Les niveaux de prix pratiqués au Sénégal et spécifiquement dans la zone du projet ont également permis au consultant d'arrêter les prix unitaires qui seront utilisés dans le cadre de l'estimation des travaux. Les coûts de la réhabilitation proposée ont été estimés à partir des quantités de l'avant métré détaillé des travaux sortis du logiciel de conception du projet (Piste) et des plans présentés dans le dossier des pièces graphiques du dossier d'appel d'offres (APD).

Les différents aménagements des autres options retenues dans cet article ont été évalués d'abord quantitativement, ensuite nous avons appliqué les prix unitaires de l'entrepreneur retenu pour le projet y compris pour le béton pour aboutir à un coût global pour l'aménagement de chaque option.

Option 1:

option du bureau d'étude: le prix du km de route est de 601 682 \$.

Option 2:

option de pulvo-stabilisation/correction granulométrique et resurfaçage: le prix du km de route est de 592 170 \$.

Option 3:

option béton de ciment de 20 cm: le prix du km de route est de 718 952 \$.

Option 4:

option resurfaçage direct en enrobé. Épaisseur: 5 cm: le prix du km de route est de 464 446 \$.

4.5.2 Présentation et interprétation des résultats de l'étude de la RN2 au Sénégal

La première évaluation des résultats porte sur l'interprétation des résultats de l'analyse économique et de l'analyse de sensibilité.

4.5.2.1 L'analyse économique

Dans le cadre de cette étude, l'interprétation des résultats de chacune des options a permis de faire la comparaison avec l'option de base. Cette comparaison est illustrée dans les tableaux 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8. Notons que les coûts sont en millions de dollars US.

Tableau 4.5 Option 1 comparée à l'option de base (RN2)

Coûts en M\$	Surcoûts à l'administration		Économie du CEV motorisé.	Économie coût du temps véhicule motorisé.	Bénéfice net VPN
	Investissement	Fonctionnement			
Non actualisé	73,29	-0,09	50,00	3,57	-19,63
Actualisé (2013)	69,96	1.41	15,07	1,24	-55,07

En ce qui concerne le tableau 4.5, Si on avait choisi l'option 1 pour la réhabilitation de ce projet en 2013, la route devrait être réhabilitée pour une durée de 20 ans et tous les 10 ans, on devrait faire un entretien périodique pour la remettre en état. Cela demanderait à l'administration routière de faire un investissement actualisé de l'ordre de 70 millions de dollars US pour réaliser une économie en coût d'exploitation des véhicules (CEV) de l'ordre

de 15 millions de dollars US et un bénéfice net actualisé (VPN) de l'ordre de -55 millions de dollars US par rapport à l'option de base.

Tableau 4.6 Option 2 comparée à l'option de base (RN2)

Coûts en M\$	Surcoûts à l'administration		Économie du CEV motorisé.	Économie coût du temps véhicule motorisé.	Bénéfice net VPN
	Investissement	Fonctionnement			
Non actualisé	71,06	-0,09	52,23	3,53	-15,21
Actualisé (2013)	67,83	1,41	15,53	1,22	-52,49

Dans le tableau 4.6, si on avait choisi l'option 2 pour la réhabilitation de ce projet en 2013, la route devrait être réhabilitée pour une durée de 20 ans et tous les 10 ans, on devrait faire un entretien périodique pour la remettre en état. Cela demanderait à l'administration routière de faire un investissement actualisé de l'ordre de 68 millions de dollars US pour réaliser une économie en coût d'exploitation des véhicules (CEV) de l'ordre de 15 millions et demi de dollars US et un bénéfice net actualisé (VPN) de l'ordre de -52 millions et demi de dollars US par rapport à l'option de base.

Tableau 4.7 Option 3 comparée à l'option de base (RN2)

Coûts en M\$	Surcoûts à l'administration		Économie du CEV motorisé.	Économie coût du temps véhicule motorisé.	Bénéfice net VPN
	Investissement	Fonctionnement			
Non actualisé	86,27	-3,11	269,23	48,98	230,04
Actualisé (2013)	82,35	-1,19	96,84	16,24	31,93

Dans le tableau 4.7, si on avait choisi l'option 3 pour la réhabilitation de ce projet en 2013, la route devrait être réhabilitée pour une durée de 20 ans et pendant toute cette durée, nous

n'aurions pas besoin de faire un entretien de la route. Cela demanderait à l'administration routière de faire un investissement actualisé de l'ordre de 82 millions de dollars US pour réaliser une économie en coût d'exploitation des véhicules (CEV) de l'ordre de 97 millions de dollars US et un bénéfice net actualisé (VPN) de l'ordre de 32 millions de dollars US par rapport à l'option de base.

Tableau 4.8 Option 4 comparée à l'option de base (RN2)

Coûts en M\$	Surcoûts à l'administration		Économie du CEV motorisé.	Économie coût du temps véhicule motorisé.	Bénéfice net VPN
	Investissement	Fonctionnement			
Non actualisé	55,73	0,25	50,75	3,27	-1,96
Actualisé (2013)	53,20	1,50	15,15	1,13	-38,42

Dans le tableau 4.8, si on avait choisi l'option 4 pour l'aménagement et la réhabilitation de ce projet en 2013, la route devrait être réhabilitée pour une durée de 20 ans et tous les 10 ans, on devrait faire un entretien périodique pour la remettre en état. Cela demanderait à l'administration routière de faire un investissement actualisé de l'ordre de 53 millions de dollars US pour réaliser une économie en coût d'exploitation des véhicules (CEV) de l'ordre de 15 millions de dollars US et un bénéfice net actualisé (VPN) de l'ordre de -38 millions de dollars US par rapport à l'option de base.

Le rapport de l'analyse économique synthèse a été utilisé pour remplir les tableaux 4.9, 4.10 et 4.11 qui constituent la base pour interpréter les résultats d'une analyse de sensibilité et est représenté dans les figures 4.2 à 4.4. Notons que les coûts du bénéfice actualisés sont en millions de dollars US.

Tableau 4.9 Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par croissance du trafic (RN2)

Option d'aménagement et de réhabilitation	Indicateur	Bas	Probable	Haut
Option 1	BA	-59,67	-55,07	-48,46
	TRI	-5,1	-2,2	0,6
Option 2	BA	-57,35	-52,49	-45,36
	TRI	-4,7	-1,7	1,2
Option 3	BA	6,41	31,93	67,82
	TRI	11,0	14,4	17,8
Option 4	BA	-43,06	-38,42	-31,7
	TRI	-3,2	-0,3	2,7

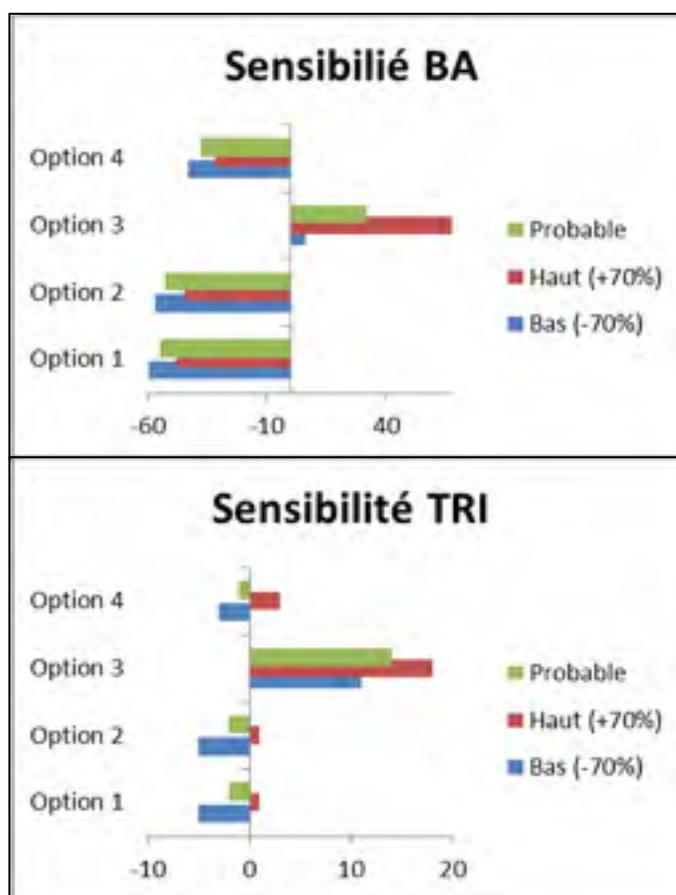


Figure 4.2 Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par croissance du trafic (RN2)

Dans le tableau 4.9 et la figure 4.2, le scénario probable correspond au scénario de base et en comparant les diverses options entre elles, tous les scénarios confirment que c'est l'option 3 qui est la plus rentable avec un bénéfice actualisé (VPN) positif et un taux de rentabilité interne (TRI) positif et supérieur au taux d'actualisation de 10%. Par contre tous les scénarios des options 1, 2 et 4 confirment que le projet n'est pas rentable avec des bénéfices actualisés (VPN) négatifs et des taux de rentabilité interne (TRI) soit négatifs, soit inférieurs au taux d'actualisation de 10%.

Tableau 4.10 Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par coût d'investissement (RN2)

Option d'aménagement et de réhabilitation	Indicateur	Bas	Probable	Haut
Option 1	BA	-37,58	-55,07	-72,56
	TRI	-0,2	-2,2	-3,8
Option 2	BA	-35,53	-52,49	-69,45
	TRI	0,4	-1,7	-3,3
Option 3	BA	52,51	31,93	11,34
	TRI	18,8	14,4	11,3
Option 4	BA	-25,12	-38,42	-51,72
	TRI	1,9	-0,3	-1,9

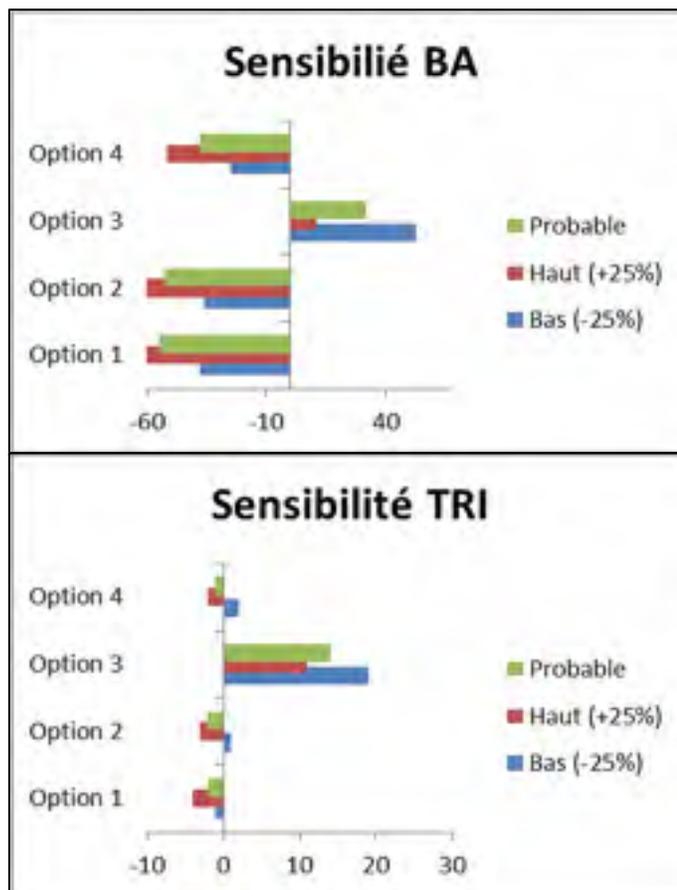


Figure 4.3 Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par coût d'investissement (RN2)

Dans le tableau 4.10 et la figure 4.3, le scénario probable correspond au scénario de base et en comparant les diverses options entre elles, tous les scénarios confirment que c'est l'option 3 qui est la plus rentable avec un bénéfice actualisé (VPN) positif et un taux de rentabilité interne (TRI) positif et supérieur au taux d'actualisation de 10%. Par contre tous les scénarios des options 1, 2 et 4 confirment que notre projet n'est pas rentable avec des bénéfices actualisés (VPN) négatifs et des taux de rentabilité interne (TRI) soit négatifs, soit inférieurs au taux d'actualisation de 10%.

Tableau 4.11 Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par TJMA (RN2)

Option d'aménagement et de réhabilitation	Indicateur	Bas	Probable	Haut
Option 1	BA	-59,94	-55,07	-50,42
	TRI	-4,4	-2,2	-0,5
Option 2	BA	-57,18	-52,49	-47,55
	TRI	-4,0	-1,7	0,1
Option 3	BA	3,03	31,93	61,37
	TRI	10,5	14,4	17,8
Option 4	BA	-42,91	-38,42	-33,73
	TRI	-2,5	-0,3	1,6

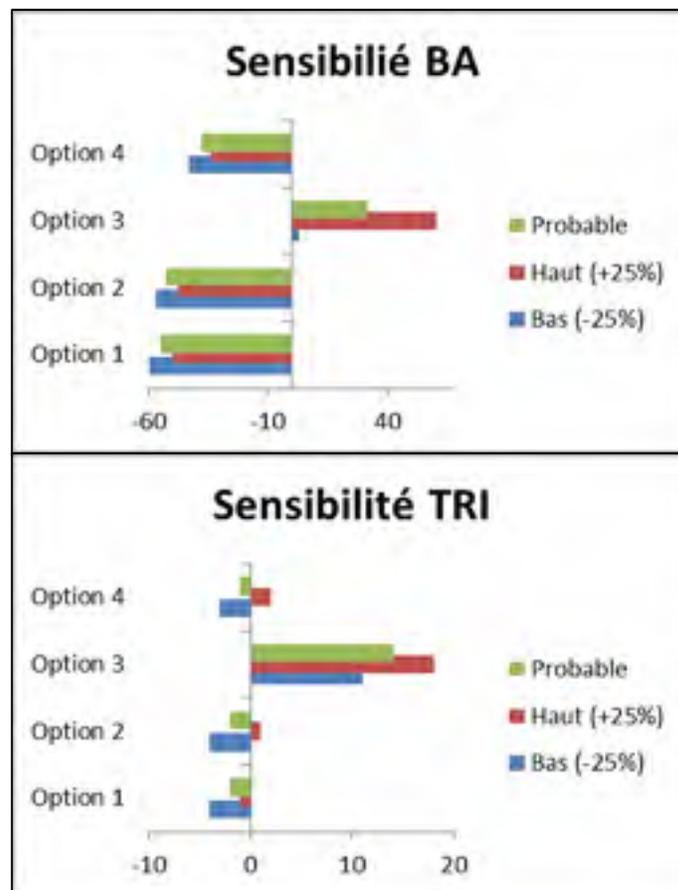


Figure 4.4 Comparaison du bénéfice actualisé (BA) et du TRI par TJMA (RN2)

Dans le tableau 4.11 et la figure 4.4, le scénario probable correspond au scénario de base et en comparant les diverses options entre elles, tous les scénarios confirment que c'est l'option 3 qui est la plus rentable avec un bénéfice actualisé (VPN) positif et un taux de rentabilité interne (TRI) positif et supérieur au taux d'actualisation de 10%. Par contre tous les scénarios des options 1, 2 et 4 confirment que notre projet n'est pas rentable avec des bénéfices actualisés (VPN) négatifs et des taux de rentabilité interne (TRI) soit négatifs, soit inférieurs au taux d'actualisation de 10%.

4.6 Conclusion

L'Afrique subsaharienne accuse un déficit énorme en matière d'infrastructures routières; Pour que ces infrastructures puissent soutenir la croissance économique, l'intégration régionale et contribuer au développement économique et social du continent, il faudrait une réelle volonté politique en termes d'entretien et de réhabilitation des chaussées. Celle-ci s'illustrerait par l'intégration de l'analyse économique à chaque projet afin de comparer les bénéfices de chaque option du projet et de choisir la technique de réhabilitation des chaussées qui tiendra compte de la solution optimale. En effet dans cet article, grâce à l'étude des projets effectués sur la route RN2 au Sénégal à l'aide de l'outil HDM-4 pour comparer les options d'intervention retenues, il ressort de cela que:

Sur la RN2, l'option 3 est la plus rentable et permet de dégager un gain d'environ 266 667 dollars US par km de route et un TRI de 14,4%.

Ce gain financier permettra à ce pays d'investir dans plusieurs éléments stratégiques de son plan de développement, ce qui augmentera les gains en matière de croissance économique. En se basant sur les résultats de cette étude de projet, il est alors préconisé lors des réhabilitations des chaussées en Afrique subsaharienne en vue d'avoir une solution moins coûteuse et durable, d'utiliser un revêtement en béton. Celle-ci contribue à l'amélioration des conditions de déplacement et rend des services à l'ensemble de la société en termes de mobilité, de sécurité et de confort. De plus, grâce à l'absence d'entretien, il est économique.

CHAPITRE 5

INTÉGRATION DE LA DIMENSION ENVIRONNEMENTALE EN GESTION DES ROUTES DANS LES PAYS D'AFRIQUE SUBSAHARIENNE

Bienvenu Thierry Mbog Towada¹, Gabriel J. Assaf²

^{1,2}Département de génie de la construction, École de technologie supérieure,
1100, Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis en Mars 2016 à la revue les «Annales du Bâtiment et des Travaux Publics»

5.1 Résumé

Cet article présente une méthodologie de réhabilitation des chaussées qui intègre la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne et permet de lutter contre le changement climatique. Le but recherché est d'aider les ingénieurs dans leurs prises de décision lors des travaux de réhabilitation des chaussées afin de diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule, ce qui permettra de lutter efficacement contre le changement climatique. Pour illustrer l'approche proposée, une étude expérimentale est effectuée. Cette étude vise à comparer plusieurs options d'intervention retenue sur un tronçon de près de 120 km de la route RN2 au Sénégal grâce à une analyse environnementale avec l'outil HDM-4 de l'AIPCR (Association Mondiale des routes) en support pour le choix de la solution optimale.

Mots clés: Impacts environnementaux, émissions de gaz à effet de serre, consommation d'énergie, dégradation de la chaussée, changement climatique, Afrique subsaharienne.

5.2 Abstract

To better integrate the different environmental impacts in road management and fight against climate change in sub-Saharan Africa, this article presents a methodology for pavement rehabilitation which makes the correlation between the energy consumption, the emissions of greenhouse gases, and the deterioration of the road and climate change in roads management

in Sub-Saharan Africa. The desired aim is to help engineers apply this methodology when performing the works of road rehabilitation, in order to reduce the emission of greenhouse gases per vehicle, which will be effective in the fight against climate change. To illustrate the proposed approach, an experimental study is performed. This study aims to compare several intervention options on a stretch of nearly 120 km of route RN2 in Senegal, through an environmental analysis with the HDM-4 tool from *PIARC* (World Road Association) in support for the choice of the optimal solution.

