

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

**LIFE-CYCLE EVALUATION AND PROGRAM
ANALYSIS UNDER BUDGET CONSTRAINT
OF "HIGH PRIORITY" FLEXIBLE PAVEMENT
MAINTENANCE WORKS INTEGRATING
VEHICLE EMISSIONS COSTS AND ENERGY
CONSUMPTION IN DEVELOPING COUNTRIES**

Emmanuel KOSSÈ KABA, Gabriel J. ASSAF

Département de génie de la construction, École de technologie supérieure
1100, Notre-Dame Ouest Montréal, Québec, Canada H3C 1K3
kaba.emmanuel@gmail.com

1. INTRODUCTION

Le réseau routier constitue un patrimoine national majeur pour les pays de l'Afrique subsaharienne (PIARC 2005). La préservation de ce patrimoine, qui implique de le maintenir dans un état relativement « bon » durant tout son cycle de vie, permet d'améliorer la mobilité et de réduire les coûts d'exploitation des véhicules, les taux d'accidents, les coûts de temps de trajet, les coûts de réhabilitation et de reconstruction, l'isolement et la pauvreté des communautés rurales. De plus, des routes en bon état contribuent au développement socio-économique ainsi qu'à l'émergence de ces pays (Mostafa and M 2018). Les sections en bon état sont des sections dont les valeurs de l'indice de rugosité international (IRI) sont comprises entre 3 et 4 m/km (UEMOA 2009). Ces dernières années, des efforts considérables ont été faits par les administrations routières des pays en développement et plus spécifiquement ceux de l'Afrique de l'Ouest, pour rehausser le niveau de financement des programmes d'entretien des routes dans le but de réduire les problèmes d'entretien chroniques des routes auxquels ils sont confrontés (Heggie 2003). Toutefois, ces fonds ne permettent pas de couvrir adéquatement les besoins en entretien des routes de l'Afrique de l'Ouest, car une grande partie du réseau routier se trouve déjà en mauvais état en raison du manque d'entretien préventif. En effet, le taux de couverture moyen des besoins en entretien des routes dans la plupart des pays de la zone l'Union économique et monétaire ouest-africaine (UEMOA) est en deçà de 50% (BOAD 2015). De plus, les facteurs environnementaux sont très rarement considérés dans l'évaluation économique des projets d'entretien. Outre l'insuffisance des fonds et l'inclusion plutôt rare des impacts environnementaux, les principaux problèmes tels que le fait d'accorder de manière quasi systématique la priorité du financement routier aux projets de construction de nouvelles routes (AIPCR 2014, AIPCR 2016), le manque de « culture d'entretien préventif » ainsi que le manque ou la mauvaise qualité des données routières (BOAD 2015, Mostafa and M 2018) entravent la lutte contre la détérioration des routes dans les pays africains.

Les principes de l'analyse du cycle de vie (ACV) et de l'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) ont été utilisés dans des travaux de recherche pour évaluer et optimiser les options d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction des routes en incluant ou non les impacts environnementaux. Adiguna, Dewanti *et al.* (2017) ont comparé deux programmes d'entretien quinquennal d'un sous-réseau routier du Kenya. Le premier a été établi en utilisant l'analyse économique, le second en se basant sur l'analyse multicritère pour intégrer les impacts environnementaux dans l'analyse économique. Les résultats de leur comparaison indiquent que la synergie de l'analyse économique et de l'analyse multicritère permet d'obtenir un programme d'entretien quinquennal des routes plus efficient. Cependant, l'analyse multicritère a recours très souvent à des données qualitatives qui peuvent introduire des subjectivités dans les programmes d'entretien. (Khan, Mesbah *et al.* 2017) ont utilisé l'ACCV pour évaluer 32 options d'entretien d'un réseau routier. Les résultats obtenus ont permis d'établir des normes « idéales » de travaux d'entretien préventif et de déterminer les options d'entretien rentables et le budget optimum d'entretien du réseau routier sur un cycle de vie de 20 ans. Les impacts environnementaux tels que la pollution de l'air et la consommation d'énergie

sur le cycle de vie par les véhicules et pour la réalisation des travaux d'entretien qui sont des facteurs importants de tout projet n'ont cependant pas été considérés dans leur étude. Le principe de cycle de vie a été aussi utilisé par (Labi and Sinha 2005) pour évaluer l'efficacité économique des options d'entretien préventif des sections de routes en les comparant avec une option de base composée des travaux de l'entretien courant minimum. Leurs résultats démontrent que l'état fonctionnel des sections influence leur rentabilité économique. Cette influence se manifeste par une augmentation de la rentabilité économique des options d'entretien préventif jusqu'à un certain niveau au-delà duquel la rentabilité économique régresse. En plus de négliger les impacts environnementaux, cette étude ne tient pas compte du budget disponible ni de l'ordre de priorité de réalisation des interventions en entretien des sections. Par ailleurs, Han, Ling *et al.* (2016) ont comparé une stratégie classique et une stratégie active d'entretien des chaussées en béton bitumineux sur un cycle de vie de 40 ans. La stratégie classique est composée des travaux de réhabilitation et de reconstruction qui sont déclenchés lorsque l'évolution de la dégradation des chaussées atteint un niveau d'état inacceptable. Les travaux d'entretien préventif tels que le resurfaçage et le recharge ment en béton bitumineux sont inclus dans la stratégie active et sont déclenchés à des intervalles réguliers de manière à retarder les travaux de réhabilitation et de reconstruction. Les résultats de leur étude indiquent que les charges environnementales telles que la consommation d'énergie et les émissions du carbone de la stratégie d'entretien active sont beaucoup plus faibles. Quoique cette étude considère les aspects environnementaux, il n'en demeure pas moins qu'elle se limite à la consommation d'énergie et à l'émission d'un seul polluant (carbone) pendant la phase de réalisation des travaux d'entretien.

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

sa performance sous le trafic et l'environnement (Assaf 1993). Par ailleurs, la validation de l'outil se limite à une seule section située dans une zone urbaine.

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

Le présent article a pour objectif de fournir aux administrations routières de l'Afrique de l'Ouest et aux bailleurs de fonds une approche pour déterminer le niveau de service des routes prioritaires d'un réseau routier donné, de valider les normes des travaux d'entretien et de choisir les meilleures interventions d'entretien, surtout d'entretien préventif, en fonction de l'état fonctionnel et structural des routes et de leurs objectifs. Les objectifs peuvent être la réduction de la consommation d'énergie et des coûts de la pollution de l'air, la minimisation des coûts totaux de transport et la maximisation des avantages ou du rapport valeur actuelle nette-coûts d'investissement (VAN/

Cinvest) avec ou sans contrainte budgétaire. Il est très important de mentionner que l'approche développée dans la présente étude ne s'applique qu'aux sections de routes dont les états sont « bons » et « moyens ».

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

2. MÉTHODOLOGIE

L'évaluation du cycle de vie et la programmation sous contrainte budgétaire des interventions en entretien des tronçons de chaussées bitumineuses existantes intégrant les coûts environnementaux et la consommation d'énergie sont composées de six (7) principales étapes. Comme présenté à la figure 1, ces étapes sont la description de la zone d'étude et l'identification des tronçons, suivies de l'inventaire et la collection des données de l'état des tronçons, de la détermination et la validation des niveaux de services, de l'établissement des options d'entretien, du calcul des coûts unitaires des émissions polluantes et de l'analyse technico-économique avec le modèle Highway design and Management (HDM-4).

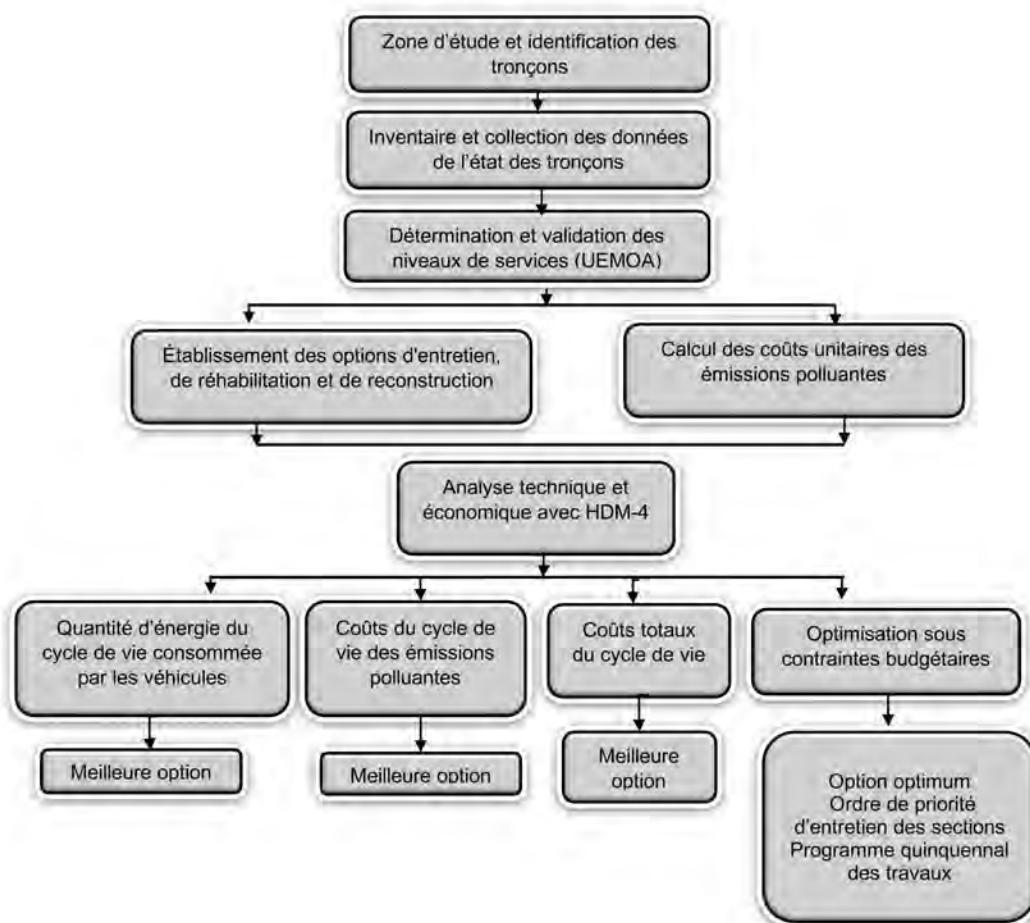


Figure 1 : Méthodologie d'évaluation de cycle de vie et programmation sous contrainte budgétaire des interventions d'entretien de chaussées flexibles de « haute priorité » intégrant les coûts des émissions polluantes et la consommation d'énergie

2.1. Zone d'étude et identification des tronçons

La zone d'étude est située dans un pays de l'Afrique de l'Ouest membre de l'Union économique et monétaire ouest-africaine (UEMOA). Les tronçons de chaussées de la zone d'étude ont été sélectionnés en fonction des valeurs de l'indice de priorité de financement des routes (IPFR) développé par Kaba and Assaf (2018). L'IPFR est un nouvel indice qui permet de sélectionner conjointement des projets de construction et des projets d'entretien des routes dites de « haute priorité » en agrégant

des indicateurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux communs aux deux types de projets en utilisant l'analyse en composantes principales. Ces projets prioritaires sont les dix (10) premiers projets constitués de quatre (4) projets de construction et de six (6) projets d'entretien des routes ayant des IPFR comprises entre 100 et 47 correspondant à des niveaux « très élevé » à « moyen » (Kaba and Assaf 2018). Comme présenté à la figure 2, six (6) tronçons de route nationale inter-état (RNIE) bitumées dont les IPFR sont compris entre 100 et 47 et totalisant une longueur 240,73 km ont été sélectionnés pour cette présente étude.

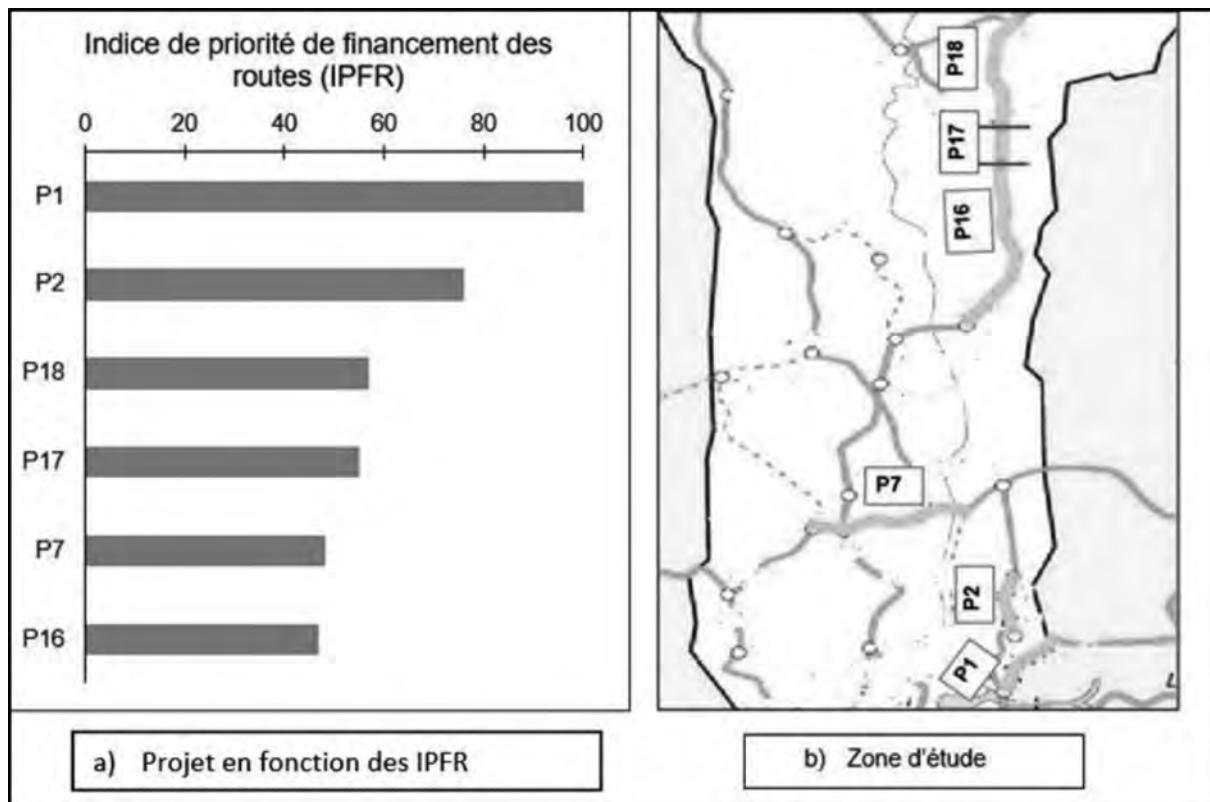


Figure 2 : Zone d'étude et Projets d'entretien de « haute priorité »

2.2. Inventaire et collection des données

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

2.2.1. Étude de trafic

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

sélectionnés. Les taux de croissance ont été obtenus en faisant une corrélation du trafic avec l'évolution du produit intérieur brut (PIB) du pays afin de déterminer le trafic actuel et future ainsi que l'ÉCAS. Le choix de cette corrélation réside dans le fait qu'en cas de manque de données historiques pour prédire avec précision le trafic, il est fortement recommandé d'associer la croissance du trafic à l'évolution du PIB, à la croissance de la population et à l'évolution du prix du carburant (Cafiso and Di Graziano 2012).

2.2.2. Évaluation fonctionnelle

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

– Les mesures de rugosité

La rugosité a été mesurée en termes d'indice de rugosité international (IRI exprimé m/km). L'IRI est l'unité de mesure de l'UNI (irrégularités géométriques) de la route. Ce dernier est le principal indicateur utilisé pour caractériser le confort au roulement et la sécurité des usagers de la route (UEMOA 2009). L'IRI exprime en unité de dénivelé vertical la réponse dynamique d'un véhicule en roulement sur une certaine distance. Ainsi, l'IRI représente les vibrations du véhicule causées par la rugosité du profil le long de la route qui est proportionnelle à la rugosité de la chaussée. Une route en bon état est caractérisée par un IRI faible (2 m/km par exemple), tandis qu'un IRI élevé caractérise une route dans un piètre état (au-dessus de 8 par exemple) (Park, Thomas *et al.* 2007). Selon les états de l'UEMOA, plusieurs appareils sont utilisés pour les mesures de l'IRI. Dans cette présente étude, l'appareil miniROMDAS Bump integrator (BI) a été utilisé pour les mesures de l'IRI. L'appareil miniROMDAS est doté de capteurs nommés BI unit qui peuvent être installés sur les deux côtés (droit et gauche) de l'essieu arrière d'un véhicule et d'un odomètre digital. Ces deux dispositifs permettent de collecter respectivement les données de rugosité et de mesurer la vitesse et la distance à une vitesse pouvant aller jusqu'à 100 km/h. Un mini-ordinateur muni d'un logiciel approprié permet d'enregistrer les données de rugosité tous les 100 m et de les convertir en IRI (m/km) (Kumar 2014). L'IRI moyen par tronçon ou par sections homogènes peut être ainsi déterminé en faisant la moyenne de tous les IRI enregistrés à chaque 100 m. Avant de procéder aux mesures de l'IRI, l'appareil miniROMDAS BI a été calibré en utilisant un autre équipement de type statique comme le profilomètre manuel (walking profilometer). De plus, l'odomètre a été calibré par rapport aux distances le long des tronçons.

– Les mesures des dégradations

Les relevés des dégradations ont été réalisés conformément aux méthodes d'inspection visuelle spécifiées dans la directive 11 de

UEMOA (2009), le manuel de suivi des routes pour la gestion de l'entretien dans les pays en développement (OECD 1990) et le guide d'estimation des besoins d'un réseau routier (méthode VIZIR) (IFSTTAR 2009). Tous ces trois documents s'accordent pour dire que la méthode d'inspection visuelle consiste à parcourir le long de chaque tronçon à inspecter en relevant le type, la gravité et l'étendue des dégradations. Pour la présente étude, chaque tronçon a été subdivisé à des intervalles de 50 m sur sa longueur totale afin de collecter les données de dégradations (type, gravité, étendue). Cet intervalle de 50 m est recommandé par Autret and Brousse (1991) pour avoir un niveau de précision plus important pour ce qui est des données de dégradation collectées. Dans cette étape 2 de la méthodologie, il est plutôt question de la gravité des dégradations relevées en fonction de l'intervalle mentionné ci-dessus et exprimée en unités de mesure de dégradation du modèle HDM-4. Le tableau 1 présente les types de dégradation qui ont été considérés dans cette présente étude ainsi leurs unités correspondantes. L'état du drainage est exprimé qualitativement par les niveaux bon, moyen et élevé des valeurs d'autres paramètres influençant l'état des routes qui ont été définis par des hypothèses. Ces hypothèses concernent la profondeur du sable (texture) et l'adhérence dont les valeurs qui ont été assumées sont respectivement 0,90 mm et 0,5.

Tableau 1 : Type de dégradation et unités de mesure

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

2.2.3. Évaluation structurale

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

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

2.2.4. *Les données sur les coûts*

Les coûts unitaires des travaux d'entretien sont pertinents pour comparer les différentes options d'intervention du point de vue économique. Les coûts unitaires des travaux ont été collectés auprès de l'administration de gestion du pays de la zone d'étude. Ces coûts unitaires sont les coûts en vigueur à l'année du début de l'analyse, soit 2016. Comme présenté dans le tableau 2, les coûts unitaires sont en dollar américain (US) et un facteur de conversion de 0,84 a été utilisé pour convertir ces coûts financiers en coûts économiques.

Tableau 2 : Coûts unitaires des travaux d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction¹
Adapté de (MIDT 2012, Kebre 2013, BOAD 2015)

Description des travaux	Coût unitaire
Drainage	174,4 \$USD/km
Réparation de nids de poule	34,88 \$USD/m ²
Colmatage des fissures	8,72 \$USD/m ²
Travaux de dépendance	174,4 \$USD/km
Resurfaçage mince en BB 30 mm	21,75 \$USD/m ²
Resurfaçage mince en BB 50 mm	36 \$USD/m ²
Resurfaçage structurel en BB 80 mm	58 \$USD/m ²
Reconstruction en BB	528 192 \$USD/km
Rechargement en ESMG	13 \$USD/m ²
Rechargement en ESB	26 \$USD/m ²
ESB avec reprofilage	31,39 \$USD/m ²
Reconstruction en ESB	443 922 \$USD/km

BB : Béton bitumineux ; ESB : Enduit superficiel bicouche ;

ESMSG : Enduit superficiel monocouche simple gravillonnage

1. Ces coûts sont issus des valeurs moyennes des différents documents consultés ne doivent en aucun cas être utilisé comme tels hors du contexte de ce présent article.

