

Étude comparative aux niveaux technique, économique et
environnemental entre le recours aux revêtements en béton
versus en enrobé pour les chaussées fortement sollicitées en
Afrique subsaharienne

par

Nahouo SORO

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

MONTREAL, LE 18 DÉCEMBRE 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Nahouo Soro, 2020



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

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

M. Marc Gaudry, membre externe indépendant
Département de sciences économiques à l'Université de Montréal

M. Luc Pellecuer, membre externe
Senior lecturer, University of West of England, UK

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

LE 03 DÉCEMBRE 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Cette thèse est sous-tendue par le besoin d'approfondir les connaissances sur une branche de l'ingénierie de la construction routière à un moment de ma carrière de professionnel de la construction. C'est donc l'occasion d'acquérir de nouvelles connaissances pour intervenir dans les débats scientifiques afin de contribuer à l'avancement des technologies en Afrique subsaharienne en réorientant de ce fait ma carrière professionnelle.

Le sujet traité dans cette recherche comporte des enjeux non seulement nationaux en rapport avec le bien-être des populations mais aussi un enjeu planétaire en rapport avec la lutte contre les changements climatiques. En essayant de traiter une telle problématique, il est visé en premier lieu la documentation de nouvelles techniques de construction routières bien avancées dans certaines parties du monde et à l'inverse encore ignorées ou négligées en Afrique subsaharienne. J'en veux pour preuve l'inexistence de chaussées en béton de même que la faible littérature sur le sujet dans le contexte de l'Afrique de l'ouest et plus généralement celui de l'Afrique subsaharienne.

C'est pourquoi cette tentative de recherche appliquée à la Côte d'Ivoire est un réel défi. Le pays fait partie des nombreux pays de la sous-région qui n'ont jamais expérimenté les nouveaux matériaux de construction de routes. À côté du matériau traditionnel qu'est l'enrobé bitumineux il y a un type de matériaux composites qui fait son bonhomme de chemin. Le béton compacté au rouleau jadis connu pour la construction de barrages poids est aujourd'hui un revêtement de choix pour les chaussées fortement sollicitées. Il en est de même pour les dalles de béton non armé et goudonnées, les dalles de béton armé et goudonnées, les dalles de béton armé continu ou tout simplement les panneaux de dalles préfabriquées dont certaines sont brevetées aux États-Unis ou en Europe.

Tous ces nouveaux produits accompagnés de nouvelles technologies de construction révolutionnent la construction routière depuis des décennies dans le monde.

VI

C'est donc une satisfaction personnelle que d'avoir l'opportunité de travailler sur un sujet de haute portée qui toutefois nécessite le changement de mentalité des concepteurs, des décideurs pour sa concrétisation sur le terrain en fonction des caractéristiques du projet.

La construction de chaussées perpétuelles et vertes doit préoccuper les concepteurs et les décideurs de l'Afrique subsaharienne pour les prochaines décennies.

REMERCIEMENTS

La conduite d'une thèse est une épreuve de longue haleine et empreinte de beaucoup d'obstacles. Elle se révèle comme un véritable travail d'équipe, une équipe véritablement déterminée où chaque membre joue un rôle particulier et indispensable à la réalisation du projet.

Au rang des acteurs clés de cette équipe, il me plaît de remercier mon directeur de thèse, le professeur Gabriel J. Assaf et de lui exprimer ma gratitude pour l'opportunité qu'il m'a donnée de travailler à ses côtés, pour ses conseils très appréciés et son encadrement qui a permis de réaliser cette thèse.

Je voudrais ensuite remercier les membres du jury d'abord pour l'insigne honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de siéger dans mon jury de soutenance. Je leur en suis très reconnaissant. Je les remercie ensuite pour leurs conseils et leurs critiques pertinentes qui ont permis d'améliorer ce travail de recherche.

Je remercie le gouvernement du Québec pour l'institution de l'aide financière aux études pour les étudiants. Les prêts et bourses dont j'ai bénéficié durant les années de la thèse ont été d'un soutien très appréciable.

Durant ces longues années, j'ai eu l'occasion d'échanger avec des amis, de bénéficier de leur soutien à différents niveaux moral, matériel ou financier. Au nombre de ces amis, je voudrais remercier pour leur contribution très appréciée, Marion Ghibaudo et Kaba Kossè Emmanuel.

Au rang de l'équipe de soutien, il y a ma famille, mon épouse Fatou Koné Epse Soro et mes cinq enfants Soro Gninima Mohamed, Soro Nahouo Gnoudanhan Gbambélé Abdul-Salam, Soro Nahouo Ouodio Abdul-Rahim, Soro Nahouo Songonfori Abdul-Aziz et Soro Nahouo Nerigninniden Djanah. Je les remercie très sincèrement pour tous les sacrifices consentis. Ils ont subi beaucoup de privation pour mon absence à leur côté même quand j'étais à la maison.

VIII

Les difficiles moments de confinement dus à la Covid 19 en ont rajouté aux frustrations. Ils ont supporté mes humeurs lorsque ça n'allait pas par moment et enfin ils ont contribué au financement de ce projet.

J'ai une pensée pour mes parents, trop tôt disparus, Gbambélé Soro, mon père et Yéo Nerigninnibin, ma mère. Que mon salut leur parvienne. Je leur dédie cette thèse.

Je remercie enfin toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué de quelque manière que ce soit à la réalisation de cette thèse.

Étude comparative au niveau technique, économique et environnemental entre le recours aux revêtements en béton versus en enrobé pour les chaussées fortement sollicitées en Afrique subsaharienne

Nahouo SORO

RÉSUMÉ

Le développement des infrastructures routières est un facteur de croissance et de développement de tout pays. À ce titre, l'entretien du réseau routier et son extension sont une préoccupation centrale de la politique des gouvernements. Cependant, cet intérêt marqué s'oppose à la rareté des financements à allouer aux opérations d'entretien et de construction routières dont les coûts à l'inverse, sont de plus en plus élevés. Par ailleurs, les émissions inhérentes à la construction routière contribuent significativement au réchauffement de la planète dont les effets néfastes sont une préoccupation mondiale. Les concepteurs et les décideurs sont ainsi confrontés à un véritable défi lorsqu'il s'agit de sélectionner une intervention. Le choix réside généralement entre l'option de chaussée en enrobé bitumineux (EB) ou en béton armé continu (BAC). Le but de cette thèse est par conséquent, de proposer une nouvelle approche de sélection du revêtement des chaussées, entre l'enrobé bitumineux et le béton armé continu, particulièrement pour les chaussées fortement sollicitées, en Afrique subsaharienne. Le concept proposé est basé sur les coûts globaux du cycle de vie de la chaussée, en lieu et place des coûts initiaux généralement retenus comme critère d'attribution des marchés de construction. La chaussée à construire doit nécessiter peu d'entretien, avoir un meilleur comportement sous les températures élevées allant jusqu'à 50°C et résister au trafic lourd. Cette approche, dans la mesure où elle prend en compte à la fois les aspects économiques, environnementaux et sociaux, amène à la construction de routes durables.

La validation de cette approche innovante et originale d'optimisation de la conception et de la sélection d'une option de chaussée revêtue en EB ou en BAC, est effectuée sur un tronçon de l'Autoroute du Nord, en Côte d'Ivoire, à l'aide des outils Alizé-lcpc, Ecorce 2.0 et HDM-4 v2.0, en considérant la croissance du trafic des poids lourds. L'analyse est faite selon les trois piliers du développement durable, sur les phases d'extraction et de production des matériaux, de construction et d'exploitation de la chaussée.

Sur le plan économique, suite à l'évaluation faite sur trois sections homogènes d'une longueur totale de 50 km, les résultats indiquent que le coût initial de construction de l'option BAC est plus cher de 10 à 20 % que celui de l'option EB. En revanche, sur le cycle de vie de 20 ans, les coûts à l'administration et les coûts aux usagers baissent en moyenne de 15 % et 30 % en faveur de l'option BAC. Au final, sur le cycle de vie complet de la chaussée, les coûts globaux de l'option EB sont plus chers de 21 à 28 % que ceux de l'option BAC. Selon l'approche des coûts globaux du cycle de vie, la chaussée en béton armé continu est la meilleure option.

Sur le plan environnemental, les résultats indiquent pour les phases d'extraction et de production des matériaux, une baisse des émissions de gaz à effet de serre d'environ 15 % pour l'option BAC pour les trafics lourds élevés (70 000 véhicules par jour dont 21 % de poids

lourds) par rapport à l'option EB. À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (43 750 véhicules par jour dont 1 % de poids lourds), l'option BAC consomme jusqu'à 27 % de plus que l'option EB. Pour les phases de construction et d'exploitation de la chaussée, l'option BAC pollue respectivement 55 % et 25 % de moins que l'option EB, et ce quel que soit le trafic. Sur le cycle de vie de 20 ans, le taux des émissions globales de gaz à effet de serre de l'option BAC est de 17 à 20 % inférieur à celui de l'option EB ; la consommation globale d'énergie est également 15 à 16 % plus basse. Ces taux s'accroissent avec l'augmentation du trafic des poids lourds. L'option BAC est plus avantageuse que l'option EB sur le cycle de vie, en particulier pour les chaussées à trafic de poids lourds élevé.

Sur le plan social, les résultats obtenus en phase d'extraction et de production des matériaux, sur les indicateurs d'eutrophisation (EI), d'acidification (AP) et d'écotoxicité (EP) démontrent que l'option BAC est plus avantageuse pour les routes subissant un volume élevé de trafic lourd. Pour les indicateurs d'ozone troposphérique (POCP) et de toxicité (TP), elle est plus avantageuse quel que soit le volume de trafic lourd. Par conséquent, lorsque le trafic lourd est peu élevé, l'option EB est plus avantageuse selon les indicateurs EI, AP et EP. En phases construction et exploitation, l'option en BAC est plus avantageuse quel que soit le niveau de trafic lourd. La monétisation de ces externalités sur le cycle de vie indique que le coût total des dommages de l'option EB est supérieur de 15 à 19 % environ pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds). À l'inverse, le coût total des dommages de l'option BAC est supérieur de 7 à 8 % environ pour les trafics lourds faibles (1% de poids lourds). L'option BAC est plus avantageuse que l'option EB pour les trafics lourds élevés.

Au final, cette thèse permet de conclure que la chaussée en BAC est plus durable que la chaussée en EB, particulièrement pour les chaussées fortement sollicitées. Une analyse de sensibilité d'une part et la comparaison des résultats d'autre part avec ceux de la littérature scientifique disponible ont permis de vérifier la robustesse des projets de l'étude.

Mots-clés : Chaussées en enrobé et en béton, Analyse des coûts du cycle de vie, Environnement, Coûts sociaux, Développement durable

A comparative study at technical, economic and environmental level between the use of concrete pavements and asphalt pavements on heavily loaded pavements in sub-Saharan africa

Nahouo SORO

ABSTRACT

The development of road infrastructure is a factor of growth and development in any country. As such, the maintenance of the road network and its extension are a central concern of the governments' policy. However, this high degree of interest faces the scarcity of funding to be allocated to road maintenance and construction operations, the costs of which, on the other hand, are increasingly high. In addition, polluting emissions inherent in road construction, significantly contribute to global warming, the harmful effects of which are a global concern. Designers and decision makers are thus faced with a real challenge when choosing a pavement option to be built between asphalt concrete pavement (AC) and continuous reinforced concrete pavement (CRCP). The aim of this thesis is therefore to propose a new approach for the selection of pavement surfacing between AC and CRCP, particularly for heavily trafficked roads, in sub-Saharan Africa. The proposed concept is based on the overall lifecycle costs of the pavement instead of the initial costs generally used as a criterion for the award of construction contracts. The pavement to be constructed should require little maintenance, perform better at high temperatures of up to 50 ° C and withstand heavy traffic. This approach, insofar as it takes into account economic, environmental and social aspects, leads to the construction of sustainable roads.

The validation of this innovative and original design optimization approach and the selection of a pavement option between AC and CRCP is carried out on a section of the Autoroute du Nord in Côte d'Ivoire, using the Alizé-lcpc, Ecorce 2.0 and HDM-4 v2.0 tools, and considering the growth in heavy goods vehicle traffic. The analysis is made according to the three pillars of sustainable development on the phases of production and manufacturing of materials, of construction and of operation of the pavement.

Economically, following the evaluation made on three homogeneous sections with a total length of 50 km, the results indicate that the initial cost of construction of the CRCP option is more expensive by 10 to 20 % than that of the AC option. Over the 20-year life cycle, administration costs and user costs fall on average by 15 % and 30 % in favor of the BAC option. Ultimately, at the end of the life cycle, the overall costs of the AC option are 21 to 28 % more expensive than those of the CRCP option. According to the overall life cycle cost approach, the continuous reinforced concrete pavement should be carried out.

From an environmental standpoint, the results indicate, for the materials extraction and production phases, a reduction in greenhouse gas emissions of around 15 % for the CRCP option for high heavy traffic (70,000 vehicles per day, including 21 % heavy goods vehicles) compared to the AC option. Conversely, for light heavy traffic (43,750 vehicles per day including 1 % heavy goods vehicles), the CRCP option consumes up to 27 % more than the

AC option. For the construction and operation phases of the pavement, the CRCP option pollutes 55 % and 25 % less than the AC option, respectively, regardless of the traffic. Over the 20-year life cycle, the overall greenhouse gas emissions rate of the CRCP option is 17 to 20 % lower than that of the AC option; overall energy consumption is also 15 to 16 % lower. These rates increase with the increase in heavy vehicle traffic. The CRCP option is more advantageous than the AC option over the life cycle, especially for pavements with heavy truck traffic.