Keywords: environmental impacts, emissions of greenhouse gases, energy consumption, pavement degradation, climate change, sub-Saharan Africa.

5.3 Introduction

5.3.1 Problématique

Les impacts environnementaux causés par la route sont proportionnels aux caractéristiques de la chaussée. Ils sont rarement pris en compte en Afrique subsaharienne par les administrations routières dans leur processus de décision pendant les phases de conception, de réhabilitation et d'utilisation de la chaussée. Cette défaillance entraîne des choix de gestion techniquement acceptables, mais insuffisants pour la société dans son ensemble. La question qui se pose est de savoir comment on peut intégrer de façon efficace et pertinente, les effets néfastes qu'ont les routes sur leur environnement dans le processus de la gestion des infrastructures routières. La communauté internationale (Amekudzi et al., 2005) y répond en prônant l'approche du développement durable. En effet, si la gestion des routes vise à intégrer certains paramètres environnementaux pertinents dans ses processus de prise de décision, il en résulte une route plus adaptée à son environnement, c'est-à-dire moins nuisible. C'est dans cet esprit que cet article met en évidence une méthodologie de réhabilitation qui permet de réduire la consommation d'énergie et le dioxyde de carbone (CO₂) qui est d'après Seinfeld et Pandis (Seinfeld et Pandis, 2012) le principal gaz qui contribue de manière la plus significative à l'effet de serre considéré comme la principale cause du changement climatique.

5.3.2 État de l'art

5.3.2.1 Revue de la littérature

Contrairement aux pays d'Afrique subsaharienne, les pays développés ont commencé à intégrer les impacts environnementaux dans la gestion de leurs routes. La prise en compte de ces impacts environnementaux permet d'intégrer la gestion des routes dans un contexte plus global et d'établir les choix techniques concernant les chaussées qui se feront bien plus durables pour la société dans son ensemble (Amekudzi et al., 2005). Les impacts environnementaux sont souvent intégrés dans la réflexion sur les projets routiers, on parle alors d'internaliser les effets externes du transport. Mais ce n'est que récemment que les premières études faisant appel à la monétarisation de ces effets ont été utilisées dans le cadre de la gestion d'infrastructures routières (Pellecuer, 2014). L'avantage de la monétarisation est que l'impact environnemental de la route est intégré dans le calcul même des coûts et bénéfices qui la concernent (Friedrich, Rabl et Spadaro, 2001). Dès à présent, la prise en compte de l'estimation de l'impact environnemental et social des projets routiers par les organismes internationaux est une réalité (Racioppi et Dora, 2005). Les Nations Unies proposent aujourd'hui d'évaluer en continu l'impact des projets routiers sur leur environnement en mettant à contribution la participation de la population et des professionnels (Pellecuer, 2014). Cela est assuré au Québec depuis 1978 par le BAPE (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement) visant à évaluer les préoccupations environnementales sur les projets routiers en faisant appel à la participation du public. Malgré cette nécessité généralement admise, il n'en demeure pas moins que peu de gestionnaires des chaussées tiennent compte des impacts environnementaux dans leurs décisions. En effet, rares sont les administrations routières qui n'ont pas encore pris conscience de la nécessité de l'intégration des impacts environnementaux dans la gestion des routes mais qu'elle ne l'applique réellement sur le terrain (Chan, Keoleian et Gabler, 2008). Afin d'aider ces gestionnaires dans leur projet routier, certains auteurs en l'occurrence Pellecuer (2014), Lidicker et al. (2012), Zhang, Keoleian et Lepech (2012) ont développé les outils pour quantifier les impacts environnementaux. Toutefois, comme l'indique Pellecuer (2014) ces nouveaux outils de gestion ne se concentrent chacun uniquement que sur certains

impacts tels que le bruit (Ahammed et Tighe, 2010), les émissions de gaz atmosphérique (Yu et Lu, 2012) et les changements climatiques (Wang et al., 2012). Par ailleurs, Hubert (2004) montre qu'il existe un lien direct entre les émissions des gaz à effet de serre par les véhicules et la consommation en carburant de ces mêmes véhicules. Bennett et Greenwood (2001) quant à eux montrent que plus l'uni de la chaussée est mauvais plus il y a de gaz à effet de serre émis par les véhicules qui y circulent. Basé sur ces constatations et efforts, il est aisé de conclure qu'il est nécessaire d'intégrer la dimension environnementale dans les projets routiers entrepris en Afrique subsaharienne.

5.3.2.2 Les indicateurs d'impacts entre la route et l'environnement

Dans le contexte actuel où les principes du développement durable sont appelés à intégrer les pratiques de gestion, il apparaît nécessaire de prendre en compte les impacts environnementaux dans le processus de gestion des routes.

a) Les impacts de l'environnement sur la route

L'état des routes est solidaire de la structure de la chaussée c'est-à-dire, du type de chaussée et des matériaux utilisés pour sa construction. Mais d'autres facteurs comme le trafic, le climat et l'âge de la chaussée ont une influence sur la dégradation et sur l'état des chaussées (Falls et Tighe, 2004) tel qu'illustré à la figure 5.1.

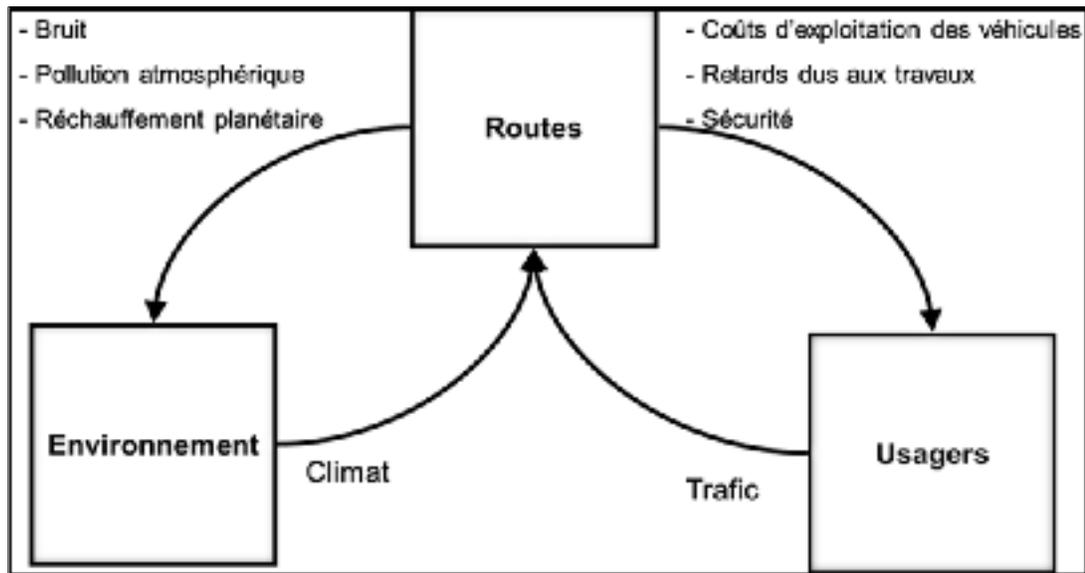


Figure 5.1 Influence des routes sur l'environnement et les usagers

Contrairement au passé où la gestion des routes ne tenait compte que des éléments directement liés à la chaussée et à son état (Kulkarni et Miller, 2003), aujourd'hui elle tient compte de son environnement pour maintenir l'efficacité de la route. La prise en compte de ces informations permet de mieux concevoir, entretenir et réhabiliter ces chaussées en prévoyant dans le temps et l'espace les dégradations qu'elles subissent. L'ensemble des caractéristiques environnementales, structurelles, mécaniques et du trafic que la chaussée devra supporter sont prises en compte par la nouvelle version du modèle OPAC (Ontario Pavement Analysis of Costs) (Tighe, He et Haas, 2001).

b) Les impacts de la route sur l'environnement

Les projets d'entretien, de réhabilitation et de construction des chaussées ont un impact non négligeable sur l'environnement et sur les usagers (Freedman, 2005). En vue de perpétuer la politique actuelle de développement durable, il est important de mentionner l'impact des routes sur divers éléments de l'environnement, soit la qualité de l'air, le réchauffement planétaire et les milieux humides. La figure 5.2 montre les mécanismes d'impact des routes sur leur environnement (Pellecuer, 2014).

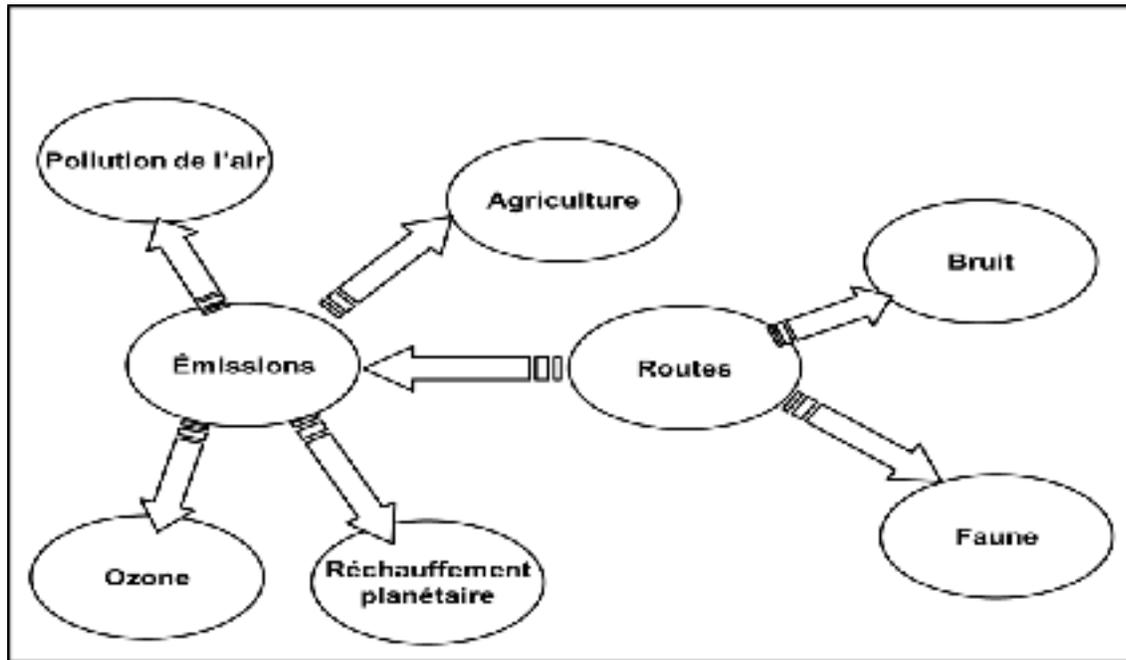


Figure 5.2 Les mécanismes d'impact des routes sur leur environnement

Il convient de noter que les coûts d'exploitation des véhicules, les retards dus aux travaux et la sécurité sont les coûts aux usagers engendrés par la route. Par contre, le bruit, la pollution atmosphérique et le réchauffement planétaire sont les coûts sociaux et environnementaux engendrés par la route (Pellecuer, 2014). Le bruit routier est un élément environnemental bien couvert par la FHWA (*Federal Highway Administration*). C'est une nuisance importante pour les riverains de la route car le bruit provient essentiellement des frottements de l'air sur les véhicules, des moteurs des véhicules et l'interface pneumatique/chaussée (Bernhard et McDaniel, 2005). Il est d'ailleurs déjà pris en compte dans tous les projets routiers américains (Hasselmann, 1995). Mais il reste rarement utilisé dans les analyses de coûts et bénéfices lors de la gestion des routes (Lambert, Kail et Quinet, 1998). En ce qui concerne les émissions de gaz atmosphériques, leur accroissement est en grande partie dû à la consommation d'essence et l'arrachement de matière aux pneumatiques des véhicules qui augmentent avec la rugosité du revêtement (Bennett et Greenwood, 2001). Pour limiter cela, il faut faire une bonne planification afin de limiter les travaux à réaliser, choisir les matériaux appropriés pour une conception durable et maintenir sur le long terme un bon IRI. Le réchauffement planétaire quant à lui est dû en grande partie aux gaz à effet de serre (CO_2)

émis dans l'atmosphère et permet aux gestionnaires d'infrastructures routières de quantifier monétairement l'impact sur l'état des chaussées (Schreyer et al., 2004). Lors de la gestion des routes, il sera important de prendre en compte l'émission de gaz à effet de serre liée au mauvais état des chaussées et l'émission de gaz à effet de serre due aux travaux d'entretien et de réhabilitation des chaussées et aux congestions liées à ces travaux (Pellecuer, 2014).

c) Quantification des impacts environnementaux pour le changement climatique

Les émissions de plusieurs gaz en l'occurrence le CO₂ envoyé dans l'atmosphère, va augmenter l'effet de serre, ce qui est considéré comme la principale cause du changement climatique (Gordon, 2011). Ce changement climatique pourrait avoir des conséquences néfastes sur les chaussées, lesquels vont s'observer par:

- l'augmentation prévu des précipitations extrêmes qui vont forcément causer un affaiblissement des structures de chaussée en enrobé mais plus encore celles en gravier ou en terre et donc une durée de vie nécessairement plus courte. Ce qui nécessitera un accroissement des interventions d'entretien et possiblement des interventions de réhabilitation;
- en corollaire de la constatation précédente, l'augmentation de l'écoulement des eaux pourrait provoquer plus d'inondations, donc de l'érosion voire des emportements et des pertes d'accès. Ce qui nécessitera la conception de systèmes de drainage pour des inondations importantes et donc de facto causera l'augmentation des coûts de construction;
- l'augmentation de la température qui va nécessairement provoquer le ramollissement des bitumes qui composent les couches de roulement en enrobé bitumineux, l'accroissement des ornières, des bourrelets et du ressuage en corollaire. Ceci nécessitera la sélection de bitumes à la plage d'utilisation plus large pour réduire la sensibilité desdits bitumes à la température. En corollaire il en résultera nécessairement une prochaine intervention plus fréquente et plus coûteuse pour ce qui concerne les couches de roulement en enrobé. Il est à noter, qu'a priori, les chaussées avec revêtement en béton seront épargnées.

D'après toutes ces observations, il apparaît donc urgent d'intégrer les impacts environnementaux dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne, d'où la nécessité de présenter une méthodologie dans cet article. Celle-ci permettra de diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule, ce qui aura comme conséquence de lutter efficacement contre le changement climatique.

5.4 Méthodologie

5.4.1 Méthodologie d'intégration de la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne

Pour réhabiliter une chaussée dans le but de diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule et lutter contre le changement climatique, il faut intégrer la dimension environnementale dans chaque projet afin de trouver les solutions appropriées. Cette méthodologie s'articule comme suit:

- recueillir les informations du projet;
- évaluer les défauts de la route à réhabiliter et sectionner la route en zones homogènes de trafic, topographie, état de la route et profil en travers type;
- choisir et définir les différentes options de réhabilitation de la route;
- faire les simulations à l'aide de l'outil HDM-4 de l'AIPCR (Association Mondiale des routes) afin d'évaluer et de comparer pour chaque option choisie dans le projet, la consommation d'énergie et les émissions de gaz;
- dégager les interventions appropriées en choisissant l'option dont la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre est plus bas, ce qui donne un bon présage pour la lutte contre le changement climatique.

La figure 5.3 ci-dessous représente l'arborescence structurée pour l'étude environnementale d'une réhabilitation.

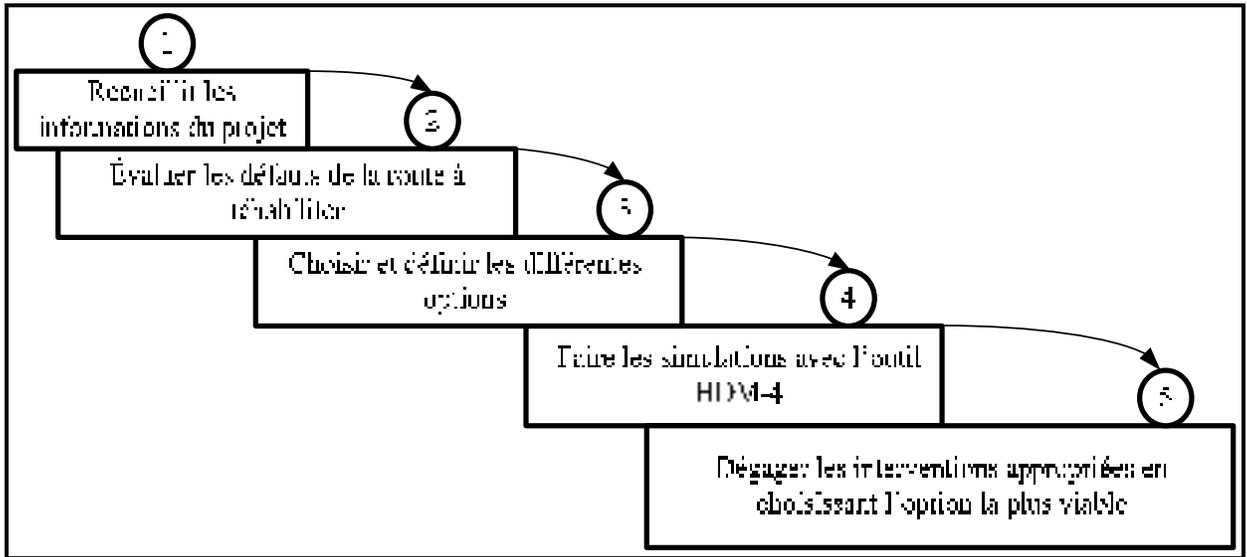


Figure 5.3 Arborescence structurée pour l'étude environnementale d'une réhabilitation

5.5 Résultats et discussion

5.5.1 Étude expérimentale

5.5.1.1 Données du projet

Dans le cadre de la mise en œuvre d'un nouveau programme d'assistance étrangère, le gouvernement des États-Unis d'Amérique a créé le Millennium Challenge Corporation (MCC), le 23 janvier 2004. La mission du MCC consiste à réduire la pauvreté en appuyant la croissance économique durable et transformative dans les pays en voie de développement. Le 16 septembre 2009, le MCC et le gouvernement du Sénégal ont signé un accord de subvention de cinq (5) ans d'un montant de 540 millions de dollars US, pour financer un programme conçu pour réduire la pauvreté à travers des interventions ciblées portant sur l'agriculture, le transport et les infrastructures sociales. C'est ainsi que pour l'exécution de ce compact, le Millennium Challenge Account - Sénégal (MCA-Sénégal) a été créé pour mettre en œuvre les travaux de réhabilitation de la route RN2 entre les villes de Richard Toll et de N'Dioum d'un linéaire de près de 120 km.