2.2.5. *Division des tronçons en sections homogènes*

Un tronçon de route peut être subdivisé en plusieurs sections, appelées « sections homogènes », en se basant sur la similarité des caractéristiques techniques. Cette subdivision peut être basée sur des paramètres de techniques tels que l'IRI, le CBR du sol de support, la gravité et l'étendue des dégradations, le trafic, le

type de sol, etc. Les sections homogènes sont souvent nécessaires pour assurer un dimensionnement et une gestion fiable et économique des routes (Misra and Das 2003). Les méthodes de subdivision des routes en tronçons ou en sections homogènes recommandées par la Banque mondiale sont (Bennett, Chamorro *et al.* 2007) : la méthode de segmentation de longueur fixe, la méthode de segmentation dynamique et la méthode de segmentation statique. La segmentation dynamique, qui consiste à analyser les attributs d'un réseau routier dans son ensemble et à créer des sections d'analyse en se basant sur ces attributs, est la méthode utilisée dans le présent document pour subdiviser les six (6) tronçons sélectionnés en dix (10) sections homogènes. Ainsi, chaque tronçon a été subdivisé de telle sorte qu'une nouvelle section débute à l'endroit où un changement d'un ou plusieurs paramètres (attributs) est observé. La segmentation dynamique de chaque tronçon a été effectuée en se basant sur des paramètres de déflexion, du sol de support et de dégradation de la couche de surface tels que présentés dans le tableau 3.

2.2.6. *Résumé des données routières de l'étude*

Le résumé des données routières utilisées dans le présent document est présenté au tableau 3. Ces données sont principalement composées des données de l'inventaire routier, des paramètres qui ont été déterminés à partir des évaluations fonctionnelles et structurelles et de l'étude de trafic.

2.3. Détermination et validation des niveaux de service

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

Tableau 3 : Résumé des données de l'inventaire, de l'évaluation fonctionnelle, de l'évaluation structurelle et de l'étude du trafic

Paramètres géométriques	Sections homogènes									
	P1	P2	P7		P16			P17		P18
Nom tronçon	P1	P2	P7		P16			P17		P18
Nom section	SH1	SH2	SH3	SH4	SH5	SH6	SH7	SH8	SH9	SH10
Classe fonctionnelle	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI
Type de revêtement	EB	EB	Esb	Esb	EB	EB	EB	EB	EB	EB
Longueur (km)	9,77	22,6	20,2	29,36	25,92	32,08	35	13,84	28,05	23,91
Largeur (m)	7	6,5	7	7	7	7	7	7	7	7
CBR du sol de support (%)	25,00	22,83	21,00	21,00	48,00	17,00	40,00	21,50	28,50	36,00
Épaisseur couche de surface (mm)	51	54	26	27	72	71	70	62	71,5	68,5
Nombre structural	5,06	3,25	3,07	3,18	6,08	3,79	6,39	4,09	5,02	5,44
Âge construction / dernière reconstruction (ans)	16	20	11	11	7	7	7	11	7	7
DJMA- 2015 (véh./jour)	7625	2955	1806	1806	1554	1554	1554	1952	1952	1952
Taux de croissance trafic (%)	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5
Déflexion-poutre Benkelman (mm)	0,16	0,26	0,28	0,27	0,10	0,24	0,10	0,21	0,16	0,14
Prof moyenne d'ornière (mm)	4,3	4,17	1,57	1,8	2,1	2,5	2,75	3,55	5,15	3,05
Nombre de nids de poule (nb./km)	27	26	15	11	13	11,25	30	27	15	3,75
Uni (IRI - m/km)	4,625	4,83	4	3	4	4,6	5,28	5,035	3,8	4,61
Fissuration (%)	16,5	20	8,5	6,5	13,5	16	22,5	18,5	7,25	15
Arrachement (%)	21,5	21	14	11,5	12,5	20,5	26	22,5	12,75	25
Dentelle de rives (m²/km)	21	25	9,5	5	7	28	35	30	10	15
Drainage	Moyen	Moyen	Bon	Bon	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Bon	Bon

RNEI : Route nationale inter-états

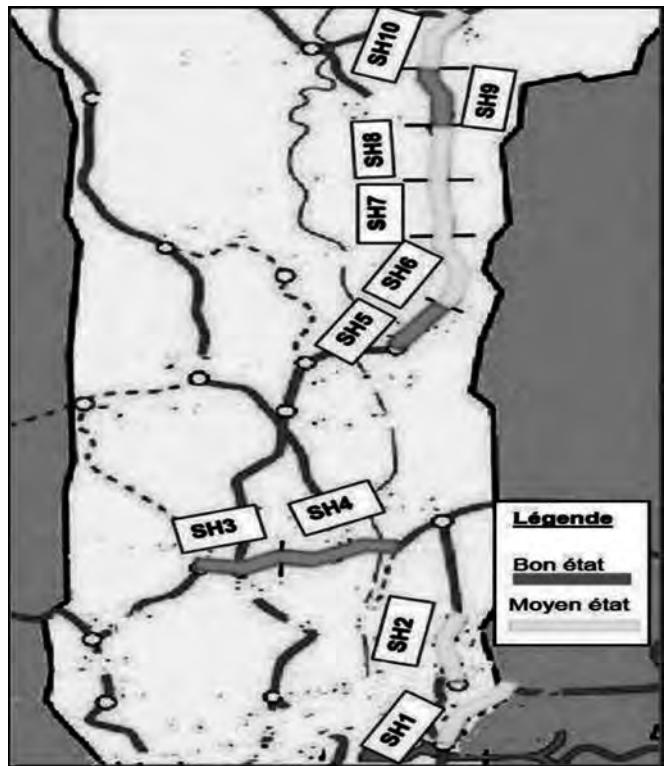
EB : Enrobé bitumineux

Esb : Enduit superficiel bicouche

Tableau 4 : Niveaux de service. Adapté de(UEMOA 2009, UEMOA 2009)

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

La comparaison des valeurs de l'IRI, de la vitesse moyenne, de la profondeur des ornières, de la fissuration, des arrachements et de la signalisation avec les valeurs de ces mêmes paramètres issus de l'étude de trafic, des évaluations fonctionnelles et structurelles a permis de choisir le niveau de service de chaque section au tableau 4. Comme présenté dans la figure 3, les niveaux de service des sections sont à 1, correspondant respectivement à des états « bon » et « moyen ». Les états des sections « bon » et « moyen » sont acceptables pour l'application des travaux de préventions, comme cela a déjà été mentionné ci-dessus.



2.4. Établissement des options d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction

L'établissement des options ou stratégies d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction (ERR) est généralement basé sur des normes de travaux récentes d'ERR, la classe et la rugosité de la couche de surface, les caractéristiques du trafic, etc. Les normes des travaux varient considérablement en raison des nouvelles techniques et des innovations en ERR des routes et de l'expérience acquise par les administrations routières par l'application de ces normes. Cette variation indique la nécessité de rassembler toutes les normes des travaux d'ERR disponibles et applicables tant au niveau réseau qu'au niveau projet afin d'évaluer leurs performances techniques et économiques à long terme avant d'établir des options d'ERR (Haas, Hudson *et al.* 1994, Odoki and Kerali 2000). Dans le présent document, les dix options d'ERR telles que présentées dans les tableaux 6 et 7 ont été établies en s'appuyant sur une revue de littérature approfondie concernant les stratégies d'entretien fréquemment utilisées en Afrique de l'Ouest (MIDT 2012, BOAD 2015) et les interventions en entretien utilisées dans les pays en développement (Odoki and Kerali

2000, Birmingham and Stankevich 2005, Adiguna, Dewanti *et al.* 2017). Ces stratégies et interventions en entretien ont été ajustées dans ce présent document en variant les seuils des IRI et des fréquences d'applications.

Il existe certains travaux d'ERR qui ne peuvent pas s'appliquer au même type de chaussée. Par conséquent, il est recommandé de définir les types travaux d'ERR à inclure en fonction des classes de surface des chaussées (Odoki and Kerali 2000). Le tableau 7 présente les options d'ERR qui ont été appliquées aux sections en Esb (SH3 et SH4) et le tableau 6 présente celles qui ont été appliquées aux sections en EB (SH1, SH2, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10).

Toutes les options, y compris l'option de base, peuvent être regroupées en trois catégories de travaux d'ERR : l'entretien préventif, la réhabilitation et la reconstruction. L'entretien préventif est composé de l'entretien courant et de l'entretien périodique. L'entretien courant englobe les travaux de moindre envergure (voir tableau 5) qui sont réalisés très tôt et manière récurrente pour retarder les besoins d'entretien périodique et de réhabilitation (PIARC 2013). L'entretien périodique est l'ensemble des opérations programmables pour préserver l'intégrité structurale des routes. Les travaux d'entretien périodique composés du resurfaçage mince en BB et du rechargement en ESMMSG (voir tableaux 6 et 7) ont pour but d'améliorer l'adhérence et la rugosité de la couche de surface sans aucun apport significatif à la structure de la chaussée (Birmingham and Stankevich 2005). La réhabilitation composée des travaux tels que le resurfaçage structurel en BB et le rechargement en Esb avec reprofilage (voir tableaux 6 et 7) consiste à réparer ou à renforcer la structure de la chaussée. Dans certains cas, une partie des matériaux des couches de la chaussée est extraite et remplacée par des matériaux plus performants dans le but d'augmenter la capacité portante et d'améliorer les caractéristiques de surface de la chaussée (PIARC 2013). La reconstruction consiste à reconstruire complètement la chaussée incluant des modifications du système de drainage et de la géométrie (PIARC 2005). Il est important de différencier l'entretien courant minimum de l'entretien courant. L'entretien courant minimum (voir tableaux 6 et 7) a été considéré dans ce présent document comme l'option de base. Celle-ci a été établie en fixant des seuils d'interventions minimums de telle sorte que le déclenchement des travaux de l'entretien courant minimum accentue la détérioration des sections. L'option de base équivaut au scénario « ne rien faire » qui, une fois appliquée, générera des coûts totaux de transport plus élevés que les autres options en raison de la détérioration de la route plus importante. Les options 1 à 7 sont composées des travaux d'entretien préventif, de l'option 8 des travaux de réhabilitation et de l'option 9 des travaux de reconstruction (voir tableaux 6 et 7). L'entretien courant (voir tableau 5) a été inclus dans les options 1 et 9 pour deux principales raisons. La première raison est de s'assurer qu'un entretien de routine est effectué continuellement après l'application de l'entretien périodique, la réhabilitation et la reconstruction. La deuxième raison est d'appliquer l'entretien courant seul sur certaines sections en cas de restriction budgétaire ne permettant pas d'appliquer l'entretien préventif.

Étant donné que les niveaux de service des sections sélectionnées dans cette présente étude sont « bon » et « moyen », les travaux de reconstruction de l'option 9 peuvent ne pas être applicables à certaines sections parce que ces sections performeront toujours en dessous des seuils d'intervention de l'option 9. Dans un tel cas, seul l'entretien courant de cette option est appliqué

aux sections. Il est évident que pour des sections qui se trouvent relativement en bon état comme c'est le cas des sections sélectionnées pour la présente étude, il n'était pas nécessaire d'inclure les travaux de reconstruction. Cependant, les options avec les travaux de reconstruction et réhabilitation ont été établies dans le présent article pour prouver scientifiquement la rentabilité, l'efficience des travaux d'entretien préventif par rapport aux travaux de réhabilitation et de reconstruction réalisés sur des sections dont les états sont « bon » et « moyen ».

Le déclenchement des travaux d'ERR sur chaque section dépend des critères d'intervention. Les critères d'intervention sont des seuils qui peuvent être établis en se basant sur le paramètre de temps (année), les indicateurs du trafic (ÉCAS, DJMA) et les types des travaux (Odoki and Keralli 2000). La

rugosité des chaussées est causée par les dégradations de la couche de surface, des inadéquations de la capacité portante et du système de drainage. Une relation directe existe entre la rugosité, les coûts d'exploitation des véhicules, les accidents et le confort (Odoki and Keralli 2000, Morosiuk, Riley *et al.* 2006, Khan, Mesbah *et al.* 2017). Il a été aussi prouvé que le vieillissement des matériaux contribue à la dégradation des chaussées affectant ainsi la rugosité (Khan, Mesbah *et al.* 2017). Par conséquent, l'IRI est l'indicateur d'état primordial des chaussées. Dans le présent document, les critères d'intervention des options d'ERR ont été fixés en fonction de la rugosité et de la fréquence d'application des travaux d'ERR sur les sections. La rugosité a été exprimée en termes d'IRI et la fréquence d'application en année.

Tableau 5 : Normes des travaux d'entretien courant

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

Tableau 6 : Options d'entretien des sections en enrobé bitumineux

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

Tableau 7 : Option d'entretien des chaussées en enduit superficiel bicouche

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

2.5. Calcul des coûts unitaires des émissions polluantes

Les coûts découlant des dommages environnementaux sont des coûts externes qui englobent les coûts de la pollution de l'air, de la nuisance sonore et de la perturbation du voisinage (Haas, Hudson et al. 1994) qui ne peuvent pas être incorporés directement dans l'ACCV avec le modèle HDM-4. Cependant, les quantités en tonnes métriques des principaux polluants tels que l'hydrocarbure (HC), le monoxyde de carbone (CO), l'oxyde d'azote (NO_x), l'oxyde de soufre (SO_2), le dioxyde de carbone (CO_2), les particules fines (PM2,5) et le plomb (Pb) émis par les véhicules de chaque option pendant le cycle de vie peuvent être calculées avec le modèle HDM-4 (Odoki and Kerali 2000). En effet, un sous-modèle des effets sociaux et environnementaux incorporé dans le modèle HDM-4 permet de quantifier les émissions polluantes. Dans le présent document, les sept polluants cités ci-dessus ont été considérés parce qu'ils représentent les principaux gaz rejetés par les échappements des véhicules qui sont les plus nocifs tant pour la santé humaine que pour l'environnement (Odoki and Kerali 2000). L'approche des coûts résultant des dommages et l'approche des coûts de réduction sont les deux principales approches pour monétiser la pollution de l'air. L'approche des coûts découlant de dommages consiste à évaluer les coûts de l'impact des émissions polluantes sur la santé humaine, l'environnement, l'activité économique, etc.

(RICARDO-AEA 2014). En ce qui concerne l'approche des coûts de réduction, elle permet d'évaluer les coûts d'atténuation des émissions polluantes. Cependant, cette dernière n'est solide que si les objectifs de réduction ne reflètent pas clairement les préférences de la société où l'évaluation est réalisée (CPCS 2018). L'approche recommandée est l'approche des coûts résultant des dommages, communément utilisée dans les organisations pour évaluer les coûts des effets de la pollution de l'air. L'approche des coûts des dommages est composée de (5) principales étapes : la détermination des quantités des polluants (basée sur des coefficients d'émission des véhicules du trafic), l'évaluation de l'expansion de la pollution autour de la source et de sa transformation chimique dans l'atmosphère, l'évaluation de l'étendue du risque d'exposition de la population à inhale ces quantités de polluants, l'évaluation des impacts sur la mortalité, la santé, la perte de production des cultures, des risques écologiques, etc., et enfin l'évaluation de l'équivalent monétaire de ces impacts (RICARDO-AEA 2014). En l'absence de données au sujet de la zone à l'étude (pays de l'Afrique de l'Ouest) permettant d'estimer les coûts des dommages des sept principaux polluants, les coûts unitaires des principaux polluants sont issus d'une revue de littérature approfondie et ont été ajustés pour l'analyse. En effet, les coûts unitaires des polluants de chaque année du cycle de vie (20 ans) ont été calculés en se basant sur les coûts de pollution de l'air du Québec (MTMDET 2016), du Canada (TC 2008), de l'Europe (France,

Allemagne, Grande-Bretagne) (RICARDO-AEA 2014) et des États-Unis d'Amérique (TIGER 2016). Il est évident que les coûts unitaires des polluants de la province et des pays cités ci-dessus diffèrent les uns des autres ainsi que du pays de la zone à l'étude. Ces écarts de coûts unitaires se justifient par le fait que les systèmes de santé, la démographie, la production de richesse (PIB) et la réglementation environnementale sont tous différents d'un pays à l'autre. Les coûts unitaires des polluants peuvent même diverger dans un même pays selon que la zone d'étude se situe dans une zone rurale ou urbaine (CPCS 2018). La même méthodologie a utilisé par (Ghibaudo 2018) pour l'évaluation des coûts des émissions polluantes des projets d'entretien routier situé dans un pays de l'Afrique de l'Ouest. Cependant, les résultats sont différents des coûts unitaires des émissions polluantes calculés dans cette présente étude parce que les hypothèses de calcul sous-jacentes telles que les sources de référence des coûts unitaires, le PIB et les taux d'inflation utilisés sont différentes. De plus, cette présente étude est basée sur les valeurs moyennes des coûts unitaires des émissions polluantes des pays cités ci-dessus.

Dans le présent document, les coûts unitaires des émissions polluantes issus de la revue de littérature qui remontent à 2010, 2013 et 2015 ont d'abord été adaptés proportionnellement au

PIB du pays situé dans la zone à l'étude. Le PIB s'avère l'indicateur économique le plus utilisé pour la comparaison de la parité des pouvoirs d'achat et du bien-être économique des pays selon l'organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) (Schreyer and Koechlin 2002). Par conséquent, il constitue l'indicateur par excellence pour adapter les coûts unitaires des émissions polluantes d'un pays à ceux d'un autre pays. Ensuite, les coûts unitaires des émissions polluantes estimés précédemment ont été extrapolés à l'année 2016 (année du début de l'analyse) en dollar US en utilisant les taux d'inflation de la zone d'étude publiés par la Banque mondiale (Banque mondiale 2019). Enfin, le coût unitaire de chaque émission polluante de chaque année du cycle de vie (20 ans) a été calculé en utilisant l'équation 1 (Haas, Hudson *et al.* 1994) et un taux d'actualisation de 10%. Le tableau 8 présente les coûts unitaires de chaque année du cycle de vie des principaux polluants qui ont été calculés et utilisés dans cette présente étude.

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

Où

F_n : facteur d'actualisation de l'année n

i : le taux d'actualisation (%)

n : le nombre d'années

Tableau 8 : Coûts unitaires des émissions polluantes

Année	Hydro-carbure (HC) \$USD/t	Monoxyde de carbone (CO) \$USD/t	Oxyde d'azote (NO _x) \$USD/t	Oxyde de soufre (SO ₂) \$USD/t	Dioxyde de carbone (CO ₂) \$USD/t	Particule (PM2,5) \$USD/t	Plomb (Pb) \$USD/t
1	12,184	5,807	87,879	101,573	0,701	1030,977	0,358
2	10,069	4,799	72,627	83,945	0,579	852,047	0,296
3	9,154	4,363	66,025	76,313	0,526	774,588	0,269
4	8,322	3,966	60,023	69,376	0,479	704,171	0,245
5	7,565	3,606	54,566	63,069	0,435	640,156	0,223
6	6,877	3,278	49,605	57,335	0,396	581,960	0,202
7	6,252	2,980	45,096	52,123	0,360	529,054	0,184
8	5,684	2,709	40,996	47,385	0,327	480,958	0,167
9	5,167	2,463	37,269	43,077	0,297	437,235	0,152
10	4,697	2,239	33,881	39,161	0,270	397,486	0,138
11	4,270	2,035	30,801	35,601	0,246	361,351	0,126
12	3,882	1,850	28,001	32,364	0,223	328,501	0,114
13	3,529	1,682	25,455	29,422	0,203	298,637	0,104
14	3,208	1,529	23,141	26,747	0,185	271,488	0,094
15	2,917	1,390	21,038	24,316	0,168	246,808	0,086
16	2,652	1,264	19,125	22,105	0,153	224,371	0,078
17	2,411	1,149	17,386	20,096	0,139	203,973	0,071
18	2,191	1,044	15,806	18,269	0,126	185,430	0,064
19	1,992	0,950	14,369	16,608	0,115	168,573	0,059
20	1,811	0,863	13,063	15,098	0,104	153,248	0,053

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

2.6. Analyse technique et économique avec le logiciel HDM-4

Le logiciel HMD-4 est un modèle basé sur les principes de l'analyse du cycle de vie qui a été développé par la Banque mondiale pour évaluer la performance technique et la viabilité économique des projets routiers ainsi qu'analyser les stratégies, les programmes et les normes des normes de travaux d'entretien, de réhabilitation et de construction à moyen et long terme. En outre, ce modèle permet d'effectuer une analyse comparative des options de gestion et d'investissement routier en se basant sur trois principales analyses : l'analyse de projet, l'analyse de programme et l'analyse de stratégie. L'analyse de projet permet d'évaluer un ou plusieurs projets ou options. Cette évaluation consiste en la détermination des coûts, des avantages et des indicateurs des projets routiers en analysant un groupe de sections homogènes auxquelles sont appliquées des options de travaux d'entretien, de réhabilitation ou de construction neuve. L'analyse de programme permet d'élaborer un programme pluriannuel ou de cycle de vie en identifiant les sections susceptibles de recevoir des travaux d'ERR sous contraintes budgétaires. L'analyse de stratégie permet d'évaluer le réseau routier dans son ensemble dans la perspective d'estimer les besoins budgétaires prévisionnels à long terme pour différents scénarios d'entretien et de développement du réseau routier (Morosiuk, Riley *et al.* 2006). Dans le présent document, l'analyse de programme a été utilisée pour stimuler l'évolution des états des sections homogènes sur une période d'analyse de 20 ans en fonction des dix (10) options appliquées aux sections et des contraintes budgétaires. Les résultats de l'analyse de programme ont permis de déterminer les coûts d'administration (fonctionnement et investissement), les coûts des usagers (exploitation des véhicules et temps de trajet), les coûts des émissions polluantes et la consommation d'énergie de chaque option appliquée aux sections.