At the social level, the results obtained in the material extraction and production phase, on the indicators of eutrophication (EI), acidification (AP) and ecotoxicity (EP) give an advantage to the CRCP option for roads with a high volume of heavy traffic. For tropospheric ozone (POCP) and toxicity (TP) indicators, it is more advantageous whatever the volume of heavy traffic. Therefore, when the heavy traffic is low, the AC option is more advantageous according to the EI, AP and EP indicators. In the construction and operation phases, the CRCP option is more advantageous whatever the level of heavy traffic. The monetization of these life cycle externalities indicates that the total cost of damage of the AC option is about 15 to 19 % higher for high heavy traffic (21 % of heavy goods vehicles). Conversely, the total damage cost of the CRCP option is approximately 7 to 8 % higher for light heavy traffic (1 % of heavy goods vehicles). The CRCP option is more advantageous than the AC option, especially for heavily trafficked roads.

Finally, this thesis concludes that the CRCP pavement is more durable than the AC pavement, particularly for heavily trafficked roads. A sensitivity analysis on the one hand and the comparison of the results on the other hand with those of the available scientific literature made it possible to verify the robustness of the study projects.

Keywords: Asphalt and concrete pavements, Life cycle cost analysis, Environment, Social costs, Sustainable development

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	11
1.1 L'Afrique subsaharienne.....	11
1.2 État du réseau.....	12
1.2.1 Dégradations prématurées.....	12
1.2.1.1 Faible entretien.....	12
1.2.1.2 Effet de la surcharge routière.....	14
1.2.1.3 Charges de trafic et flotte utilisée dans cette thèse	19
1.2.1.4 Effet des températures élevées.....	21
1.3 Outils de conception des chaussées	21
1.4 Méthodes d'évaluation usuelles des options de chaussées ACCV	22
1.4.1 Évaluation technico-économique.....	23
1.4.2 Évaluation environnementale.....	23
1.4.3 Évaluation des externalités	24
1.5 Durabilité des chaussées	26
1.6 Analyse de sensibilité	26
1.7 Conclusion	27
CHAPITRE 2 STRATÉGIE OPTIMALE DE SÉLECTION D'UN REVÊTEMENT POUR LA CONSTRUCTION DE ROUTES FORTEMENT SOLLICITÉES. CAS DE L'AUTOROUTE DU NORD EN CÔTE D'IVOIRE.....	31
2.1 Résumé.....	31
2.2 Abstract.....	32
2.3 Introduction.....	33
2.4 Localisation de la zone du projet	35
2.5 Méthodologie	36
2.6 Dimensionnement des chaussées	38
2.6.1 Les paramètres de la conception	38
2.6.2 Les outils utilisés.....	39
2.7 L'évaluation économique sur le cycle de vie.....	40
2.7.1 Les outils utilisés.....	40
2.7.2 Rentabilité économique des projets	41
2.7.3 La comparaison des coûts initiaux et globaux du cycle de vie	42
2.8 Résultats et analyse.....	42
2.8.1 Dimensionnement des chaussées	43
2.8.2 Analyse comparative des chaussées en EB et en BAC à l'aide du logiciel HDM-4 v2.0.....	45
2.8.2.1 Taux de dégradation des chaussées en EB et en BAC sous l'effet du trafic	45

2.8.2.2	Coûts initiaux (CI)	49
2.8.2.3	Coûts d'entretien (CE)	52
2.8.2.4	Coûts à l'administration (CA).....	55
2.8.2.5	Coûts aux usagers (CU)	58
2.8.2.6	Valeur actuelle nette (VAN)	61
2.8.2.7	Taux de rendement interne (TRI)	64
2.8.2.8	Coûts globaux du cycle de vie (CT)	67
2.9	Discussions	70
2.9.1	Dimensionnement des chaussées	70
2.9.2	Analyse comparative des deux options de chaussées	71
2.10	Conclusion	78
CHAPITRE 3 ÉVALUATION DE L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE D'UNE CHAUSSEE EN ENROBÉ OU EN BÉTON ARMÉ CONTINU, EN FONCTION DU VOLUME DE POIDS LOURDS, SUR SON CYCLE DE VIE. CAS DE L'AUTOROUTE DU NORD EN CÔTE D'IVOIRE.....		
3.1	Résumé.....	83
3.2	Abstract	84
3.3	Introduction.....	86
3.4	Localisation du projet	88
3.5	Revue de littérature	90
3.5.1	Les matières premières	90
3.5.2	Les chaussées en béton versus en enrobé	91
3.5.3	Les modèles d'évaluation environnementale.....	92
3.5.4	Les outils ecocompareurs.....	93
3.5.5	Le choix d'une option de chaussée entre l'enrobé et le béton	95
3.6	Méthodologie	96
3.6.1	La recherche des données	96
3.6.2	Les outils utilisés.....	97
3.6.2.1	Le catalogue des chaussées SETRA-LCPC 1998 et le logiciel Alizé-LCPC V1.3.....	97
3.6.2.2	Le logiciel ECORCE 2.0.....	98
3.6.2.3	Le logiciel HDM-4 v2.0.....	98
3.6.2.4	Les hypothèses	99
3.6.3	Le modèle ECORCE-HDM-4.....	104
3.6.4	Les limites de l'étude	106
3.7	Résultats et analyse	107
3.7.1	Phase de production des matériaux de construction	107
3.7.1.1	Section Banco-Gesco	107
3.7.1.2	Section Gesco-Attinguié	110
3.7.1.3	Section Attinguié-PK50	112
3.7.2	Phase de construction.....	115
3.7.2.1	Section Banco-Gesco	115
3.7.2.2	Section Gesco-Attinguié	117

	3.7.2.3	Section Attinguié-PK50	119
3.7.3		Phase d'exploitation.....	121
	3.7.3.1	Section Banco-Gesco	121
	3.7.3.2	Section Gesco-Attinguié	123
	3.7.3.3	Section Attinguié-PK50	126
3.7.4		Impacts environnementaux globaux	128
	3.7.4.1	Section Banco-Gesco	128
	3.7.4.2	Section Gesco-Attinguié	130
	3.7.4.3	Section Attinguié-PK50	132
3.8		Discussions	134
	3.8.1	Phase de production des matériaux de construction	134
	3.8.2	Phase construction	138
	3.8.3	Phase exploitation	139
	3.8.4	Phase de fin de vie	140
	3.8.5	Impacts environnementaux globaux sur le cycle de vie	141
3.9		Conclusion	141
CHAPITRE 4		APPROCHE DE CALCUL DE COÛTS SOCIAUX SUR LE CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE EN ENROBÉ OU EN BÉTON ARMÉ CONTINU ET APPLICATION	145
4.1		Résumé.....	145
4.2		Abstract	147
4.3		Introduction.....	148
4.4		Le développement de routes durables.....	151
	4.4.1	Indicateurs en phase d'extraction des matériaux et de construction	151
	4.4.2	Indicateurs en phase d'exploitation	153
	4.4.3	Caractéristiques des chaussées en enrobé et en béton armé continu	153
	4.4.4	La durabilité des chaussées.....	154
4.5		Méthodologie	155
	4.5.1	Les outils utilisés.....	155
	4.5.2	Recherche des données	156
	4.5.3	Intégration sur une plateforme	156
	4.5.4	Hypothèses.....	157
	4.5.5	Synthèse des indicateurs calculés	160
	4.5.6	Comparaison des coûts des externalités.....	161
4.6		Résultats et analyse.....	161
	4.6.1	Phase d'extraction et de production des matériaux de construction	161
		4.6.1.1 Section Banco-Gesco	161
		4.6.1.2 Section Gesco-Attinguié	168
		4.6.1.3 Section Attinguié-PK50	175
	4.6.2	Phase de construction.....	182
		4.6.2.1 Section Banco-Gesco	182
		4.6.2.2 Section Gesco-Attinguié	188
		4.6.2.3 Section Attinguié-PK50	194
	4.6.3	Phase d'exploitation.....	200

4.6.3.1	Section Banco-Gesco	200
4.6.3.2	Section Gesco-Attinguié	202
4.6.3.3	Section Attinguié-PK50	203
4.6.4	Évaluation monétaire globale des dommages des externalités sur le cycle de vie.....	205
4.6.4.1	Section Banco-Gesco	205
4.6.4.2	Section Gesco-Attinguié	206
4.6.4.3	Section Attinguié-PK50	208
4.7	Discussions	209
4.7.1	Phase d'extraction et de production des matériaux de construction	209
4.7.2	Phase de construction.....	218
4.7.3	Phase d'exploitation.....	224
4.7.4	Comparaison des coûts totaux des externalités sur le cycle de vie.....	226
4.8	Conclusion	226
CHAPITRE 5 PRINCIPALES DISCUSSIONS		229
5.1	Synthèse des principales discussions des articles	229
5.1.1	Sur le plan économique.....	229
5.1.2	Sur le plan environnemental	230
5.1.3	Sur le plan social	231
5.1.4	Analyse de sensibilité	232
5.2	Conclusion	232
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		235
RECOMMANDATIONS		245
ANNEXE I	PARC DE VÉHICULES.....	249
ANNEXE II	COMPARAISON DES CHAUSSÉES FLEXIBLES ET DES CHAUSSÉES RIGIDES	263
ANNEXE III	SECTION BANCO-GESCO	267
ANNEXE IV	SECTION GESCO-ATTINGUIÉ.....	271
ANNEXE V	SECTION ATTINGUIÉ-PK50.....	275
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		278

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	L'Afrique est divisée en 5 parties.....12
Tableau 1.2	Limites des charges à l'essieu dans l'espace UEMOA Tiré de Le conseil des ministres de l'UEMOA (2005).....17
Tableau 1.3	Limites du PTAC et du PTRR dans l'espace UEMOA Tiré de Le conseil des ministres de l'UEMOA (2005).....18
Tableau 1.4	Distribution de la charge par groupe d'essieux et par catégorie de véhicule, Canada Tiré de Gaudry (2000)19
Tableau 1.5	Valeurs par défaut des coefficients d'agressivité moyens (ÉCAS).....21
Tableau 2.1	Évolution du DJMA des poids lourds (véhicules / jours).....39
Tableau 2.2	Normes d'entretien de la chaussée en graveleux latéritique (GL).....40
Tableau 2.3	Normes d'entretien de la chaussée en enrobé bitumineux (EB).....41
Tableau 2.4	Normes d'entretien de la chaussée en béton armé continu (BAC).....41
Tableau 2.5	Épaisseur des couches de la chaussée en EB.....43
Tableau 2.6	Épaisseur des couches de la chaussée en BAC.....43
Tableau 2.7	Épaisseur des couches de la chaussée en EB.....44
Tableau 2.8	Épaisseur des couches de la chaussée en BAC.....44
Tableau 2.9	Épaisseur des couches de la chaussée en EB.....45
Tableau 2.10	Épaisseur des couches de la chaussée en BAC.....45
Tableau 3.1	Part du béton dans le réseau routier de quelques pays.....92
Tableau 3.2	Sections homogènes.....99
Tableau 3.3	Hypothèses sur le pourcentage de poids lourds (véhicules / jours)99
Tableau 3.4	Propriétés des matériaux.....100
Tableau 3.5	Épaisseur des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)100

Tableau 3.6	Épaisseur des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)100
Tableau 3.7	Épaisseur des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)100
Tableau 3.8	Épaisseur des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)101
Tableau 3.9	Épaisseur des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)101
Tableau 3.10	Épaisseur des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)101
Tableau 3.11	Données de transport pour l'option de chaussée en BAC.....102
Tableau 3.12	Données de transport pour l'option de chaussée en EB102
Tableau 3.13	Normes d'entretien de la chaussée en graveleux latéritique (GL).....103
Tableau 3.14	Normes d'entretien de la chaussée en enrobé bitumineux (EB).....103
Tableau 3.15	Normes d'entretien de la chaussée en béton armé continu (BAC).....103
Tableau 3.16	Comparaison des émissions de gaz à effet de serre109
Tableau 3.17	Comparaison de la consommation d'énergie.....110
Tableau 3.18	Comparaison des émissions de gaz à effet de serre112
Tableau 3.19	Comparaison de la consommation d'énergie.....112
Tableau 3.20	Comparaison des émissions de gaz à effet de serre115
Tableau 3.21	Comparaison de la consommation d'énergie.....115
Tableau 3.22	Comparaison des émissions de gaz à effet de serre116
Tableau 3.23	Comparaison de la consommation d'énergie.....117
Tableau 3.24	Comparaison des émissions de gaz à effet de serre118
Tableau 3.25	Comparaison de la consommation d'énergie.....118
Tableau 3.26	Comparaison des émissions de gaz à effet de serre120
Tableau 3.27	Comparaison de la consommation d'énergie.....120
Tableau 3.28	Comparaison des émissions de gaz à effet de serre123
Tableau 3.29	Comparaison de la consommation d'énergie.....123