Les principaux acteurs de ce projet sont :

- le Millennium Challenge Account-Sénégal (MCA-Sénégal) à titre de Maître d'Ouvrage;
- l'Agence des Travaux et de Gestion des Routes (AGEROUTE) à titre d'Assistant technique du Maître d'Ouvrage;
- le Bureau d'Études qui a fait les études d'ingénierie;
- l'entreprise qui a exécuté les travaux;
- le MCC qui a financé l'opération par un don.

5.5.1.2 Les différentes options retenues dans ce projet

En ce qui concerne l'option de base, elle consiste à faire un entretien courant durant toute la durée de vie de la chaussée en réalisant les réparations mineures telles que la réparation des rives, le scellement des fissures et le rapiéçage des nids de poule sur la chaussée.

L'option proposée par le bureau d'études est l'option 1. Elle consiste à un élargissement de la chaussée existante par un décaissement de 40 cm de matériaux puis un apport de 15 cm de nouveaux matériaux de caractéristique d'une couche de fondation, la mise en œuvre d'une couche de base de 20 cm de latérite-ciment sur la largeur de la plateforme et la mise en œuvre d'un revêtement en béton bitumineux de 5 cm. Dans cette option, le bureau d'études a utilisé la méthode CEBTP (Dione, 2011) combinaison des indices de qualité avec le trafic, pour déterminer une structure de renforcement. Les vérifications ont été faites par le logiciel Alizé (Duhamel et al., 2005) pour s'assurer que les contraintes ainsi que les déformations enregistrées sont inférieures aux limites admissibles. Un entretien périodique est prévu au moins tous les 10 ans tout dépendamment de la dégradation de la chaussée.

L'option 2, quant à elle, consiste à pulvériser l'enrobé sur une épaisseur de l'ordre de 35 cm, valoriser les matériaux retirés sur la route avec un ajout de 2,5% à 3% de ciment sur 30 cm avec ou sans correction granulométrique pour réduire la teneur des fines au besoin par l'apport de la pierre nette. Ceci aura pour conséquence de stabiliser 30 cm de couche de base afin d'augmenter la résistance structurale de la route. Le CBR amélioré à 95% OPM doit être

supérieur ou égal à 160 pour la couche de base et le module entre 1000 et 2000 MPa max (CEBTP, 1984). Un nouveau revêtement de 5 cm de béton bitumineux est posé à la fin. Un entretien périodique est effectué tous les 10 ans dès l'apparition de dégradation sur la surface de la chaussée.

L'option 3 consiste à maintenir la structure existante comme fondation, puis de mettre une couche de 20 cm de béton de ciment (dalles courtes goujonnées) comme revêtement. Selon les modèles de comportement développés par Luc Rens (Rens, 2013) du centre de recherche routière en Belgique, cette opération peut jusqu'à tripler la durée de vie de la route à cause des lois de comportement de béton et son entretien sera réduit selon les observations rapportées.

Enfin l'option 4, consiste à enlever 5 cm d'enrobé au maximum sur la route principale, de réparer les trous, de corriger le profil et de faire un rechargement d'enrobé neuf de 5 cm. Un entretien périodique qui va consister à procéder au renouvellement du revêtement en béton bitumineux selon une épaisseur qui dépendra du trafic ou tous les 10 ans dès l'apparition de dégradations prononcées sur la surface de la chaussée.

5.5.1.3 Méthode de l'étude

Pour réaliser cette étude sur la RN2, nous avons utilisé le logiciel HDM-4 (Kerali, Odoki et Stannard, 2005) dans le but d'évaluer et de comparer pour chaque options choisie dans l'étude de ce projet de réhabilitation, la consommation d'énergie et les émissions de gaz. Et enfin, de voir leurs impacts sur le changement climatique de chaque option du projet.

HDM-4 un outil flexible qui permet de modéliser la détérioration des chaussées dans le temps selon les interventions qui y sont appliquées, d'évaluer la viabilité économique de diverses alternatives de réhabilitation et les stratégies d'entretien des chaussées à moyen et long termes (Watanatada et al., 1987). Il a été développé par la Banque Mondiale et diverses autres organisations sous l'égide de l'Association Internationale Permanente des Congrès de

la Route (AIPCR) par l'équipe de l'Université de Birmingham pour justifier le choix de la méthodologie de réhabilitation des chaussées. Dans le cadre de ce travail, HDM-4 a permis d'utiliser les modèles empiriques basés sur des expériences réelles réalisées sur la route RN2 au Sénégal pour simuler l'évolution du comportement des chaussées selon diverses options de réhabilitation. Il a aussi permis d'effectuer une analyse de sensibilité pour voir l'effet de l'écart entre les données fournies au système ainsi que des hypothèses retenues, par rapport aux données réelles. De mesurer la robustesse des recommandations qui demeurent sujettes aux estimations des paramètres d'entrées significatifs, et cela par rapport à chacun des paramètres, tels le coût d'investissement des travaux, la croissance du trafic normal des véhicules et le trafic moyen journalier annuel (TJMA) post-travaux.

Le tableau 5.1 ci-dessous fournit les données d'identification du projet avant la réhabilitation, à savoir par exemple que la longueur est de 120 km, la largeur est de 4 à 6 m, le nombre de voies est de 2 et l'IRI moyen est de 2,8 m/km. Cet IRI a été mesuré avec un analyseur du profil en long (APL) et étalonné par huit sections de 200 m à la mire et au niveau. L'exactitude et la répétabilité sur l'APL sont de moins de 10%.

Tableau 5.1 Données d'identification du projet avant la réhabilitation

Identification du projet	RN2
Longueur du projet	120 km
Largeur de la chaussée sur tout le projet	4 à 6 m
Nombre de voies	2,00
Nombre de trottoirs	2 x 1,00 m
TJMA (2009), véhicules par jour	876
Sens du trafic	2 sens
Vitesse limite	80 km/h

Identification du projet	RN2
Climat de type sahélien	9 à 10 mois (octobre-Juillet) saison sèche
	2 à 3 mois (fin Juillet-Début octobre) saison pluvieuse
Pluviométrie moyenne annuelle	265 mm
Pluviométrie maximale journalière	47 mm
IRI moyen	2,9 m/km
Épaisseur des couches de la chaussée existante	Fondation : 400 mm
	Base: 200 mm
	Revêtement: 50 mm
Capacité de portance du sol, CBR	Sol de plateforme: CBR 21%

Le tableau 5.2, fournit quelques données du projet après la réhabilitation, par exemple que la largeur moyenne en section courante est de 7,20 m et celle en agglomération est de 11 m.

Tableau 5.2 Données d'identification du projet après la réhabilitation

Caractéristique de la nouvelle route à aménager et à réhabiliter	RN2
Vitesse de référence	80 km/h et (60 km/h en agglomération)
Pente minimale des talus en remblais	3/2 (3 horizontale, 2 verticale)
Pente minimale des talus en déblais	1/2 (1 horizontale, 2 verticale)
Charge maximale à l'essieu	13t (tonnes)
Mise hors d'eau	obligatoire
Largeur de la chaussée en section courante et en agglomération	2 x 3,60 m = 7,20 m

Caractéristique de la nouvelle route à aménager et à réhabiliter	RN2
Largeur des accotements	Section courante: 2 x 1,50 m = 3 m
	En agglomération: 2 x 2,00 m = 4 m
Largeur de la chaussée dans l'agglomération de N'Dioum	4 x 2,75 m = 11 m
Largeur des accotements dans l'agglomération de N'Dioum	2 x 1,75 m = 3,5 m
IRI post-travaux	1,5 m/km
Longueur de la chaussée	Section courante: 110,5 km
	En agglomération: 6,45 km
Longueur de la chaussée dans l'agglomération de N'Dioum	3,05 km
Taux de croissance	Trafic normal : 3,5% - 4,55%
	Trafic induit : 30% (15% grâce au projet routier RN2 et 15% grâce à d'autres projets dans la zone du projet.
Période d'analyse du projet	20 ans
Durée des travaux de réhabilitation du projet	24 mois
Date du début des travaux de réhabilitation du projet	13 janvier 2013
Date de mise en œuvre du projet	13 janvier 2015

5.5.1.4 Les différents défauts et les causes de détériorations du projet de la RN2

Le projet a été divisé en 11 sections toutes dépendantes des dégradations et des profils en travers types de chaque section. Le tableau 5.3 tabule les différentes sections, leurs dégradations ainsi que leurs profils en travers type.

Tableau 5.3 Les différentes sections de la route, leurs dégradations et leurs profils en travers type

PKi	PKf	Profil en travers	section	Dégradations
0+000	29+350	PT1	1	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages fins à mailles larges sans arrachements, faïençages, fissures transversales, âge (plumage ponctuel), épaufrures de rive.
29+350	30+550	PT2	2	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, pelade, âge (plumage ponctuel), épaufrures de rive, fissures transversales, désenrobage, peignage, plumage.
30+550	48+750	PT1	3	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
48+750	50+200	PT2	4	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
50+200	62+550	PT1	5	Orniérage, bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
62+550	64+750	PT2	6	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
64+750	89+050	PT1	7	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.

PKi	PKf	Profil en travers	section	Dégradations
89+050	90+650	PT2	8	Bourrelets, affaissement, flaches, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
90+650	111+700	PT1	9	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
111+700	114+750	PT3	10	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.
114+750	120+000	PT1	11	Affaissement, fissures longitudinales, faïençages, fissures transversales, nid de poule, désenrobage, pelade, plumage, ressuage, épaufrures de rives.

Les profils en travers types PT1, PT2 et PT3 correspondent aux cas ci-après:

PT1:

profil en travers à deux voies en rase campagne (chaussée: 2 x 3,60 m et accotements: 2 x 1,50 m) ;

PT2:

profil en travers à deux voies en agglomération (chaussée: 2 x 3,60 m et accotements: 2 x 2,00 m) ;

PT3:

profil en travers en 4 voies en agglomération (Chaussée: 4 x 2,75 m et accotements: 2 x 1,75 m).

5.5.2 Résultat expérimentaux et discussion

Les simulations effectuées avec le logiciel HDM-4 nous ont permis de faire ressortir les différentes émissions de gaz et la consommation d'énergie par option pour tout le projet afin de comparer les différentes options de réhabilitation du projet.

5.5.2.1 Les émissions de gaz

Le tableau 5.4 et les figures 5.4 à 5.10 ci-dessous résument les résultats obtenus des émissions des différents gaz du projet par options durant 20 ans.

Tableau 5.4 Les émissions de gaz par options durant 20 ans

Options	Quantités en tonnes durant 20 ans						
	Hydrocarbures (HC)	Monoxyde de carbone (CO)	Oxydes d'azote (NO _x)	Dioxyde de soufre (SO ₂)	Dioxyde de carbone (CO ₂)	Particules (Par)	Plomb (Pb)
Option de base	6 042	15 555	5 932	444	529 742	1 419	19
Option 1	5 993	15 442	5 892	440	525 776	1 407	19
Option 2	5 988	15 427	5 886	441	525 279	1 406	19
Option 3	3 656	10 713	4 289	254	356 848	824	18
Option 4	5 991	15 434	5 889	440	525 528	1 407	19

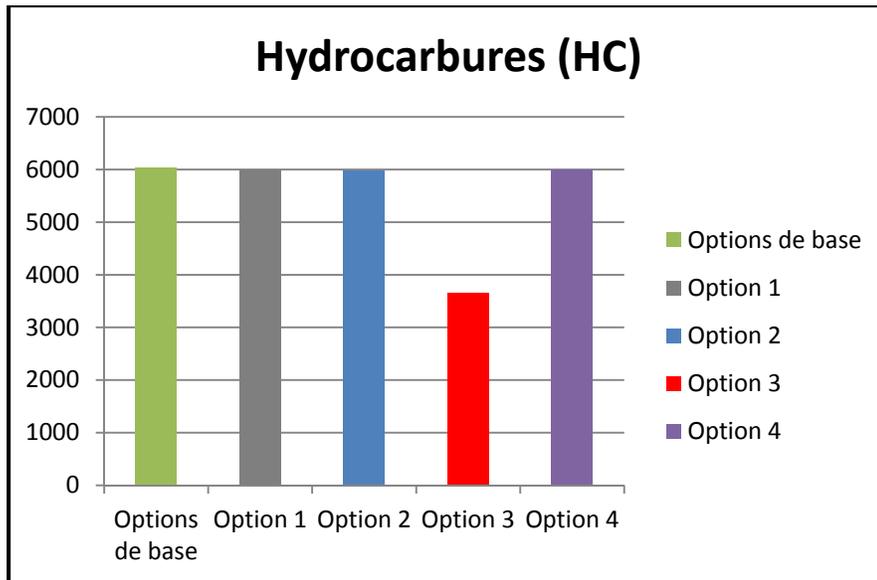


Figure 5.4 Graphique des émissions d'hydrocarbures (HC) par options durant 20 ans

D'après la figure 5.4, il ressort que l'émission d'hydrocarbures (HC) est beaucoup plus faible de l'ordre de 39% pour l'option 3 par rapport aux autres options.

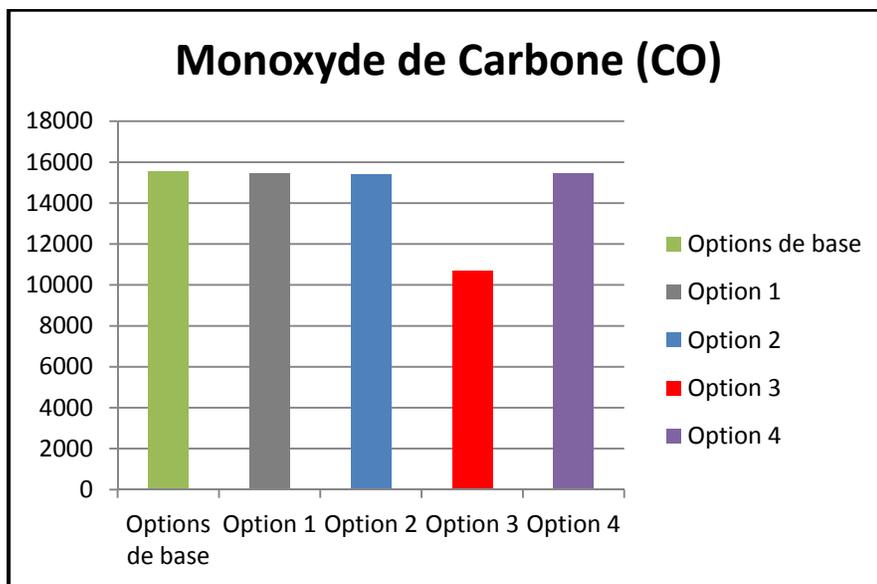


Figure 5.5 Graphique des émissions du monoxyde de carbone (CO) par options durant 20 ans

D'après la figure 5.5, il ressort que l'émission du monoxyde de carbone (CO) est beaucoup plus faible de l'ordre de 31% pour l'option 3 par rapport aux autres options.

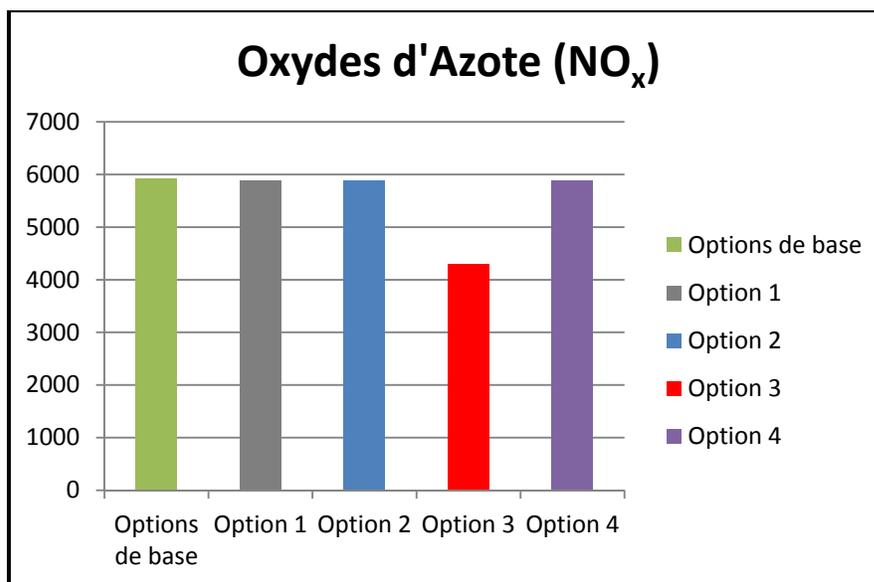


Figure 5.6 Graphique des émissions d'oxydes d'Azote (NO_x) par options durant 20 ans

D'après la figure 5.6, il ressort que l'émission d'oxydes d'azote (NO_x) est beaucoup plus faible de l'ordre de 27% pour l'option 3 par rapport aux autres options.

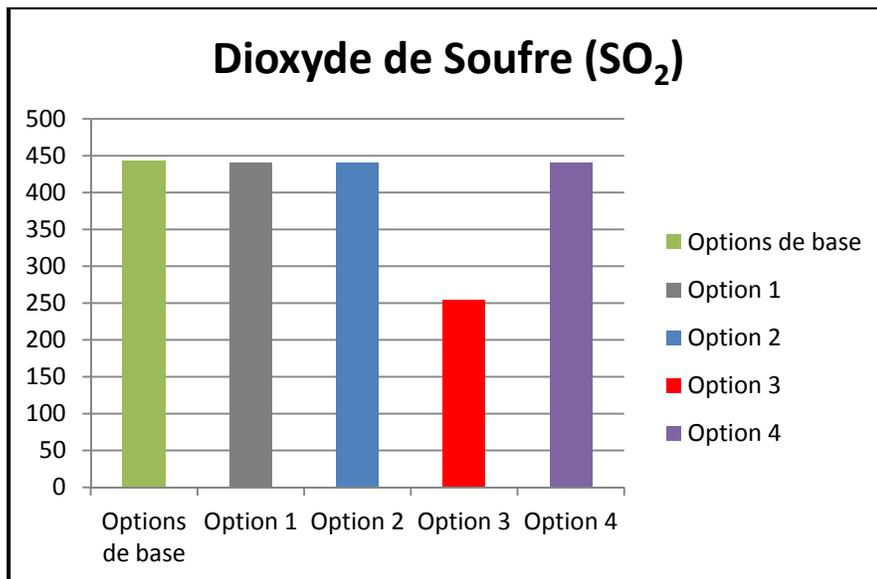


Figure 5.7 Graphique des émissions du dioxyde de Soufre (SO₂) par options durant 20 ans

D'après la figure 5.7, il ressort que l'émission de dioxyde de Soufre (SO₂) est beaucoup plus faible de l'ordre de 42% pour l'option 3 par rapport aux autres options.