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

2.6.1. Détermination de la quantité totale de cycle de vie de consommation d'énergie

La consommation totale d'énergie des projets routiers provient principalement de l'énergie consommée par les véhicules motorisés et les véhicules non motorisés ainsi que de l'énergie consommée pendant les travaux de construction, d'entretien et de réhabilitation des routes (Bennett and Greenwood 2000). La consommation d'énergie par les véhicules motorisés dépend de la taille de véhicule, de son poids, de sa conception, de son âge, des caractéristiques de la route et de son état et des caractéristiques du trafic. De plus, cette catégorie d'énergie

est générée par la consommation des ressources non renouvelables telles que le carburant, l'huile, les pneus et les pièces détachées lors de l'utilisation des véhicules (Odoki and Kerali 2000). La consommation d'énergie des véhicules non motorisés est composée de la consommation d'énergie des véhicules à traction animale et des véhicules à traction humaine qui sont beaucoup plus répandus dans les pays en développement. La consommation des véhicules à traction animale est fondée sur l'énergie utilisée pour nourrir et garder les animaux de telle sorte qu'ils puissent assurer le service de transport prévu. La consommation d'énergie des véhicules à traction humaine tels que le cyclisme et la marche est liée à la quantité de calories supplémentaires consommées pendant le transport par les personnes. L'énergie consommée pour les travaux de construction, d'entretien et de réhabilitation provient de l'énergie utilisée pour la production des matériaux (bitume, ciment, pierres concassées, etc.), le transport des matériaux sur le chantier et le fonctionnement des équipements utilisés pour la réalisation des travaux (ETSU 1997).

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

La quantité totale du cycle de vie de la consommation d'énergie par les véhicules motorisés de chaque option des travaux a été déterminée par les équations 2 à 4 (voir annexe A) (Bennett and Greenwood 2000).

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

2.6.2. Coûts du cycle de vie des émissions polluantes

Le coût du cycle de vie des émissions, aussi nommé « coûts du cycle de vie des externalités environnementales (CCVEE) de

chaque option d'ERR des sections », est le produit des quantités totales des émissions polluantes de chaque option (en tonne métrique) et des coûts unitaires (\$US/ tonne) sur la période d'analyse. Les quantités totales des émissions ont été déterminées avec HDM-4 et les coûts unitaires ont été déterminés en 2.5. Les principales étapes qui ont permis de déterminer les CCVEE ainsi que les équations (équations 5, 6, 7, 8, 9) sont présentées à l'annexe B de ce présent document (Odoki and Kerali 2000).

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

2.7. Coûts totaux du cycle de vie de transport (CTCV)

Les coûts de cycle de vie des projets routiers ou les coûts totaux de transport sont composés des coûts d'administration, des coûts des usagers et des coûts des externalités sur toute la période d'analyse (20 ans) (Haas, Hudson *et al.* 1994, Kumar 2014). Dans le présent document, les coûts totaux de cycle de vie de chaque option j ($CTCV_j$) ont été calculés par l'équation 10.

$$CTCV_j = CCVAj + CCVUj + CCVEEj \quad (10)$$

Où

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

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

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

2.7.1. Optimisation sous contrainte budgétaire

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

applicable au niveau réseau (Karan and Haas 1976, Mahoney, Ahmed *et al.* 1978, Garcia-Diaz and Liebman 1980, Fwa and Sinha 1988, Li, Haas *et al.* 1998, Frerreira and Picado-Santos 2002, Wang, Zhang *et al.* 2003). Dans le présent document, le modèle de programmation linéaire à nombre entier représenté par les équations 11 à 14 (Haas, Hudson *et al.* 1994) a été utilisé pour déterminer l'option optimale de chaque section homogène sur un cycle de vie de 20 ans en maximisant le rapport valeur actuelle nette-coûts d'investissement.

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T X_{ijt} \cdot E_{ijt} \quad (11)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ijt} \cdot P_{ijt} \leq B_t \text{ pour } t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n X_{ijt} \leq 1 \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$X_{ijt} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m ; j = 1, 2, \dots, n ; t = 1, 2, \dots, T \quad (14)$$

Où :

z : fonction-objectif

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

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

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

B_t : budget pour l'année t

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

L'équation 11 représente la fonction-objectif, qui dans cette présente étude consiste à maximiser la valeur actuelle nette-coût d'investissement (VAN/Cinvest). Cela signifie que l'option dont le rapport VAN/Cinvest est le plus élevé serait la plus prioritaire pour une section donnée.

L'équation 12 représente la contrainte budgétaire de chaque année de la période de la programmation qui ne peut être excédée. Cela indique que la somme des coûts des travaux d'entretien sur tout le cycle de vie de toutes les options sélectionnées pour toutes les sections doit être inférieure ou égale au budget disponible pour entretenir les sections de routes pendant 20 ans. L'équation 13 représente la contrainte d'exclusion mutuelle. Cela indique que pour une section i donnée, seulement une option j peut être choisie à une période t de la période d'analyse. L'équation 14 est la contrainte binaire qui permet à la variable de prendre la valeur 1 si une option j d'entretien est choisie pour une section i à l'année t et la valeur 0 si cette option n'a pas été sélectionnée.

– Options optimums

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

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

– Ordre de priorité d'interventions en ERR des sections

Comme cela a déjà été mentionné ci-dessus la fonction-objectif qui a été maximisée dans cette présente étude est le rapport avantages/coût investissement représenté par l'équation 15 (Odoki and Kerali 2000) :

$$E_{ijt} = \frac{VAN_{ijt} - VAN_{ibt}}{Cinves_{ijt}} \quad (15)$$

Où

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

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

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

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

– Programme quinquennal

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

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. États des sections homogènes en fonction des options

Les figures 4 à 13 présentent l'évolution des états en fonction des options d'entretien appliquées à chacune des dix (10) sections sur un cycle de vie de 20 ans. Il est observé sur ces figures (4 à 13) que l'option de base appliquée aux sections engendre une croissance abrupte des états des sections sur le cycle de vie atteignant des IRI très élevés variant de 10,5 à 16 m/km avant la fin de la période d'analyse. Un IRI supérieur à 10,5 m/km correspond à une détérioration très avancée des sections. L'état de la route qui était préalablement « bon » et « moyen » se dégrade rapidement et atteint à un état « mauvais » voire « médiocre » si aucune action d'entretien n'est entreprise au moment opportun. Ainsi, l'évolution des dégradations est étroitement liée aux

normes des travaux d'ERR appliquées aux sections pour préserver leurs états fonctionnels. De plus, les travaux issus de ces normes réalisés au moment opportun permettent de maintenir leurs capacités structurales suffisantes pour continuer à supporter adéquatement les charges du trafic pour lesquelles elles ont été conçues (Kerali, Odoki *et al.* 2000).

Telle que présentée aux tableaux 6 et 7, chaque option, à l'exception de l'option de base, est composée d'un entretien périodique qui est primordial et d'un entretien courant qui est appliqué systématiquement à chaque fois que les critères d'intervention ne sont pas satisfais. Ainsi, il peut être observé aux figures 4, 6, 7, 8, 9, 12 et 13 que l'entretien périodique de l'option 9, qui est la reconstruction, n'est pas applicable aux sections SH1, SH3, SH4, SH5, SH6, SH9 et SH10. En effet, les travaux de reconstruction ne peuvent être déclenchés que si les valeurs de l'IRI des sections sont supérieures à 8 m/km et à des intervalles de 10 ans et 8 ans respectivement pour les sections en EB et en Esb. Ces valeurs limites ne sont pas atteintes pour les sections mentionnées ci-dessus. Par conséquent, seul l'entretien courant de l'option 9 est appliqué à ces sections.

À l'opposé des sections SH1, SH3, SH4, SH5, SH6, SH9 et SH10, l'entretien courant et l'entretien périodique de l'option 9 sont appliqués conjointement aux sections SH2, SH7 et SH8 (voir les figures 6, 10 et 11). Cela est dû au fait que l'évolution de la détérioration de ces sections sur le cycle de vie atteint les seuils de déclenchement des travaux de reconstruction. Il est important de mentionner que l'entretien courant des options est toujours appliqué jusqu'à ce qu'il devienne inefficace pour remédier à la détérioration avancée des sections. De plus, les sections SH2, SH7 et SH8 dont les travaux de reconstruction sont réalisables ont toutes un état service 1 correspondant à un état « moyen » d'après les spécifications de l'UEMOA (2009) et comportent respectivement des valeurs d'IRI de 4,83, 5,28, 5,04 m/km. Ces IRI sont plus élevés comparativement à ceux des autres sections. Cela indique que les travaux d'entretien préventif sont plus efficaces sur les sections en bon état que sur celles en moyen état. Ces dernières nécessiteront des opérations de reconstruction plus tôt à un moment donné du cycle de vie, même avec la réalisation des travaux de l'entretien de courant, d'où l'importance d'entretenir les routes lorsqu'elles sont toujours relativement en bon état.

L'application des options 1 à 8 et plus spécifiquement des options 1 à 7 (entretien préventif) comme cela est illustré aux figures 4 à 13 permet d'améliorer considérablement les états des sections en maintenant les valeurs de leurs IRI entre 2 et 4,5 m/km sur tout le cycle de vie tandis qu'avec l'option de base ces valeurs atteignent 10,5 à 16 m/km avant la fin du cycle de vie. Cette tendance permet de valider la pertinence des normes des travaux ERR utilisées dans cette étude puisque l'application des options 1 à 9 permet d'améliorer les IRI des sections d'environ de 72 à 81% par rapport à l'application de l'option de base. Il peut être observé sur les figures 4 à 13 que l'évolution de la rugosité des sections sur le cycle de vie sous les options d'ERR correspond à ce qui était prévu en fixant les critères d'intervention présentés dans la colonne 4 des tableaux 6 et 7. En effet, il était prévu que l'option de base mènerait les sections à état « médiocre » et que les options 1 à 9 amélioreraient la qualité de roulement des sections pendant la période d'analyse en fonction des critères d'intervention. La validation de cette tendance s'avère indispensable

avant toute interprétation des résultats (Morosiuk, Riley *et al.* 2006). Puisque cette tendance est validée dans la présente analyse, les meilleures options ou options optimums de chaque section en considérant la consommation d'énergie, les coûts

des émissions polluantes des véhicules, les coûts totaux de transport et les contraintes budgétaires peuvent être maintenant déterminées. Ces analyses sont présentées dans les prochaines sections du présent document.

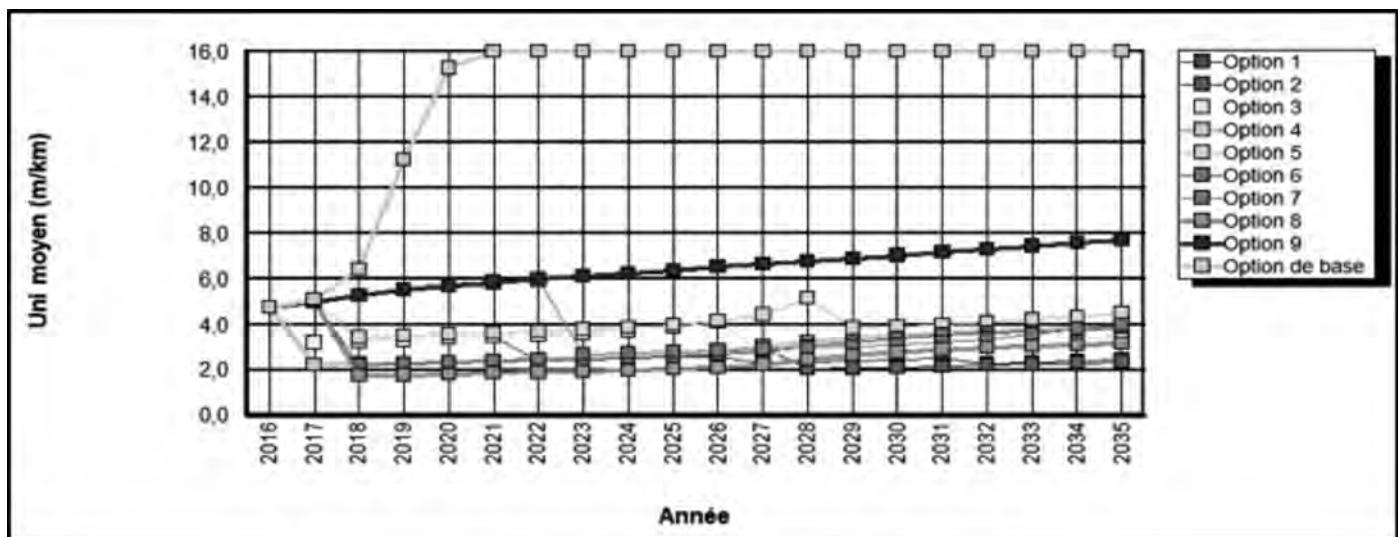


Figure 4 : Évolution de l'uni de la section homogène SH1 en fonction des différentes options

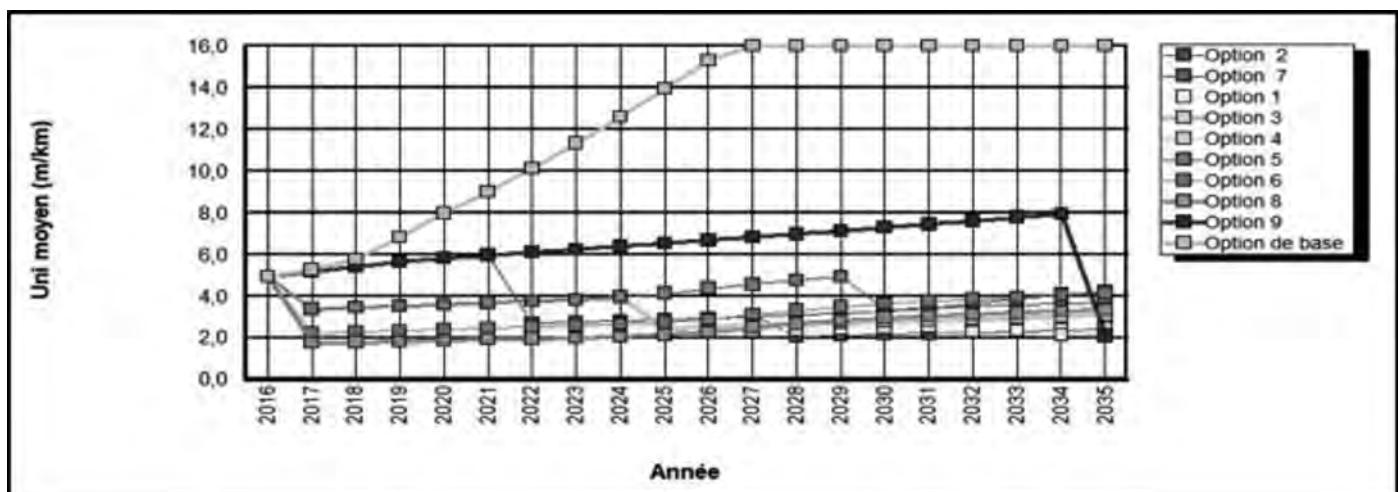


Figure 5 : Évolution de l'uni de la section homogène SH2 en fonction des différentes options

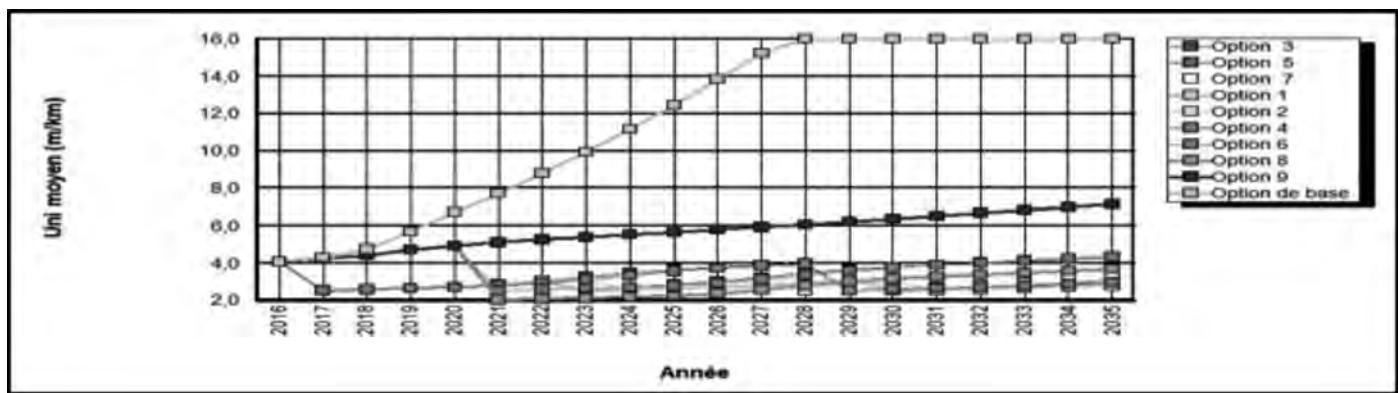


Figure 6 : Évolution de l'uni de la section homogène SH3 en fonction des différentes options

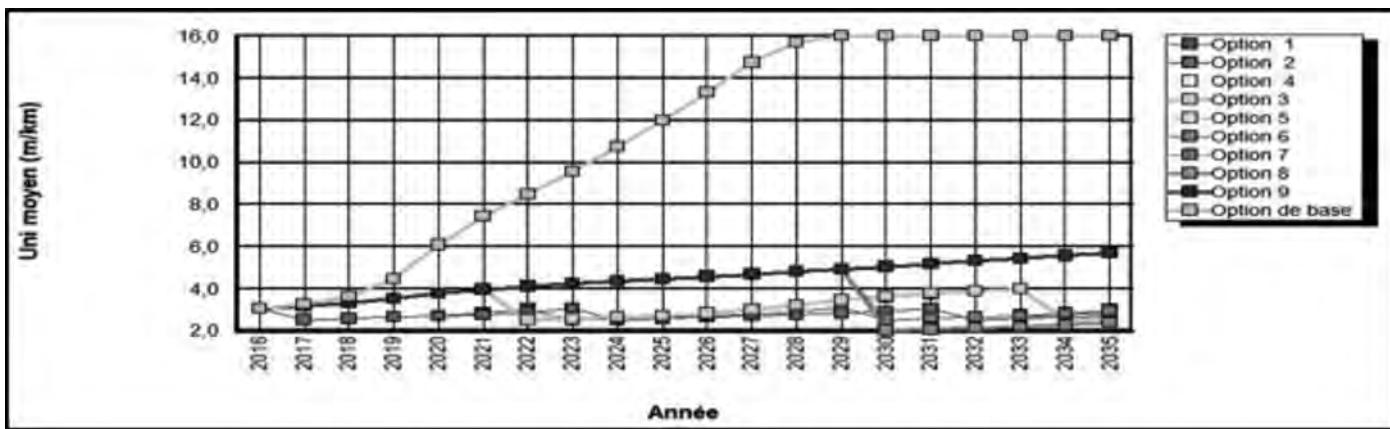


Figure 7 : Évolution de l'uni de la section homogène SH4 en fonction des différentes options

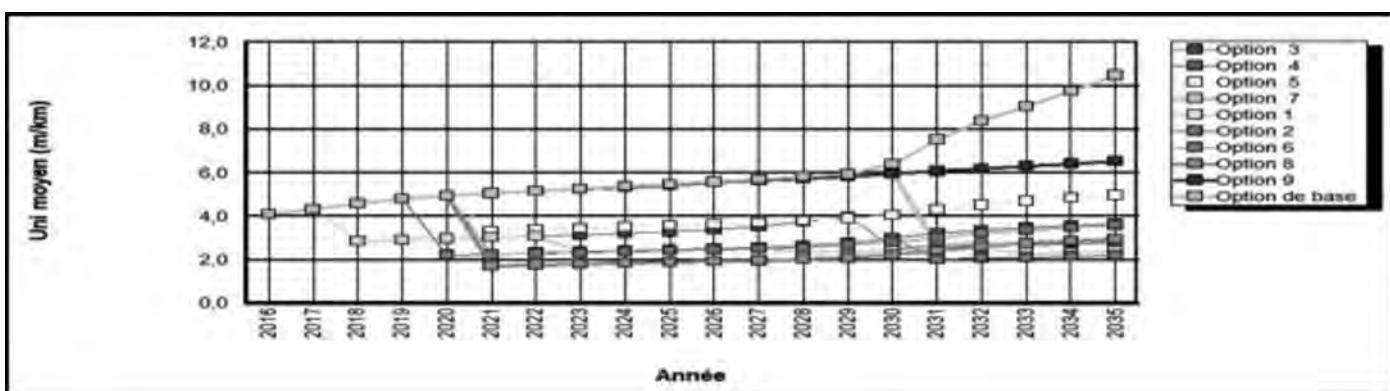


Figure 8 : Évolution de l'uni de la section homogène SH5 en fonction des différentes options