Tableau 3.30	Comparaison des émissions de gaz à effet de serre	125
Tableau 3.31	Comparaison de la consommation d'énergie.....	125
Tableau 3.32	Comparaison des émissions de gaz à effet de serre	127
Tableau 3.33	Comparaison de la consommation d'énergie.....	127
Tableau 3.34	Comparaison des émissions de GES globales sur le cycle de vie.....	129
Tableau 3.35	Comparaison de la consommation globale d'énergie sur le cycle de vie.....	130
Tableau 3.36	Comparaison des émissions de GES globales sur le cycle de vie.....	131
Tableau 3.37	Comparaison de la consommation d'énergie globale sur le cycle de vie.....	132
Tableau 3.38	Comparaison des émissions de GES globales sur le cycle de vie.....	133
Tableau 3.39	Comparaison de la consommation d'énergie globale sur le cycle de vie.....	134
Tableau 3.40	Taux de consommation d'énergie	135
Tableau 3.41	Taux de consommation d'énergie	136
Tableau 4.1	Indicateurs sociaux.....	156
Tableau 4.2	Indicateur social	156
Tableau 4.3	Hypothèse d'évaluation	157
Tableau 4.4	Pourcentage de poids lourds (véhicules / jours)	158
Tableau 4.5	Section Banco-Gesco - Épaisseurs des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB).....	159
Tableau 4.6	Section Banco-Gesco - Épaisseurs des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)	159
Tableau 4.7	Section Gesco-Attinguié - Épaisseurs des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB).....	159
Tableau 4.8	Section Gesco-Attinguié - Épaisseurs des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)	159

Tableau 4.9	Section Attinguié-PK50 - Épaisseurs des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB).....	160
Tableau 4.10	Section Attinguié-PK50 - Epaisseurs des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)	160
Tableau 4.11	Synthèse des indicateurs calculés	160
Tableau 4.12	Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Banco-Gesco-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction	168
Tableau 4.13	Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction	175
Tableau 4.14	Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Attinguié-PK50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction	182
Tableau 4.15	Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Banco-Gesco-Phase construction	188
Tableau 4.16	Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Gesco-Attinguié-Phase construction	194
Tableau 4.17	Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Attinguié-PK50-Phase construction	200
Tableau 4.18	Résultats de l'indicateur CU pour la section Banco-Gesco-Phase d'utilisation	202
Tableau 4.19	Résultats de l'indicateur CU pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'utilisation	203
Tableau 4.20	Résultats de l'indicateur CU pour la section Attinguié-PK50-phase d'utilisation	205
Tableau 4.21	Résultats de l'évaluation monétaire comparative pour la section Banco-Gesco	206
Tableau 4.22	Résultats de l'évaluation monétaire comparative pour la section Gesco-Attinguié.....	208
Tableau 4.23	Résultats de l'évaluation monétaire comparative pour la section Attinguié-PK50	209

Tableau 5.1	Scenarios de l'analyse de sensibilité.....	232
-------------	--	-----

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Méthodologie.....5
Figure 0.2	Organigramme de la thèse.....8
Figure 1.1	Cartographie de l'Afrique subsaharienne11
Figure 1.2	État du réseau principal de quelques pays Tirée de Ken et al. (2008)14
Figure 1.3	Surcharges routières observées : (a) camion léger; (b) camion lourd.....15
Figure 1.4	Dégâts occasionnés par les surcharges en Afrique du Sud16
Figure 1.5	Éléments de coûts sociaux des infrastructures routières26
Figure 2.1	Localisation du site du projet.....35
Figure 2.2	Section Banco-Gesco37
Figure 2.3	Section Gesco-Attinguié37
Figure 2.4	Section Attinguié-PK 5038
Figure 2.5	Évolution de l'IRI-Trafic lourd faible.....46
Figure 2.6	Évolution de l'IRI-Trafic lourd élevé46
Figure 2.7	Évolution de l'IRI –Trafic lourd faible47
Figure 2.8	Évolution de l'IRI-Trafic lourd élevé48
Figure 2.9	Évolution de l'IRI-Trafic lourd faible.....49
Figure 2.10	Évolution de l'IRI-Trafic lourd élevé49
Figure 2.11	Coûts initiaux des chaussées50
Figure 2.12	Coûts initiaux des chaussées51
Figure 2.13	Coûts initiaux des chaussées52
Figure 2.14	Coûts d'entretien53

Figure 2.15	Coûts d'entretien.....	54
Figure 2.16	Coûts d'entretien.....	55
Figure 2.17	Coûts à l'administration de la section 1	56
Figure 2.18	Coûts à l'administration de la section 2.....	57
Figure 2.19	Coûts à l'administration de la section 3.....	58
Figure 2.20	Coûts aux usagers de la section 1	59
Figure 2.21	Coûts aux usagers de la section 2	60
Figure 2.22	Coûts aux usagers de la section 3	61
Figure 2.23	Valeurs actuelles nettes.....	62
Figure 2.24	Valeurs actuelles nettes.....	63
Figure 2.25	Valeurs actuelles nettes.....	64
Figure 2.26	Taux de rendement internes dans la section 1	65
Figure 2.27	Taux de rendement internes dans la section 2	66
Figure 2.28	Taux de rendement internes dans la section 3	67
Figure 2.29	Coûts totaux du cycle de vie de la section 1	68
Figure 2.30	Coûts totaux du cycle de vie de la section 2	69
Figure 2.31	Coûts totaux du cycle de vie de la section 3	70
Figure 3.1	Carte de l'Afrique et de la Côte d'Ivoire	89
Figure 3.2	Tronçon de l'autoroute du nord en Côte d'Ivoire	90
Figure 3.3	Cycle de vie type des chaussées.....	104
Figure 3.4	Phases du cycle de vie étudiées	106
Figure 3.5	Émissions de GES pour la Section Banco-Gesco-Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0).....	108
Figure 3.6	Consommation d'énergie pour la Section Banco-Gesco-Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0).....	108

Figure 3.7	Émissions de GES pour la Section Gesco-Attinguié – Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0).....	110
Figure 3.8	Consommation d'énergie pour la Section Gesco-Attinguié – Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	111
Figure 3.9	Émissions de GES pour la Section Attinguié-PK50 – Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0).....	113
Figure 3.10	Consommation d'énergie pour la Section Attinguié-PK50 – Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	113
Figure 3.11	Émissions de GES pour la Section Banco-Gesco-Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)	115
Figure 3.12	Consommation d'énergie pour la Section Banco-Gesco-Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)	116
Figure 3.13	Émissions de GES pour la Section Gesco-Attinguié-Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)	117
Figure 3.14	Consommation d'énergie pour la Section Gesco-Attinguié-Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)	118
Figure 3.15	Émissions de GES pour la Section Attinguié-PK50-Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)	119
Figure 3.16	Consommation d'énergie pour la Section Attinguié-PK50-Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)	120
Figure 3.17	Émissions polluantes pour la Section Banco-Gesco-Phase d'exploitation (logiciel HDM-4)	122
Figure 3.18	Consommation d'énergie pour la Section Banco-Gesco-Phase d'exploitation (logiciel HDM-4)	122
Figure 3.19	Émissions de GES pour la Section Gesco-Attinguié-Phase d'exploitation (logiciel HDM-4)	124
Figure 3.20	Consommation d'énergie pour la Section Gesco-Attinguié-Phase d'exploitation (logiciel HDM-4)	124
Figure 3.21	Émissions de GES pour la Section Attinguié-PK50-Phase d'exploitation (logiciel HDM-4)	126
Figure 3.22	Consommation d'énergie pour la Section Attinguié-PK50-Phase d'exploitation (logiciel HDM-4)	126

Figure 3.23	Émissions de GES globales pour la Section Banco-Gesco.....	128
Figure 3.24	Consommation d'énergie globale pour la Section Banco-Gesco	129
Figure 3.25	Émissions de GES globales pour la section Gesco-Attinguié	130
Figure 3.26	Consommation d'énergie globale pour la section Gesco-Attinguié.....	131
Figure 3.27	Émissions de GES globales pour la section Attinguié-PK50	132
Figure 3.28	Consommation d'énergie globale pour la section Attinguié-PK50.....	133
Figure 4.1	Les 3 piliers du développement durable	149
Figure 4.2	Critère de durabilité d'un projet Tirée de (FEBELCEM, 2019).....	155
Figure 4.3	Localisation du site du projet.....	158
Figure 4.4	Eutrophisation pour la section Banco-Gesco-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	162
Figure 4.5	Acidification pour la section Banco-Gesco-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	162
Figure 4.6	Ozone troposphérique pour la section Banco-Gesco-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	163
Figure 4.7	Toxicité pour la section Banco-Gesco-phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	163
Figure 4.8	Écotoxicité pour la section Banco-Gesco-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	164
Figure 4.9	Eutrophisation pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	169
Figure 4.10	Acidification pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	169

Figure 4.11	Ozone troposphérique pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	170
Figure 4.12	Toxicité pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	170
Figure 4.13	Écotoxicité pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	171
Figure 4.14	Eutrophisation pour la section Attinguié-PK50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	176
Figure 4.15	Acidification pour la section Attinguié-PK50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	176
Figure 4.16	Ozone troposphérique pour la section Attinguié-PK50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	177
Figure 4.17	Toxicité pour la section Attinguié-PK 50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	177
Figure 4.18	Écotoxicité pour la section Attinguié-PK50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)	178
Figure 4.19	Eutrophisation pour la section Banco-Gesco-Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)	183
Figure 4.20	Acidification pour la section Banco-Gesco-Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)	183
Figure 4.21	Ozone troposphérique pour la section Banco-Gesco-Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)	184
Figure 4.22	Toxicité pour la section Banco-Gesco-Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)	184
Figure 4.23	Écotoxicité pour la section Banco-Gesco-Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)	185

Figure 4.24	Eutrophisation pour la section Gesco-Attinguié- Phase construction (logiciel ECORCE 2.0).....	189
Figure 4.25	Acidification pour la section Gesco-Attinguié- Phase construction (logiciel ECORCE 2.0).....	189
Figure 4.26	Ozone troposphérique pour la section Gesco-Attinguié- Phase construction (logiciel ECORCE 2.0).....	190
Figure 4.27	Toxicité pour la section Gesco-Attinguié- Phase construction (logiciel ECORCE 2.0).....	190
Figure 4.28	Écotoxicité pour la section Gesco-Attinguié- Phase construction (logiciel ECORCE 2.0).....	191
Figure 4.29	Eutrophisation pour la section Attinguié-PK50- Phase construction (logiciel ECORCE 2.0).....	195
Figure 4.30	Acidification pour la section Attinguié-PK50- Phase construction (logiciel ECORCE 2.0).....	195
Figure 4.31	Ozone troposphérique pour la section Attinguié-PK50- Phase construction (logiciel ECORCE 2.0).....	196
Figure 4.32	Toxicité pour la section Attinguié-PK50- Phase construction (logiciel ECORCE 2.0).....	196
Figure 4.33	Écotoxicité pour la section Attinguié-PK50- Phase construction (logiciel ECORCE 2.0).....	197
Figure 4.34	Coûts aux usagers pour la section Banco-Gesco- Phase d'utilisation (logiciel HDM-4 v2.0).....	201
Figure 4.35	Coûts aux usagers pour la section Gesco-Attinguié- Phase d'utilisation (logiciel HDM-4 v2.0).....	202
Figure 4.36	Coûts aux usagers pour la section Attinguié-PK50- Phase d'utilisation (logiciel HDM-4 v2.0).....	204
Figure 4.37	Évaluation monétaire comparative des dommages des externalités pour la section Banco-Gesco.....	205
Figure 4.38	Évaluation monétaire comparative des dommages des externalités pour la section Gesco-Attinguié.....	207
Figure 4.39	Évaluation monétaire comparative des dommages des externalités pour la section Attinguié-PK50.....	208

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation officials
ACCV	Analyse des coûts sur le cycle de vie
AIPCR	Association internationale permanente des congrès de la route
AP	Indicateur d'acidification
BAC	Béton armé continu
BC5	Béton de ciment de classe 5
BC2	Béton de ciment de classe 2
CBR	California bearing ratio
CEBTP	Centre expérimental du bâtiment et des travaux publics
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés organiques volatils
CRCP	Continuously reinforced concrete pavements
CU	Coûts aux usagers
DJMA	Débit journalier moyen annuel

XXX

E Module d'Young

ÉCAS Équivalent charge axiale simple

ECORCE ECOcomparateur Routes Construction Entretien

EI Indicateur d'eutrophisation

EB Enrobé bitumineux

EP Indicateur d'écotoxicité

FHWA Federal highway administration

GES Gaz à effet de serre

GB3 Grave-bitume de classe 3

GNT Grave non traité

HDM-4 Highway development and management

IRI Indice de rugosité international

JPCP Jointed plain concrete pavement

JRCP Jointed reinforced concrete pavement

LCCA Life cycle cost analysis

LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MTMDET	Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des Transports
MTQ	Ministère des transports du Québec
NO ₂	Dioxyde d'azote
Pb	Plomb
PIB	Produit intérieur brut
PFi	Classe de portance à long terme de la plateforme support de chaussée
PM	Particulate Matter (particules fines)
POCP	Indicateur d'ozone troposphérique
SO _x	oxyde de soufre
TP	Indicateur de toxicité
TRI	Taux de rendement interne
VAN	Valeur actuelle nette

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Alphabet grec minuscule

μm Micromètres

Alphabet grec majuscule

$\varepsilon\text{-T}$ Écart-type

Alphabet romain minuscule

$f'c$ Résistance à la compression à 28 jours

g Gramme

$h \%$ Humidité du granulat

kg Kilogramme

kN Kilonewton

kN/s Kilonewton par seconde

m Mètre

m^2 Mètre carré

mm Millimètre

mm^2 Millimètre carré

m^3 Mètre cube

s Seconde

Alphabet romain majuscule

$^{\circ}\text{C}$ Degré Celsius

C_u Coefficient d'uniformité

MPa Mégapascal

MPa/s Mégapascal par seconde

XXXIV

N	Newton
P	Poids
T	Contrainte de traction
TH	Teneur en humidité
W %	Teneur en eau
W _s	Teneur en eau de la phase solide
W _w	Teneur en eau de la phase liquide

INTRODUCTION

Contexte

L'Afrique sub-saharienne est la partie du territoire du continent Africain située au sud du Sahara. Elle constitue un grand espace composé de plusieurs grandes régions que sont l'Afrique de l'ouest, l'Afrique centrale, l'Afrique de l'Est et l'Afrique australe. Ces quatre grandes régions présentent des similitudes en termes de climat, de géologie, de géographie, de sociologie, et d'histoire.