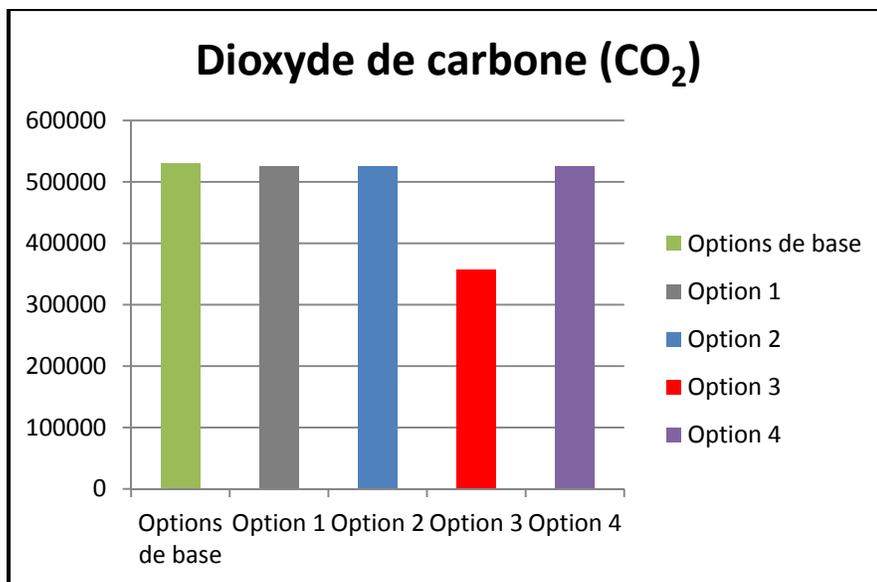


Figure 5.8 Graphique des émissions du dioxyde de Carbone (CO₂) par options durant 20 ans

D'après la figure 5.8, il ressort que l'émission du dioxyde de carbone (CO₂) est beaucoup plus faible de l'ordre de 32% pour l'option 3 par rapport aux autres options.

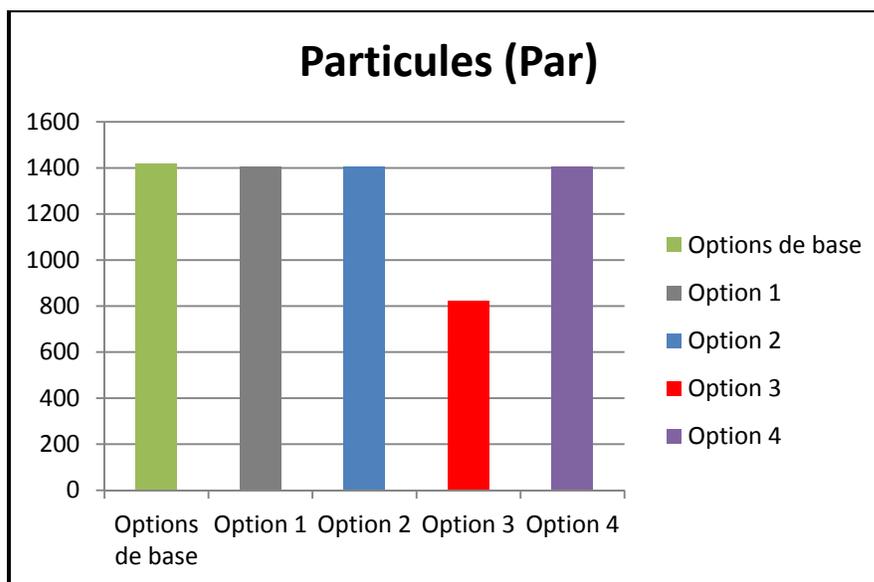


Figure 5.9 Graphique des émissions de Particules (Par) par options durant 20 ans

D'après la figure 5.9, il ressort que l'émission de Particules (Par) est beaucoup plus faible de l'ordre de 41% pour l'option 3 par rapport aux autres options.

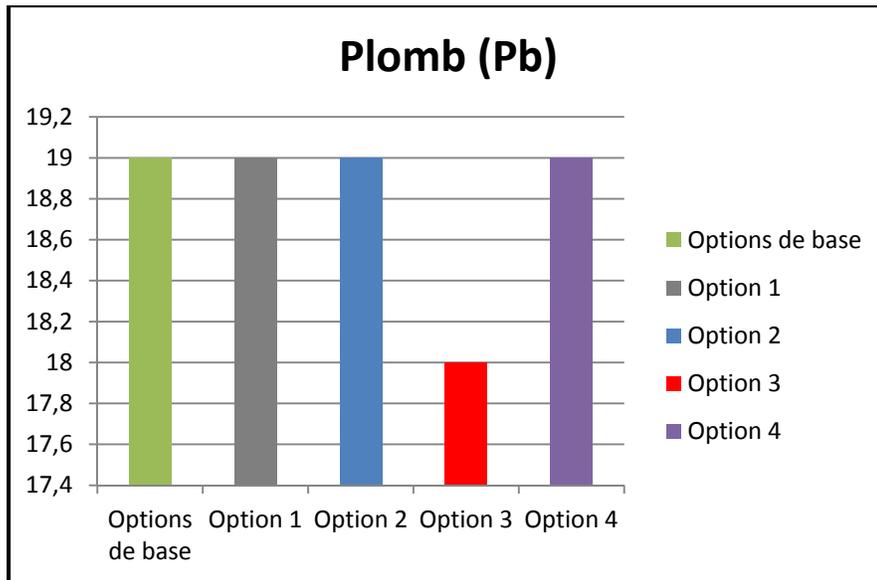


Figure 5.10 Graphique des émissions du Plomb (Pb) par options durant 20 ans

D'après la figure 5.10, il ressort que l'émission du plomb (Pb) est beaucoup plus faible de l'ordre de 5% pour l'option 3 par rapport aux autres options.

Il ressort des résultats que l'émission du dioxyde de carbone (CO₂) qui est le gaz qui contribue de manière le plus significatif à l'effet de serre est beaucoup plus faible pour l'option 3 par rapport aux autres options.

D'où la nécessité de considérer des revêtements en béton pour une réhabilitation des chaussées en Afrique subsaharienne si l'on veut diminuer les émissions de gaz à effet de serre et lutter contre le changement climatique.

5.5.2.2 La consommation d'énergie

Le tableau 5.5 et les figures 5.11 et 5.12 ci-dessous résument les résultats obtenus de la consommation d'énergie par option durant 20 ans.

Tableau 5.5 La consommation d'énergie par options durant 20 ans.

Options	EGTOT (MJ)	ENTOT (MJ)
Option de base	29 861 180	24 581 608
Option 1	29 539 834	24 325 961
Option 2	29 513 165	24 303 257
Option 3	20 852 736	16 580 871
Option 4	29 526 410	24 314 620

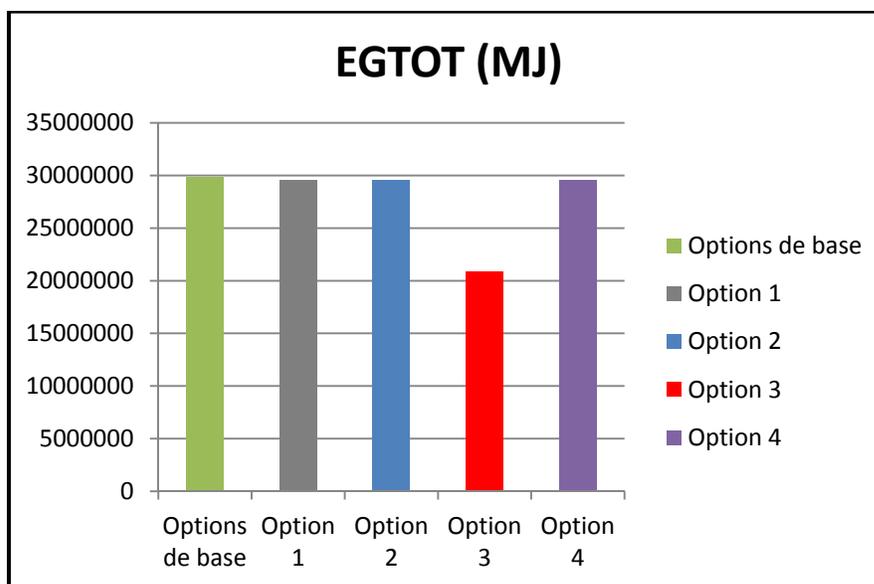


Figure 5.11 Graphique de la consommation d'énergie par options durant 20 ans

D'après la figure 5.11, il ressort que la consommation d'énergie (EGTOT) est beaucoup plus faible de l'ordre de 30% pour l'option 3 par rapport aux autres options.

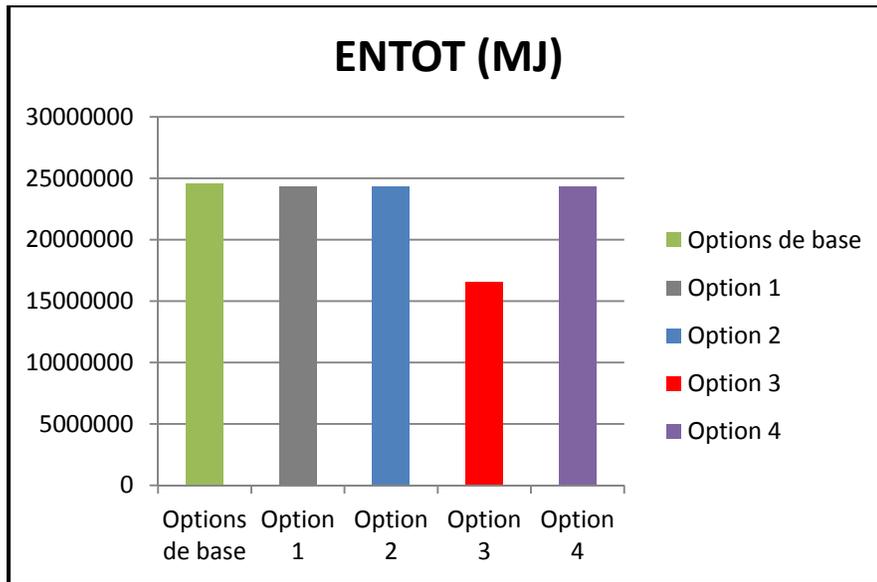


Figure 5.12 Graphique de la consommation d'énergie par options durant 20 ans

D'après la figure 5.12, il ressort que la consommation d'énergie (ENTOT) est beaucoup plus faible de l'ordre de 30% pour l'option 3 par rapport aux autres options.

Il ressort des résultats que la consommation d'énergie est beaucoup plus faible pour l'option 3 par rapport aux autres options.

D'où la nécessité de considérer le revêtement en béton pour une réhabilitation des chaussées en Afrique subsaharienne en vue de diminuer les consommations d'énergie.

5.6 Conclusion

L'approche développée dans cet article est d'intégrer la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne. Celle-ci passe par la mise sur pied d'une méthodologie qui permet de diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule, ce qui permet de lutter contre le changement climatique. À la lumière de cette analyse effectuée sur la RN2 au Sénégal à l'aide de l'outil HDM-4, il ressort

que l'intégration de la dimension environnementale en gestion des routes dans les projets en Afrique subsaharienne a un bénéfice considérable pour l'environnement et la société dans son ensemble. Il nous a permis grâce à la méthodologie mise en place de faire le choix technique concernant la chaussée qui se fait plus durable pour la société. Ce choix pointe vers un revêtement en béton car elle procure une économie d'énergie d'environ 30% et une diminution des émissions de CO₂ d'environ 32% comparée à d'autres options, ce qui représente un gain considérable en matière de lutte contre le changement climatique. L'un des avantages prépondérants de ce type de revêtement est sa longue durée de vie et son entretien extrêmement réduit, lorsqu'il est bien conçu et correctement mis en œuvre. L'autre avantage pertinent est qu'en fin de vie, les revêtements en béton démantelés pourront être employés dans des centres de concassage; et les granulats de béton réutilisés dans les couches de sous-fondation et de fondation ou comme gravillons pour des applications plus nobles.

CHAPITRE 6

DISCUSSION

Le présent chapitre présente une analyse multicritère (AHP) pour évaluer les impacts techniques, économique et environnemental que génère le projet, dégage une synthèse des principaux résultats des trois articles et souligne une contribution originale de cette thèse dans le domaine de la recherche.

6.1 Analyse multicritère

L'analyse multicritère d'aide à la décision utilisé par HDM-4 est la méthode AHP (analyse hiérarchique des procédés. Elle a été effectuée pour évaluer le projet en réalisant un bilan des impacts qu'ils génèrent dans le domaine technique, économique et environnemental, afin d'éclairer les décideurs dans le choix d'une solution viable. Elle intègre plusieurs critères et arrive à un choix justifié de technologie, la décision est alors dite rationnelle, systématique et correctement prise (Wind et Saaty, 1980).

Description de la méthode AHP (Wind et Saaty, 1980).

La méthode repose sur les activités suivantes:

- décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique (niveaux);
- effectuer les combinaisons binaires;
- déterminer les priorités;
- synthétiser les priorités;
- cohérence des jugements.

Principes fondamentaux de la méthode AHP (Wind et Saaty, 1980).

Les principes sont les suivants:

- structure hiérarchique (classes-critère-poids);
- structure des priorités, comparaison binaire (sous critères-rangs);

- cohérence logique;
- méthode semi-quantitative.

Avantage de la méthode AHP (Wind et Saaty, 1980).

Les avantages de la méthode AHP sont les suivants:

- sa capacité de structurer un problème complexe, multicritère, multi personne et multi période de façon hiérarchique;
- la comparaison binaire des éléments (alternatives, critère et sous critères);
- la facilité de son support informatique, le logiciel Expert Choice.

Les critères pris en compte dans l'analyse multicritère HDM (Kerali, Odoki et Stannard, 2005).

La partie la plus importante du processus mis en œuvre dans une analyse multicritère (AMC) est sans doute l'identification des objectifs que l'on recherche dans les variantes analysées, ainsi que les critères associés. Par exemple, du point de vue économique, l'objectif principal sera la minimisation des coûts totaux de transport (c'est-à-dire la maximisation du BA), et du point de vue environnement ce sera la minimisation de tous les impacts négatifs du trafic et des travaux. La priorité dépendra de l'importance (ou du poids) respective de chacun des critères. Il est important que ces poids soient déterminés par une large concertation entre les différents partenaires.

Le tableau 6.1 présente les critères pris en compte dans l'analyse multicritères HDM-4.

Tableau 6.1 Critères pris en compte dans l'analyse multicritère HDM-4

Catégorie	Critères/Objectifs	Attributs
Economique	Minimiser les coûts aux usagers (RUC)	Les coûts totaux aux usagers sont calculés par HDM-4 pour chaque option.
	Maximiser le bénéfice actualisé (BA)	Les avantages nets totaux sont calculés par HDM-4 pour chaque option.

Catégorie	Critères/Objectifs	Attributs
Sécurité routières	Réduire les accidents	Le nombre total d'accidents et leur gravité est calculé par HDM-4
Niveau de service	Assurer un bon confort	Le confort est évalué sur la base de l'IRI moyen. L'IRI moyen est calculé par HDM-4.
	Réduire les encombrements	Les encombrements sont évalués par le rapport débit capacité (volume-capacity ratio, VCR). La valeur de VCR est calculée par HDM-4.
Environnement	Réduire la pollution de l'air	La pollution de l'air est mesurée par la quantité de polluants émis. Cette quantité est calculée par HDM-4.
Énergie	Maximiser l'efficacité énergétique	Efficacité dans l'utilisation totale d'énergie et celle d'énergie d'origine nationale. La quantité d'énergie utilisée est calculée par HDM-4.
Social	Maximiser les bénéfices sociaux	Les bénéfices sociaux comprennent l'amélioration de l'accès aux services sociaux: écoles, centres de santé, marchés, etc. L'utilisation fournit une appréciation pour chaque option.
Politique	Prendre en compte les aspects politiques	Cohérence avec l'accessibilité, la promotion de la stabilité politique, l'utilisation fournit une appréciation pour chaque option.

Elle a permis d'évaluer neuf (09) critères et d'y attribuer les poids relatif à chaque critère sur la base d'une consultation des différents experts avec la méthode Delphi. Il s'agit d'une méthode subjective dans la mesure où elle fait appel à l'intuition et aux connaissances des experts. Ses éléments fondamentaux sont l'anonymat, la rétroaction et la simultanéité des données (Vernette, 1994).

Le tableau 6.2 présente la liste de la signification des différents poids relatif et le tableau 6.3 celle des différents critères.

Tableau 6.2 La liste des différents poids relatifs

Signification	Poids relatif
Sans préférence	1
Très légère préférence	2
Légère préférence	3
Légère à nette préférence	4
Nette préférence	5
Nette à très nette préférence	6
Très nette préférence	7
Forte préférence	8
Très forte préférence	9

Tableau 6.3 La liste des différents critères

Critères utilisés
Coûts aux usagers (RUC)
Bénéfice Net actualisé (VPN)
Analyse des accidents
Confort des usagers
Saturation du trafic
Pollution
Efficacité énergétique
Avantage socio/économique
Aspects politiques

La méthode Delphi (Vernette, 1994) a permis de recueillir l'opinion de trois (03) experts sur certains nombres de questions, mais également de faire réagir chaque expert à l'opinion générale de ses pairs. Les réponses obtenues ont été synthétisées et ont permis de donner les poids relatif à nos critères utilisés.

La liste des experts consultés est la suivante:

- Gabriel J. Assaf, professeur titulaire à l'ETS (30 ans d'expérience);
- Paul Wandji, expert en routes en Afrique subsaharienne (20 ans d'expérience);
- Christophe Amoussou, ancien directeur de l'ingénierie à SOGECO S.A Guinée Équatoriale (15 ans d'expérience).