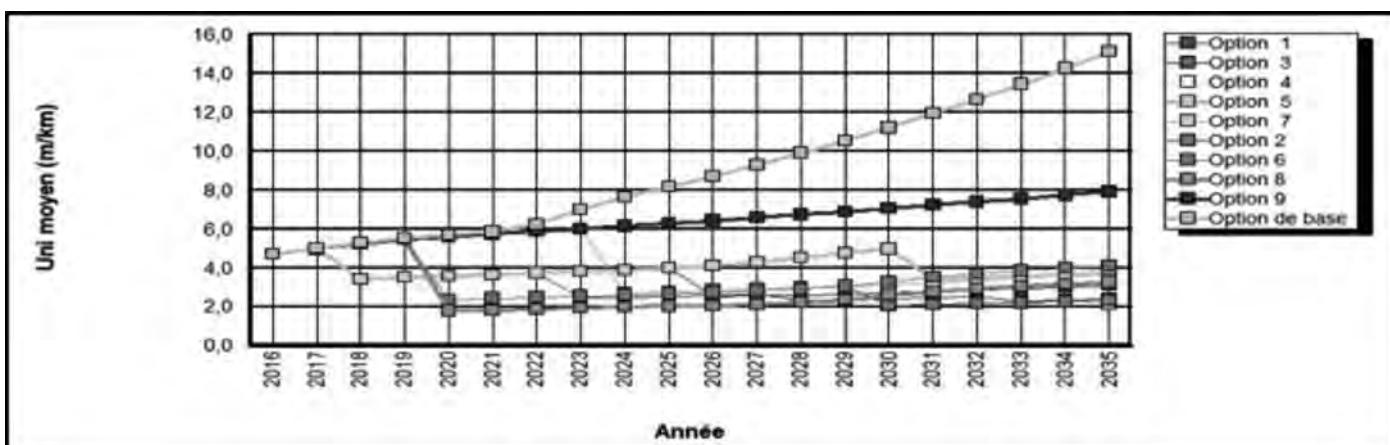


Figure 9 : Évolution de l'uni de la section homogène SH6 en fonction des différentes options

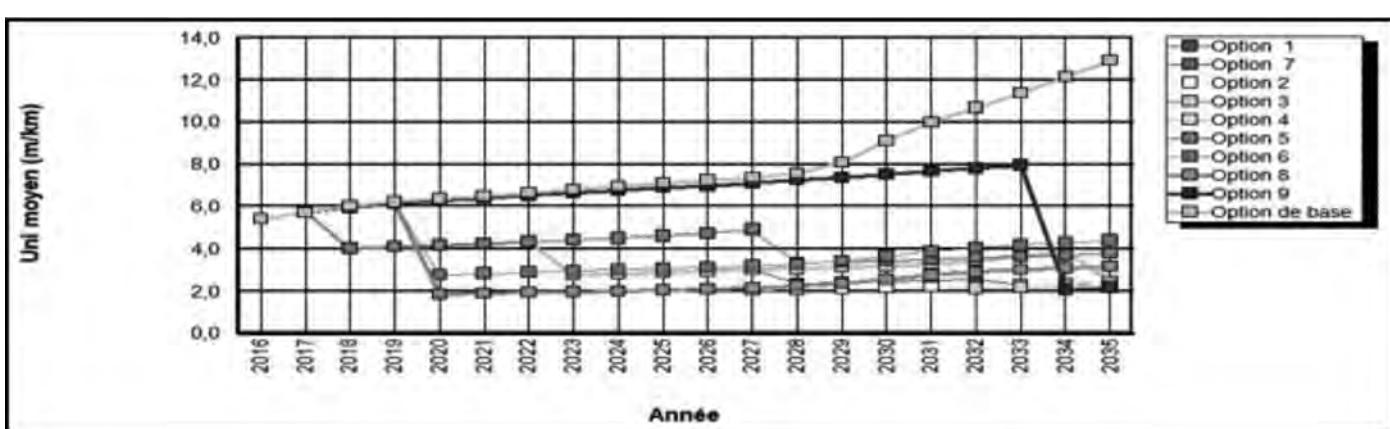


Figure 10 : Évolution de l'uni de la section homogène SH7 en fonction des différentes options

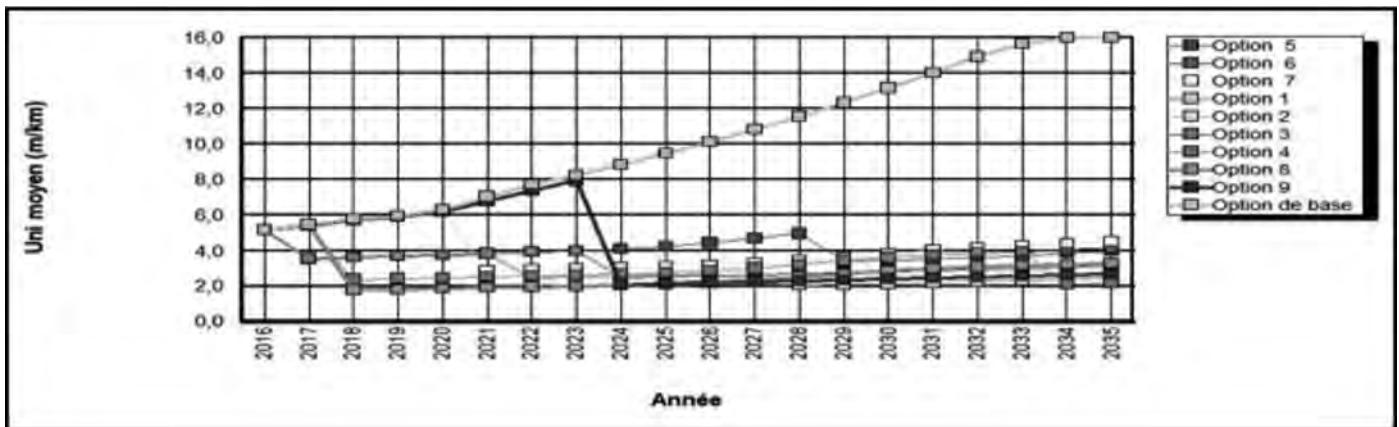


Figure 11 : Évolution de l'uni de la section homogène SH8 en fonction des différentes options

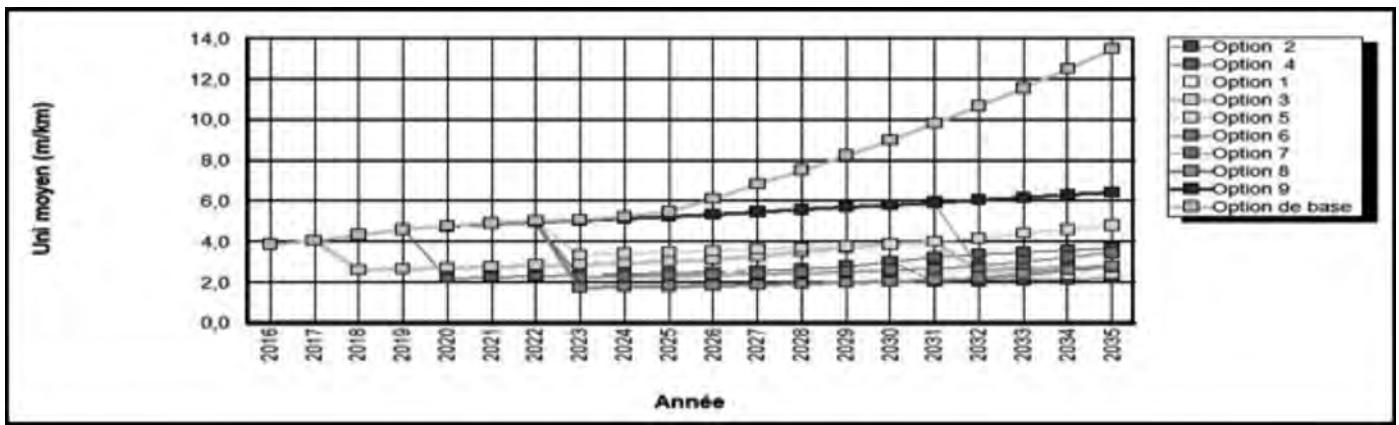


Figure 12 : Évolution de l'uni de la section homogène SH9 en fonction des différentes options

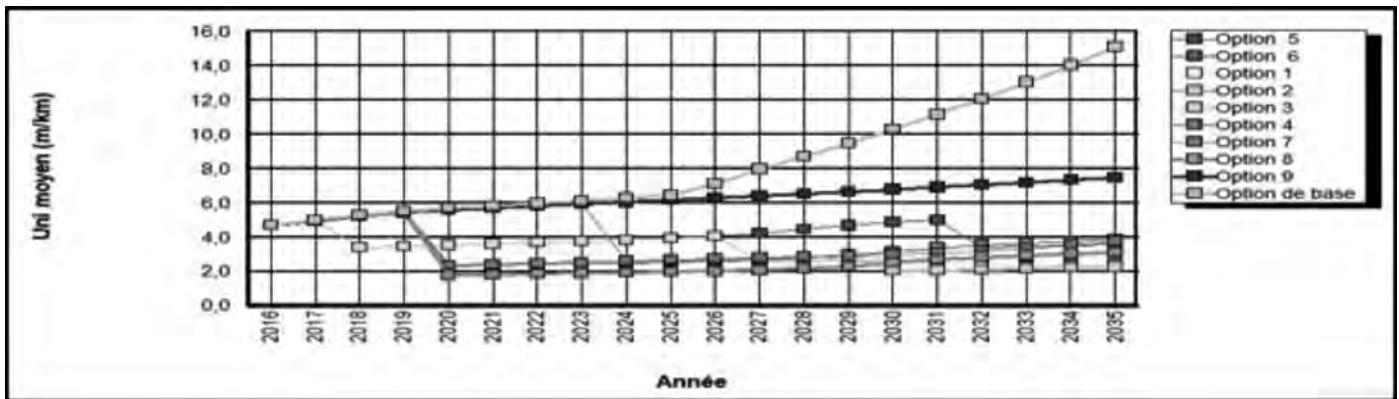


Figure 13 : Évolution de l'uni de la section homogène SH10 en fonction des différentes options

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

Les figures 14 à 33 présentent les quantités totales d'énergie consommée par les véhicules pendant toute la période d'analyse des options appliquées aux sections. Les quantités totales d'énergie de cycle de vie consommée par les véhicules (EGLOB) de l'option de base des sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont respectivement égales à 143 314 GJ, 12 540 GJ, 7 876 GJ, 11 429 GJ, 13 215 GJ, 16 664 GJ, 17 705 GJ, 5 709 GJ, 15 194 GJ et 12 744 GJ. Il peut être constaté sur les figures 14 à 33 que les quantités d'EGLOB de l'option de base sont les plus élevées comparativement

aux options 1 à 9. Il s'avère que l'option de base est la plus consommatrice d'énergie étant donné qu'au lieu d'améliorer l'état des sections, elle entraîne une augmentation brusque du taux de détérioration des sections en modifiant leurs états qui étaient préalablement « bon » et « moyen » et passent désormais à un état « mauvais » voire même « médiocre ». Un tel piètre état nécessite plus de consommation des ressources telles que le carburant, l'huile, les pneumatiques et les pièces détachées (Odoki and Kerali 2000) par les véhicules circulant sur ces sections, justifiant ainsi les quantités élevées d'EGLOB de l'option de base.

Les quantités minimales d'EGLOB des sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont respectivement égales à 11 270 GJ, 11 230 GJ, 6 928 GJ, 107 754 GJ,

12 893 GJ, 15 548 GJ, 17 091 GJ, 5 278 GJ, 14 838 GJ et 12 360 GJ, étant donné que ces quantités minimales d'EGLOB correspondent à celles des options 4, 2, 4, 2, 1, 1,8,2, 1 et 8 appliquées respectivement aux sections SH1 à SH10. Les pourcentages de réduction de la consommation d'énergie des options correspondants aux quantités minimales d'EGLOB mentionnées ci-dessus dont les valeurs sont respectivement de 21,27%, 10,45%, 12,04%, 5,9%, 2,43%, 6,70%, 3,46%, 7,55%, 2,34% et 5,21% pour les sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont les plus élevés comparativement aux options de base des sections. Par conséquent, ces options sont les meilleures options d'entretien périodique pour la réduction de la consommation d'énergie par les véhicules motorisés sur un cycle de vie de 20 ans. De plus, l'application de ces options aux sections réduira considérablement la quantité d'énergie consommée par les véhicules pour les transports des personnes et des marchandises. À l'exception de l'option 8 qui est composée des travaux de réhabilitation et de l'entretien courant, les autres meilleures options sont des options d'entretien

préventif déclenchées à partir des IRI de 3 et 4 m/km et chaque 3 et 5 ans. Aucune meilleure option ne comprend les travaux de reconstruction étant donné que l'évolution des dégradations n'a pas atteint les seuils nécessitant le déclenchement d'une telle intervention. Les dégradations de surface des chaussées dues à l'ornierage, à la fissuration, aux nids de poule, aux arrachements, aux dentelles de rives, au système de drainage, à l'adhérence, à la texture ou à toutes autres imperfections de surface influencent considérablement la consommation d'énergie des véhicules (Haider and Conter 2012). L'entretien préventif dont le but est d'améliorer l'état fonctionnel des chaussées sans apport significatif sur la structure des chaussées (AASTHO 2012) permet de contrôler ou de réparer ces dégradations de surface (EC 2006, Haider and Conter 2012). Par conséquent, les meilleures options déterminées dans cette étude en considérant les quantités minimales d'EGLOB sont cohérentes et pertinentes étant donné qu'elles sont principalement composées de resurfaçages minces en BB de 30 mm et 50 mm et de rechargements en EMSG et ES qui sont des travaux d'entretien préventif.