La quasi inexistence des voies de communication permettant le transport des biens et des personnes reste la difficulté majeure rencontrée en Afrique subsaharienne pour ce qui concerne les échanges commerciaux, freinant ainsi le développement économique de la région. Le coût du transport aérien est très élevé et le taux de connectivité par voie ferroviaire ou terrestre est très faible. Pour faire face à cette situation, les pays lancent des programmes routiers aussi bien sur le plan national qu'interrégional.

La construction et la circulation routières sont reconnues pour participer de façon sensible aux émissions polluantes et de gaz à effet de serre à l'origine du réchauffement de la planète. Les préoccupations mondiales concernant le changement climatique, la consommation d'énergie, les impacts environnementaux et les limites des ressources financières pour les infrastructures de transport nécessitent des approches nouvelles et différentes pour planifier, concevoir, exploiter et entretenir des solutions et des systèmes de transport (CH2M HILL & Company, 2009).

Les communautés qui entourent un site de construction en activité se retrouvent souvent soumises à des impacts négatifs tels que des désagréments comme par exemple, la pollution atmosphérique, la pollution sonore, la poussière, et des pertes économiques dues à une baisse de fréquentation ou à la fermeture d'un commerce durant la période des travaux ou à la destruction d'une propriété qui se trouvait dans l'emprise, par exemple. Ces derniers, souvent appelés « coûts sociaux », désignent l'équivalent monétaire des ressources consommées, la

perte de revenus et la perte de jouissance subies par les parties non engagées dans l'accord contractuel, uniquement en raison d'un processus de construction. Les coûts sociaux prennent de nombreuses formes, notamment la perte de revenus, de productivité et de temps, la consommation de ressources non renouvelables et la détérioration accélérée des routes secondaires (Gilchrist & Allouche, 2005). Il est conclu qu'une approche méthodique pour l'intégration des coûts sociaux dans le processus d'évaluation des offres sera une étape clé vers une industrie de la construction plus durable (Gilchrist & Allouche, 2005).

Problématique

Les agences routières doivent sélectionner une intervention de réhabilitation adéquate lorsque la chaussée est dégradée et qu'un entretien préventif n'est plus suffisant. Si la stratégie d'intervention est inadaptée, les ressources sont mal investies et il est fort probable que les dégradations refassent surface rapidement.

A l'heure actuelle, le choix d'une stratégie est basé sur les coûts de construction et ne tient pas toujours compte des coûts sur le cycle de vie, ni des impacts sociaux, ni des coûts sanitaires et environnementaux.

De plus, l'absence de données de références claires et acceptées par la communauté scientifique, permettant de faire un choix entre le revêtement en béton et le revêtement en enrobé, pour une chaussée fortement sollicitée, en considérant les aspects techniques, économiques, environnementaux et sociaux, est observée.

En outre, les études de cas de cette recherche sont basées sur des chaussées situées dans les pays d'Afrique subsaharienne. La plupart des pays ne disposant pas de réglementation et bases techniques propres, ils s'appuient le plus souvent sur les technologies et les normes des pays développés dans un environnement complètement différent.

Une gestion déficiente, des diagnostics techniques incomplets, une absence d'analyses environnementales et sociales et des technologies et normes inadaptées, sont à l'origine de

constats biaisés, conduisant à des choix d'interventions inadéquats et donc à de mauvais investissements.

Dès lors, comment déterminer la meilleure stratégie d'intervention aux niveaux technique, sociale, environnemental et économique pour une chaussée dégradée, entre l'option en béton et l'option en enrobé, particulièrement pour les chaussées fortement sollicitées ?

Objectif général

Le but ultime de la recherche est d'aider les agences de gestion d'infrastructures routières, les ingénieurs concepteurs et autres décideurs à faire un choix judicieux d'un type de chaussée à construire, entre les chaussées en béton et les chaussées en enrobé bitumineux, pour chaque projet d'infrastructure, et notamment pour les chaussées fortement sollicitées en Afrique subsaharienne.

Ainsi, l'objectif général de la recherche est de contribuer à la conception et à la réalisation d'infrastructures durables dans la région d'Afrique subsaharienne par un choix judicieux du type de revêtement pour les futures chaussées fortement sollicitées.

Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont :

- (1) Proposer une stratégie optimale de sélection d'une option de chaussée en considérant la conception d'une chaussée avec un revêtement en enrobé et en béton et son fonctionnement sur le cycle de vie désiré. Ainsi le premier article permet de rencontrer cet objectif et permet d'analyser deux options de chaussée au plan économique. Au lieu de conclure sur la base des coûts initiaux, l'analyse est conduite selon le concept des coûts globaux du cycle de vie de la chaussée.

- (2) Identifier et intégrer des indicateurs environnementaux et d'évaluer l'empreinte environnementale des deux options de chaussées considérées dans le premier article. Le deuxième article permet d'atteindre cet objectif. L'empreinte environnementale des options de chaussée est faite sur le cycle de vie à partir des indicateurs environnementaux identifiés, et
- (3) Identifier les indicateurs sociaux des deux options de chaussées et suggérer une approche de calcul des externalités de ces projets. Le troisième article à travers lequel est proposé une approche de calcul des coûts sociaux et la monétisation des dommages engendrés par les indicateurs sociaux permet d'atteindre cet objectif. Ces trois articles ont en commun la prise en compte de la même croissance du trafic des poids lourds, l'analyse sur les mêmes phases du cycle de vie et permettent une vérification des options de chaussées selon les trois piliers du développement durable. Ainsi la nouvelle approche de sélection permet d'atteindre les objectifs de développement durable.

Méthodologie

La méthodologie générale de la recherche se déroule selon quatre (4) principales étapes telles qu'indiquées à la Figure 0.1. Cette démarche méthodologique est utilisée pour l'atteinte de chaque objectif spécifique comme suit :

(1) Étude d'une stratégie optimale de sélection d'une option de chaussée

Une revue documentaire a été faite sur les revêtements et leurs comportements dans les pays chauds. Les technologies les plus appropriées au niveau des revêtements sont identifiées. Une enquête ciblée auprès des administrations nord-américaines et subsaharienne est par la suite effectuée. Ensuite le dimensionnement optimal des options enrobé vs béton a été fait en utilisant le catalogue des structures de chaussées neuves 1998 de France. Le dimensionnement obtenu a été vérifié et optimisé à l'aide du logiciel Alizé LCPC de France pour répondre aux exigences mécanistes de la conception. Après avoir déterminé les structures des chaussées en prenant en compte la variation du trafic des poids lourds une analyse économique a été faite sur le cycle de vie à l'aide du logiciel HDM-4 v2. Les coûts initiaux de construction et les coûts

globaux du cycle de vie ont été obtenus et comparés. La validation du concept a été effectuée sur trois sections homogènes de l'autoroute du nord en Côte d'Ivoire.

(2) Évaluation de l'empreinte environnementale

Le processus de collecte des données est fait en s'appuyant sur les données et informations obtenues tel que décrit à l'étape précédente. Les résultats du dimensionnement sont pris en compte pour évaluer l'empreinte environnementale des deux options de chaussée. Pour couvrir les phases du cycle de vie étudiées, les outils ECORCE 2.0 et HDM-4 ont été utilisés. La validation est faite sur les mêmes sections homogènes que précédemment.

(3) Approche de calcul des coûts sociaux et monétisation des externalités

Suivant la même démarche les résultats obtenus dans les deux premières étapes sont utilisés. Les indicateurs sociaux dégagés à l'étape précédente sont considérés. Le dimensionnement et, le trafic des poids lourds ainsi que les phases du cycle de vie sont les mêmes. Les outils ECORCE 2.0 et HDM-4 servent à faire l'analyse comparative. Les externalités sont monétisées pour être prises en compte dans les coûts de construction. La validation est faite sur les mêmes sections homogènes.

La description sommaire de la démarche méthodologique appliquée à chaque chapitre est la suivante :

Étape 1

Une revue de littérature spécifique a été faite pour connaître le comportement des revêtements selon la technologie utilisée. Les paramètres influençant leurs comportements ont été répertoriés en identifiant les indicateurs économiques, environnementaux et sociaux.

Étape 2

La collecte des informations, des données selon la pratique de la conception et des systèmes de gestion des chaussées en tenant compte des paramètres identifiés à l'étape 1 a ensuite été réalisée. Les pays nord-américains ont développé une grande expertise particulièrement pour

les chaussées en béton. Les technologies les plus appropriées pour l'Afrique subsaharienne pourraient être importées et adaptées au contexte de chaque projet.

Étape 3

Le dimensionnement optimal des deux options de chaussées est fait sur un projet réel dans un pays de l'Afrique subsaharienne en tenant compte des paramètres déjà identifiés aux étapes précédentes. Les recommandations suite à la validation de la méthode proposée dans cette thèse seront une contribution par une démarche scientifique au débat en cours sur le choix de l'option à réaliser. Les indicateurs identifiés aux étapes antérieures sont ici pris en compte. Les ressources à utiliser seront entre autres les méthodes de dimensionnement des Règles techniques pour la construction routière dans les pays africains de la zone intertropicale (CEBTP, 2018), le catalogue des chaussées neuves de 1998 en France et les méthodes de conception du livre de Pavement Analysis and Design (Huang Yang., 2004). L'outil informatique utilisé est le logiciel Alizé LCPC.

Étape 4

Cette étape est consacrée aux évaluations des aspects économiques, environnementaux et sociaux de chaque option de chaussée sur le cycle de vie à l'aide des outils ECORCE 2.0 et HDM-4 v2.0. Le concept des coûts globaux pour la sélection des projets est appliqué sur le projet de l'autoroute du nord en Côte d'Ivoire. L'intégration des paramètres environnementaux et sociaux est prise en compte pour la première fois sur un projet de la sous-région. Suite aux analyses du cycle de vie des chaussées, une comparaison des deux options de chaussée est faite pour déterminer l'option optimale de chaussée à réaliser en prenant en compte la croissance du trafic des poids lourds comme variable indépendante car l'étude s'intéresse spécialement aux chaussées fortement sollicitées. Cette étape aboutit à la proposition d'une nouvelle approche de sélection d'une option de chaussée en respectant les trois piliers du développement durable.

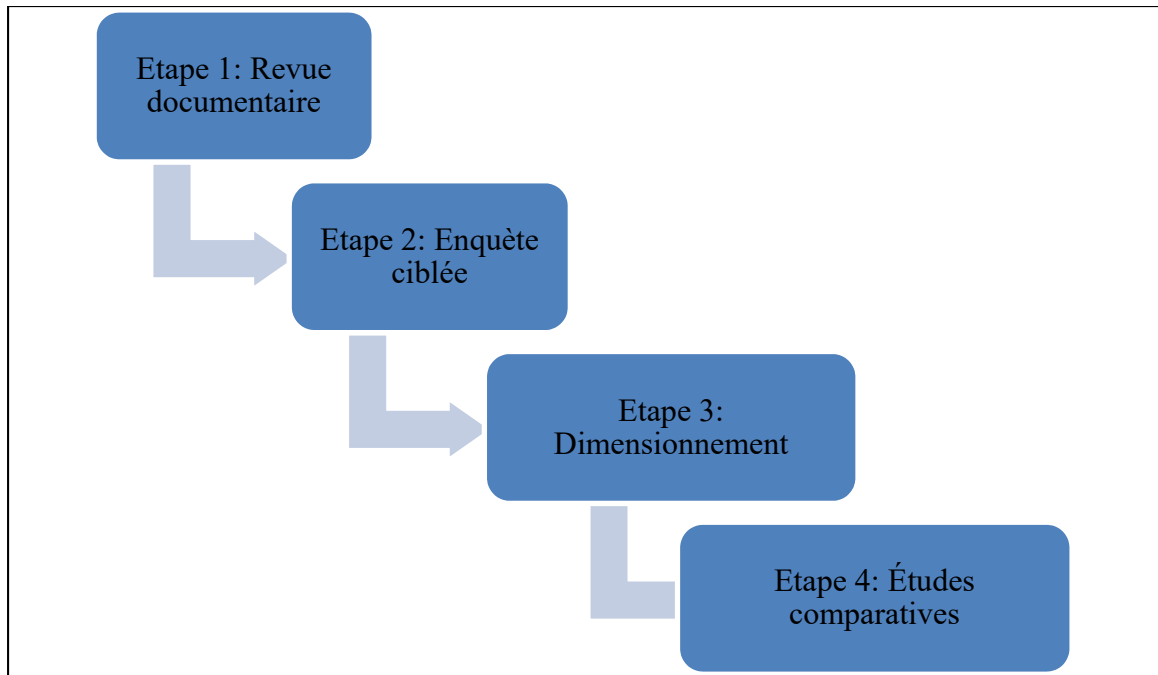


Figure 0.1 Méthodologie

Contribution originale du projet

La présente recherche tire son originalité de :

- (1) L'approche novatrice d'adaptation des technologies importées des pays développés vers l'Afrique subsaharienne en considérant les conditions locales ;
- (2) Les recommandations données aux agences de gestion routière, aux concepteurs et autres décideurs pour faire un choix judicieux du revêtement des chaussées. Cet appui est inexistant jusqu'à ce jour ;
- (3) La prise en compte de l'ensemble des coûts sur le cycle de vie de la chaussée dans le processus de passation des marchés de travaux aux entreprises, alors que les marchés sont généralement attribués aux soumissionnaires en considérant le coût initial des travaux ; et,
- (4) La prise en compte des contraintes environnementales et les dommages des externalités des projets routiers.