Le tableau 6.4 donne les poids relatif émis par les différents experts.

Tableau 6.4 Poids relatif des experts

Experts Critères utilisées	Gabriel J. Assaf	Paul Wandji	Christophe Amoussou
Coûts aux usagers (RUC)	8	7	8
Bénéfice Net actualisé	9	9	9
Analyse des accidents	5	5	4
Confort des usagers	7	6	7
Saturation du trafic	3	3	2
Pollution	4	4	5
Efficacité énergétique	2	1	3
Avantage	6	8	6
Aspects politiques	1	2	1

6.1.1 Analyse multicritère du projet RN2 au Sénégal

Les critères utilisés et leurs poids relatif pour la route RN2 sont donnés dans le tableau 6.5.

Unité monétaire: dollar US (millions)

Taux d'actualisation: 10%

Critère de base: aspects politiques

Tableau 6.5 Critères utilisés et leurs poids relatif (RN2)

Critères utilisés	Poids relatif
Coûts aux usagers (RUC)	8
Bénéfice Net actualisé (VPN)	9
Analyse des accidents	5
Confort des usagers	7
Saturation du trafic	3
Pollution	4
Efficacité énergétique	2
Avantage socio/économique	6
Aspects politiques	1

Il ressort du tableau 6.5 que les critères les plus prononcés sont d'ordre économique, technique et environnemental. Le tableau 6.6 et la figure 6.1 présentent l'analyse multicritère de la route RN2.

Tableau 6.6 Analyse multicritère et poids relatif (RN2)

Option de projet	Coûts totaux actualisés administration (RAC) M\$	Coûts invest. Actualisés administration (CAP) M\$	Valeur du vecteur AMC	Bénéfice actualisé (VPN=B +E-C) M\$	Rapport BA/Coût (VPN/RAC) M\$	Rapport BA/Coût inv (VPN/CAP) M\$	Taux de rentabilité interne (TRI)
Option de base	78,688	72,642	1,562	0,000	0,000	0,000	0,0
Option 1	53,044	51,373	1,553	-70,985	-1,338	-1,382	-3,7
Option 2	51,462	49,792	1,585	-67,845	-1,318	-1,363	-3,2
Option 3	60,472	60,472	2,069	14,244	0,236	0,236	11,7
Option 4	40,736	39,065	1,604	-50,049	-1,229	-1,281	-1,7

Explication des colonnes de ce tableau:

RAC: coûts totaux actualisés administration.

CAP: coûts des investissements actualisés à l'administration.

C: surcoûts à l'administration.

Entretien: réduction des coûts d'entretien courant.

B: économies coûts usagers.

E: avantage exogène.

VPN: bénéfice actualisé.

VPN/RAC: indicateur de rentabilité relatif.

VPN/CAP: indicateur de rentabilité d'investissement relatif.

TRI: taux de rentabilité interne.

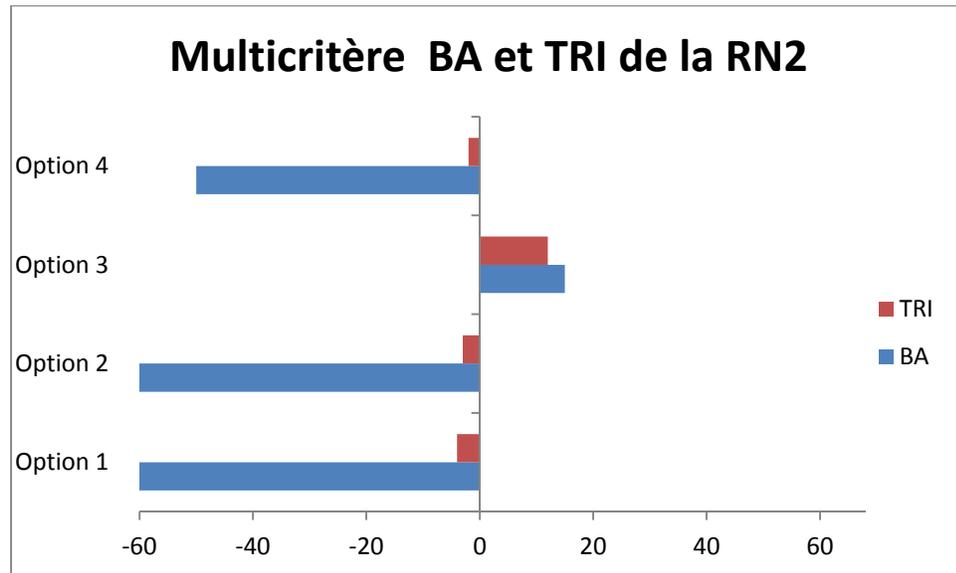


Figure 6.1 Analyse multicritère BA et TRI de la RN2

D'après le tableau 6.6 et la figure 6.1 de l'analyse multicritère générée par HDM-4, Il ressort que c'est l'option 3 qui est la plus rentable avec un bénéfice actualisé (VPN) de l'ordre de 14 millions de dollars US et un taux de rentabilité interne (TRI) presque de 12%.

Les autres options (1, 2 et 4) ont chacun un bénéfice actualisé négatif et un taux de rentabilité interne négatif.

6.2 Synthèse des principaux résultats des articles

Cette thèse démontre une méthodologie qui repose sur l'identification de la cause technique de détérioration présentée dans les tableaux 3.1 à 3.4, l'analyse économique des options acceptables, ainsi que l'analyse environnementale.

Dans cette section, les principaux résultats de la recherche du projet de la route RN2 sont présentés à savoir:

- l'identification des courbes de détérioration de la chaussée selon l'IRI;
- l'analyse économique;
- les différentes émissions de gaz et la consommation d'énergie.

6.2.1 Identification des courbes de détérioration de la chaussée selon l'IRI dans le projet RN2 au Sénégal

Les présents travaux ont porté sur un tronçon de route de près de 120 km au nord du Sénégal et il a été défini vue les critères d'identification de l'IRI que pour maintenir la chaussée toujours en bon état, il faut que l'IRI reste inférieur à 2,6 m/km (OCDE, 2001).

Durant toute la phase d'analyse, il ressort des résultats des différents courbes de détérioration que l'IRI de l'option 3 (revêtement en béton) varie entre 1m/km après la fin des travaux à 2,1m/km tout au long de la durée de vie de la route.

L'IRI de l'option 1 varie de 1,2m/km après la fin des travaux à 4,2m/km au fil des années d'analyse, ce qui est nécessairement moins intéressant que l'option 3.

L'IRI de l'option 2 varie de 1m/km après la fin des travaux à 3,9m/km au fil des années d'analyse, ce qui est également moins intéressant que l'option 3.

L'IRI de l'option 4 varie de 1,1m/km après la fin des travaux à 4,1m/km au fil des années d'analyse, ce qui aussi est moins intéressant que l'option 3.

D'après nos critères pris en compte pour ce projet selon les normes de l'OCDE (OCDE, 2001), seul l'IRI obtenu avec l'option 3 est inférieur à 2,6m/km tout au long de la durée de vie de la route, d'où la nécessité d'adopter cette option de revêtement en béton pour ce projet sur la base strictement technique de l'IRI.

6.2.2 Analyse économique dans le projet RN2 au Sénégal

La section précédente a permis de constater l'avantage en terme d'IRI du revêtement en béton. Cette section traite le point de vue économique sur le même tronçon.

- l'option 1 donne un bénéfice actualisé (VPN) de -55 millions de dollars et un taux de rentabilité interne (TRI) de -2,2% par rapport à l'option de base (option de non intervention);
- l'option 2 donne un bénéfice actualisé (VPN) de -52 millions de dollars et un taux de rentabilité interne (TRI) de -1,7% par rapport à l'option de base (option de non intervention);
- l'option 3 donne un bénéfice actualisé (VPN) de 32 millions de dollars et un taux de rentabilité interne (TRI) de 14,4% par rapport à l'option de base (option de non intervention);
- l'option 4 donne un bénéfice actualisé (VPN) de -38 millions de dollars et un taux de rentabilité interne (TRI) de -0,3% par rapport à l'option de base (option de non intervention).

Il ressort donc que c'est l'option 3 (revêtement en béton) qui est la seule rentable dans ce projet. Elle a un bénéfice actualisé de 266 667 USD par km de route et un taux de rentabilité interne de 14,4%.

6.2.3 Émissions de gaz dans le projet RN2 au Sénégal

Les deux premières sections ont permis de conclure tant sur la base technique de l'IRI que et sur la base économique du VPN et du TRI à l'avantage d'un revêtement en béton dans le projet de la RN2. Celle-ci traite le point de vue environnemental sur le même tronçon.

D'après les résultats de l'analyse, il ressort que:

les émissions des différents gaz sont largement plus faibles pour l'option 3 comparées à ceux des autres options. En particulier, le dioxyde de carbone (CO₂) qui est 32% plus faible pour l'option 3 par rapport au CO₂ associé aux autres options (tableau 5.4).

D'où l'intérêt de considérer le revêtement en béton pour ce projet si l'on veut diminuer significativement les émissions de gaz à effet de serre.

6.2.4 Consommation d'énergie dans le projet RN2 au Sénégal

En ce concerne la consommation d'énergie sur le même projet, il ressort des résultats que: la consommation d'énergie est 30% plus faible pour l'option 3 comparée à celle des autres options.

D'où encore la nécessité de considérer le revêtement en béton pour ce projet en vue de diminuer la consommation d'énergie.

6.2.5 Conclusion

En accord avec la méthodologie intégrée développée dans le chapitre 2, nous pouvons dire qu'au sortir de cette analyse, sur la base strictement technique (IRI), économique (VPN, TRI), environnementale (CO₂, EGTOT, ENTOT) et l'analyse multicritère (AHP), qu'il faut considérer sérieusement le revêtement en béton dans le projet de la route RN2 au Sénégal.

6.3 Limites de la recherche

Au terme de la présente recherche, il convient de mentionner certaines réserves dans l'appréciation des résultats. On compare les chaussées construites en enrobé bitumineux au Kenya en 1970 et leur comportement et ceux construites en béton aux États unis (Texas et Californie en 2000) et leur comportement. On suppose qu'on va avoir la même qualité de construction avec la route construite au Sénégal en 2013, ce qui n'est pas une évidence. Puisqu'on n'a jamais fait une route en béton au Sénégal, il est fort probable qu'on la manque la première fois.

Mais cette réserve peut être compensée par les améliorations subites par le logiciel HDM-4 pendant les années 2000 et 2005. Ces améliorations sont réparties sous plusieurs catégories, comme indiqué ci-après (Kerali, Odoki et Stannard, 2005):

- **amélioration des modèles /outils d'analyse;**
 - l'analyse de sensibilité permet à l'utilisateur d'étudier l'impact possible de la modification des principaux paramètres sur les résultats de l'analyse;
 - l'analyse de scénarios budgétaires permet à l'utilisateur d'évaluer les effets des différents niveaux de financement sur le réseau analysé;
 - l'analyse multicritères permet de comparer des projets selon des critères dont le coût économique est difficile à déterminer;
 - l'évaluation du patrimoine permet d'estimer la valeur financière et économique du patrimoine routier en fonction des investissements réalisés.
- **amélioration de la connectivité avec les systèmes externes;**
 - les données sont échangées selon un format plus courant (Microsoft Access);
 - les données concernant les réseaux routiers et les parcs de véhicules sont validées au moment de leur importation.
- **améliorations liées à l'organisation et au traitement des données;**
 - nouvelle conception des fonctions permettant de réutiliser de nouvelles sections sur d'autres études et options;
 - nouvelle conception des données de circulation afin de refléter la manière dont elles sont utilisées.
- **amélioration des modèles techniques;**
 - dégradation des routes bitumineuses et effet des travaux actualisés pour améliorer les fonctions de calage et la modélisation;
 - dégradation des routes non revêtus et effets des travaux actualisés pour améliorer les fonctions de calage. Le modèle effets causés par les usagers a été actualisé pour en améliorer les résultats;
 - modèle effets causés par les émissions actualisé par l'inclusion de nouvelles relations pour obtenir de meilleurs résultats.
- **améliorations liées à la facilité d'utilisation et à la configuration.**
 - définition de la logique de démarrage des travaux améliorée par l'introduction d'un éditeur d'intervention;

- nouvelle utilisation interface pour la définition des options afin de mieux informer l'utilisateur sans avoir à ouvrir et refermer constamment les boîtes de dialogue;
- possibilité de définir des normes d'entretien qui seront appliquées après aménagement;
- des séries de calage ont été introduites pour permettre aux utilisateurs de définir une section en utilisant les mêmes jeux de calage;
- introduction d'un nouveau type de données (classes d'accidents) pour améliorer l'analyse des taux d'accidents.

CONCLUSION

Afin de préserver l'état de leur réseau routier, les administrations routières prennent des décisions importantes de gestion, lesquelles influent sur les caractéristiques futures de leurs chaussées en général et sur l'évolution de l'état de leur revêtement en particulier.

Cette thèse prône, dans une perspective de bonne gestion des chaussées, une approche qui met sur une même plateforme décisionnelle les aspects technique, économique et environnemental afin de s'assurer que les décisions sont optimales, non aux seuls yeux de l'administration, mais bien plutôt du point de vue de la société dans son ensemble.

L'aspect technique permettra d'éclairer les gestionnaires sur les causes de détérioration et s'arrimera à l'aspect économique qui minimisera les coûts requis pour le maintien de ces infrastructures routières, tout en tenant compte également de leur empreinte environnementale qui aussi est à minimiser.

La première phase de ce projet de recherche a consisté à établir les pratiques actuelles en gestion et réhabilitation des chaussées, et à recenser les méthodes utilisées dans les domaines de gestion des chaussées. L'analyse de ces pratiques a permis de dresser un bilan des déficiences actuelles et de mettre en évidence une meilleure approche pour la gestion des chaussées en Afrique subsaharienne.

La deuxième phase a développé le canevas d'une méthodologie intégrée qui repose sur trois (03) critères essentiels: technique, économique et environnemental avec à la fin une analyse multicritère (AHP) pour évaluer le projet en réalisant un bilan des impacts qu'il génère dans ces trois (03) critères.

La troisième phase fournit l'approche permettant d'identifier la cause de détérioration des chaussées flexibles en Afrique subsaharienne dans le but d'aider les ingénieurs à choisir les interventions les plus appropriées. Cette approche a permis d'associer à chaque défaut de

surface l'ensemble des causes possibles, de choisir les essais de confirmation pertinents et les interventions appropriées.

La quatrième phase présente une intégration de l'analyse économique dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne. Le but est de permettre aux gestionnaires de bien comprendre les enjeux, d'établir les solutions les plus appropriées et de faire les interventions optimales au point de vue économique. Ceci dans le but de maximiser le retour sur l'investissement en vue d'augmenter les gains en matière de croissance économique.

La cinquième phase, présente une intégration de la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne. Le but recherché est d'aider les ingénieurs à appliquer cette méthodologie lors de la réalisation des travaux de réhabilitation des chaussées afin de diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par véhicule, ce qui permettra de lutter efficacement contre le changement climatique.

La sixième phase dresse une analyse multicritère (AHP) pour évaluer les impacts techniques, économiques et environnementaux que génère le projet, résume les principaux résultats des trois articles et souligne une contribution originale de cette thèse dans le domaine de la recherche.

Une validation est effectuée sur un tronçon de près de 120 km de la route RN2 au Sénégal pour valider l'applicabilité de la méthodologie.

Il ressort de cette validation que:

- l'option 3 qui consiste en un revêtement en béton est la plus rentable sur la base strictement technique de l'IRI (1 à 2,1m/km);
- cette option en béton est la seule rentable sur la base strictement économique avec un bénéfice actualisé (VPN) de 266 667 USD par km de route et un taux de rentabilité interne (TRI) de 14,4%;

- cette option en béton est aussi la plus rentable sur la base strictement environnementale avec une économie d'énergie d'environ 30% et une diminution des émissions de CO₂ d'environ 32% comparé aux autres options.
- cette option en béton est enfin la plus rentable sur la base strictement de l'analyse multicritère AHP avec bénéfice actualisé (VPN) de 14 millions de dollars US et un taux de rentabilité interne (TRI) de près de 12%.

En conclusion, nous préconisons aux différents pays d'Afrique subsaharienne l'utilisation de cette méthodologie afin de permettre aux gestionnaires d'avoir la possibilité de choisir l'option la plus durable et viable techniquement, économiquement et environnementalement.

ANNEXE 1

LES MODELES DE COMPORTEMENT DES CHAUSSÉES SELON HDM-4

Chaussée flexible

Le développement des modèles de détérioration de la route a été basé sur les trois documents suivants :

1. Riley et Bennett (1995 et 1996) inspiré de celui de Paterson (1987);
2. Watanatada et al. (1987);
3. (NDLI, 1995).

1. Planéité longitudinale

Le modèle de la planéité longitudinale proposé dans **HDM-4** est composé de plusieurs éléments. Il prend en considération les caractéristiques suivantes: structure, fissures, ornières, nid-de-poule, environnement. Il a été développé par Paterson (1987) en se basant sur les études faites au Kenya en 1971 (Kerali et Odoki, 2006).