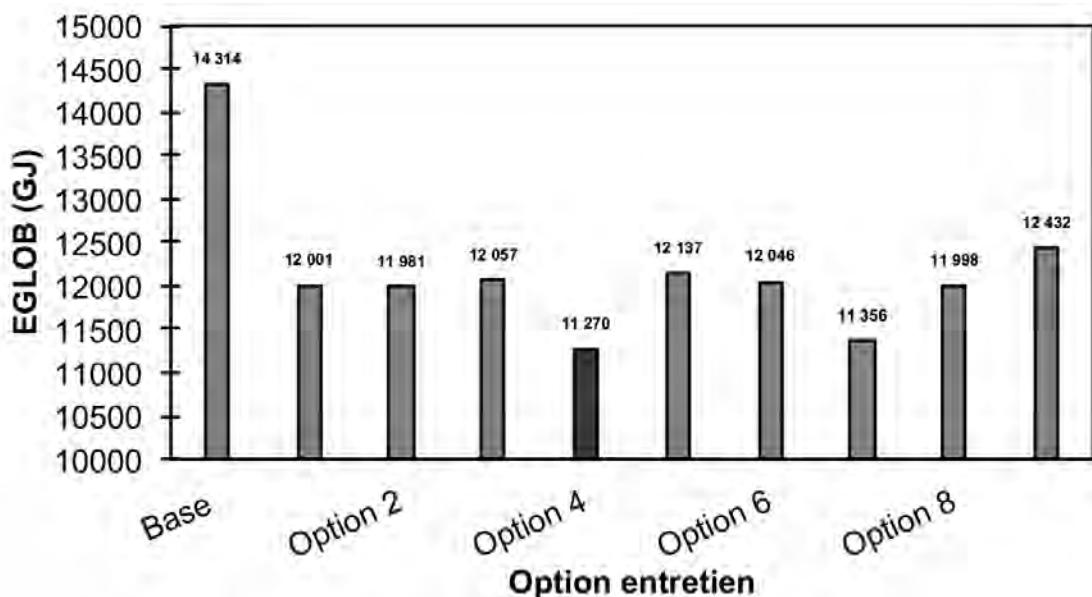


Figure 14 : Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH1

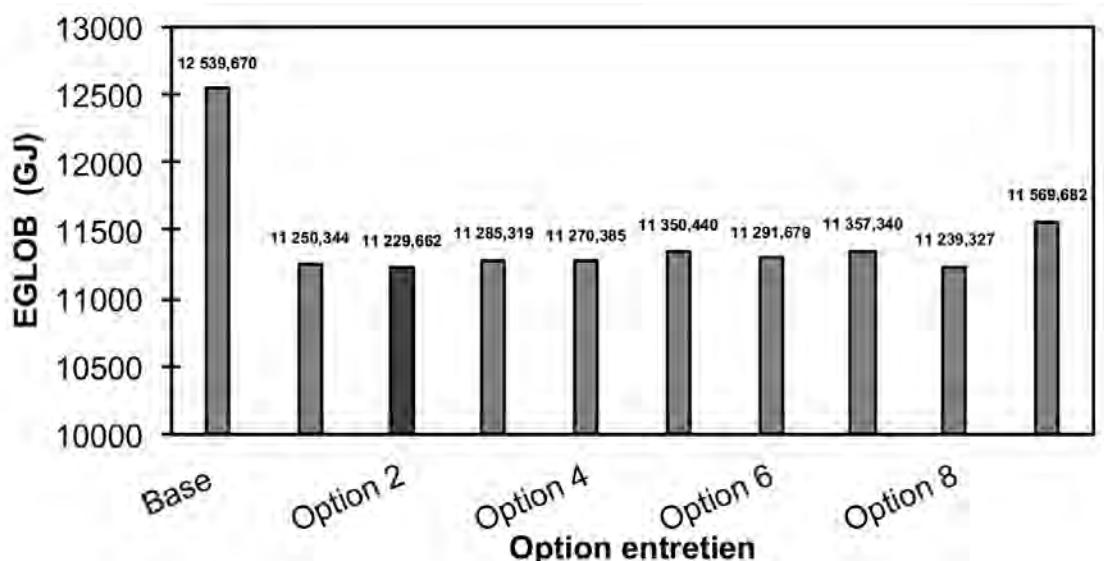


Figure 15 : Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH2

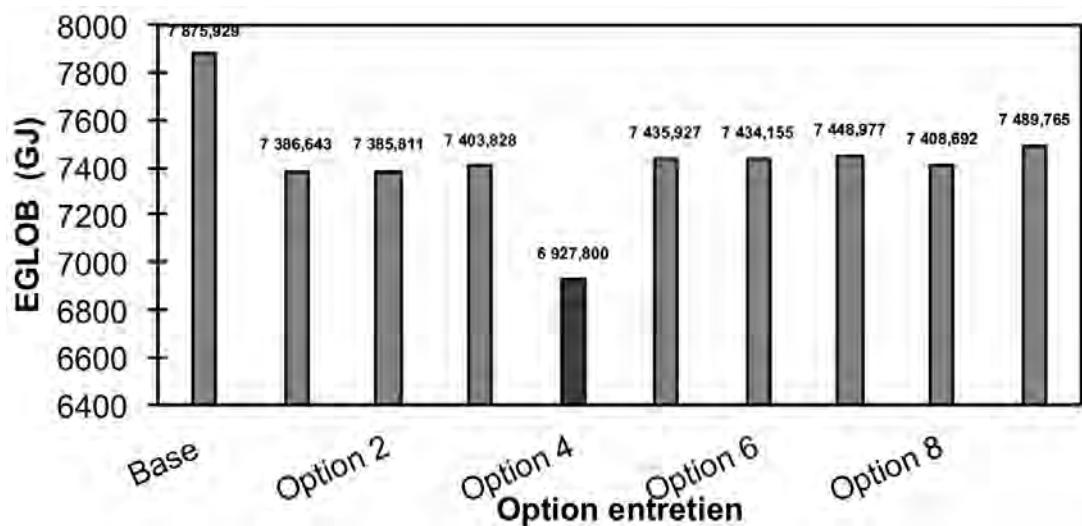


Figure 16 : Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH3

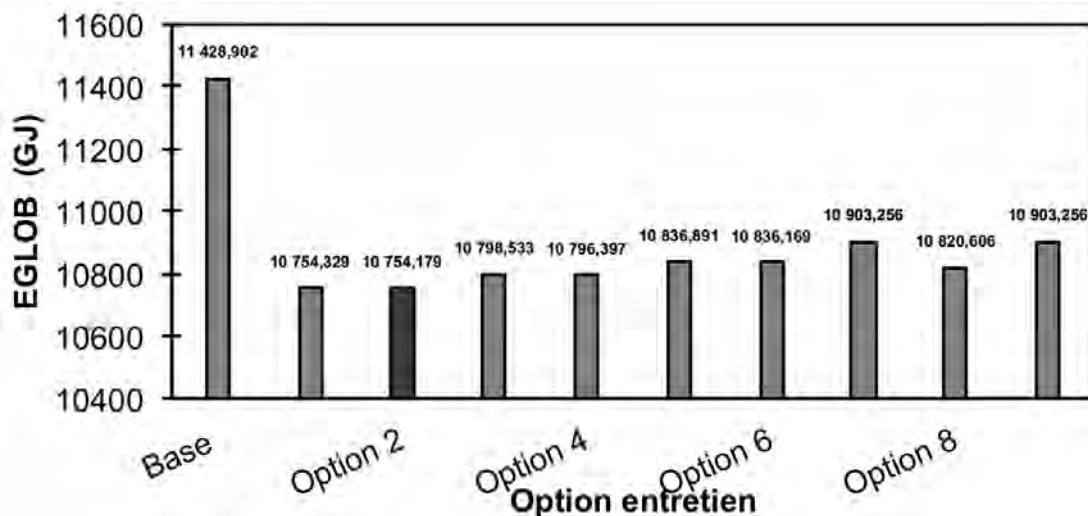


Figure 17 : Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH4

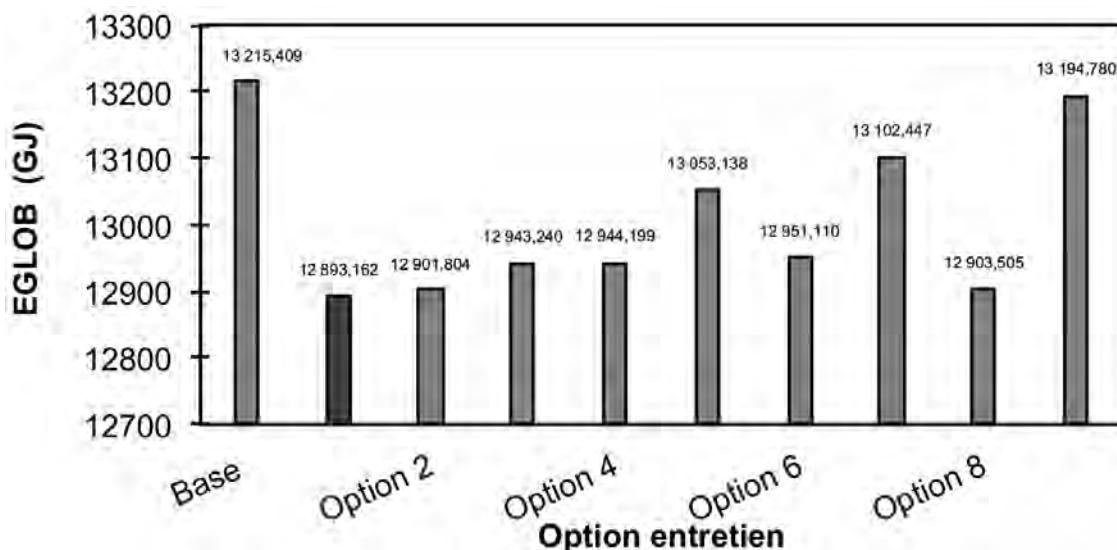


Figure 18 : Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH5

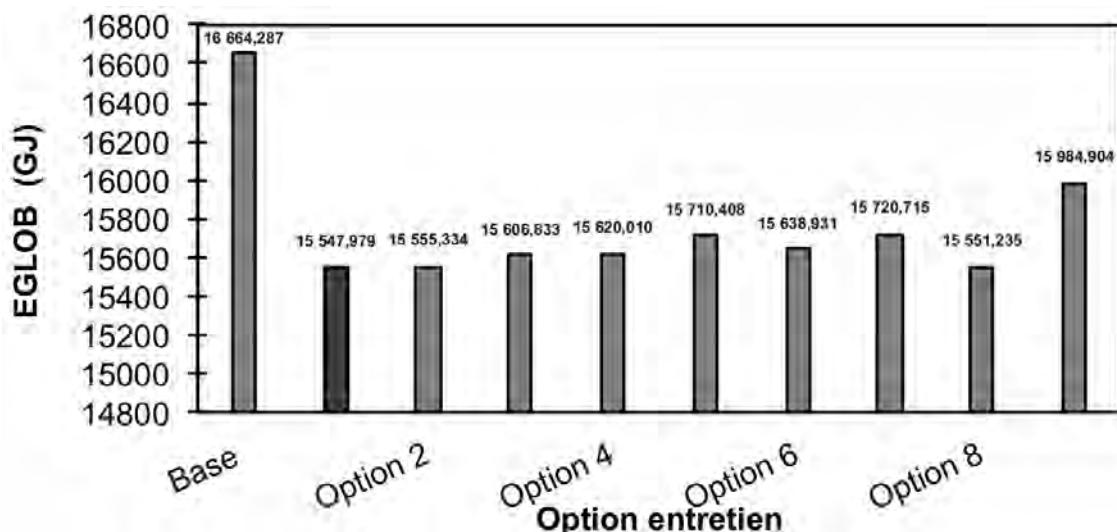


Figure 19 : Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH6

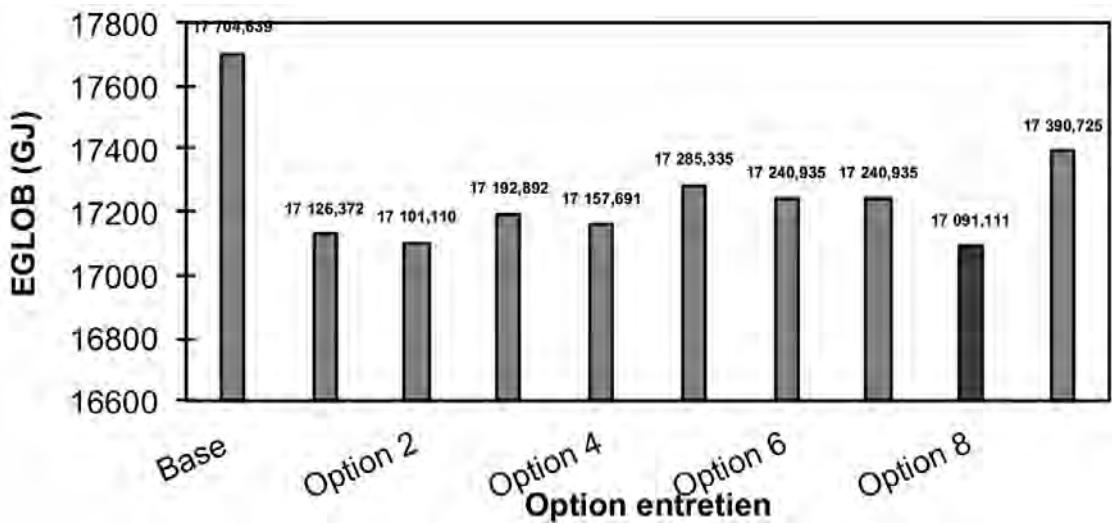


Figure 20 : Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH7

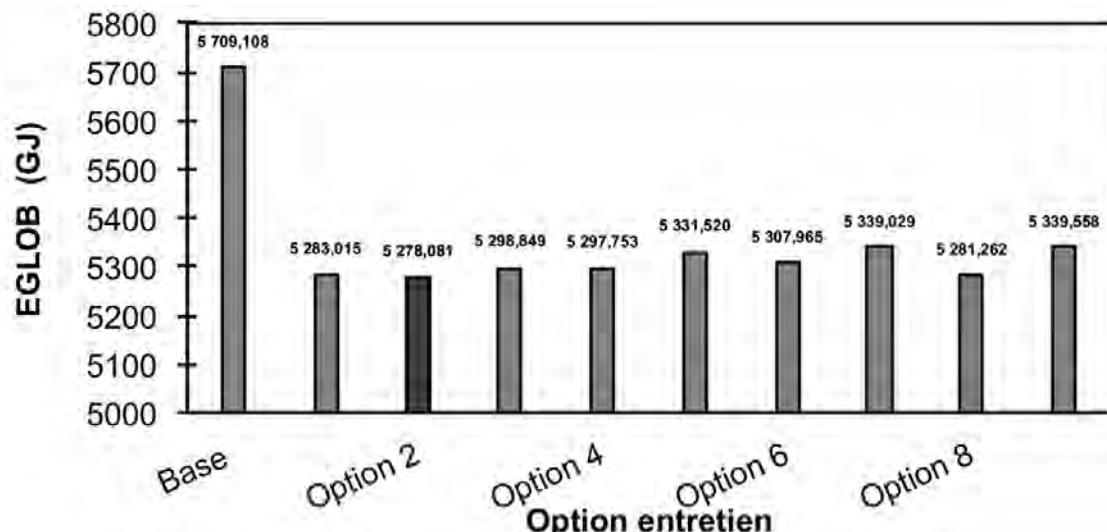


Figure 21 : Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH8

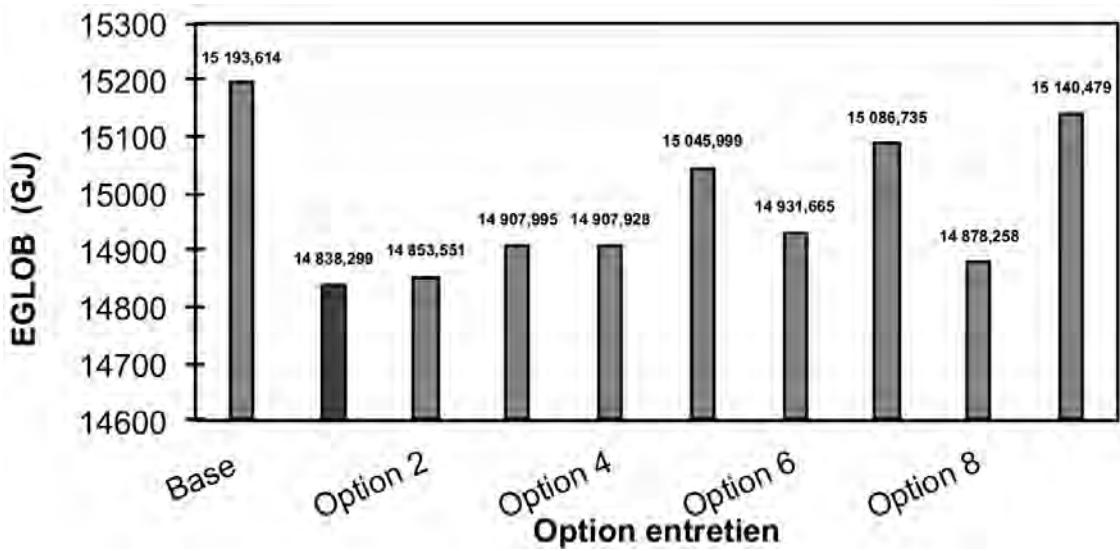


Figure 22 : Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH9

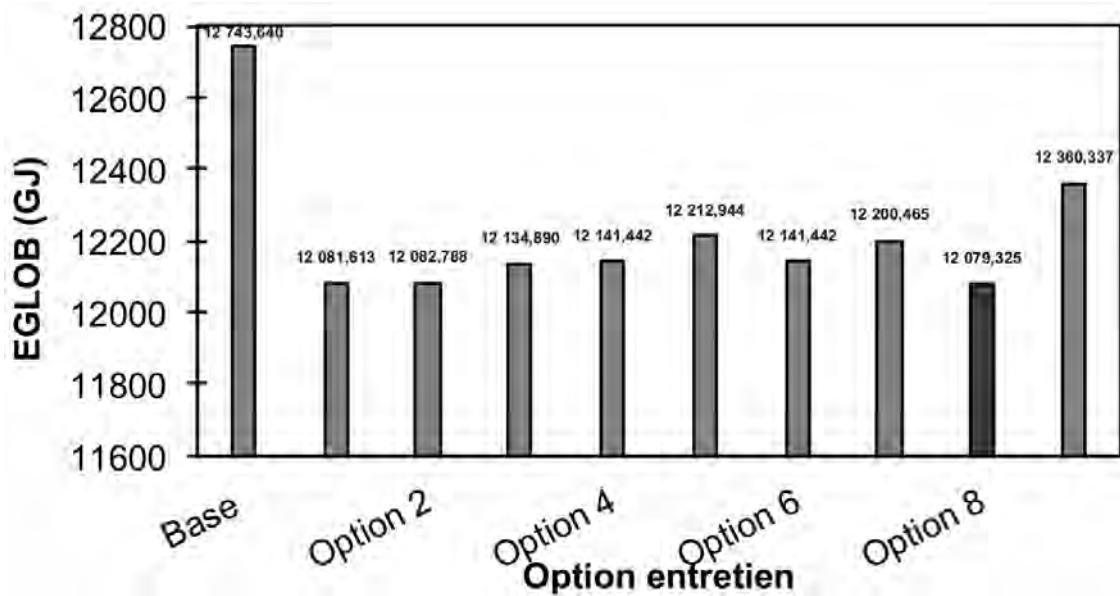


Figure 23 : Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH10

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

Les figures 24 à 33 présentent les coûts du cycle de vie des émissions polluantes des véhicules des options appliquées à chaque section (CCVEE). Les CCVEE de l'option de base des sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont respectivement égaux à 2,44 M\$USD, 2,82 M\$USD, 2,30 M\$USD, 3,12 M\$USD, 5,11 M\$USD, 5,97 M\$USD, 6,82 M\$USD, 1,62 M\$USD, 4,92 M\$USD et 4,13 M\$USD. Comparativement aux options 1 à 9, les coûts de cycle de vie des émissions polluantes de l'option de base sont les plus élevés, ce qui est conforme aux résultats attendus, puisque l'option de base consiste en la réalisation des travaux d'entretien courant minimum qui sont inefficients pour faire régresser la détérioration des chaussées.

Les CCVEE minimaux des sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont respectivement égaux

à 2,05 M\$USD, 2,48 M\$USD, 2,10 M\$USD, 3,06 M\$USD, 4,58 M\$USD, 5,66 M\$USD, 6,23 M\$USD, 1,54 M\$USD, 4,85 M\$USD et 3,96 M\$USD correspondant respectivement aux options 1, 8, 5, 8, 2, 1, 8, 2, 1 et 8. Les économies sur les coûts de cycle de vie des émissions polluantes des meilleures options comparativement aux options de base de chaque section sont respectivement de 15,57%, 12,06%, 8,70%, 1,92%, 8,41%, 5,19%, 8,65%, 4,82%, 1,54% et 4,09% pour les sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10. Ces options sont considérées comme les meilleures options de chaque section étant donné que leurs économies sur les coûts de cycle de vie des émissions polluantes sont les plus élevées comparativement aux options de base des sections. Les meilleures options mentionnées ci-dessus sont composées des travaux d'entretien préventif (options 1, 2 et 5) tels que le resurfaçage mince en BB de 30 et 50 mm et les rechargements en ESMSG et en Esb et des travaux de réhabilitation (option 8) tels que le resurfaçage structurel en BB de 80 mm et le rechargeement en

Esb avec reprofilage. Techniquement, il n'est pas recommandé de choisir une option de réhabilitation telle que l'option 8 pour une route en bon état même si les CCVVE sont les plus faibles. En effet, la présence de cette option dans les meilleures options choisies n'est pas cohérente. Cela se justifie par les incertitudes et l'insuffisance de l'état de l'art pour calculer les coûts unitaires

des émissions polluantes de manière plus précise. Cependant, en utilisant uniquement les quantités totales des émissions polluantes sur le cycle de vie en tonnes, les options comprenant les travaux d'entretien préventif constituent les meilleures options. Ces résultats sont présentés pour des raisons de conformité et de cohérence avec les objectifs du présent article.