Cette étude est par ailleurs d'application immédiate dans le contexte d'un projet en Afrique subsaharienne.

Limite de l'étude

La présente recherche propose une nouvelle approche du choix du revêtement des chaussées entre l'enrobé bitumineux et le béton armé continu. Les autres formes de revêtement à base d'enrobé ou de béton de ciment ne sont pas étudiées. La validation de l'approche est effectuée dans le contexte spécifique de l'Afrique subsaharienne et particulièrement en Côte d'Ivoire. Les phases du cycle de vie des chaussées prises en compte sont la phase d'extraction et de production des matériaux, la phase construction et la phase d'exploitation.

Organisation de la thèse

Cette thèse est organisée en 5 chapitres. Le chapitre suivant soit le chapitre 1 traite de la revue de littérature. Il synthétise le point des connaissances en lien avec le sujet. Le chapitre 2 effectue une analyse technico-économique et propose une nouvelle approche de sélection des options de chaussées basée sur le concept des coûts globaux sur le cycle de vie à travers un article. Cet article intitulé « Stratégie optimale de sélection d'un revêtement pour la construction de routes fortement sollicitées en Afrique subsaharienne - Cas de l'autoroute du nord en Côte d'Ivoire. » a été soumis à la revue *Anales du Bâtiment et des Travaux Publics* et publié dans cette revue en septembre 2020. Le chapitre 3 traite de la prise en compte des impacts environnementaux dans le processus de sélection d'une option de chaussée à travers un article intitulé « Évaluation de l'empreinte environnementale d'une chaussée en enrobé ou en béton armé continu, en fonction du volume de poids lourds, sur son cycle de vie. Cas de l'Autoroute du Nord en Côte d'Ivoire », article soumis à la revue *Anales du Bâtiment et des Travaux Publics*. Dans une perspective de construction de routes vertes, la nouvelle approche proposée doit satisfaire les trois piliers du développement durable. Ainsi, le chapitre 4 fait une tentative de monétisation des externalités de la chaussée à travers un article intitulé « Approche

de calcul de coûts sociaux sur le cycle de vie d'une chaussée en enrobé ou en béton armé continu et application », article soumis à la revue Anales du Bâtiment et des Travaux Publics. La robustesse des résultats est obtenue d'une part par une analyse de sensibilité qui permet d'observer l'impact de la variation des principales données sur les résultats et d'autre part par la comparaison avec les résultats disponibles dans la revue de littérature. Le chapitre 5 fera une synthèse des principales discussions suivi de la conclusion générale et des recommandations. L'organigramme est représenté par la Figure 0.2.

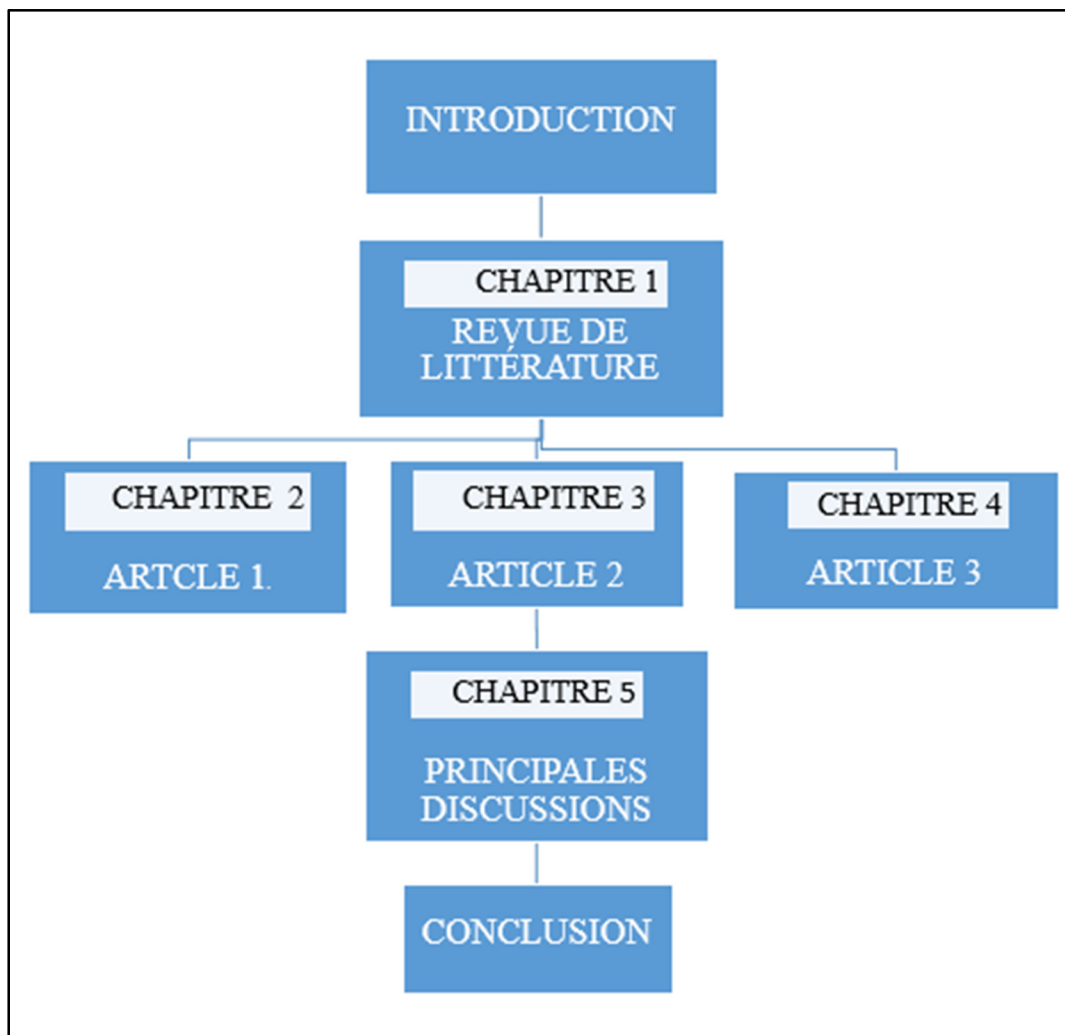


Figure 0.2 Organigramme de la thèse

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 L'Afrique subsaharienne

Située à la frontière sud du Sahara l'Afrique subsaharienne telle que présentée à la Figure 1.1 représente près de 80 % de la superficie du continent africain lequel est composé de cinq sous-continentes décrits au Tableau 1.1.



Figure 1.1 Cartographie de l'Afrique subsaharienne
Tirée de Collin et Labrecque (2011)

Tableau 1.1 L'Afrique est divisée en 5 parties
Adapté de Ronfard (Ronfard, 2020)

N° d'ordre	Partie
1	L'Afrique du Nord
2	L'Afrique de l'Ouest
3	L'Afrique Centrale
4	L'Afrique de l'Est
5	L'Afrique Australe

1.2 État du réseau

Le réseau routier est caractérisé par des dégradations prématurées dues à plusieurs paramètres combinés tels que le faible entretien, les températures élevées, la surcharge routière et d'une manière générale, une gestion des chaussées critiquable depuis la collecte des données sur le terrain jusqu'à la construction, la réhabilitation ou l'entretien des chaussées.

1.2.1 Dégradations prématurées

Plusieurs paramètres conjugués découlant de toutes les étapes du processus de gestion des chaussées, concourent à la dégradation prématurée des chaussées. Cette section met l'accent sur l'entretien routier, les surcharges routières et les températures élevées dans la zone subsaharienne.

1.2.1.1 Faible entretien

Selon Ken et al. (2008), bien que les réformes du secteur routier aient porté essentiellement sur l'entretien, il y a des signes d'un parti pris persistant en faveur de l'investissement dans les dépenses. Celui-ci représente deux tiers de la dépense totale, ne laissant ainsi qu'un tiers pour

l'entretien. Sur la base de l'expérience dans d'autres régions du monde, le rapport entre l'investissement et l'entretien devrait être plus proche de la moitié.

Il en résulte que l'entretien routier reste insuffisant du fait de la faible partie des ressources financières allouée. Le réseau routier étant peu entretenu, les routes en Afrique subsaharienne sont souvent en mauvais état et se dégradent autant plus rapidement. Selon Ken, en moyenne, près de la moitié du réseau est en bon état et un tiers dans un état passable. L'état du réseau dans des pays d'Afrique subsaharienne est présenté à la Figure 1.2, selon les données de 2008. Pour chaque pays donné, l'histogramme comporte trois portions en pourcentage. La portion en noir est le pourcentage du réseau bien entretenu. La partie grise est le pourcentage du réseau dans un état passablement entretenu. Enfin, la partie en blanc représente le pourcentage du réseau non entretenu. Dans le cas de la Côte d'Ivoire en 2008, il y avait environ 10 % du réseau bien entretenu, 77 % du réseau passablement entretenu et 13 % du réseau non entretenu.

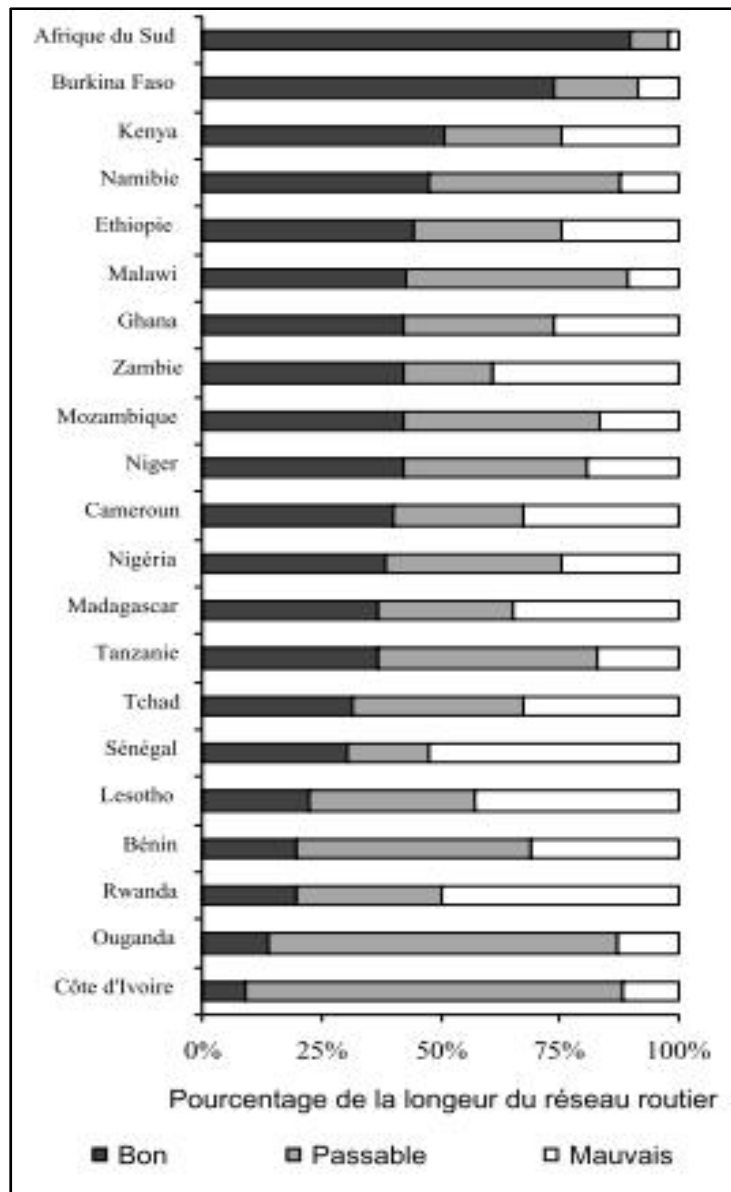


Figure 1.2 État du réseau principal de quelques pays
Tirée de Ken et al. (2008)

1.2.1.2 Effet de la surcharge routière

La surcharge des véhicules est une pratique fréquente sur le réseau routier. En l'absence d'un contrôle rigoureux de cette pratique par les organismes compétents, cette situation devient un

fléau destructeur des routes. Les Figures 1.3 (a) et (b) représentent des cas de surcharges rencontrés dans les pays en développement et en Afrique.