L'expression du modèle est :

$\Delta RI = Kgp (\Delta RIs + \Delta RIc + \Delta RIr + \Delta Rit) + \Delta RIe$	
ΔRI = variation totale de la planéité durant la période, en m/kmIRI	
Kgp = facteur de calibration pour la propagation de la planéité	
structure	$\Delta RIs = 134 \exp(0.1 Kgm AGE3) (1 + SNPKb)^{-5} YE4$
	SNPKb = max ((SNPa – dSNPK), 1.5) dSNPK = 0.0000758 (min (63, ACXa) HSNEW + max (min (ACXa – PACX, 40), 0) HSOLD)
	ΔRIs = variation de la planéité due à la détérioration structurelle durant la période d'analyse, en m/km IRI
	dSNPK = réduction du structural number due à la fissuration
	SNPKb = structural number due à la fissuration à la fin de la période d'analyse
	SNPa = structural number au début de la période d'analyse
	ACXa = surface de fissuration au début de la période d'analyse, en %
	ACX = 0.62 ACA + 0.39 ACW (cf. fissures structurelles et transversales)
	PACX = surface de fissuration de l'ancienne couche, en %
	HSNEW = épaisseur de la couche de surface la plus récente, en mm
HSOLD = épaisseur totale des couches de surfaces, en mm	
AGE3 = âge depuis la dernière reconstruction ou nouvelle couche, (nb. D'années)	
YE4 = nombre annuel d'essieux standards équivalents, en million/voie	
Kgm = facteur de calibration pour le coefficient d'environnement	

Fissure	$\Delta R_{Ic} = 0.0066 \Delta ACRA$
	ΔR_{Ic} = variation de planéité due à la fissuration pendant la période d'analyse, en m/km IRI $\Delta ACRA$ = variation de la surface totale de fissuration durant la période d'analyse, en % $ACRA = ACX + ACT$ (cf fissures structurelles et transversales) $ACX = 0.62 ACA + 0.39 ACW$
Ornière	$\Delta R_{Ir} = 0.088 \Delta RDS$
	ΔR_{Ir} = variation de planéité due à l'orniérage pendant la période d'analyse, en m/km IRI ΔRDS = variation de la déviation standard de profondeur d'ornière pendant la période d'analyse, en mm (cf. modèle d'orniérage)
Nid de poules	$\Delta R_{It} = 0.00019 \Delta NPT (2 - FM)(NPTa + \Delta NPT/2)^{0.5}$
	$FM = \max (\min (0.25 (CW - 3), 1), 0) \max ((1 - AADT/5000), 0)$
	ΔR_{It} = variation de la planéité due aux nids-de-poule pendant la période d'analyse, en m/km IRI FM = liberté de manœuvre CW = largeur de chaussée, en m $AADT$ = flux de trafic dans les deux sens, en veh/jour $NPTa$ = nombre de nids-de-poule au début de la période d'analyse ΔNPT = variation du nombre de nids-de-poule pendant la période d'analyse (cf. modèle nid-de- poule)
Environnement	$\Delta R_{Ie} = 0.1 Kgm R_{Ia}$
	ΔR_{Ie} = variation de la planéité due à l'environnement durant la période d'analyse, en m/km IRI R_{Ia} = planéité au début de la période d'analyse, en m/km IRI Kgm = facteur de calibration des composants environnementaux

Modèle de la planéité longitudinale proposé dans **HDM-4** :

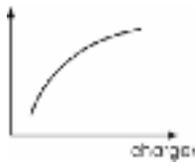
Le graphique illustre la relation entre le temps et la charge, montrant une courbe qui s'élevé de manière exponentielle, indiquant une dégradation accrue de la planéité sous des conditions de charge et de temps prolongées.

2. Planéité Transversale (Orniérage)

Le modèle de planéité transversale de **HDM-4** a également été développé par Paterson (1987) en se basant sur les études faites au Kenya en 1971 (Kerali et Odoki, 2006).

HDM-4 modélise la profondeur d'ornière sur la base de quatre causes possibles de l'orniérage : la densité initiale, la déformation structurelle, la déformation plastique et l'usure due aux pneus cloutés. La profondeur d'ornière à un temps donné est la somme de ces quatre composants dont la formulation est:

RDM = min ((RDO + RDST + RDPD + RDW), 50)	
Densité initiale	$RDO = Krid (51740 (YE4 10^6)^{(0.09 + 0.0384 DEF)} SNP^{-0.502} COMP^{-2.3})$
	RDO = ornières dues à la densité initiale, en mm
	YE4 = nombre annuel d'essieux standards, en millions/voie
	DEF = règle de déflection Benkelman, en mm
	SNP = structural number moyen annuel ajusté de la structure
	COMP = compatibilité relative, en %
Krid = facteur de calibration pour la densité initiale	
Déformation structurelles	$\Delta RDST = \Delta RDST_{uc}$ si ACRA = 0 (cf. modèle fissuration)
	$\Delta RDST = \Delta RDST_{uc} + \Delta RDST_{crk}$ si ACRA > 0 (cf. modèle fissuration)
	$\Delta RDST_{uc} = Krst (44950 SNP^{-1.14} YE4^{0.11} COMP^{-2.3})$ (sans fissuration)
	$\Delta RDST_{crk} = Krst (0.0000248 SNP^{-0.84} YE4^{0.14} MMP^{1.07} ACX_a^{1.11})$ (après fissuration)
	$\Delta RDST$ = augmentation totale de la déformation structurelle pour l'année d'analyse, en mm
	$\Delta RDST_{uc}$ = orniérage dû à la déformation structurelle sans fissuration, en mm
$\Delta RDST_{crk}$ = orniérage dû à la déformation structurelle après fissuration, en mm	
MMP = précipitation mensuelle moyenne, en mm/mois	
ACX_a = surface totale de fissuration au début de la période d'analyse, en %	
$ACX = 0.62 ACA + 0.39 ACW$ (cf. fissures structurelles et transversales)	
K_{rst} = facteur de calibration pour la déformation structurelle et les autres variables définies pour la densité initiale	
Déformation plastique	$\Delta RDPD = K_{rpd} CDS^3 2.46 YE4 Sh^{-0.78} HS^{0.71}$
	$\Delta RDPD$ = augmentation de la déformation plastique pour l'année d'analyse, en mm
	CDS = indice de défauts de construction pour les surfaces bitumineuses
	CDS = 0.5 si la teneur en liant est 10% inférieure à la teneur optimale,
	CDS = 1 si la teneur en liant est optimale,
	CDS = 1.5 si la teneur en liant est 10% supérieure à la teneur optimale)
YE4 = nombre annuel d'essieux standards, en millions/voie	
Sh = vitesse des véhicules lourds, en km/h	
HS = épaisseur totale de la couche bitumineuse, en mm	
K_{rpd} = facteur de calibration pour la déformation plastique	

Usure	$\Delta RDW = K_{rsw} (0.0000248 PASS W^{-0.46} S^{1.22} SALT^{-0.32})$
	<p> ΔRDW = augmentation de l'épaisseur d'ornièrè due aux pneus clous pour la période d'analyse, en mm PASS = nombre annuel de passage de véhicules avec pneus clous dans une direction, en millier S = vitesse moyenne du trafic, en km/h SALT = variable pour route salée ou non (2 = salée ; 1 = non salée) W = largeur de route, en m K_{rsw} = facteur de calibration pour l'usure de surface </p>
Modèle de la profondeur d'ornièrè proposé dans HDM-4 : <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  </div>	

3. Fissuration structurelle

La fissuration structurelle dans **HDM-4** est modélisée sur la base des relations dérivées de Paterson (1987) en se basant sur les études faites aux Caraïbes en 1982 (Kerali et Odoki, 2006).

HDM-4 propose une modélisation pour l'initialisation des fissures ainsi que pour leur propagation. Basée sur les relations de HDM-III, deux types de fissures sont modélisés. Elles sont notées 'All' et 'Wide'. Les modèles tiennent compte du type de fondation utilisé (stabilisée ou non), du type de revêtement, ainsi que de l'existence ou non d'anciennes couches (HSOLD). Les modèles présentés ici sont un peu simplifiés (ne présentent pas tous les types de revêtement traités). Pour le développement complet il faudra se référer au volume 4 de la documentation du HDM-4 intitulée «structure analytique et descriptions du modèle».

Les types de revêtement considérés dans HDM-4 sont :

Tableau 1: Types de structures utilisées dans HDM-4

Pavement Type	Surface Type	Base Type	Description
AMGB	AM	GB	Béton bitumineux sur une couche de base granulaire
AMAB	AM	AB	Béton bitumineux sur une couche de base granulaire liée au bitume
AMSB	AM	SB	Béton bitumineux sur une couche de base liée avec un liant hydraulique
AMAP	AM	AP	Béton bitumineux sur une couche de base en enrobé bitumineux
STGB	ST	GB	Traitement de surface (couche de base granulaire)
STAB	ST	AB	Traitement de surface (couche de base granulaire liée au bitume)
STSB	ST	SB	Traitement de surface (couche de base granulaire liée avec un liant hydraulique)
STAP	ST	AP	Traitement de surface (couche de base en enrobé bitumineux)

AM: Asphalt Mix, ST: Surface Treatment, GB: Granular Base, AB: Asphalt Base, AP: Asphalt Pavement, SB: Stabilised Base

Initialisation	Fissures (All)	Fondation stabilisée	HSOLD = 0	ICA = $K_{cia} \{CDS^2 a_0 \exp(a_1 HSE + a_2 \log_e CMOD + a_3 \log_e DEF + a_4 (YE4)(DEF)) + CRT\}$					
			HSOLD > 0	ICA = $K_{cia} \{CDS^2 ((0.8 KA + 0.2 KW)(1 + 0.1 HSE) + (1 - KA)(1 - KW) a_0 \exp(a_1 HSE + a_2 \log_e CMOD + a_3 \log_e DEF + a_4 (YE4)(DEF))) + CRT\}$					
		Fondation non stabilisée	HSOLD = 0	ICA = $K_{cia} \{CDS^2 a_0 \exp(a_1 SNP + a_2 (YE4/SNP^2)) + CRT\}$					
			HSOLD > 0	ICA = $K_{cia} \{CDS^2 (\max(a_0 \exp(a_1 SNP + a_2 (YE4/SNP^2))) \max(1 - PCRW/a_3, 0), a_4 HSNEW)) + CRT\}$					
		Valeur des paramètres a_0, a_1, a_2, a_3, a_4							
		Type de revêtement	Valeur HSOLD	Equ ⁿ	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
		AMGB	0	6.3	4.21	0.14	-17.1	-	-
			> 0	6.4				30	0.025
		AMAB	0	6.3	4.21	0.14	-17.1	-	-
			> 0	6.4				30	0.025
	AMAP	> 0	6.4	4.21	0.14	-17.1			
	AMSB	0	6.1	1.12	0.035	0.371	-0.418	-2.87	
		> 0	6.2						
	STGB	0	6.3	13.2	0	-20.7	-	-	
		> 0	6.4				20	0.22	
	STAB	0	6.3	13.2	0	-20.7	-	-	
		> 0	6.4				4.21	0.14	-17.1
	STAP	> 0	6.4	4.21	0.14	-17.1	20	0.12	
	STSB	0	6.1	1.12	0.035	0.371	-0.418	-2.87	
		> 0	6.2						
Fissures (wide)	Valeur des paramètres a_0, a_1, a_2								
	Type de revêtement	Valeur HSOLD	a_0	a_1	a_2				
	AMGB	0	2.46	0.93	0				
		> 0	2.04	0.98					
	AMAB	0	2.46	0.93	0				
		> 0	2.04	0.98					
	AMAP	> 0	2.04	0.98	0				
	AMSB	0	1.46	0.98	0				
		> 0	0	1.78					
	STGB	0	2.66	0.88	1.16				
		> 0	1.85	1.00	0				
	STAB	0	2.66	0.88	1.16				
		> 0	1.85	1.00	0				
	STAP	> 0	1.85	1.00	0				
	STSB	0	1.46	0.98	0				
		> 0	0	1.78					

ICA	=	période jusqu'à l'initialisation des fissures structurelles « All », (nb. D'années)
ICW	=	période jusqu'à l'initialisation des fissures structurelles « Wide », (nb. D'années)
CDS	=	indicateur des défauts de construction pour les surfaces CDS = 0.5 si la teneur en liant est 10% inférieur à la teneur optimale, CDS = 1 si la teneur en liant est optimale, CDS = 1.5 si la teneur en liant est 10% supérieure à la teneur optimale)
YE4	=	nombre annuel d'essieux standards équivalents, en millions/voie
SNP	=	moyenne annuelle ajustée du « structural number » du revêtement
DEF	=	déflexion moyenne de la poutre Benkelman dans les deux traces de roues, en mm
CMOD	=	resilient modulus of soil cement, in Mpa
HSNEW	=	épaisseur de la couche de surface la plus récente, en mm
HSOLD	=	épaisseur totale des anciennes couches, en mm
PCRA	=	surface des fissurations avant le dernier traitement, en %
PCRW	=	surface des fissurations « Wide » avant le dernier traitement, en %
KW	=	min (0.05 max (PCRW – 10, 0), 1)
KA	=	min (0.05 max (PCRA – 10, 0), 1)
HSE	=	min (100, HSNEW + (1 – KW) HSOLD)
Kcia	=	facteur de calibration pour l'initialisation des fissures structurelles « All »
Kciw	=	facteur de calibration pour l'initialisation des fissures structurelles « Wide »

Propagation	Fissures (All)	$dACA = K_{cpa} (CRP/CDS) z_A ((z_A a_0 a_1 \delta t_A + SCA^{a_1})^{1/a_1} - SCA)$
	Fissures (Wide)	$dACW = K_{cpw} (CRP/CDS) z_w ((z_w a_2 a_3 \delta t_w + SCW^{a_3})^{1/a_3} - SCW)$ $dACW = \min (ACA_a + dACA - ACW_a, dACW)$
	Fissures (All)	$\delta t_A = 1 \text{ si } ACA_a > 0, \text{ sinon } \delta t_A = \max \{0, \min ((AGE2 - ICA), 1)\}$ <p>si $ACA_a \geq 50$ alors $z_A = -1$, sinon $z_A = 1$</p> $ACA_a = \max (ACA_a, 0.5)$ $SCA = \min (ACA_a, (100 - ACA_a))$ $Y = (a_0 a_1 z_A \delta t_A + SCA^{a_1})$
	Fissures (Wide)	$\delta t_w = 1 \text{ si } ACW_a > 0, \text{ sinon } \delta t_w = \max \{0, \min ((AGE2 - ICW), 1)\}$ <p>si $ACW_a \geq 50$ alors $z_w = -1$, sinon $z_w = 1$</p> $ACW_a = \max (ACW_a, 0.5)$ $SCW = \min (ACW_a, (100 - ACW_a))$ $Y = (a_2 a_3 z_w \delta t_w + SCW^{a_3})$

Valeur des paramètres a_0, a_1, a_2, a_3					
Type de revêtement	Valeur HSOLD	a_0	a_1	a_2	a_3
AMGB	0	1.84	0.45	2.94	0.56
	> 0	1.07	0.28	2.58	0.45
AMAB	0	1.84	0.45	2.94	0.56
	> 0	1.07	0.28	2.58	0.45
AMAP	> 0	1.07	0.28	2.58	0.45
AMSB	0	2.13	0.35	3.67	0.38
	> 0	2.13	0.35	3.67	0.38
STGB	0	1.76	0.32	2.50	0.25
	> 0	2.41	0.34	3.40	0.35
STAB	0	1.76	0.32	2.50	0.25
	> 0	2.41	0.34	3.40	0.35
STAP	> 0	2.41	0.34	3.40	0.35
STSB	0	2.13	0.35	3.67	0.38
	> 0	2.41	0.34	3.40	0.35

dACA = variation de la surface des fissurations structurelles pendant la période d'analyse, en % de la surface totale de la chaussée

dACW = variation de la surface des « wide » fissurations pendant la période d'analyse, en % de la surface totale de la chaussée

ACA_a = surface de fissuration au début de la période d'analyse, en %

ACW_a = surface de « wide » fissuration au début de la période d'analyse, en %

δt_A = fraction de l'année d'analyse pour laquelle la progression des fissures est appliquée

δt_W = fraction de l'année d'analyse pour laquelle la progression des « wide » fissures est appliquée

AGE2 = âge de la surface du revêtement, (nb. D'années)

K_{cpa} = facteur de calibration pour la propagation des fissures structurelles

K_{cpw} = facteur de calibration pour la propagation des « wide » fissures structurelles

CRP = retard de la propagation des fissures dû au traitement préventif, donné par $CRP = 1 - 0.12 CR$

et les autres variables sont définies comme pour l'initialisation des fissures

4. Fissuration thermique transversale

La fissuration thermique dans **HDM-4** a également été modélisée sur la base des relations dérivée de Paterson (1987) en se basant sur les études faites aux Caraïbes en 1982 (Kerali et Odoki, 2006).

HDM-4 modélise la fissuration transversale par l'intensité de fissuration. Cette intensité est exprimée par le nombre de fissures par kilomètre de chaussée.

Initialisation	HSOLD = 0	$ICT = K_{cit} \max(1, CDS^3 500)$
	HSOLD > 0	$ICT = K_{cit} CDS^3 (500 - 1 + 0.02 HSNEW)$
Propagation	HSOLD = 0	$dNCT = K_{cpt} (1/CDS) \max \{0, \min [(NCT_{eq} - NCT_a), (NCT_{eq} / ICT)]\}$
	HSOLD > 0	$dNCT = K_{cpt} (1/CDS) \min \{(NCT_{eq} - NCT_a), \max (\min (0.25 PNCT, (PNCT - NCT_a)), (NCT_{eq} / ICT), 0)\}$

$dACT = dNCT / 20$
<p>ICT = temps d'initialisation des fissures transversales (nb. D'années)</p> <p>dNCT = variation du nombre de fissures transversales pendant la période, en nb/km</p> <p>dACT = variation de la surface de fissuration transversale pendant la période d'analyse, en % de la surface totale de la route</p> <p>CCT = coefficient de fissuration thermique</p> <p>PNCT = nombre de fissures transversales avant le dernier traitement, en no/km</p> <p>NCT_a = nombre de fissures transversales au début de la période d'analyse, en nb/km</p> <p>NCT_{eq} = nombre maximum de fissures thermiques, en nb/km</p> <p>HSNEW = épaisseur de la couche de surface la plus récente, en mm</p> <p>CDS = indicateur de défauts de construction pour les surfaces bitumineuses</p> <p>K_{cit} = facteur de calibration pour l'initialisation des fissures transversales</p> <p>K_{cpt} = facteur de calibration pour la propagation des fissures</p>

5. Perte de matériaux

La progression du modèle dans **HDM-4** est basé sur celui proposé par Paterson (1987), mais avec une variable du trafic introduite tel que proposé par (Riley, 1999). Tout ceci en se basant sur les études faites au Kenya en 1971 (Kerali et Odoki, 2006).