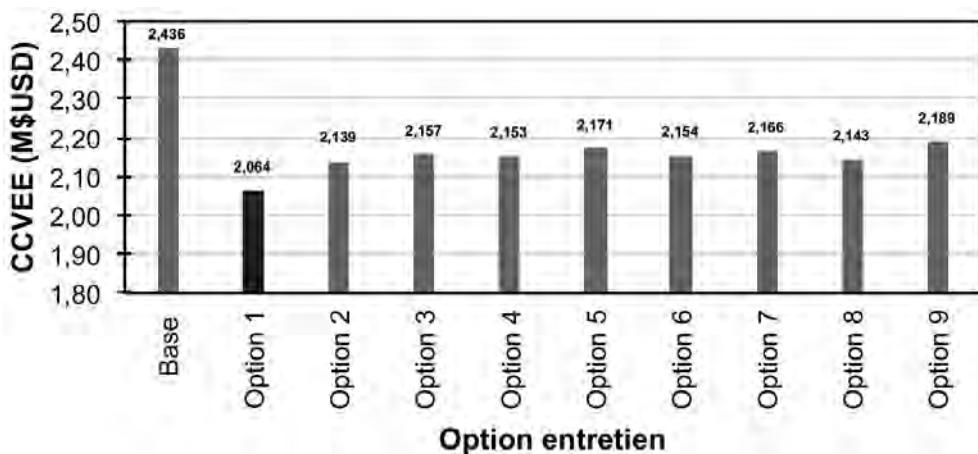


Figure 24 : Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH1

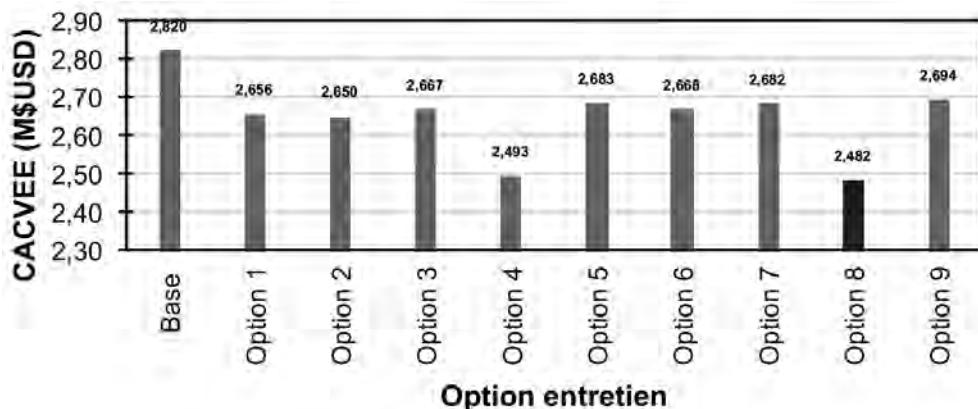


Figure 25 : Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH2

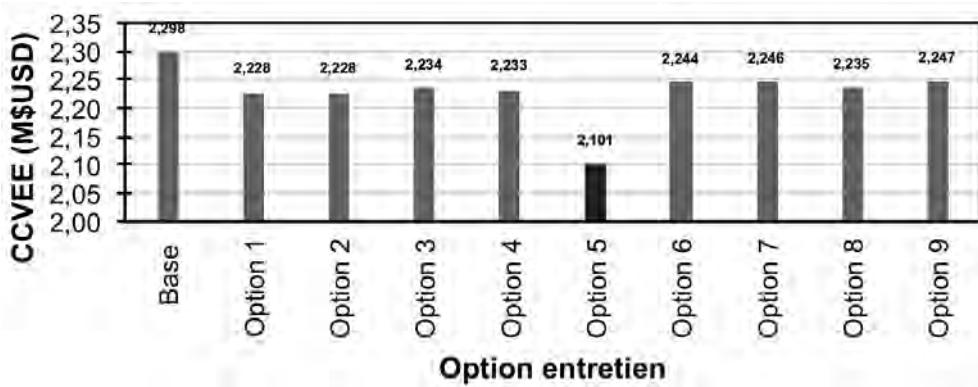


Figure 26 : Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH3

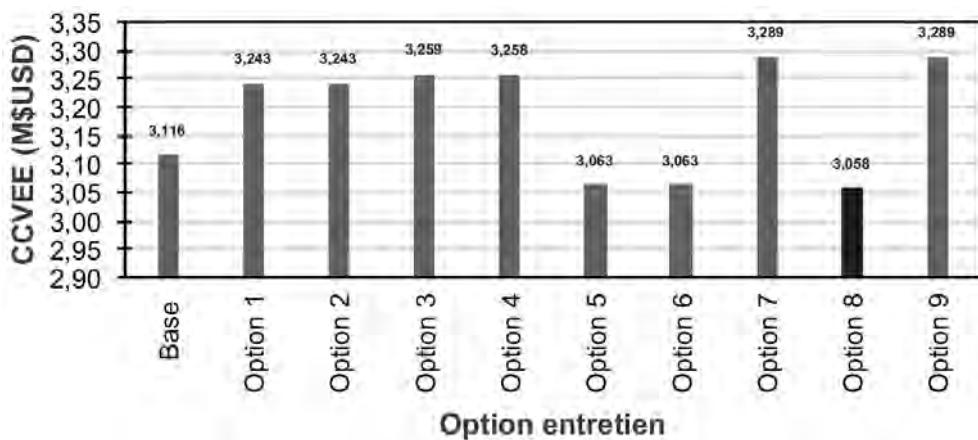


Figure 27 : Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH4

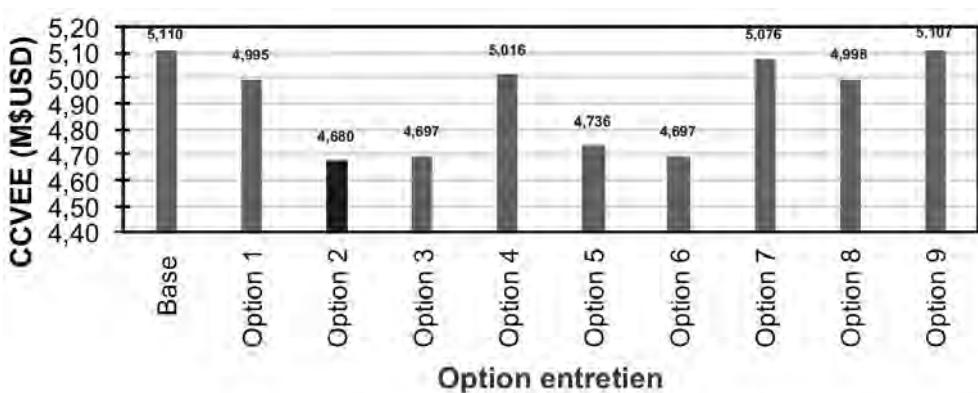


Figure 28 : Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH5

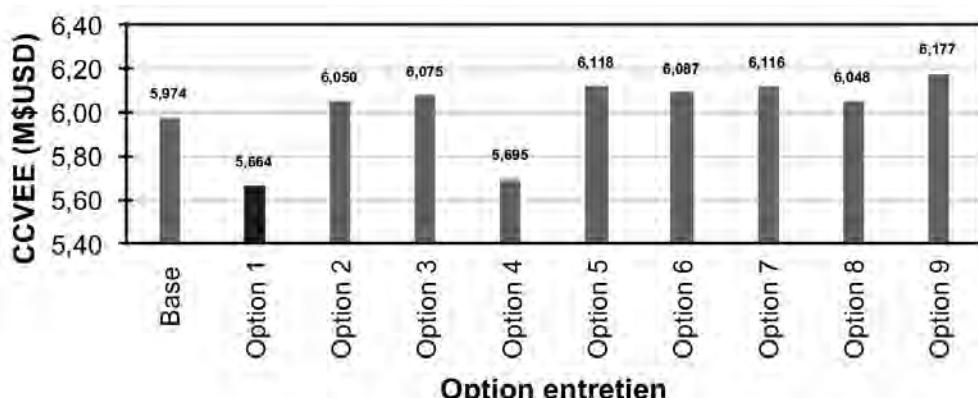


Figure 29 : Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH6

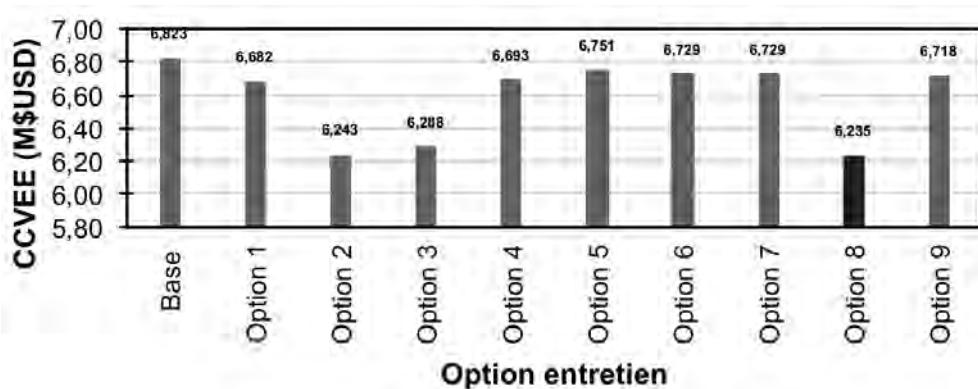


Figure 30 : Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH7

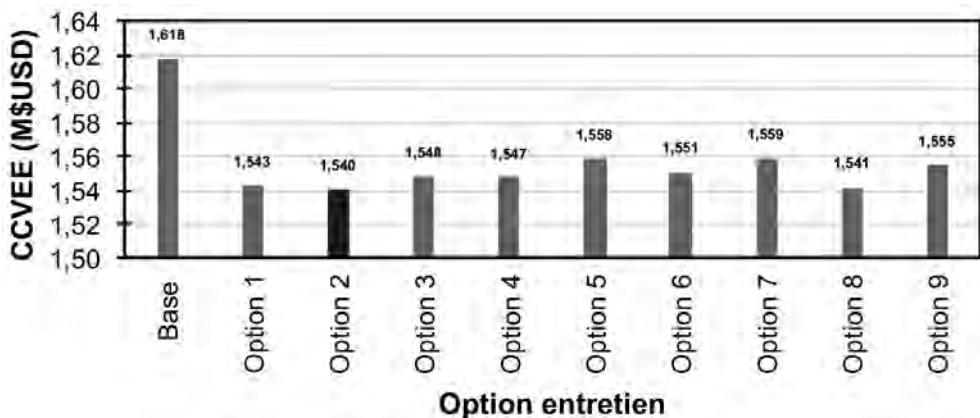


Figure 31 : Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH8

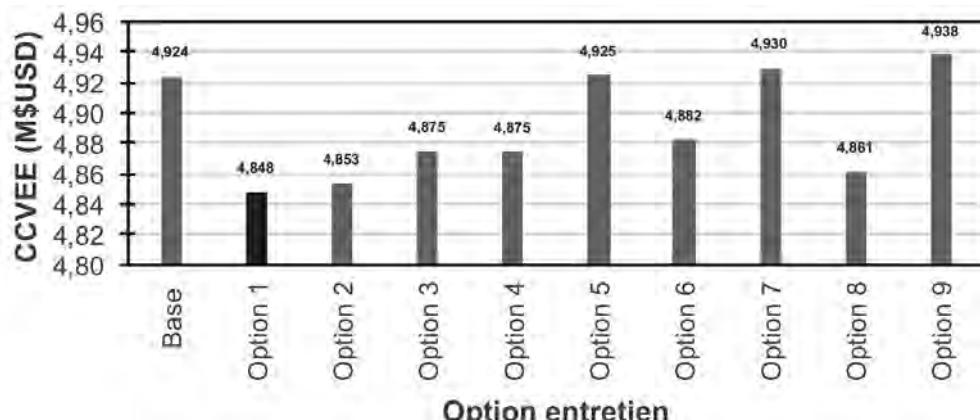


Figure 32 : Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH9

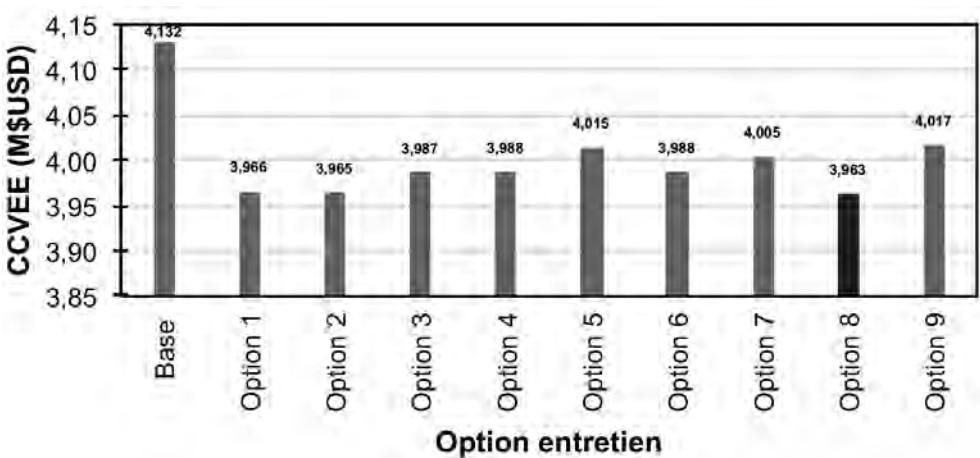


Figure 33 : Coûts du cycle de vie des émissions polluantes de la section SH10

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

Les coûts totaux du cycle de vie de transport (CTCV) des options 1 à 9 incluant l'option de base appliquée à chaque section sont présentés aux figures 34 à 42. Les CTCV de l'option de base appliquée aux sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont respectivement égaux à 331,73 M\$USD, 239,45 M\$USD, 149,20 M\$USD, 212,74 M\$USD, 219,37

M\$USD, 303,04 M\$USD, 313,75 M\$USD, 95,75 M\$USD, 251,43 M\$USD et 222,53 M\$USD. À l'exception de l'option de base appliquée aux sections SH7, SH8, les CTCV de l'option de base appliquée sur les autres sections sont supérieurs aux CTCV des options 1 à 9. En effet, les CTCV de l'option 9 appliquée aux sections SH7 et SH8 qui sont respectivement égaux à 322,39 M\$USD et 105,63 M\$USD et s'avèrent supérieurs aux CTCV de l'option de base appliquée à ces sections. Cette tendance est probablement associée aux états des sections

SH7 et SH8 exprimés en termes d'IRI dont les valeurs (5,28 m/km et 5,04 m/km) sont plus élevées que les valeurs des IRI des autres sections. De plus, les valeurs de l'IRI de 5,28 m/km et 5,04 m/km respectivement des sections SH7 et SH8 traduisent des états de détérioration plus avancés que ceux des autres sections. Par conséquent, les sections SH7, SH8, comparativement aux autres sections, pourraient nécessiter dans une période de temps plus courte des travaux importants tels que les travaux de reconstruction dont les CTCV sont plus élevés. Cela indique aussi que les sections de routes en état de détérioration avancée nécessitent des coûts d'administration plus élevés pour rétablir leurs fonctionnalités et affectent plus les usagers ou la société en général en générant des coûts d'usagers et coûts d'externalités plus élevés (Joubert 2006).

Les meilleures options, qui sont les options avec des CTCV minimales des sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10, sont respectivement égales à 210,91 M\$USD, 174,80 M\$USD, 111,69 M\$USD, 160,65 M\$USD, 208,97 M\$USD, 260,46 M\$USD, 284,12 M\$USD, 79, 67 M\$USD, 228,46 M\$USD et 195,97 M\$USD (voir figures 34 à 42). Ces meilleures options des sections SH1 à SH10 correspondent

respectivement aux options 4, 3, 3, 3, 3, 3, 6, 3, 2 et 3. Les économies sur des coûts totaux du cycle de vie de transport des meilleures options par rapport aux options de base de chaque section sont de 36,42%, 27,00%, 25,14%, 24,48%, 4,74%, 14,05%, 9,44%, 16,80%, 9,13% et 11,94% respectivement pour les sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10. Ces résultats sont très intéressants et confirment une fois de plus l'importance de l'entretien préventif puisque les options 2, 4, 3 et 6 sont composées des travaux d'entretien préventif tels que le recharge mince en BB de 30 mm et 50 mm pour les routes en EB et le recharge en Esb et en EMSG. En aucun cas les meilleures options n'incluent les options 8 et 9 qui sont composées respectivement des travaux de réhabilitation et des travaux de reconstruction. Cela permet d'affirmer que la réalisation des travaux d'entretien préventif sur des sections de routes dont les états sont «bon» et «moyen» permet de réduire l'empreinte du carbone (faibles coûts des émissions polluantes) et de reporter le recours aux travaux de remise en état (réhabilitation) et de reconstruction qui sont plus dispendieux (AIPCR 2016, Khan, Mesbah *et al.* 2017).