Figure 1.3 Surcharges routières observées : (a) camion léger; (b) camion lourd
Tirée de https://www.pinterest.ca/myriam_thys/overloaded-vehicles-in-asia-and-africa/?lp=true

Un manque persistant de restriction de poids et d'application sur les camions est pandémique dans toute l'Afrique, et il est probable que la surcharge des camions au Nigeria soit importante (Campbell, 2009). La Commission des transports et des communications de l'Afrique australe (2001) indique que lorsque les données de charge et de trafic par essieu ne sont pas disponibles, la probabilité de surcharge est élevée et doit être prise en compte dans la conception routière et/ou dans les solutions de réhabilitation (Campbell, 2009).

Toujours selon Campbell (2009), la mauvaise utilisation des routes au Nigéria, due aux camions surchargés est l'une des principales causes de détérioration des infrastructures routières. Les charges à l'essieu excessivement élevées sur les routes revêtues et en gravier,

surtout pendant la saison des pluies, contribuent considérablement à réduire l'espérance de vie des routes (Campbell, 2009).

Ce constat de mauvaise utilisation des routes par les usagers, soutenu par l'inexistence d'un contrôle adéquat des charges limites autorisées sur les chaussées dans la plupart des pays de l'Afrique subsaharienne, reste une réalité. Tel que représenté à la Figure 1.4, une corrélation existe entre les charges à l'essieu et les dégâts occasionnés sur les routes. Selon cette Figure, environ 20 % des camions surchargés produisent 60 % des dommages alors qu'environ 80 % des camions non surchargés produisent 40 % de dégâts sur le réseau routier selon une étude effectuée dans la province de Mpumalanga en Afrique du Sud.

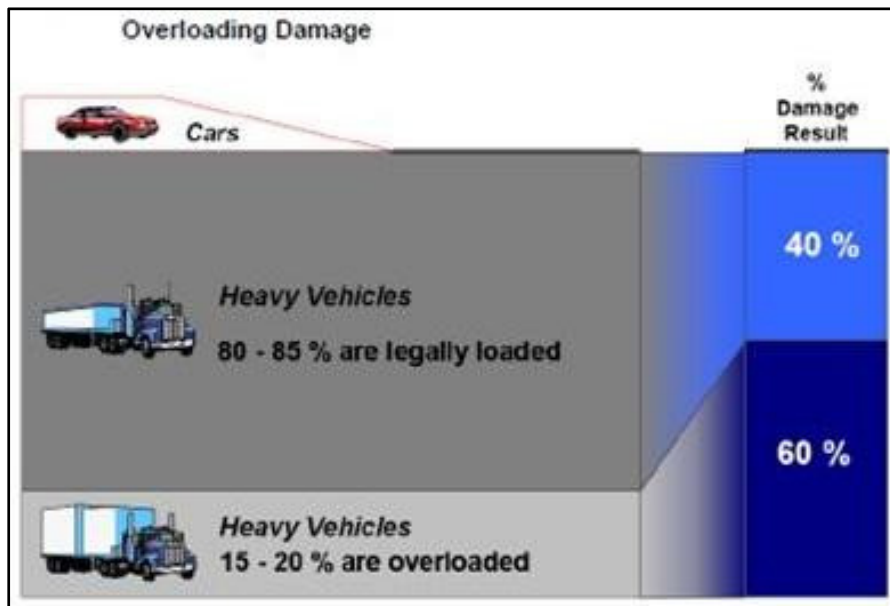


Figure 1.4 Dégâts occasionnés par les surcharges en Afrique du Sud
Tirée de <http://www.safiri.co.za/mpfdb/roads-overload-control.html>

Dans l'espace de l'Union monétaire ouest africaine (UEMOA), la commission de l'UEMOA a dû recourir à la mise en place du règlement 14 visant à limiter la charge à l'essieu ainsi que les gabarits des camions sur le réseau routier de l'espace UEMOA (Le conseil des ministres de l'UEMOA, 2005).

Dans l'espace de l'union économique et monétaire ouest Africain le règlement 14 a été institué par les gouvernements membres de l'UEMOA pour lutter contre la surcharge routière et préserver le réseau routier des dégradations prématurées. Ce règlement limite les charges à l'essieu tel qu'indiqué au Tableau 1.2. Il limite également le poids total autorisé en charge (PTAC) et le poids total roulant autorisé (PTRA) des véhicules tel que présenté au Tableau 1.3. Ce règlement très contraignant réduit la charge d'essieu simple à 6 tonnes au lieu de 12 à 13 tonnes.

Tableau 1.2 Limites des charges à l'essieu dans l'espace UEMOA
Tiré de Le conseil des ministres de l'UEMOA (2005)

<u>Désignation des essieux</u>	Charge limite
- Essieu simple avant	6 tonnes
- Essieu simple intermédiaire ou arrière avec roue unique	11,5 tonnes
- Essieu simple intermédiaire ou arrière avec roues jumelée	12 tonnes
- Essieu tandem intermédiaire ou arrière :	
- Tandem de type 1	11,5 tonnes
- Tandem de type 2	16 tonnes
- Tandem de type 3	18 tonnes
- Tandem de type 4	20 tonnes
- Essieu tridem	
- Tridem de type 1	21 tonnes
- Tridem de type 2	25 tonnes
- Remorque, essieu simple avant	6 tonnes

Tableau 1.3 Limites du PTAC et du PTRA dans l'espace UEMOA
Tiré de Le conseil des ministres de l'UEMOA (2005)

<u>Catégories de véhicule</u>	PTAC
- Véhicule à moteur isolé à 2 essieux (6 + 12 tonnes)	18 tonnes
- Véhicule à moteur isolé à 3 essieux dont 1 tandem (6 + 20 tonnes)	26 tonnes
- Véhicule à moteur isolé à 4 essieux et plus (6+25 tonnes)	31 tonnes
- Remorque à 2 essieux (6 + 12 tonnes)	18 tonnes
- Remorque à 3 essieux dont 1 tandem (6 + 18 tonnes)	24 tonnes
	PTRA
- Véhicules articulés à 3 essieux simples (6+12+12 tonnes)	30 tonnes
- Véhicules articulés à 4 essieux (6 + 12 + 20 ou 6+20+12 tonnes)	38 tonnes
- Véhicules articulés à 5 essieux avec un tridem (6 + 12 + 25 tonnes)	43 tonnes
- Véhicules articulés à 5 essieux avec deux tandems (6+ 20+20 tonnes)	46 tonnes
- Véhicules articulés à 6 essieux (6 + 20 + 25 tonnes) et plus	51 tonnes
- Train routier et train double à 4 essieux simples ;	38 tonnes
- Train routier (porteur+remorque » et train double, à 5 ou 6 essieux	44 tonnes
- Train routier «porteur+semi-remorque » à 6 essieux et plus	51 tonnes

Au Canada, un exemple de répartition des charges à l'essieu , selon l'étude de Gaudry (2000) est présenté au Tableau 1.4.

Tableau 1.4 Distribution de la charge par groupe d'essieux
et par catégorie de véhicule, Canada
Tiré de Gaudry (2000)

Average weight (kg) per axle group and per vehicle category										
Axle # Group of axles	Single-units trucks			Single-trailer trucks			Multi-trailer trucks			
	2-axle	3-axle	4-axle or +	4-axle or +	5-axle	6-axle or +	5-axle or +	6-axle	7-axle or +	
1 1	3339.6	5131.5	8209.9	3717.4	4765.3	5043.8	4291.9	4730.8	5169.9	
2 1	4890.4	6430.1	7543	5983.6	6730.5	8912.1	6081.8	17500	7266.1	
2 2		9145.4	12083.8	8046.7	10892.3	12988.4	12199.8	11449.2	13156.7	
2 3			17578.8			17150.6				
2 4										27500
3 1		5377.9	7495.2	4106.3	8352.7	8368.7	5427.3	5448.1	7808.7	
3 2			14935.3	6814.2	9836.2	11998.4	6551.1	9959.1	11207.3	
3 3			27500		4915.3	16020.8			17172.6	
3 4						20174.2			22068.8	
4 1			17500	6026.6	4752.9	8221.1	4216.7	4734.8	5943.7	
4 2					5597.5	12147.7	7149.3	11183.1	12818.7	
4 3						16761.4			14974.8	
4 4						20589.9			25259.4	
5 1					5023.7	8204.2	3632.3	4527.4	5734.1	
5 2						12796.2			9363	
5 3						18764.7			10062.8	
5 4						19184.7				
6 1						6714.6		17500	5799.6	
6 2						13703.6			11907.2	
6 3									5500	
6 4										
7 1										6847

1.2.1.3 Charges de trafic et flotte utilisée dans cette thèse

Le parc de véhicule composé de dix (10) types de véhicules et la distribution du trafic sur les trois (3) sections étudiées, sont indiqués à l'Annexe 1.

Le trafic est le facteur le plus important dans la conception des chaussées. La prise en compte du trafic doit inclure à la fois l'amplitude et la configuration de la charge ainsi que le nombre de répétitions de cette charge. Il existe trois procédures différentes pour considérer les effets des véhicules et du trafic dans la conception des chaussées: le trafic fixe, le véhicule fixe et le trafic et le véhicule variables (Huang, 2004).

La procédure du véhicule fixe, qui fait appel à l'utilisation de l'équivalent de charge axial simple (ÉCAS ou « equivalent single axle load » ou ESAL en anglais) est utilisée dans cette étude. Dans la procédure du véhicule fixe, l'épaisseur de la chaussée est régie par le nombre de répétitions d'une charge standard par essieu, généralement la charge par essieu simple de 18 kip (80 kN). Les grandes variétés de charges par essieu et de volumes de trafic et leurs effets intraitables sur les performances des chaussées exigent que la plupart des méthodes de conception utilisées aujourd'hui soient basées sur le concept de véhicule fixe (Huang, 2004).

Le nombre d'ECAS supporté par une section de route, dans une direction analysée et sur la voie analysée, se calcule comme suit (Doré & Grellet, 2015) :

$N_{18} = DJMA_{initial} * VL * Dir * Voie * CAM * N * fa$ Où : N_{18} , nombre total d'ÉCAS prévus (ÉCAS)

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

VL, pourcentage de véhicules lourds (camions / véhicule)

Dir, pourcentage de camions dans la direction analysée

Voie, pourcentage de camions dans la voie analysée

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

N, nombre de jours estimés de circulation (jours)

fa, facteur d'accroissement pour les véhicules lourds.

Les valeurs des ÉCAS aux fins des calculs de dimensionnement sont généralement obtenues par des mesures aux stations de pesées sur les tronçons routiers. Si ces derniers ne comportent pas de stations de pesage, les valeurs par défaut du Tableau 1.5 peuvent être intégrées dans les calculs (Doré & Grellet, 2015).

Tableau 1.5 Valeurs par défaut des coefficients d'agressivité moyens (ÉCAS)
Tiré de Doré et Grellet (2015)

Véhicules		Coefficient d'agressivité moyen (ÉCAS)
Camion 1 unité	2 essieux	0,3
	3 essieux	1,5
	4 essieux et plus	5,7
Camion 2 unités	4 essieux et moins	0,5
	5 essieux	1,7
	6 essieux et plus	6,8
Camion 3 unités	5 essieux	1,7
	6 essieux et plus	7,3

1.2.1.4 Effet des températures élevées

La température est une variable-clé à prendre en compte à toutes les phases du cycle de vie de la chaussée particulièrement pour l'enrobé bitumineux. Que la température réelle soit en inadéquation avec les paramètres de formulation ou tout simplement élevée dans la zone étudiée, elle reste un facteur aggravant de diverses dégradations des chaussées, tel que décrit dans le catalogue des dégradations de surfaces des chaussées (L.C.P.C., 1998). La zone subsaharienne est caractérisée par un climat tropical et reconnue pour ses températures élevées allant jusqu'à 50 °C dans certains pays. Ces températures favorisent le vieillissement des chaussées en enrobé.

1.3 Outils de conception des chaussées

La conception des chaussées est généralement faite, dépendant des pays, à l'aide de logiciels de chaussées ou de catalogues. Ailleurs dans le monde, selon Rust, Mahoney, et Sorenson (1998), la plupart des méthodes de conception utilisées sont empiriques. La méthode du CBR est la plus utilisée dans le monde (Rust et al., 1998). Ainsi, les résultats de l'essai du CBR sont

utilisés pour le dimensionnement de la chaussée dans la plupart des pays. La pratique de nouveaux matériaux, les méthodes de mise en œuvre, les équipements utilisés et la qualité du personnel nécessaire posent des difficultés aux pays d'Afrique subsaharienne qui ne disposent pas des mêmes environnements technologiques que les pays développés.

En Afrique subsaharienne, ces technologies, particulièrement pour la chaussée en béton, doivent être importées et adaptées. Ainsi, les principes de conception se réfèrent aux Règles techniques pour la construction routière dans les pays africains de la zone intertropicale (C.E.B.T.P, 2018) et peuvent aussi s'inspirer d'autres principes, comme la méthode de conception du livre « Pavement Analysis and Design » (Huang, 2004).