Une modélisation pour l'initialisation de la perte de matériaux ainsi que pour sa propagation sera de la forme suivante :

Initialisation	$IRV = K_{vi} CDS^2 100 RRF \exp(-0.156 YAX)$
	<p>IRV = temps jusqu'à l'initialisation de la perte des matériaux</p> <p>CDS = indice des défauts de construction pour les revêtements bitumineux</p> <p>CDS = 0.5 si la teneur en liant est 10% inférieure à la teneur optimale,</p> <p>CDS = 1 si la teneur en liant est optimale,</p> <p>CDS = 1.5 si la teneur en liant est 10% supérieure à la teneur optimale)</p> <p>YAX = nombre annuel d'essieux de toutes les classes de véhicules durant la période, en millions/voie</p> <p>K_{vi} = facteur de calibration pour la perte des matériaux</p> <p>RRF = retard sur la perte des matériaux dus à la maintenance</p>
Propagation	$dARV = (K_{vp} / RRF) (1 / CDS^2) z ((z 4.43 0.352 \delta t_v + SRV^{0.352})^{1/0.352} - SRV)$
	<p>La propagation de perte des matériaux commence lorsque $\delta t_v > 0$ ou $ARV_a > 0$</p> <p>$\delta t_v = 1$ si $ARV_a > 0$, sinon $\delta t_v = \max \{0, \min ((AGE2 - IRV), 1)\}$</p> <p>si $ARV_a \geq 50$ alors $z = -1$, sinon $z = 1$</p> <p>$ARV_a = \max (ARV_a, 0.5)$</p> <p>$SRV = \min (ARV_a, (100 - ARV_a))$</p> <p>$dARV$ = variation de la surface détériorée pendant la période d'analyse, en % de la surface totale de la route</p> <p>ARV_a = surface détériorée au début de la période d'analyse, en %</p> <p>δt_v = fraction de l'année d'analyse pour laquelle est appliquée la progression de dégradation</p> <p>AGE2 = âge de la surface du revêtement, (nb. D'années)</p> <p>K_{vp} = facteur de calibration pour la propagation de perte de matériaux</p>

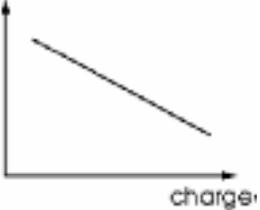
6. Nids-de-poule

HDM-4 propose une modélisation pour l’initiation et pour la propagation des nids-de-poule, celle-ci a été proposée par NDLI (1995) et Riley (1996b) en se basant sur les études faites au Brésil en 1984 (Kerali et Odoki, 2006).

Initiation	<p>L’initiation des nids-de-poule est due soit à la fissuration, soit à l’arrachement. L’initiation des nids-de-poule dus à la fissuration ne débute que lorsque la surface des fissures « larges » (ACW) dépasse 20%. Les nids-de-poule provenant des arrachements ne débute que lorsque la surface d’arrachement (ARV) dépasse 30%. Les valeurs pour IPT sont calculées séparément selon qu’elles proviennent de la fissuration ou de l’arrachement.</p>
	$IPT = K_{pi} 2[(1+0.05 \cdot HS)/(1+CDB)(1+0.5 \cdot YAX)(1+0.01 \cdot MMP)]$
	<p>IPT = temps entre l’initialisation des fissures « larges » ou de l’arrachement et l’initialisation des nids-de-poule, (nb. D’années) HS = épaisseur totale de la couche bitumineuse, en mm CDB = indice des défauts de construction pour la fondation (CDB varie entre 0 s’il n’y a pas de défaut et 1,5 s’il y en a plusieurs) YAX = nombre annuel d’essieux (tous les véhicules) pendant la période d’analyse, en millions/voie MMP = précipitation moyenne mensuelle, en mm/mois K_{pi} = facteur de calibration pour l’initialisation des nids-de-poule</p>
Propagation	$dNTP = dNPT_{fiss} + dNPT_{ar} + dNPT_{ex}$
	$dNPT_{fiss} = K_{pp} ADIS_{fiss} [(1+CDB)(1+10 \cdot YAX)(1+0.05 \cdot MMP)/(1+0.08 \cdot HS)]$
	$dNPT_{arr} = K_{pp} 0.2 ADIS_{arr} [(1+CDB)(1+10 \cdot YAX)(1+0.05 \cdot MMP)/(1+0.08 \cdot HS)]$
	<p>dNPT_{ext} = K_{pp} 0.07 ADIS_{ext} [(1+CDB)(1+10·YAX)(1+0.05·MMP)/(1+0.08·HS)] 1.541 [exp(Tpat/365)-1]</p> <p>dNPT = nombre total de nids-de-poule additionnel dNPT_i = nombre additionnel de nid-de-poule par km relatif au type de dégradation i (fissures larges, arrachement, extension) ADIS_i = % de fissures larges au début de la période d’analyse, ou % d’arrachement au début de la période d’analyse, ou nombre de nids-de-poule existants par km au début de la période d’analyse Tpat = délais entre l’apparition et la réparation, en jours K_{pp} = facteur de calibration pour la propagation des nids-de-poule</p>
<p>Modélisation HDM-4 pour l’initiation et la propagation des nids-de-poule :</p> <div style="text-align: center;"> </div>	

7. Glissance

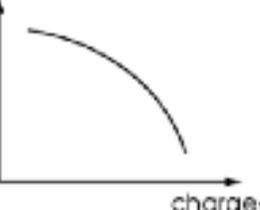
D'après **HDM-4**, la glissance est fortement influencée par la micro-texture, qui est une mesure du degré de polissage d'une surface de la chaussée ou de l'agrégat et la surface. Cenek et Griffith-Jones (1997) ont proposé le modèle de la résistance au dérapage en se basant sur les études faites au Brésil en 1984 (Kerali et Odoki, 2006).

 <p>HDM-4</p>	$\Delta SFC_{50} = K_{sfc} (-0.663 \cdot 10^{-4}) \Delta QCV$
	<p>ΔSFC_{50} = Variation du coefficient de la force de friction durant la période d'analyse, mesuré à 50 km/h</p> <p>ΔQCV = Variation annuelle du trafic de véhicules commerciaux, en veh/voie/jour</p> <p>K_{sfc} = facteur de calibration pour la glissance</p>

8. Texture

D'après **HDM-4**, la texture est peut-être la variable la plus importante qui détermine l'ampleur de forces longitudinales et latérales à l'interface pneu-route. Cela fait référence à la macro-texture de la chaussée qui détermine la capacité de drainage et donc l'efficacité. Cenek et Griffith-Jones (1997) ont proposé un modèle macro-texture supplémentaire en se basant sur les études faites au Brésil en 1984 (Kerali et Odoki, 2006).

Celle-ci peut être exprimée comme suit:

 <p>HDM-4</p>	$\Delta TD = K_{td} \{0.7 - TD_a - 0.7 \cdot 0.005 \log_{10} (10^{((0.7 - TD_a) / (0.0035))} + \Delta NELV)\}$
	<p>$\Delta NELV$ = nombre de véhicules légers équivalents pendant la période d'analyse</p> <p>K_{td} = facteur de calibration pour la profondeur de texture</p> <p>ΔTD = Variation de la hauteur au sable durant la période d'analyse</p> <p>TD_a = profondeur de texture au début de la période d'analyse (mm)</p>

Chaussée rigide

Les modèles de prévision de la détérioration de la chaussée en béton inclus dans HDM-4 sont basées sur les recherches menées par l'équipe latino-américaine d'étude, au Chili en 1996 et au sud des états unis (Kerali et Odoki, 2006). La recherche consistait à une revue bibliographique complète des modèles de détérioration de la chaussée en béton existante. Les modèles mis en œuvre dans HDM-4 sont principalement basées sur des travaux antérieurs réalisés par SHRP (1993), Al-Omari et Darter (1994), Lee et Darter (1994) et ERES Consultants en 1995 (Yu et al., 1998).

Les modèles de détérioration des chaussées rigides sont des expressions mathématiques (ou fonctions) qui cherchent à prédire l'évolution de la performance d'un indicateur (fissuration, dénivellation des joints, etc.). Ces modèles sont généralement basés sur des principes physiques. Ils sont ensuite calibrés selon la performance des chaussées en service.

1. Modèle de la dénivellation des joints transversaux

La dénivellation des joints transversaux d'une chaussée rigide se produit lorsque les dalles, de part et d'autre du joint, ne sont plus solidaires. Cette désolidarisation découle habituellement d'une perte ou d'une augmentation des matériaux fins au-dessous de la dalle. Ce flux des matériaux fins est désigné par le pompage qui résulte d'un mécanisme de transfert des charges déficient, ou lorsqu'un tel système n'est pas en place. Elle s'exprime par un déplacement différentiel vertical des deux dalles.

D'après Kerali et Odoki (2006), le modèle de la dénivellation des joints transversaux a été proposé en 1995 par l'entreprise : ERES Consultants (Yu et al., 1998).

Le modèle proposé dans HDM-4 est le suivant :

$$\begin{aligned} \text{FAULT} = & \text{ESAL}^{0.25} [0,0628 (1 - C_d) + 0,3673 \text{ E-8 BSTRESS}^2 \\ & + 0,4116 \text{ E-5 AVJSPACE}^2 + 0,7466 \text{ E-9 FI}^2 (\text{PRECIP})^{0.5} \\ & - 0,009503 \text{ BASE} - 0,01917 \text{ WIDENED} + 0,0009217 \text{ AGE}] \end{aligned}$$

N = 146

R² = 0,60

RSE = 0,022 in (0,56 mm)

FAULT = Dénivellation moyenne des joints transversaux, pouces;

ESAL = Nombre &CAS cumulé depuis la construction, en millions;

C_d = Coefficient de drainage modifié de l'AASHTO;

BSTRESS = Résistance maximale du mécanisme goujon-béton, lb/po²;

AVJSPACE = Espacement moyen des joints transversaux, pieds;

BASE = Type de fondation

0, si non stabilisée;

1, si stabilisée;

FI = Indice de gel, °F-jours;

PRECIP = Précipitation annuelle moyenne, pouces;

DAYS90 = Nombre de jours avec $T > 90^{\circ}\text{F}$;

WIDENED = Voie d'élargissement

0, si non élargie;

1, si élargie;

0,5, si les accotements sont en béton;

AGE = Âge depuis la construction, années.

N , R^2 et RSE désignent le nombre de sections suivies qui ont servi à développer ce modèle, R^2 désignent le coefficient de détermination et le RSE désigne l'écart type des résidus du modèle.

La valeur de la contrainte de roulement en béton maximale (BSTRESS) a un impact significatif sur les prédictions du modèle de failles, et est calculé comme suit (Heinrichs et al. 1989) :

La valeur BSTRESS est calculée comme suit :

$$\text{BSTRESS} = f_d * P * T * K_d * \frac{2 + \beta * Z}{4 * \beta^3 * E_c * I}$$

où:

f_d = Facteur de distribution, sans unité;

$$f_d = 24 / (I + 12)$$

I = Rayon de rigidité relative de l'ensemble sol dalle, pouce;

$$I = \left[\frac{E_c * \text{THICK}^3}{12 * K_{\text{STAT}} (1 - \mu^2)} \right]^{0.25}$$

THICK = Épaisseur de la dalle, pouces;

E_c = Module d'élasticité du béton, lb/po²;

μ = Coefficient de Poisson du béton, sans unité, fixé à 0,15;

KSTAT = Module de réaction de la sous fondation, lb/po³;

P = Charge appliquée d'une roue, fixée à 9 000 lb (40-kN);

T = Pourcentage de transfert de charge B travers les joints, fixé à 0,45;

K_d = Module de support des goujons, fixé à $1,5 \times 10^6$ lb/po³ ou $4,07 \times 10^8$ KN/m²/m;

P = Rigidité relative du système béton-goujon, sans unité;

$$B = \left[\frac{k_d * DOWEL}{4 * E_s * I} \right]^{0.25}$$

Es = Module d'élasticité du goujon, fixe 2,9 x 10⁷ lb/po² (2,0 x10⁵ MPa);

I = Moment d'inertie de la section du goujon, po⁴ ;

$$I = 0.25 * \pi * \left(\frac{DOWEL}{2} \right)^4$$

DOWEL = Diamètre du goujon, pouces;

Z = Ouverture moyenne des joints transversaux, pouces;

$$Z = 12 * CON * AVJSPACE * \left(\left(\frac{\gamma * TRANGE}{2} \right) + e \right)$$

CON = Facteur de fondation

0,80, si non stabilisée,

0,65, si stabilisée;

AVJSPACE = Espacement moyen des joints transversaux, pieds;

γ = Coefficient de dilatation thermique du béton de ciment Portland, 1/°F;

TRANGE = Écart annuel de température (max. moyen - min. moyen), °F;

e = Coefficient de retrait de séchage du béton, po/po.

La distribution des effectifs des sections utilisées pour le développement initial du modèle de la dénivellation des joints des chaussées rigides goujonnées dans le cadre de l'étude HDM-4 est présentée au tableau 1.

Tableau 1 : Distribution des effectifs du modèle de dénivellation

Zone climatique	Fondation non stabilisée		Fondation stabilisée	
	Espacement des joints ≤ 6 m	Espacement des joints > 6 m	Espacement des joints ≤ 6 m	Espacement des joints > 6 m
Humide avec gel	17	7	19	4
Humide sans gel	0	4	22	11
Sèche avec gel	2	2	0	0
Sèche sans gel	6	0	37	0

Le modèle proposé a été élaboré en fonction d'une plage de données décodant de l'échantillonnage disponible. Des analyses de sensibilité ont été effectuées et les résultats sont présentés au tableau 2 qui présente aussi la plage des données disponibles pour les variables entrant dans l'élaboration du modèle.

Tableau 2: Plages de données - Dénivellation des joints transversaux

Variable	Plages des données du modèle	Plage de l'analyse de sensibilité
ESALS	0 - 15 millions	0 – 80 millions
AGE	0 - 25 ans	0 – 30 ans
BSTRESS	9653 – 19306 kpa	10 000 – 21790 kpa
DOWEL	2,5 - 3,8 cm	2,5 – 5,0 cm
AVJSPACE	3 - 21 m	3,0 – 24 m
FT	0 - 1500	0 - 2000
PRECIP	508 – 1270 mm	0 – 2032 mm
BASE	Stabilisée et non stabilisée	Stabilisée et non stabilisée
WIDENED	Élargie ou non élargie	Élargie ou non élargie
Cd	0,7 – 1,1	0,7 – 1,15
THICK	20 – 30 cm	20 – 35 cm
KSTAT	138 – 1724 kpa	103 – 2068 kpa

2. Modèle de l'épaufrure (spalling) des joints transversaux

L'épaufrure des lèvres d'un joint transversal survient généralement lorsque les deux bords de dalles formant le joint s'épaufront. Cette détérioration des joints transversaux peut être causée par une présence des matériaux incompressibles dans le joint, par une faible durabilité du béton ou par un mauvais alignement de transfert des charges. L'épaufrure des joints transversaux a une incidence sur la qualité de roulement. De plus, des joints épaufrés présentent habituellement une imperméabilité réduite à l'infiltration de l'eau de ruissellement.

D'après Kerali et Odoki (2006), le modèle de l'épaufrure des joints transversaux a été proposé en 1995 par l'entreprise: ERES Consultants (Yu et al., 1998).

Le modèle retenu par **HDM-4** est le suivant:

$$\text{SPALL} = \text{AGE}^2 \text{ E-6 AVJSPACE [549,9 - 895,7(LIQSEAL + PREFSEAL)} \\ + 1,11 \text{ E-3 DAYS90}^3 + 375 \text{ DOWELCOR} + (29,01 - 27,6 \text{ LIQSEAL} \\ - 28,59 \text{ PREFSEAL} - 27,09 \text{ SILSEAL) FI}]$$

N = 164

R² = 0,76

RSE = 5,4% des joints

SPALL = Pourcentage des joints moyennement **A** fortement épaufrés, %;

AGE = Âge depuis la construction, années;

DOWELCOR = Corrosion du goujon :

0 si absence de goujons, ou si les goujons sont protégés de la corrosion;

1 si les goujons ne sont pas protégés de la corrosion;

AVJSPACE = Espacement moyen des joints transversaux, pieds;

FI = Indice de gel, °F-jours;

DAY S90 = Nombre de jours où T > 90°F;

LIQSEAL = Présence de scellant dans les joints :

0 si non présence; 1 si présence;

SILSEAL = Présence de scellant à base de silicone dans les joints :

0 si non présence; 1 si présence;

PREFSEAL = Présence d'un boudin de scellement pré moulé dans les joints :

0 si non présence; 1 si présence.

N, R^2 et RSE désignent le nombre de sections suivies qui ont servi à développer ce modèle, R^2 désignent le coefficient de détermination et le RSE désigne l'écart type des résidus du modèle.

Tableau : 3 Plages de données - Épaufrement des joints transversaux

Variable	Plage des données du Modèle	Plage de l'analyse de sensibilité
AGE	0 - 25 ans	0 – 30 ans
DAYS 90	0 – 100 jours	0 – 120 jours
FI	0 – 1600	0 – 2000
AVJSPACE	4,5 – 6,0 m	3,0 – 6,0 m
DOWELCOR	Avec et sans protection	Avec et sans protection
LIQSEAL	Scellant de type liquide	Scellant de type liquide
SILSEAL	Scellant de type silicone	Scellant de type silicone
PREFSEAL	Scellant de type prémoulé	Scellant de type prémoulé

3. Modèle de la fissuration transversale

La fissuration transversale apparaît généralement lorsque la dalle se rompt par fatigue suite à des sollicitations répétées, ou lorsque les efforts engendrés par le retrait du béton sont supérieurs à la résistance en traction du béton. La fissuration transversale présente alors un potentiel d'infiltration de l'eau de ruissellement dans la fondation, et modifie le confort au roulement, toutefois dans une mesure moindre qu'en présence des autres indicateurs présentés précédemment.

D'après Kerali et Odoki (2006), le modèle de la fissuration transversale a été proposé en 1995 par l'entreprise: ERES Consultants (Yu et al., 1998).

Le modèle retenu par HDM-4 représentant le pourcentage de fissures transversales sur un tronçon est le suivant :

$$\text{Percent - crack} = \frac{100}{1+1.41*FD^{-1.66}}$$

N = 465 sections

R² = 0,93

RSE = 6,0

Percent-crack = Pourcentage de fissuration transversale sur la section, %;

FD = Dommage structurai accumulé, $\Sigma n/N$, sans unité.

N, R² et RSE désignent le nombre de sections suivies qui ont servi à développer ce modèle, R² désignent le coefficient de détermination et le RSE désigne l'écart type des résidus du modèle.

4. Modèle de l'uni

La mesure de l'indice de rugosité international (IRI) est une valeur exprimée en mm par m, en m par km ou encore en pouce par mile. Cette mesure représente l'uni longitudinal de la chaussée. Le MTQ relève cet indice annuellement.

D'après Kerali et Odoki (2006), le modèle de l'uni a été proposé en 1995 par l'entreprise : ERES Consultants (Yu et al., 1998).