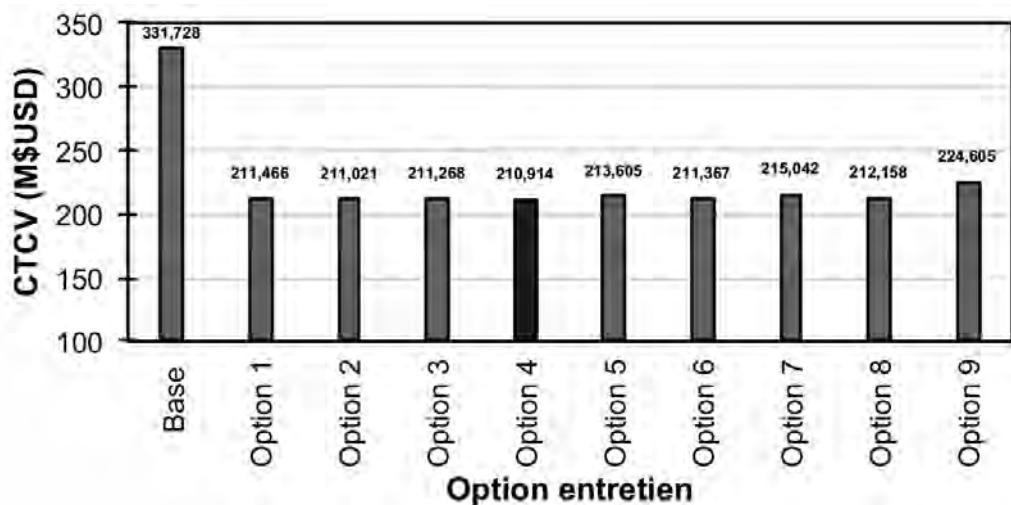


Figure 34 : Coûts totaux de cycle de vie de la section SH1

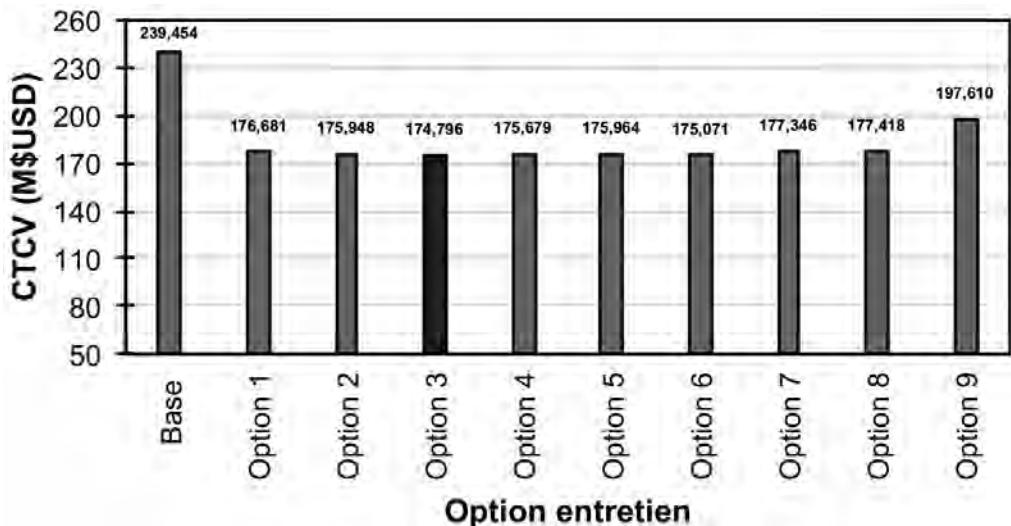


Figure 35 : Coûts totaux de cycle de vie de la section SH2

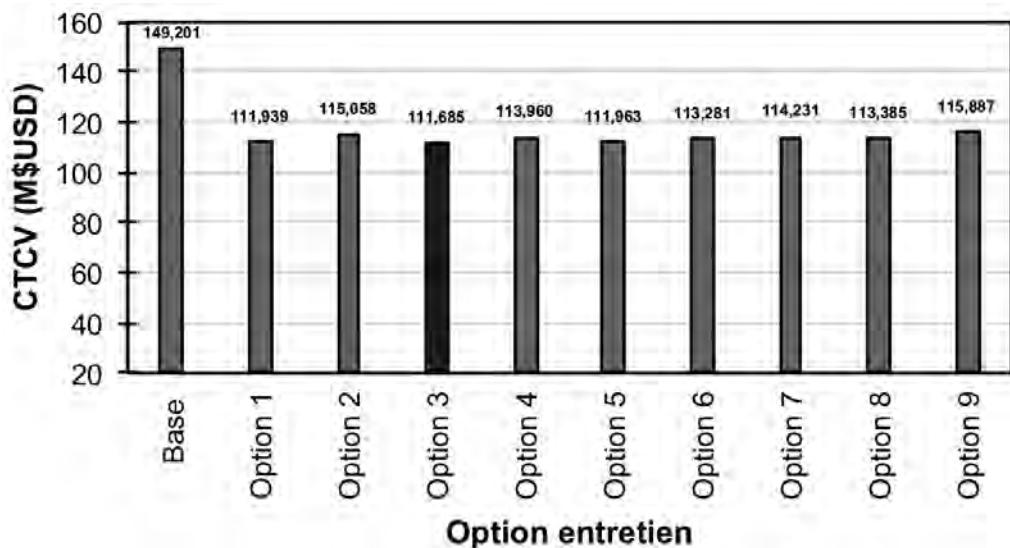


Figure 36 : Coûts totaux de cycle de vie de la section SH3

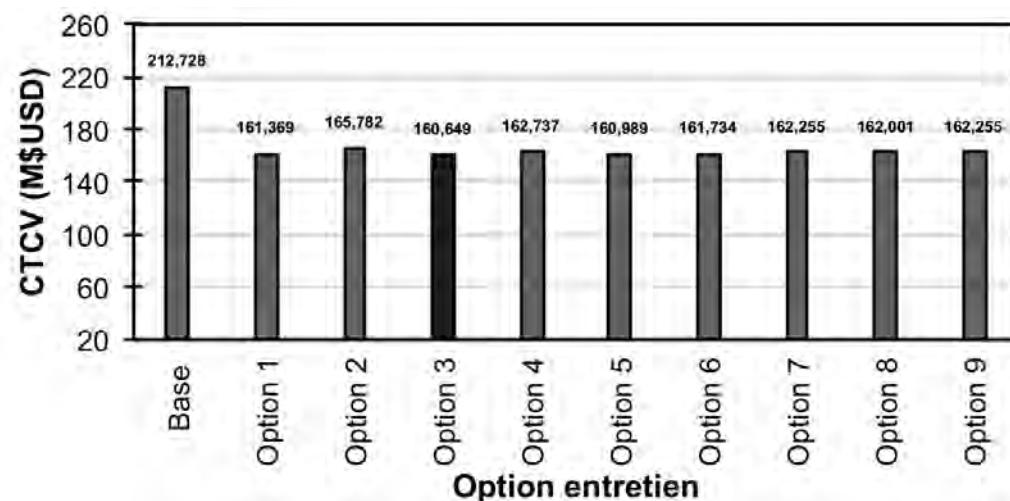


Figure 37 : Coûts totaux de cycle de vie de la section SH4

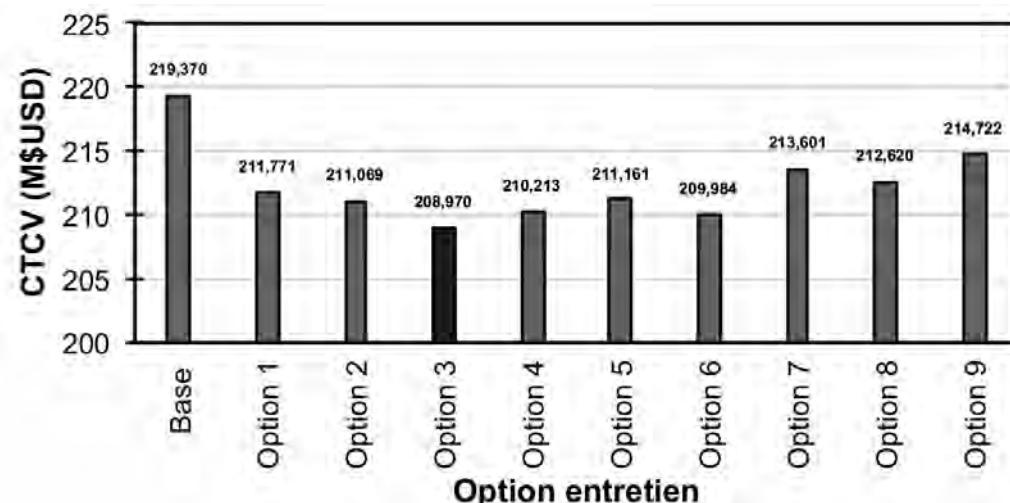


Figure 38 : Coûts totaux de cycle de vie de la section SH5

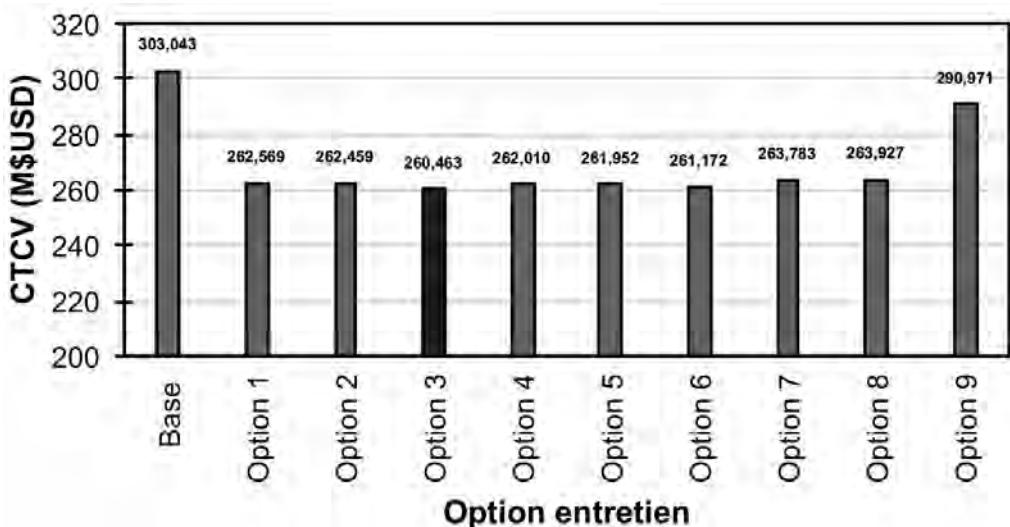


Figure 39 : Coûts totaux de cycle de vie de la section SH6

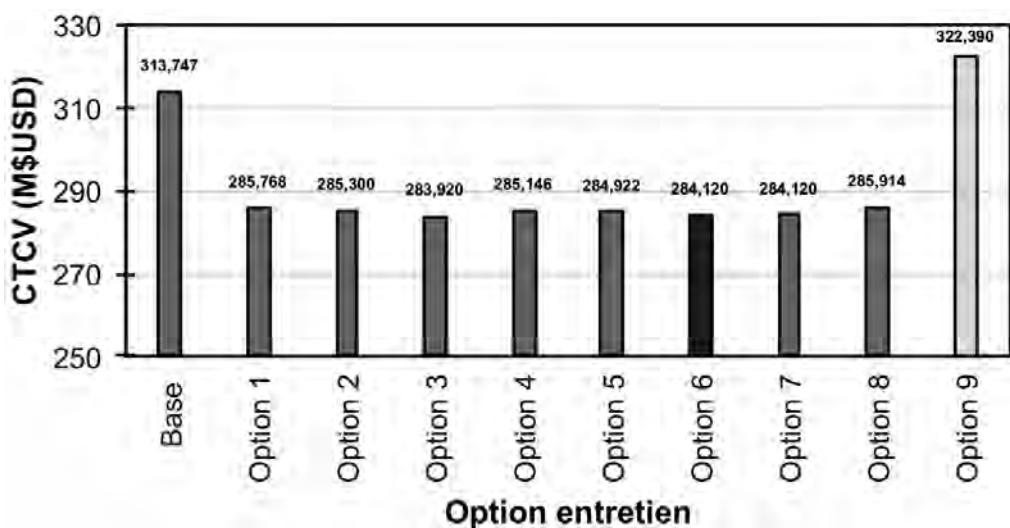


Figure 40 : Coûts totaux de cycle de vie de la section SH7

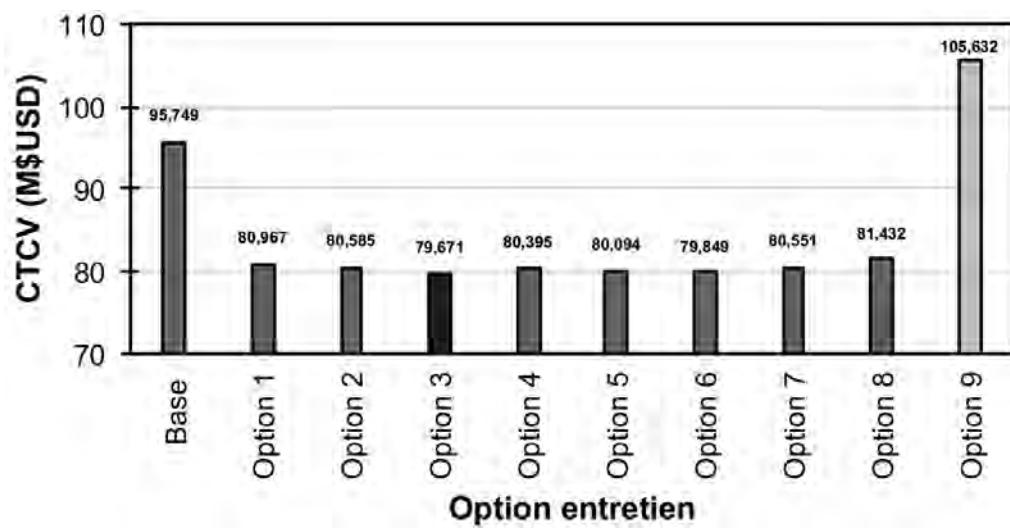


Figure 41 : Coûts totaux de cycle de vie de la section SH8

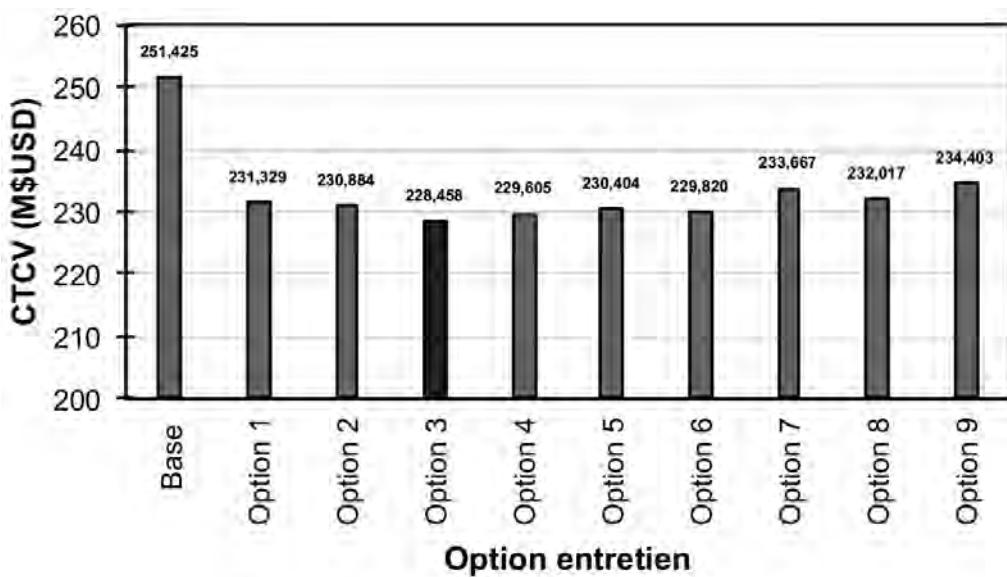


Figure 42 : Coûts totaux de cycle de vie de la section SH9

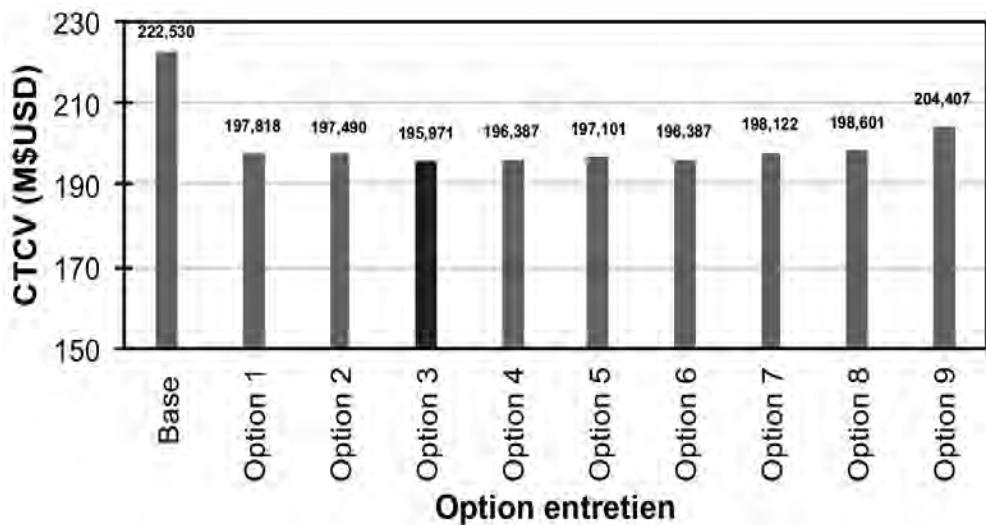


Figure 43 : Coûts totaux du cycle de vie de la section SH10

3.4.1. Répartitions des coûts totaux du cycle de vie de transport

Les coûts totaux des transports pendant le cycle de vie sont la somme des coûts du cycle de vie d'administration (CCVA), des coûts du cycle de vie des usagers et des coûts du cycle de vie des externalités environnementales. Les coûts totaux du cycle de vie des meilleures options de toutes sections sont de 1,92 milliard de dollars USD dont les CCVU représentent 95,6%, les CCVA représentent 2,44% et les CCVEE 1,96% (voir figure 44). Les CCVU constituent la plus grande proportion des coûts totaux de transport et traduisent ainsi l'importance des coûts sociaux supportés par la société en ce qui concerne le transport des personnes et des biens. Les CCVEE sont les plus faibles. Cependant, en plus des hypothèses de calcul qui peuvent s'avérer des sources d'incertitudes des CCVEE, seule une petite partie des externalités environnementales ont été monétarisées. En effet, plus exhaustivement, les coûts des externalités environnementales sont des coûts liés aux mesures d'atténuation du bruit, de la vibration, de l'érosion des sols, de la détérioration

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

Les CCVA sont la deuxième proportion des CTCV la plus élevée, mais s'avèrent très minimes par rapport au CCVU. Cela indique que l'administration de gestion routière du pays

concerné doit débourser 1,96% des CTCV pour entretenir adéquatement ses tronçons routiers de « haute priorité » sur une durée de 20 ans.

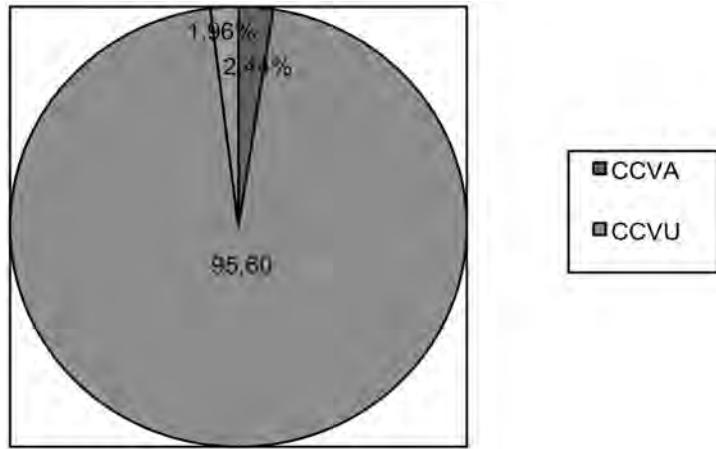


Figure 44 : Répartition des coûts totaux de cycle de vie

3.5. Optimisation sous contraintes budgétaires

3.5.1. Options optimums et ordre de priorité d'entretien des sections

Les résultats de l'optimisation des travaux d'entretien peuvent être subdivisés en deux principales parties telles que présentées au tableau 9. Une première partie des résultats est issue de la maximisation de la valeur actuelle nette sur le coût d'investissement (VAN/inv) sans aucune contrainte budgétaire pour déterminer les options optimales, qui se trouvent être les options dont les VAN/Cinv sont les plus élevées pour chaque section, et de déduire le besoin budgétaire total des différentes interventions en ERR. Il peut être vu au tableau 9 que ces options sont les mêmes que les meilleures options déterminées en considérant les CTCV. La deuxième partie des résultats provient de la maximisation de VAN/Cinv, mais sous réserve que les fonds disponibles représentent successivement 75%, 50% et 25% du budget total issu de la première partie.

Les tendances observées avec 75% du budget total disponible pour l'entretien sont les suivantes : l'option optimale pour la section SH4 est l'entretien courant qui est composé des travaux tels que l'entretien annuel du système de drainage, la réparation des nids de poule (ndp) à partir de 20 ndp/km et le colmatage des fissures à partir d'une surface de fissures structurelles de 5%. L'option optimale pour la section SH1 est le recharge en BB de 30 mm à partir d'un IRI de 5 et chaque 5 ans. L'option optimum des sections SH2, SH7, SH8 est le recharge en BB de 50 mm à partir d'un IRI de 5 et tous les 7 ans. L'option optimum de la section SH3 est le recharge en ESMSG à partir d'un IRI de 4 et tous les 3 ans. Les options optimums des sections SH5, SH6, SH9 et SH10 sont le recharge en BB de 30 mm à partir d'un IRI de 4 et tous les 5 ans. Avec 50% du budget, les tendances suivantes peuvent être énumérées : l'option optimum des sections SH4, SH5, SH9 est l'entretien courant ; l'option optimum de section SH1 est le recharge en BB de 50 mm à partir d'un IRI de 4 et tous les 7 ans ;

le recharge en BB de 30 mm à partir d'un IRI et tous les 5 ans est l'option optimum des sections SH2 et SH10 ; l'option optimum de la section SH3 est le recharge en ESMSG à partir d'un IRI de 5 et tous les 3 ans ; le recharge en BB de 50 mm à partir d'un IRI de 5 et tous les 7 ans est l'option optimum des sections SH6, SH7 et SH8.

Les tendances observées avec 25% du budget sont les suivantes : l'entretien annuel du système de drainage, la réparation des nids de poule (ndp) à partir de 20 ndp/km et le colmatage des fissures à partir d'une surface de fissures structurelles de 5% constituent l'option optimum des sections SH1, SH4, SH5, SH7, SH9 et SH10. L'option optimum des sections SH2, SH6 et SH8 est le recharge en BB de 50 mm à partir d'un IRI de 5 et tous les 7 ans. Le recharge en ESMSG à partir d'un IRI de 5 et tous les 3 ans est l'option optimum de la section SH3. Toutes les tendances observées ci-dessus avec les différents scénarios budgétaires indiquent clairement qu'avec une restriction du budget, l'entretien préventif n'est réalisable que sur certaines sections tandis que les autres options se limiteront à l'entretien courant. Plus le budget est réduit, plus les fonds disponibles pour réaliser les travaux d'entretien préventif (resurfaçage mince et recharge en enduit superficiel) sur certaines sections sont insuffisants et plus de sections recevront uniquement des travaux d'entretien. Cela influencera les coûts totaux des travaux de « fonctionnement » et des travaux d'« investissement » ainsi que l'état moyen de toutes les sections sur le cycle de vie. L'analyse d'une telle influence des restrictions budgétaires est présentée à la section 3.5.2.

Dans certains cas, des restrictions budgétaires peuvent amener certaines organisations routières à reporter certains travaux à l'année suivante. Il convient donc de faire une analyse comparative de la réalisation des travaux d'« investissement » durant la période budgétaire et le report de ces travaux à la première année suivant cette période budgétaire. Une telle comparaison s'effectue à l'aide d'un programme annuel ou pluriannuel des travaux en ciblant des périodes budgétaires d'un ou de deux ans (Morosiuk, Riley *et al.* 2006). Il est évident qu'un report

à l'année prochaine, par exemple d'un resurfaçage mince sur section qui devrait être réalisé cette année, pourrait se transformer en réhabilitation de la section en raison de son nouvel état plus détérioré qui nécessitera des travaux d'entretien plus

importants. La présente étude se limitera à l'analyse de programme de cycle de vie sans tenir compte de l'impact du report des travaux d'entretien.

Tableau 9 : Options optimaux en fonction des contraintes budgétaires

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

Les options optimales de chaque section, qui ont été déterminées en considérant que 100% du budget de l'entretien est disponible, peuvent être utilisées pour classer les sections par ordre de priorité en fonction de leurs rapports de VAN/Cinv. Le classement par ordre décroissant des VAN/Cinves permet classer les projets (sections) du plus prioritaire au moins prioritaire. Comme présenté à la figure 45, la section SH1 est celle dont la VAN/Cinv est la plus élevée, et constitue donc *à cet effet la section* la plus prioritaire suivie respectivement des sections SH4, SH3, SH2, SH6, SH10, SH8, SH9, SH7 et SH5. La section SH1 est certainement la plus prioritaire en raison de son volume de trafic qui est plus élevé comparativement à celui des autres sections. Il est important de mentionner que les paramètres du trafic tels que le TJMA et l'ÉCAS sont des paramètres d'entrée très pertinents pour l'analyse économique dont les résultats permettent de déterminer l'indicateur économique VAN/Cinv (TRL 2005). Par

conséquent, un trafic élevé mènera probablement à des valeurs élevées du rapport VAN/Cinv. Cependant, cette tendance ne peut pas être dégagée pour les autres sections parce leurs TJMA ne sont pas aussi élevés que celui de la section SH1. De plus, d'autres sections ont les mêmes trafics, d'autant plus qu'elles appartiennent aux mêmes tronçons de route (par exemple SH3 et SH4, SH5 à SH7). L'ordre de priorité des sections en fonction des VAN/Cinv ne peut pas être justifié uniquement par les paramètres du trafic, mais plutôt par l'action combinée du trafic des sections, des états des sections, des normes d'entretien appliquées aux sections et des conditions climatiques qui prévalent dans la zone d'étude des projets. Néanmoins, ce classement par ordre de priorité des sections en fonction des VAN/Cinv est très pertinent parce qu'il demeure le seul indicateur économique fiable et robuste pour classer les projets par ordre de priorité (Adiguna, Dewanti *et al.* 2017).

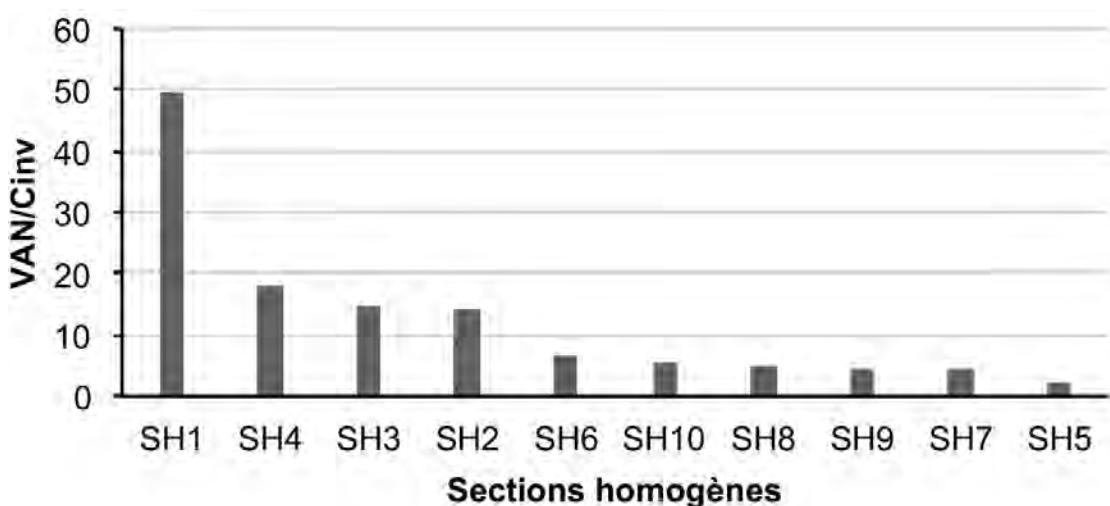


Figure 45 : Ordre de priorité des sections en fonction des VAN/Cinv

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

Les contraintes budgétaires influencent les états des sections et les coûts des travaux d'entretien courant et périodique pendant le cycle de vie. La figure 46 présente l'influence des différents scénarios budgétaires sur l'état moyen et les coûts totaux des travaux d'entretien. Les états moyens des sections pendant la période d'analyse sont égaux à 3,33 m/km, 3,48 m/km, 4,06 m/km et 4,72 m/km en considérant respectivement des scénarios budgétaires de 100%, 75%, 50%, 25% du budget total. Les coûts totaux du cycle de vie des travaux d'« investissement » (*entretien périodique*) de toutes les sections sous les contraintes budgétaires de 100%, 75%, 50% et 25% du budget total sont respectivement égaux à 49,64 M\$USD, 47,77 M\$USD, 33,83 M\$USD et 18,4 M\$USD.

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

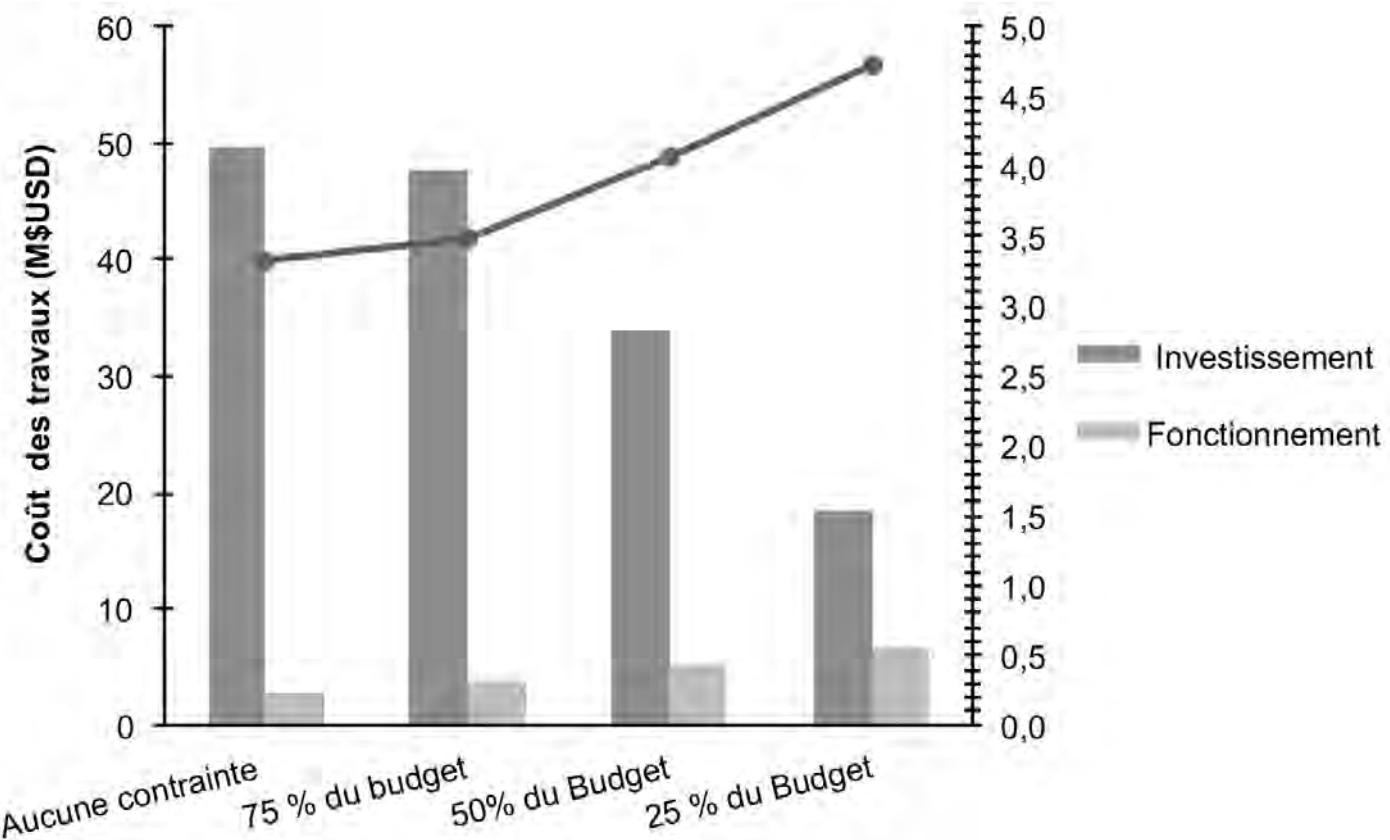


Figure 46 : Variation de l'état et des coûts de travaux en fonction du budget

3.5.3. Programme quinquennal de travaux

Le budget alloué à l'entretien des routes étant très souvent limité, il est donc fondamental pour les administrations routières d'établir une programmation des travaux d'entretien à moyen pour fixer les priorités afin d'assurer une meilleure utilisation de ce budget insuffisant (Kerali, Odoki *et al.* 2000). Il est généralement recommandé d'établir les besoins budgétaires en entretien routier pour une période de 5 à 10 ans (Haas, Hudson *et al.* 1994, Morosiuk, Riley *et al.* 2006, Kumar 2014). Le tableau 10 présente le programme quinquennal des travaux d'entretien en considérant que l'administration routière dispose de tous les fonds pour entretenir convenablement ses sections routières sur une période de 5 ans. Les travaux de l'entretien périodique sont

classés annuellement par ordre de priorité du rapport VAN/Cinves. Il est important de mentionner que, bien qu'il existe d'autres indicateurs économiques, le rapport VAN/Cinves est l'indicateur économique le plus approprié pour classer des options ou des projets en raison de sa robustesse et sa fiabilité comparativement aux indicateurs tels que le taux de rendement (TRI) et la VAN (Morosiuk, Riley *et al.* 2006). Les résultats du tableau 10 indiquent qu'un budget de 41,157 millions de \$ USD est nécessaire pour la réalisation des travaux d'entretien préventif des 10 sections de routes sur une période de 5 ans. Il peut aussi être observé au tableau 10 qu'aucune activité d'entretien périodique n'est prévue pour les années 2018 et 2020. Cela signifie que l'évolution de la détérioration des sections n'a pas atteint les seuils d'intervention nécessitant le déclenchement de l'entretien

périodique à l'année 2018 et 2020. Dans un tel cas, les travaux d'entretien courant doivent être systématiquement réalisés sur toutes les sections aux années 2018 et 2020. Bien que les coûts

de fonctionnement (entretien courant) ne soient pas présentés au tableau 10, ils sont inclus dans le besoin budgétaire total de l'entretien des 5 prochaines années.