Le logiciel Alizé du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) et le catalogue des structures types de chaussées neuves de la société d'études techniques des routes et autoroutes et du laboratoire central des ponts et chaussées (SÉTRA-LCPC), de France, sont les outils les plus utilisés pour la conception des structures de chaussées en Afrique de l'ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire. Les limites de ces outils sont qu'ils sont conçus d'abord pour leur pays d'origine. Les coefficients de sécurité pris en compte ne sont pas déterminés en fonction des réalités africaines. C'est en réalité une approche de calcul du dimensionnement qui est effectuée avec ces outils qui conduit souvent à un surdimensionnement ou à l'inverse un sous-dimensionnement de la chaussée. Une adaptation est nécessaire au contexte local en attendant le développement de normes et codes de constructions locales. C'est pourquoi la future méthode de conception des chaussées sera basée sur l'expérience locale de construction des routes dans chaque pays (Assaf, 2018).

1.4 Méthodes d'évaluation usuelles des options de chaussées ACCV

Les chaussées à comparer peuvent être analysées selon différents axes. Les évaluations des chaussées sont faites à l'aide d'outils permettant les analyses des coûts du cycle de vie (ACCV). Les aspects technico-économiques, environnementaux et sociaux sont traités dans cette section.

1.4.1 Évaluation technico-économique

La prise en compte des aspects techniques puis économiques, dans la comparaison des options de chaussées, passent par les étapes de conception structurale des chaussées et l'évaluation des coûts associés à celles-ci. Le logiciel HDM-4 version 2.0 de l'association mondiale de la route (AIPCR) est un outil conçu avec la Banque Mondiale pour les évaluations techniques, économiques et environnementales des chaussées sur le cycle de vie. La Banque Mondiale étant l'un des principaux partenaires du financement des travaux d'infrastructures routières l'outil qu'elle a parrainé est approprié pour faire les analyses qui lui seront soumises.

Cet outil possède de nombreuses possibilités des chaussées tant au niveau projet qu'au niveau réseau (Greg, Mike, & Tyrone, 2005). Il est aussi par excellence un outil de gestion des chaussées. Il permet la planification des ressources allouées aux divers travaux, la gestion des réseaux routiers et la gestion des projets. Les coûts qu'il permet d'évaluer prennent en compte au plan économique les coûts à l'administration et les coûts aux usagers. Au plan environnemental la consommation d'énergie et les émissions polluantes sont évaluées. Les principaux polluants et gaz à effet de serre sont pris en compte. Selon SAMBE, Philippe DOYON, et BEAULIEU (2016), il s'agit des indicateurs suivant : le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC), l'oxyde d'azote (NOX), l'oxyde de soufre (SOX), les particules fines (PM10 et PM2,5), le gaz carbonique (CO2), le méthane (CH4) et le protoxyde d'azote (N2O). Le logiciel HDM-4 permet entre autres de vérifier la faisabilité économique des projets, de vérifier la viabilité des choix d'investissement, de comparer différentes politiques alternatives de gestion et d'investissement, de classer les projets d'aménagement et d'entretien, et de fixer les priorités d'investissement (Ghibaudo, 2018).

1.4.2 Évaluation environnementale

Dans la perspective du développement durable, les impacts environnementaux sont pris en compte à l'aide d'outils variés tel que rencontré dans la littérature (Techno-Bitume, 2011). Il

n'existe pas un outil prenant en compte l'évaluation environnementale sur toutes les phases depuis l'extraction des matériaux et leur fabrication jusqu'à la fin de vie de la chaussée construite et utilisée.

De nombreux logiciels écocompareurs existent et traitent généralement les phases matériaux et construction, comme l'outil ECORCE 2.0.

Le logiciel HDM-4 version 2.0 traite la phase d'utilisation de la chaussée et permet une évaluation environnementale notamment des émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie. L'objet de l'outil ECORCE 2.0, qui traite les phases d'extraction et de production des matériaux et construction, est de fournir des données d'inventaire sur le cycle de vie et des résultats d'indicateurs environnementaux calculés concernant différents choix techniques en phase d'appel d'offres, en phase projet ou encore à la fin de réalisation des travaux qu'ils soient de construction et d'entretien structurel de chaussées d'infrastructures linéaires, de construction de couche de forme, de construction de PST, de réalisation de remblais (Dauvergne, Proust, Tamagny, & Ventura, 2013). Les indicateurs calculés sont : le monoxyde de carbone (CO), le gaz carbonique (CO₂), les hydrocarbures (HC), l'oxyde d'azote (NO_x), les particules fines (PM 10 et PM_{2,5}), le plomb (Pb), l'oxyde de soufre (SO_x) et le dioxyde de soufre (SO₂).

1.4.3 Évaluation des externalités

Une externalité est une transaction entre deux agents économiques, ce qui affecte un troisième agent non-participant, qui n'aura ni paiement ni compensation (Cornes & Sandler, 1996). En politique environnementale, cette notion se réfère principalement à des externalités négatives, qui correspondent à la dépréciation du stock naturel, le bien-être, l'utilité ou la satisfaction des agents économiques externes (Fauchaux, 2007). En d'autres termes, les externalités négatives sont les coûts associés à des dommages environnementaux qui ne sont pas reflétés dans le prix de marché d'un produit ou d'un service.

De tels dommages sont aussi appelés coûts externes car, bien que représentant des coûts réels pour la société, ils ne sont pas payés par l'entreprise ou industrie qui est responsable de ceux-ci et ne sont donc pas transmis aux consommateurs. Le prix d'un produit sur le marché, ne comprend généralement que les coûts privés, tel que les coûts payés par le producteur pour des intrants, par exemple, les matières premières, l'énergie, l'eau, la main-d'oeuvre, l'emballage, le transport, le capital, etc., et laisse totalement en dehors de ses coûts privés, les coûts externes (Laratte, Nguyen , Guillaume, & Hua, 2016).

Étant donné les tendances récentes de la pensée économique, en particulier l'accent sur le développement durable ou de passer au « vert » et l'utilisation des mécanismes de marché dans la mise en place des réglementations environnementales, le concept des externalités environnementales est devenu de plus en plus populaire dans l'économie et la politique publique (Kostas, 2011; UNEP PRI FI, 2011). L'importance de la prise en compte des coûts externes dans la formulation des prix d'un produit, procédé ou service, en particulier dans le domaine de la production d'énergie a été universellement reconnue par les spécialistes environnementaux et économiques (Krey, Widmer, & Zweifel, 2011)(GIEC, 2011 et Krey et al., 2011).

La Figure 1.5 résume les composantes des coûts sociaux des projets d'infrastructure routières.

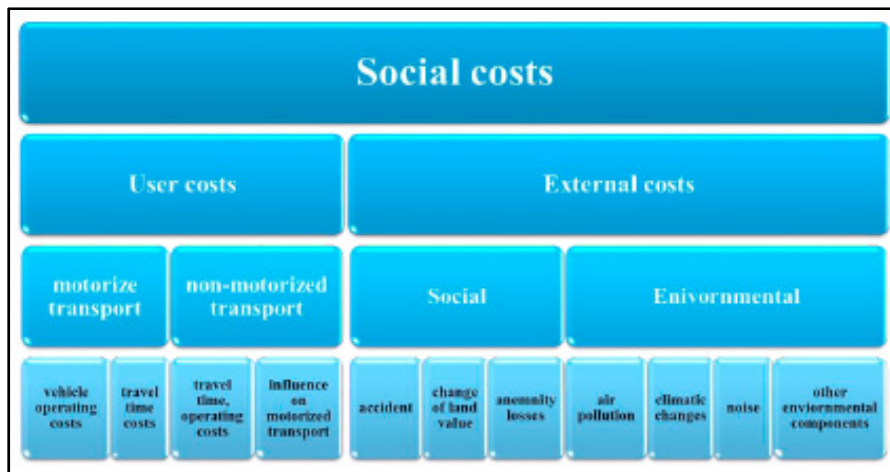


Figure 1.5 Éléments de coûts sociaux des infrastructures routières
Tirée de Margorínová et Trojanová (2019)

1.5 Durabilité des chaussées

Pour être considérée comme une chaussée durable, la chaussée à construire doit satisfaire à la fois les trois aspects au plan économique, environnemental et social (FEBELCEM, 2019). La sélection d'une option de chaussée, généralement basée sur le critère économique doit plutôt prendre en compte les trois critères de développement durable. Le concept de développement durable est un nouveau concept encore mal compris de façon général. Dans le cadre de cette recherche il doit être compris comme une méthodologie qui permet de construire des chaussées en accordant une valeur équivalente aux critères économique, environnemental et social des projets.

1.6 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est effectuée pour examiner la robustesse d'un projet, en termes économiques ou financiers, aux changements de l'ampleur des variables importantes. Elle peut être entreprise dans le cadre d'un scénario plus large ou d'une analyse des risques car les résultats d'une évaluation sont sujets à l'incertitude (Greg et al., 2005). La fonctionnalité de l'analyse de sensibilité dans le HDM-4 permet un examen relativement simplifié de l'incertitude en permettant à l'utilisateur d'employer des chiffres supérieurs et inférieurs à ceux

attendus, et de déterminer dans quelle mesure les critères de décision économique sont sensibles à de tels changements. Les variables choisies sont une question de jugement, mais pour la plupart des projets d'immobilisations routières, la viabilité du projet doit être testée pour la variation du trafic, les coûts du projet et le calendrier. En fonction du projet, d'autres facteurs peuvent être examinés, y compris le trafic généré, les économies de temps et d'accidents, les prix fictifs, la maintenance et des facteurs spéciaux, tels que les effets des investissements complémentaires, ou l'effet des mesures de gestion ou de réglementation (Greg et al., 2005).

1.7 Conclusion

La préservation du réseau routier représente une difficulté majeure pour les pays de la zone subsaharienne. L'entretien est faible et généralement effectué à la demande en lieu et place de l'application d'un système de gestion des chaussées (PMS). La surcharge routière, le faible entretien du réseau routier et les conditions climatiques, notamment les températures élevées, accélèrent la dégradation des infrastructures.

La conception et le choix de l'option de chaussée sont influencés par divers paramètres et les trois critères de durabilité des chaussées ne sont pas toujours tous considérés lorsqu'il faut choisir une option de chaussée. Ainsi les infrastructures finalement réalisées ne sont pas durables.

En se référant à la revue de littérature effectuée dans les différents articles, plusieurs caractéristiques des chaussées en enrobé ou en béton ont été relevées à travers les recherches antérieures.

Au final, dans la littérature, la plupart des auteurs s'accordent sur le choix de l'option de chaussée en béton pour les chaussées autoroutières à fort volume de trafic. Parmi les solutions de béton couramment utilisées entre les dalles de béton non armées et goudonnées, les dalles

de béton armé et goujonnées et les dalles de béton armé continu, les dalles de béton armé continu ont été préférées pour ce type de chaussées. L'entretien des chaussées en béton tout au long du cycle de vie est faible et elles comportent divers avantages comme le manque d'orniérage, la stabilité de l'IRI (voir annexes II à V), l'albédo et les effets d'îlots de chaleur, la facilité et la rapidité des réparations évitant ainsi des délais aux usagers.

Les auteurs s'accordent sur le fait que pour les chaussées à faible volume de trafic la chaussée en béton n'est pas avantageuse par rapport à la solution en enrobé bitumineux.

Les points de désaccord concernent le coût initial de construction des chaussées. Si la plupart des auteurs indiquent que la chaussée en enrobé est moins chère à la construction, d'autres d'auteurs ont conclu que le coût initial de la solution en béton est moins cher que l'option en enrobé dépendant du coût des matières premières entrant dans la fabrication de ces revêtements dans le pays concerné. Un autre point de désaccord, de loin le plus important est la frontière de l'étude. Lorsque que certains auteurs comparent les chaussées sur la seule phase d'utilisation, d'autres considèrent en plus la phase construction et / ou la phase d'extraction et de productions des matériaux. Pour d'autres encore il faut aller jusqu'aux opérations de production du pétrole pour aboutir au bitume ou du clinker pour arriver au ciment puis le béton. Jusqu'à quelle limite faut-il commencer l'étude? Telle est la question qui n'est pas encore résolue de façon consensuelle au sein de la communauté scientifique. Or les frontières de l'étude influencent considérablement les résultats et les rendant difficilement comparables à ceux des autres auteurs si les frontières ne sont pas communes. L'une des faiblesses de la présente étude sera donc les limites considérées.

Les résultats de toutes les études, selon les auteurs, y compris la présente recherche sont intimement liés à la disponibilité de données de qualités et du contexte local du projet. Si la chaussée en BAC a fait ses preuves sur les chaussées fortement sollicitées du Japon en Asie jusqu'aux États-Unis, en passant par les pays d'Europe, les résultats des recherches dans ces pays ne peuvent pas être transposés tout simplement en Afrique sans tenir compte des conditions locales. Cela justifie la présente recherche. De plus les études couramment

rencontrées dans la littérature se limitent le plus souvent à la phase d'utilisation. Quand d'autres traitent seulement les phases d'extraction et de production des matériaux et /ou de construction.

L'existence d'une faible littérature sur les études similaires au sujet de cette recherche a été constatée. Ainsi, la présente thèse apporte un plus non seulement en faisant une analyse des coûts du cycle de vie sur trois phases du cycle de vie mais en plus en intégrant la croissance du trafic des poids lourds et en arrimant l'étude sur les trois piliers du développement durable. La vision des trois piliers du développement est toutefois toujours en évolution.