Le modèle retenu dans la méthodologie HDM-4 fait intervenir trois types de dégradation pour calculer l'uni futur sur la base d'un uni présent. Le modèle revêt la forme suivante :

$$\text{IRI} = \text{IRI}_0 + 2,6098 \text{ TFAULT} + 1,8407 \text{ SPALL} + 2,2802 \text{ E-6 TCRACK}^3$$

N = 144

$R^2 = 0,61$

RSE = 64,1 I in/mi (m/km)

où

IRI = Indice de rugosité international, po/mi;

IRI_0 = indice initial de rugosité international, po/mi;

TFAULT = Dénivellation totale des joints par mile exprimée en pouces et calculé comme :

$$\text{TFAULT} = \text{FAULTING} * 5280 / \text{AVJSPACE};$$

FAULTING = Dénivellation moyenne des joints, po;

AVJSPACE = Espacement moyen des joints transversaux, pi;

TCRACKS = Nombre total des fissures transversales par mile, calculé comme :

$$\text{TCRACKS} = (\text{CRACKING} * 5280 / \text{AVJSPACE}) / 100;$$

SPALL = pourcentage des joints épaufrés, %.

N, R^2 et RSE désignent le nombre de sections suivies qui ont servi à développer ce modèle, R^2 désignent le coefficient de détermination et le RSE désigne l'écart type des résidus du modèle.

Tableau. 4 Plages de données : UNI

Variable	Plage des données du modèle	Plage de l'analyse de sensibilité
TFAULT	0 – 789 mm/km	0 – 1000 mm/km
TCRACKS	0 – 186 fissures/km	0 – 300 fissures/km
SPALL	0 – 40 %	0 – 100 %

La couche de surface est formée de dalles courtes. Dans les joints transversaux, des goujons sont ajoutés pour le transfert de charge. L'espacement des joints transversaux (longueur de la dalle) doit être tel que le changement de température et/ou la présence d'humidité, ne produisent pas des fissures intermédiaires entre les joints. L'espacement maximum des joints doit être tel qu'il minimise le mouvement et maximise le transfert de charge. Les valeurs typiques de la longueur des dalles varient de 3,5 à 6,0 m. Dans ce type de chaussée, le transfert de charge est assumé par l'enchevêtrement des granulats.

LISTE DES PUBLICATIONS

Articles publiés ou soumis dans les revues internationales avec comité de lecture

Bienvenu Thierry Mbog Towada, Gabriel J. Assaf. (Soumis en novembre 2015) «Intégration de la cause de détérioration des routes en Afrique subsaharienne» Revue des Annales du Bâtiment et des travaux publics.

Bienvenu Thierry Mbog Towada, Gabriel J. Assaf. (Soumis en mars 2016) «Intégration de l'analyse économique dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne» Revue des Annales du Bâtiment et des travaux publics.

Bienvenu Thierry Mbog Towada, Gabriel J. Assaf. (Soumis en mars 2016) «Intégration de la dimension environnementale dans la gestion des routes en Afrique subsaharienne» Revue des Annales du Bâtiment et des travaux publics.

Autres publications

Publication de la thèse complète par la maison d'édition dédiée aux ouvrages académiques (Édition Universitaires Européennes).

Publication d'un article de presse sur mes travaux dans le magazine science et le développement.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahammed, M Alauddin, et Susan L Tighe. 2010. « Pavement surface friction and noise: integration into the pavement management system ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 37, n° 10, p. 1331-1340.
- Al-Omari, Bashar, et Michael I Darter. 1994. « Relationships between international roughness index and present serviceability rating ». *Transportation Research Record*, n° 1435.
- Amekudzi, LK, Astrid Bracher, Jan Meyer, A Rozanov, H Bovensmann et JP Burrows. 2005. « Lunar occultation with SCIAMACHY: First retrieval results ». *Advances in Space Research*, vol. 36, n° 5, p. 906-914.
- Assaf, Gabriel J. 1986. *Manuel de Conception Routier pour l'Évaluation des Techniques d'Entretien* 146 P p.
- Assaf, Gabriel J. 1987. « A.G.I.R Project (Auscultation et gestion des infrastructures routière or Road infrastructure inspection and management) ». (Québec : ministère des Transports du Québec).
- Assaf, Gabriel J. 1993. *Sub-network Level Analysis in Pavement Management: the CODE and MAREE Systems*.
- Assaf, Gabriel J. 1998. *Programme de financement des travaux de réhabilitation des routes 2000-2003*. Banque mondiale. 148 P p.
- Assaf, Gabriel J. 2004. « Techniques et gestion de l'entretien des réseaux routiers ».
- Assaf, Gabriel J. 2010. « Conception et réhabilitation des chaussées: note de cour MGC 840. École de Technologie Supérieure. ». p. 220 p.
- Barish, Norman N. 1962. « ECONOMIC ANALYSIS FOR ENGINEERING AND MANAGERIAL DECISION MAKING ».
- Beg, Muhammad Arif, Zhanmin Zhang et W Ronald Hudson. 2000a. « Development of pavement type evaluation procedure for Texas Department of Transportation ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1699, n° 1, p. 23-32.
- Beg, Muhammad, Zhanmin Zhang et W Hudson. 2000b. « Development of pavement type evaluation procedure for Texas Department of Transportation ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n° 1699, p. 23-32.

- Bennett, Christopher R, et Ian D Greenwood. 2001. « Modelling road user and environmental effects in HDM-4 ». *HDM-4 Highway Development and Management. Volume seven*. *www.hdm-ims.com. Website visited January*, vol. 2, p. 2009.
- Bernhard, Robert J, et Rebecca S McDaniel. 2005. « Basics of noise generation for pavement engineers ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1941, n° 1, p. 161-166.
- Bosker, Maarten, et Harry Garretsen. 2012. « Economic geography and economic development in Sub-Saharan Africa ». *The World Bank Economic Review*, vol. 26, n° 3, p. 443-485.
- Boucher, Martin. 1994. *Revue générale et comparaison de systèmes de gestion des chaussées*. 192 p p.
- Briceño-Garmendia, Cecilia, Karlis Smits et Vivien Foster. 2008. « Financing Public Infrastructure in Sub-Saharan Africa: Patterns, Issues, and Options ». *AICD Background Paper*, vol. 15.
- Bruxelle, Claude. 2005. « Construction et dimensionnement des chaussées:note de cour . École de Technologie Supérieure. ».
- Cabanius, Philippe. 2003. « Amélioration du transport de transit dans la Région d’Afrique Centrale ». *Première session du comité intergouvernemental préparatoire de la conférence ministérielle internationale sur la coopération en transport de transit, New York*.
- CEBTP. 1984. *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux*.
- Cenek, P.D., et G. Griffith-Jones. 1997. « Incremental Forms for Modelling Texture Depth and Friction Parameters in HDM-4». *Communication to the ISOHDM, UK Works Central Laboratories, New Zealand*.
- Chan, Arthur, Gregory Keoleian et Eric Gabler. 2008. « Evaluation of life-cycle cost analysis practices used by the Michigan Department of Transportation ». *Journal of Transportation Engineering*.
- Cook, CC. 1987. « EVALUATING ALTERNATIVE MAINTENANCE STRATEGIES FOR LOW-VOLUME ROADS IN SUB-SAHARAN AFRICA ». *Transportation Research Record*, n° 1106.
- Cook, Mike, Stephen Seeds, Haiping Zhou et R Gary Hicks. 2004. « Guide for Investigating and Remediating Distress in Flexible Pavements: California Department of Transportation's New Procedure ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n° 1896, p. 147-161.

- Dione, Adama. 2011. « Dimensionnement routier au Sénégal, quelles perspectives? ».
- Duhamel, Denis, Armelle CHABOT, Philippe TAMAGNY et Larbi HARFOUCHE. 2005. «Logiciel de modélisation viscoélastique des chaussées bitumineuses». *BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES*, vol. 258, p. 259.
- Falls, Lynne Cowe, et Susan Tighe. 2004. «Analyzing longitudinal data to demonstrate the costs and benefits of pavement management ». *Public Works Management & Policy*, vol. 8, n° 3, p. 176-191.
- Foster, Vivien, et Daniel Benitez. 2011. « Congo, Democratic Republic of-The Democratic Republic of Congo's infrastructure: a continental perspective ». *World Bank Policy Research Working Paper*, n° 5602.
- Foster, Vivien, Briceño-Garmendia et Cecilia. 2010. *Africa's infrastructure: a time for transformation*. World Bank Publications.
- França, et Jean-François Corté. 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée: guide technique*.
- Freedman, Allan. 2005. « Profile: America's Leading Transportation Planning and Design Firms ». *Transportation Builder*, vol. 17, n° 7.
- Friedrich, Rainer, Ari Rabl et Joseph V Spadaro. 2001. « Quantifying the costs of air pollution: the ExternE project of the European Commission ». *Pollution Atmospherique*, p. 77-104.
- Gordon, Robertson. 2011. *Quantifier les Impacts du Changement Climatique pour le secteur routier de l'Afrique subsaharienne*. Coll. « Conference ».
- Gwilliam, Ken, Vivien Foster, Rodrigo Archondo-Callao, Cecilia Briceño-Garmendia, Alberto Nogales et Kavita Sethi. 2008. « The Burden of Maintenance: Roads in Sub-Saharan Africa ». *Background Paper*, vol. 14.
- Haas, Ralph, et W Ronald Hudson. 1978. *Pavement management systems*. Monograph.
- Haas, Ralph, W Ronald Hudson et John P Zaniewski. 1994. *Modern pavement management*.
- Hasselmann, Mark. 1995. « Federal Highway Administration ». West Virginia University.
- Heggie, Ian G. 1995. « Commercializing Africa's roads: transforming the role of the public sector ». *Transport Reviews*, vol. 15, n° 2, p. 167-184.
- Huang. 1993. « Pavement analysis and design ». *University of Kentucky. Prentice Hall, inc. USA*.

- Hubert, M. 2004. « Les coûts environnementaux de l'automobile: Une mise en perspective de l'évaluation ». *Note de méthode, IFEN*, n° 4, p. 199.
- Jean, Carrier, Chartrand Luc, Durand Jean-Marie, Flon Paul, Grondin Mathieu et Marcel Nicolas. 2007. *Guide de mesures et d'identification des dégradations des chaussées souples*.
- Kerali, Henry GR, et JB Odoki. 2006. *Structure analytique et description du modèle*.
- Kerali, Henry GR, JB Odoki et Eric E Stannard. 2005. « Vue d'ensemble de HDM-4 ».
- Kulkarni, Ram B, et Richard W Miller. 2003. « Pavement management systems: Past, present, and future ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1853, n° 1, p. 65-71.
- Kumar, Ajay, et Fanny Barrett. 2008. « Stuck in traffic: Urban transport in Africa ». *AICD Background Paper*, vol. 1.
- Lambert, J, JM Kail et E Quinet. 1998. «ransportation noise annoyance: an economic issue». *Proceedings of Noise-Effects*. Vol. 98, p. 7th.
- Laplante, Catherine. 2010. « Analyse économique : projet d'infrastructure en transport Approche méthodologique et concepts de base conférence à École de Technologie Supérieure. ». *ADEC*.
- Lee, Ying-Haur, et Michael I Darter. 1994. « New predictive modeling techniques for pavements ». *Transportation Research Record*, p. 234-234.
- Li, Ningyuan, Wei-Chau Xie et Ralph Haas. 1996. « Reliability-based processing of Markov chains for modeling pavement network deterioration ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1524, n° 1, p. 203-213.
- Lidicker, Jeffrey, Nakul Sathaye, Samer Madanat et Arpad Horvath. 2012. «Pavement resurfacing policy for minimization of life-cycle costs and greenhouse gas emissions». *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 19, n° 2, p. 129-137.
- Mazoyer, Marcel, Laurence Roudart et Ibrahim Assane Mayaki. 2008. « Rapport sur le développement dans le monde, 2008. Banque mondiale: résumé et commentaire ». *Mondes en développement*, vol. 36, n° 143, p. 117-136.
- McKone, TE, WW Nazaroff, P Berck, M Auffhammer, T Lipman, MS Torn, E Masanet, A Lobscheid, N Santero et U Mishra. 2011. « Grand challenges for life-cycle assessment of biofuels ». *Environmental Science & Technology*, vol. 45, n° 5, p. 1751-1756.

- Morian, Dennis A., Laura Coleman, Doug J. Frith, Shelley M. Stoffels et Dan Dawood. 2003. « Pennsylvania SPS-6 Performance at 10 Years: Evaluation of Concrete Pavement Rehabilitation Strategies ». 1823, p. 28-38. Coll. « Transportation Research Record »: National Research Council.
- MTQ. 1993. *Manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles*. Québec: Gouvernement du Québec, Ministère des transports.
- MTQ. 2006. *Contexte Particulier des chaussées au Québec*. Québec: Gouvernement du Québec, Ministère des transports
- NDLI. 1995. *Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4. Final Report Asian Development Bank Project RETA 5549*
- Noël, Bonzil. 2005. «Évaluation des coûts aux usagers de la route dans un contexte nordique». École de technologie supérieure.
- OCDE. 1978. *Manuel de dégradations des chaussées souple*
- OCDE. 2001. *la gestion du patrimoine d'infrastructure dans le secteur routier*.
- Osti, Durga Prasad. 1993. « CHOICE OF BITUMINOUS OTTA SEAL SURFACING AN ECONOMIC PAVEMENT SURFACING FOR LOW VOLUME ROADS ». *TRANSPORT AND COMMUNICATIONS BULLETIN FOR ASIA AND THE PACIFIC*, p. 23.
- Pambou, Koubikana. 2013. *Développement d'un catalogue de conception des chaussées pour les pays Sub-Sahariens*. École de technologie supérieure.
- Paterson, William DO. 1987. *Road deterioration and maintenance effects: Models for planning and management*.
- Pehlivanidis, M. 1994. « ARC : An Expert Inspection System for Road Repairs. Québec (QC): Université de Montréal, Centre de Recherche sur les Transports. Ouvrage inédit. ».
- Pellecuer, Luc. 2014. « Modélisation des impacts environnementaux de la circulation routière en vue de leur intégration dans les systèmes de gestion des chaussées ». École de technologie supérieure.
- Pierre, Pascale, Alexa Bresson et Sylvain Juneau. 2008. « Suivi structural saisonnier de chaussées municipales en région nordique ».
- Pinard, MI, SD Ellis, R Johansen, T Toole, R Beger, ME Gumbie, HJ Lotter et AR Quimby. 2003. « Guideline low-volume sealed roads ».

- Racioppi, F, et C Dora. 2005. « Integrating Health Concerns into Transport Policies ». *Environmental Health Impacts of Transport and Mobility*. p. 171-177. Springer.
- Rens, Luc. 2013. « La route en béton une solution économique et de qualité ». *FEBELCEM*.
- Riley, M.J, et C.R. Bennett 1995 et 1996. *Specifications for the HDM-4 Road Deterioration Model - Preliminary, Second and Third Drafts, ISOHDM, UK*.
- Riley, MJ. 1996b. « Modifications to Chapter 7 - Potholing, Delamination and Edge-break - of the NDLI report ». *Communication to the ISOHDM, UK*.
- Riley, MJ. 1999. « Notes on Seasonal Adjustment of Pavement Strength ». *Communication to the ISOHDM, UK*.
- Schreyer, Christoph, Markus Maibach, Werner Rothengatter, Claus Doll, David Schmedding et Christian Schneider. 2004. *External costs of transport: update study; final report*. Infrac.
- Schutte, Ig. 2008. *OUTILS DE GESTION ROUTIÈRE GUIDE D'UTILISATION*, 1. Coll. «PROGRAMME DE POLITIQUES DE TRANSPORT EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE».186 p.
- Seinfeld, John H, et Spyros N Pandis. 2012. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- SHRP. 1990. « Distress identification manual for the Long Term Pavement Performance studies ».
- SHRP. 1993. « Distress identification manual for the long term pavement performance project ». *Strategic Highway Research Program, SHRP-P-338*, vol. 15, p. 375-379.
- Soederberg, Susanne. 2004. « American empire and 'excluded states': the millennium challenge account and the shift to pre-emptive development ». *Third World Quarterly*, vol. 25, n° 2, p. 279-302.
- St-Laurent, Denis. 2004. « Analyse mécanique des chaussées et rétrocalcul des modules ».
- Systematics, Cambridge, Texas Transportation Institute, National Cooperative Highway Research Program, Parsons Brinckerhoff, American Association of State Highway et Transportation Officials. 2006. *Performance measures and targets for transportation asset management*, 551. Transportation Research Board.
- Tessier, Robert 1990. «Guide de Construction et d'Entretien des Chaussées. Québec:». *Association québécoise du transport et des routes*,, p. 393 p.

- Tighe, Susan, Zhiwei He et Ralph Haas. 2001. « Environmental deterioration model for flexible pavement design: an Ontario example ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1755, n° 1, p. 81-89.
- Trade, Rapport Technique du West Africa, et N Hub. 2012. « Coûts de Transport et de Logistique sur le Corridor Lomé-Ouagadougou ».
- Vernette, Eric. 1994. « La méthode Delphi: une aide à la prévision marketing ». *Décisions Marketing*, p. 97-101.
- 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.
- Watanatada, T, WD Paterson, A Bhandari, CG Harral, AM Dhareshwar et K Tsunokawa. 1987. « The highway design and maintenance standards model. volumes 1 and 2 ».
- Wind, Yoram, et Thomas L Saaty. 1980. « Marketing applications of the analytic hierarchy process ». *Management science*, vol. 26, n° 7, p. 641-658.
- Yu, Bin, et Qing Lu. 2012. « Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 17, n° 5, p. 380-388.
- Yu, HT, KD Smith, MI Darter, J Jiang et L Khazanovich. 1998. *Performance of concrete pavements. Volume III: Improving concrete pavement performance*.
- Zhang, Han, Gregory A Keoleian et Michael D Lepech. 2012. « Network-level pavement asset management system integrated with life-cycle analysis and life-cycle optimization ». *Journal of Infrastructure Systems*.
- Zhang, Han, Gregory A. Keoleian et Michael D. Lepech. 2013. « Network-level pavement asset management system integrated with life-cycle analysis and life-cycle optimization ». *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 19, n° 1, p. 99-107.
- Zilioniene, Daiva, Donatas Cygas, Antanas Aloyzas Juzenas et Algirdas Jurgaitis. 2007. «Improvement of functional designation of low-volume roads by dust abatement in Lithuania». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1989, n° 1, p. 293-298.