Tableau 10 : Plan quinquennal d'entretien des sections

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

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

3.6. Systèmes des résultats et recommandations

Un des principaux rôles du gestionnaire des routes ou de l'ingénieur routier est de fournir aux décideurs plusieurs alternatives leur permettant de faire un choix judicieux en fonction des objectifs, mais pas de décider à leur place. Les objectifs peuvent être liés à la mobilité, à la réduction de la pauvreté, à la sécurité routière ou à préservation de l'environnement (Talvitie 2000). Les résultats présentés au tableau 11 donnent aux décideurs des pays en développement et aux bailleurs de fonds une multitude de choix d'options en fonction de l'orientation de leurs politiques en matière d'entretien des routes. Ainsi, les recommandations suivantes peuvent être faites : si la politique routière

est la réduction des émissions polluantes des véhicules, il est recommandé de choisir les options dont les CCVEE sont les plus faibles. Si l'objectif est de minimiser la consommation d'énergie, dans ce cas les options avec des valeurs minimums de EGLOB sont recommandées. Si l'objectif est de minimiser les coûts totaux de transport composés des CCVE, CCVA et CCVE, les options avec les CTCV minimums sont recommandées. Dans le cas où le budget est insuffisant pour entretenir adéquatement toutes les sections, il est recommandé de sélectionner les options optimales en maximisant la fonction-objectif (VAN/Cinv) sous contraintes budgétaires. Dans le cas de la présente étude, les options optimales avec 75% du budget total disponible sont recommandées.

Tableau 11 : Synthèse des meilleures options

Sections homogènes	CCVEE	CTCV	EGLOB	Optimisation (VAN/Cinv)			
				100% budget	75% budget	50% budget	25% budget
SH1	Option 1	Option 4	Option 4	Option 4	Option 5	Option 4	EC
SH2	Option 8	Option 3	Option 2	Option 3	Option 6	Option 3	Option 6
SH3	Option 5	Option 3	Option 4	Option 3	Option 3	Option 5	Option 5
SH4	Option 8	Option 3	Option 2	Option 3	EC	EC	EC
SH5	Option 2	Option 3	Option 1	Option 3	Option 3	EC	EC
SH6	Option 1	Option 3	Option 1	Option 3	Option 3	Option 6	Option 6
SH7	Option 8	Option 6	Option 8	Option 6	Option 6	Option 6	EC
SH8	Option 2	Option 3	Option 2	Option 3	Option 6	Option 6	Option 6
SH9	Option 1	Option 3	Option 1	Option 3	Option 3	EC	EC
SH10	Option 8	Option 3	Option 1	Option 3	Option 3	Option 3	EC

4. CONCLUSION

L'évaluation économique et l'analyse de la programmation sur le cycle de vie des interventions en entretien, réhabilitation et reconstruction (ERR) pour les chaussées flexibles existantes démontrent que la sélection des meilleures interventions d'ERR devrait être basée sur la réduction des impacts environnementaux, de la consommation d'énergie, des coûts des émissions polluantes des véhicules, des coûts totaux de transport et des restrictions budgétaires.

Les résultats issus de l'application de l'approche développée dans ce présent article sur des routes candidates à l'entretien indiquent clairement que les meilleures interventions en matière d'entretien en considérant la consommation du carburant, les coûts des émissions polluantes, les coûts totaux de transport et les restrictions budgétaires sur le cycle de vie sont principalement des travaux préventifs d'entretien périodique. En effet, les meilleures interventions d'entretien périodique en considérant les quatre (4) aspects mentionnés ci-dessus sur un cycle de vie de 20 ans sont des travaux de resurfaçage mince en BB de 30 mm et 50 mm et des travaux de recharge en ESMSG. Cependant, en fonction des états fonctionnels et structuraux, du trafic et des critères d'intervention des travaux d'entretien, les pourcentages de réduction de la consommation du carburant ainsi que les pourcentages d'économie sur les coûts des émissions polluantes et les coûts totaux de transport sur le cycle de vie des meilleures interventions en matière d'entretien des sections candidates à l'entretien sont différents. De ce fait, les meilleures interventions d'entretien entraînent des réductions de la consommation du carburant de 21,27%, 10,45%, 12,04%, 5,9%, 2,43% 6,70%, 3,46%, 7,55%, 2,34% et 5,21% respectivement pour les sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10. Les économies sur les coûts des émissions polluantes sont de 15,57%, 12,06%, 8,70%, 1,92%, 8,41%, 5,19% 8,65%, 4,82%, 1,54% et 4,09% respectivement pour les sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10. En se basant sur les coûts totaux de transport, les économies sont de 36,42%, 27,00%, 25,14%, 24,48%, 4,74%, 14,05%, 9,44%, 16,80%, 9,13% et 11,94% respectivement pour les sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10. De plus, les analyses des résultats de l'étude de cas indiquent que les interventions optimums d'entretien périodique issues de la maximisation du rapport valeur actuelle nette - coût marginal sous une contrainte budgétaire de 75% du budget total sont les plus recommandées. En effet, avec 75% des fonds d'entretien disponibles, les interventions optimums d'entretien permettent de maintenir l'état moyen des routes à un IRI de 3,48 m/km. Ce dernier est approximatif à 3,33 m/km, qui est l'état moyen des routes obtenu en supposant que tous les fonds d'entretien sont disponibles (100% du budget total). Cependant, avec une disponibilité des fonds de 75% du budget requis, seuls les travaux d'entretien courant sont réalisables sur la section SH4. À ce titre ces travaux d'entretien courant constituent l'intervention d'entretien optimum de cette section. Le besoin budgétaire pour réaliser adéquatement les travaux d'entretien sur toutes les sections conformément au plan quinquennal d'entretien est de 41,157 M\$US.

En conclusion, les travaux de recherche présentés dans cet article offrent aux administrations responsables de la gestion des routes dans les pays de l'Afrique de l'Ouest et aux bailleurs

de fonds, la possibilité d'intégrer les impacts environnementaux dans leurs processus de prise de décision pour une meilleure gestion et préservation du patrimoine routier existant. Les incertitudes dans la monétisation des impacts environnementaux proviennent principalement de l'insuffisance de l'état de l'art. Cette approche devrait permettre aux gestionnaires et aux décideurs de faire un choix judicieux des meilleures interventions d'entretien des sections prioritaires du réseau routier en fonction de leurs objectifs tels que les économies sur les coûts totaux de cycle de vie et des coûts de cycle des émissions polluantes, la réduction de l'énergie de cycle de vie consommée par les véhicules motorisés et l'amélioration de l'IRI. De plus, en cas de restriction budgétaire, qui est toujours le cas dans la majorité des pays en développement, cette approche permet de déterminer la réduction possible du budget d'entretien sans compromettre le niveau de service des routes. L'implémentation de cette approche permettrait aussi de déterminer les niveaux de service minimum économiquement justifiés selon classe fonctionnelle et le volume de trafic afin d'établir des interventions en matière d'entretien réalisables sur les routes de l'Afrique de l'Ouest. Il en ressort qu'un programme de préservation n'est rentable que si l'entretien préventif est appliqué au bon moment.

5. ANNEXES

5.1. Annexe A : Équations pour la détermination de l'énergie consommée par les véhicules motorisés

$$EGLOB_k = EGLICV_k \times VKM_k \quad (2)$$

$$EGLOB = \sum_{k=1}^K EGLOB_k \quad (3)$$

$$EGLOBY = \sum_{y=1}^Y EGLOB_y \quad (4)$$

Où

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

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

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

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

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

5.2. Annexe B : Principales étapes de détermination des coûts de cycle de vie des externalités environnementales (CCVEE)

Calcul de la quantité du polluant i de chaque véhicule de type k pour la période p du flux trafic en tonnes (EYR_{kp}) par l'équation 5. $EYR_{kp} = T_{pk} \times L_j \times EM_{ki}$ (5)

Où

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

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

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

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

$$EYRi_{jk} = \sum_{p=1}^n EYRi_{kp} \quad (6)$$

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

$$EYRi_j = \sum_k \sum_{p=1}^n EYRi_{kp} \quad (7)$$

Le coût annuel de chaque émission polluante i de l'option j sous chaque section ($CEPi_j$) a été calculé par l'équation 8 :

$$CEPi_j = EYRi_j \times CU \quad (8)$$

Où

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

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

$$CCVEE_j = \sum_m \sum_{i=1}^I CEPi_j \quad (9)$$

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

$m = 1, 2, \dots, M$ (années)

RÉFÉRENCES

AASHTO, A. A. o. S. H. a. T. O. (2012). "Pavement Management Guide Chapter Six : Project and Treatment Selection." 30.

AASTHO (2012). Pavement Management Guide. Project and Treatment Selection. Washington, American Association of State Highway and Transportation Officials: 40.

Adiguna, S., et al. (2017). "Multi Year Program under Budget Constraints Using." Journal of the Civil Engineering Forum 3(2): 12.

AIPCR (2014). Importance de l'entretien routier, Association mondiale de la Route: 40.

AIPCR (2016). La préservation des routes nationales comme moteur du développement. France, Association mondiale de la Route: 46.

Assaf, G. J. (1993). Sub-network level analysis in pavement management : the code and MARIE systems. Civil engineering. Waterloo, Canada, University of Waterloo. PhD: 272.

Autret, P. and J.-L. Brousse (1991). VIZIR: méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins en entretien d'un réseau routier. Paris, France, Laboratoire central des ponts et chaussées: 62.

Banque mondiale (2019). «Inflation, prix à la consommation (% annuel).» Retrieved 2019-02-18, 2019, from <https://donnees.banquemonde.org/indicateur/fp.cpi.totl.zg>.

Bennett, C. R., et al. (2007). Data collection technologies for road management. Washington, D.C., World Bank: 167.

Bennett, C. R. and I. D. Greenwood (2000). Modelling Road User and Environmental Effects in HDM-4. United Kingdom, World Road Association/World Bank. 7: 401.

BOAD (2015). Étude sur l'entretien routier dans les pays de l'union économique et monétaire ouest africaine (UEMOA) : bilan des 50 dernières années et perspectives. Togo, Banque Ouest Africaine de Développement: 318.

Burningham, S. and N. Stankevich (2005). Importance de l'entretien des routes et moyens d'y parvenir. Washington, DC, Banque Mondiale. 4: 12.

Cafiso, S. and A. Di Graziano (2012). "Definition of Homogenous Sections in Road Pavement Measurements." Procedia - Social and Behavioral Sciences 53: 1069-1079.

Chappat, M. and J. Bilal (2003). The environmental road of the future : life cycle analysis. Paris COLAS group: 47.

Chehovits, J. and L. Galehouse (2010). Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation. California, United States: 27-42.

CPCS (2018). Coûts sociaux externes transport routier Côte-Nord Québec CPCS Transcom Limited: 62.

Dorchies, T. P. (2005). The environmental road of the future: Analysis of energy consumption and greenhouse gas emissions. Toronto, Sintra Inc.: 19.

EC (2006). Energy conservation in road pavement design, maintenance and utilisation. Ireland, European Commission: 63.

ETSU (1997). Emissions modelling framework for HDM-4. United Kingdom, University of Birmingham: 200.

Freeman, T., et al. (2003). Analysis and treatment recommendations from the supplemental maintenance effectiveness research program. Texas, Texas transportation institute: 160.

Frerreira, G. W. and L. Picado-Santos (2002). "Probabilistic segment-linked pavement management optimization model." Journal of transportation engineering 128(6): 568-577.

Fwa, T. F. and K. C. Sinha (1988). "Highway routine maintenance programming at network level." Journal of transportation engineering 114(5).

Garcia-Diaz, A. and J. S. Liebman (1980). "An investment staging model for a bridge replacement problem." Operations research 28(3): 736-753.

Ghibaudo, M. (2018). Optimisation du choix des interventions sur un réseau routier existant. Département du génie de la construction. Montréal, École de technologie supérieure Maitrise: 200.

Haas, R., et al. (2015). Pavement asset management. Canada/USA, Scrivener publishing.

Haas, R., et al. (1994). Modern pavement management. Florida, USA, Krieger publishing company.

Haider, M. and M. Conter (2012). Infrastructure effects on vehicle energy consumption. Austria, Austria Institute of Technology (AIT): 50.

Han, B., et al. (2016). Environmental impacts of different maintenance and rehabilitation strategies for asphalt pavements. Transportation research congress. China, American Society of Civil Engineers: 312-322.

Heggie, I. G. (2003). "Shortage of funds to maintain and modernise the road network." Transport Reviews 23(2): 139-160.

IFSTTAR (2009). Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques. Paris, France, Institut Français des

- Sciences et Techniques des Réseaux, de l'Aménagement et des Transports: 84.
- Joubert, P. (2006). «Application du modèle GiRR pour la programmation de travaux d'entretien au Monténégro.» Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées (BLPC)(256): 28.
- Kaba, E. K. and J. G. Assaf (2018). «Nouvel indice de priorité de financement des routes (IPFR) pour la sélection des projets routiers de «haute priorité» dans les pays en développement en utilisant l'analyse en composantes principales.» Annale de batiment travaux publics (Eska) 70(3): 23.
- Karan, M. A. and R. Haas (1976). “Determining investment priorities for urban pavement improvements.” Journal of Association of Asphalt Paving Technology 45.
- Kebre (2013). Modélisation sur un réseau de route avec recherche sur les paramètres influents en utilisant le modèle hdm4-v2 : application à la route Ouahigouya_thiou_frontière du mali. Département de l'eau et de l'environnement Ouagadougou, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Master en ingénierie: 72.
- Kerali, H. G. R., et al. (2000). Vue d'ensemble de HDM-4, Association mondiale de la route 1: 46.
- Khan, M. U., et al. (2017). “Development of optimum pavement maintenance strategies for a road network.” Australian Journal of Civil Engineering 14(2): 85-96.
- Kumar, R. S. (2014). Pavement evaluation et maintenance management system. India, Univesities press.
- Labi, S. and K. C. Sinha (2005). “Life-Cycle Evaluation of Flexible Pavement Preventive Maintenance.” Journal of Transportation Engineering 133(10): 8.
- Li, N., et al. (1998). “Integer programming of maintenance and rehabilitation treatments for pavements networks.” Journal of transportation research board 1629: 242-248.
- Mahoney, J. P., et al. (1978). “Optimization of pavement rehabilitation and maintenance by use of integer programming.” Journal of transportation research board(674): 15-22.
- MIDT (2012). Programme quinquennal 2013-2017 de l'entretien périodique. Burkina Faso, Ministère des Infrastructures, du Désenclavement et des Transports: 217.
- Misra, R. and A. Das (2003). “Identification of Homogeneous Sections from Road Data.” International Journal of Pavement Engineering 4(4): 229-233.
- Morosiuk, G., et al. (2006). Volume deux guide des applications de HDM-4. Washington, DC, Banque mondiale et Association mondiale de la Route (AIPCR). 2: 136.
- Mostafa, M. and M. H. M (2018). “Road Maintenance in Africa: Approaches and Perspectives.” E3S Web of Conferences 38: 01005.
- MTMDET (2016). Plan d'intervention en infrastructures routières locales. Québec Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports: 20.
- Odoki, J. B. and H. Kerali (2000). Analytical Framework and Model Descriptions : Part D - Works Effects Whashington, DC, World Bank. 4: 20.
- Odoki, J. B. and H. Kerali (2000). Analytical Framework and Model Descriptions : Part F - Social and environmental effects. Whashington, DC, World Bank. 4: 20.
- Odoki, J. B. and H. Kerali (2000). Analytical Framework and Model Descriptions : Part G - Analyses. Whashington, DC, World Bank. 4: 20.
- Odoki, J. B. and H. G. R. Kerali (2000). Analytical framework and model descriptions : Part C - Road Deterioration Model. Washington,DC, World Road Association. 4: 149.
- OECD (1990). Road monitoring for maintenance management :manual for developing countries. Washington,DC, Organisation for Economic Co-operation and Development. 1: 115.
- Park, K., et al. (2007). “Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition.” Journal of Transportation Engineering 12(133): 4.
- Pellecuer, L. (2016). Influence of pavement maintenance strategy on road traffic social and environmental impacts and associated costs. Sustainability and Climate Change Considerations in Pavements Session. Transportation Association of Canada, Transportation Association of Canada: 13.
- Pellecuer, L., et al. (2014). «Influence of Pavement Condition on Environmental Costs.» Journal of Transportation Engineering 140(10): 04014050.
- PIARC (2005). Evaluation and funding of road maintenance in piarc member countries. Paris, France, World Road Association: 80.
- PIARC (2013). Pratiques exemplaires concernant l'entretien durable des routes rurales dans les pays en développement. Paris,France, Association mondiale de la Route. 1: 47.
- RICARDO-AEA (2014). Update of the Handbook on External Costs of Transport. United Kingdom, European Commission: 139.
- Schreyer, P. and F. Koechlin (2002). «Parités de pouvoir d'achat : mesure et utilisations.» Cahiers statistiques de l'OCDE(3): 8.
- Subramanyam, B., et al. (2017). “Functional and structural evaluation of a road pavement.” International Journal of Civil Engineering and Technology 8(8): 7.
- Talvitie, A. (2000). “Evaluations of road projects and programs in developing countries.” Elsvier Science Ltd Transport policy 7: 12.
- TC (2008). Estimates of the full cost of transportation in Canada. Canada, Transports Canada: 106.
- TIGER (2016). Benefit-cost analysis resource guide. USA, U.S Department of transportation: 20.
- TRL (2005). Overseas Road Note 5 :A guide to road project appraisal. United Kingdom, Transport Research Laboratory: 153.
- UEMOA (2009). Directive N° 11/2009/CM/UEMOA portant harmonisation des stratégies d'entretien routier dans les états membres de l'UEMOA. Burkina Faso, Union Économique et Monétaire des États Membres de l'Afrique de l'Ouest: 62.
- UEMOA (2009). Règlement n°08/2009/cm/UEMOA portant adoption du statut du réseau routier communautaire de l'UEMOA et de ses modalités de gestion. Lomé,Togo, Union Economique et Monétaire Ouest Africaine: 11.
- USAID (2014). Sector environmental guidelines : Rural roads. Washington, DC, United States Agency for International Development 44.
- Wang, F., et al. (2003). “Decision-making problem for managing pavement maintenance and rehabilitation projects.” Journal of transportation research board(1853): 21-28.
- Wang, T., et al. (2012). “Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance.” Journal of Cleaner Production 33: 86-96.
- Zimmerman, K. A. and ERES Consultants (1995). Pavement management methodologie to selects projects and recommend preservation treatments. Washington, D.C, Transportation Research Board.