CHAPITRE 2

STRATÉGIE OPTIMALE DE SÉLECTION D'UN REVÊTEMENT POUR LA CONSTRUCTION DE ROUTES FORTEMENT SOLLICITÉES. CAS DE L'AUTOROUTE DU NORD EN CÔTE D'IVOIRE

Nahouo Soro¹, Gabriel J. Assaf¹

¹Département de génie de la construction, École de technologie supérieure

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

Article soumis à la revue Annales du Bâtiment et des Travaux Publics
pour publication, août 2019

2.1 Résumé

La préservation du réseau routier et son extension représentent des défis majeurs pour les pays d'Afrique subsaharienne vu la rareté des financements. Le peu d'entretien effectué, les surcharges routières et les températures élevées entraînent une dégradation prématurée des routes avec pour conséquence d'importants coûts aux administrations et aux usagers.

Face à cette situation, il convient de recourir à une nouvelle approche de sélection du revêtement des chaussées entre l'enrobé bitumineux et le béton armé continu, particulièrement pour les chaussées fortement sollicitées en considérant les coûts globaux du cycle de vie au lieu des coûts initiaux. La chaussée à construire doit nécessiter peu d'entretien, avoir un meilleur comportement sous les températures élevées allant jusqu'à 50°C et résister au trafic lourd.

Cet article propose de décrire et d'illustrer une approche innovante et originale d'optimisation de la conception et la sélection d'une option de chaussée revêtue en enrobé bitumineux (EB) ou en béton armé continu (BAC). Dans cet esprit, une validation est effectuée sur un tronçon de 50 km de l'autoroute du nord en Côte d'Ivoire. Les résultats indiquent que le coût initial de construction de la chaussée en BAC est plus cher de 10 à 20 % que celui de la chaussée en EB. Sur le cycle de vie de 20 ans, les coûts à l'administration et les coûts aux usagers baissent

respectivement en moyenne de 15 % et 30 % en faveur de la chaussée en BAC. Au final, en fin de cycle de vie, les coûts globaux de la chaussée en EB sont plus chers de 21 à 28 % que ceux de la chaussée en BAC. Selon l'approche des coûts globaux du cycle de vie, la chaussée en béton armé continu doit être réalisée.

Mots clés : Revêtement de chaussées, enrobé, béton, coût initial, coût globaux, analyse des coûts du cycle de vie

2.2 Abstract

Preservation and extension of road network represent major challenges for Sub-saharan African countries given the scarcity of funding. The poor maintenance carried out, the road overloads and the high temperatures leading to roads premature deterioration with consequent significant costs for both road administrations and users.

In view of this situation, a new way of selecting the type of asphalt or concrete pavement, particularly for heavily loaded pavements should be use considering the overall costs over the life cycle in place of initial costs. The pavement to be built should require little maintenance and have better behavior under high temperatures up to 50 ° C and withstand heavy traffic.

This article aims to describe and illustrate an innovative and original approach for optimizing the design and selection of a pavement option between asphalt pavement (AC) and continuous reinforced concrete pavement (CRCP). In this spirit, validation is carried out on a 50 km section of the Autoroute du nord in Côte d'Ivoire. The results indicate that CRCP initial cost is 10 to 20 % more expensive than that of AC. Over the 20-year life cycle, administration costs and user costs decrease by an average of 15 % and 30 % respectively in favor of CRCP. Finally, at the end of the life cycle, the overall costs of AC are 21 to 28 % more expensive than those of CRCP.

According to the overall life cycle cost approach, the continuous reinforced concrete pavement must be built.

Key words: Pavement, asphalt, concrete, initial costs, global costs, life cycle cost analysis

2.3 Introduction

Les infrastructures routières sont nécessaires pour la communication, le commerce et de façon plus générale pour la croissance de tout pays. Elles constituent l'un des premiers indicateurs du niveau de développement d'un pays.

Toutefois, la construction des infrastructures routières nécessite la mobilisation d'importantes sommes pour leur financement dans tous les pays du monde. Les coûts de la construction routière ont monté en flèche depuis quelques années et les budgets s'y rapportant n'ont pas toujours augmenté au même rythme (Langlois, 1982). Les liaisons internationales sont généralement des routes à faible débit. Selon Ken et al, 2008, la vitesse du trafic sillonnant ces routes a été dramatiquement réduite (généralement à moins de 10 km par heure) par l'engorgement administratif au niveau des frontières et des ports (Ken et al., 2008).

Dans les pays en développement la rareté des fonds nécessaires au financement des routes est une situation à prendre en compte dans la conception et le choix des revêtements des chaussées routières. À cette difficulté de financement s'ajoute, pour l'Afrique subsaharienne, le manque d'entretien des routes et les contraintes liées au climat tropical. Le niveau d'entretien pratiqué par les pays est généralement faible si l'on se réfère à l'étude réalisée par Ken et al, 2008, et les chaussées soumises à de très fortes températures, vieillissent prématurément. En outre la pratique de la surcharge routière non encore maîtrisée par les pays vient accélérer la dégradation des routes. Au final, les routes africaines sont vieillissantes et peu entretenues et la construction de nouvelles routes se fait attendre. Les effets combinés des fortes sollicitations et des températures élevées particulièrement sur les routes ou autoroutes assurant les liaisons internationales sont néfastes à ces corridors commerciaux qui jouent un rôle de haute importance pour l'économie des pays desservis.

Face à cette situation, il faut recourir à une nouvelle approche pour le choix de la chaussée à construire. Les pays occidentaux ont déjà fait le pas en construisant des routes en béton armé ou non armé ou encore en béton compacté au rouleau (BCR). Aux Etats-Unis, Selon les statistiques de la FHWA, 94 % des routes publiques sont revêtues en enrobé bitumineux et seulement 6 % sont revêtues en béton (Federal Highway Administration, 1995). En Afrique subsaharienne, quelques pays comme l'Afrique du Sud et Madagascar font figure de pionniers. En Côte d'Ivoire comme dans l'espace UEMOA, il n'existe pas de routes en béton, particulièrement pour les chaussées fortement sollicitées. Pour faire face aux effets de la surcharge routière et des dégradations prématurées, l'UEMOA a adopté le règlement 14 qui vise à normaliser la charge à l'essieu et le gabarit des véhicules roulant sur le réseau routier de l'espace UEMOA. La charge à l'essieu actuellement pratiquée peut atteindre 20 tonnes versus 8-12 tonnes en Amérique du nord. Le règlement 14 de l'UEMOA prévoit une charge à l'essieu simple de 6 tonnes (Le conseil des ministres de l'UEMOA, 2005).

Cet article effectue une étude comparative des chaussées traditionnellement construites en enrobé bitumineux et les chaussées en béton. Les chaussées en béton couramment réalisées dans les pays développés sont de type dalles goudonnées en béton armé (JRCP), dalles goudonnées en béton non armé (JPCP), dalles en béton armé continu (CRCP) ou encore le béton compacté au rouleau (BCR). Le modèle CRCP ou BAC est généralement adopté pour les chaussées fortement sollicitées (Thébeau, 2004). Cette étude se limitera à la comparaison des modèles de chaussées en enrobé bitumineux (EB ou AC) et en béton armé continu (BAC ou CRCP). La comparaison des coûts initiaux et des coûts globaux à l'exception des coûts environnementaux comme cela se fait couramment en Afrique subsaharienne, sera faite sur un tronçon de l'autoroute du nord en Côte d'Ivoire l'un des axes routiers les plus sollicités eu égard au rôle majeur qu'il joue dans le commerce sous régional. L'étude comparative se fera d'abord au niveau du dimensionnement et ensuite à celui de l'analyse économique à l'aide du logiciel HDM-4.

2.4 Localisation de la zone du projet

Le projet est situé dans l'espace de l'union monétaire ouest africaine (UMOA). Son importance pour le commerce sous régional se justifie par le fait qu'il relie le port d'Abidjan en Côte d'Ivoire à l'arrière-pays en permettant le transport notamment des marchandises entre la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso, le Mali et le Niger tel que présenté à la Figure 2.1.



Figure 2.1 Localisation du site du projet
Tirée de atoo.ci (2017)

2.5 Méthodologie

L'étude a été réalisée sur un tronçon de 50 km de l'autoroute du Nord en Côte d'Ivoire se décomposant en 3 sections homogènes. Afin de comparer les coûts de construction des deux options de chaussée, l'enrobé bitumineux et le béton armé continu, il a été procédé aux dimensionnements des structures de chaussées dans chaque section à partir des données du terrain. Le dimensionnement obtenu à l'aide du catalogue des chaussées a ensuite été optimisé en utilisant le logiciel Alizé-LCPC v1.3. Cette optimisation permet de vérifier les contraintes mécaniques de la structure et d'ajuster au besoin le dimensionnement. L'évaluation économique des deux options de chaussées a par la suite été faite sur une période d'analyse de 20 ans. Les indicateurs économiques déterminés à savoir la valeur actuelle nette (VAN) et le taux de rendement interne (TRI) ont permis d'apprécier la viabilité économique des projets étudiés. Le logiciel HDM-4 Version 2.0 de l'association mondiale de la route a été utilisé pour déterminer pour chaque section homogène et pour chaque scénario de trafic les indicateurs économiques de l'analyse.

Les trois sections homogènes étudiées sont la section Banco-Gesco, la section Gesco-Attinguié et la section Attinguié-PK 50. Les Figures 2.2, 2.3 et 2.4 présentent respectivement une vue de leur état actuel avant les aménagements en cours d'études.



Figure 2.2 Section Banco-Gesco



Figure 2.3 Section Gesco-Attinguié



Figure 2.4 Section Attinguié-PK 50

2.6 Dimensionnement des chaussées

2.6.1 Les paramètres de la conception

a) Les données du sol

Le sol d'infrastructure a été caractérisé par le California Bearing Ratio (CBR) pour le dimensionnement des chaussées flexibles et le module de réaction du sol d'infrastructure (K) pour les chaussées rigides. Le CBR a été obtenu par un test de pénétration du sol et le module de réaction K a été quant à lui obtenu après un essai de chargement de plaque.

b) Le trafic

Les données de trafic ont été obtenues par une campagne en amont pour déterminer le DJMA du projet selon les données de 2016. Le trafic des poids lourds a été pris comme variable indépendante dans cette étude. Il varie de 4 % d'un scénario de trafic au suivant. Les scénarios de trafic correspondent aux variations de 1 %, 5 %, 9 %, 13 %, 17 % et 21 % pour chaque section homogène de route. Le Tableau 1 récapitule les données de trafic de poids lourds utilisées.

Tableau 2.1 Évolution du DJMA des poids lourds (véhicules / jours)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BANCO-GESCO	750	3500	6300	9100	11900	14700
GESCO-ATTINGUIÉ	534	2669	4804	6939	9074	11209
ATTINGUIÉ-PK50	438	2188	3938	5688	7488	9188

2.6.2 Les outils utilisés

a) Le Catalogue de dimensionnement des structures types du Sétra-Lcpc édition 1998

Le dimensionnement des chaussées est généralement fait en zone subsaharienne de l'Afrique à l'aide de catalogues de chaussées. Il existe différents types de catalogues selon les régions. On peut citer les règles techniques pour la construction routière dans les pays africains de la zone intertropicale et le guide Overseas Road Note 31 à titre d'exemple. Dans cette étude, en vue de pouvoir dimensionner les chaussées en enrobé (chaussées flexibles) et en béton (chaussées rigides) avec le même guide, le catalogue des structures types de chaussées neuves du service d'études techniques des routes et autoroutes (SÉTRA) et du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) version 1998 en France, a été utilisé. Ce guide est par ailleurs relié au logiciel Alizé-LCPC.

b) Le Logiciel Alizé-LCPC v 1.3.0

Le logiciel Alizé-LCPC v 1.3 0 est basé sur la méthode rationnelle de dimensionnement des structures de chaussées. Cette méthode a été développée par le LCPC et le SÉTRA. Tel que précisé dans le manuel d'utilisation du logiciel, cette méthode constitue la méthode réglementaire de dimensionnement des chaussées du réseau routier national français et adopté par ailleurs par de nombreuses maîtrises d'ouvrages. Le logiciel Alizé-LCPC v 1.3.0 est un logiciel de type mécaniste. Il a été utilisé pour vérifier le dimensionnement fait à l'aide du catalogue puis pour optimiser les structures par le calcul de variantes de sections.

2.7 L'évaluation économique sur le cycle de vie

2.7.1 Les outils utilisés

a) Le logiciel HDM-4 v2.0

Le logiciel HDM-4 v2.0 de l'association mondiale de la route (AIPCR) est l'un des outils les plus adaptés à l'analyse des chaussées particulièrement pour les pays en voie de développement. Il a été utilisé pour faire une analyse des coûts du cycle de vie (ACCV / LCCA). Les résultats obtenus ont permis de comparer le comportement des deux options de chaussées sur le cycle de vie dont la période d'analyse adoptée est de 20 années.

b) Les alternatives envisagées (GL, EB, BAC)

Les deux modèles de chaussées sont comparés à la chaussée en graveleux latéritique (GL), non revêtue, prise comme l'alternative de base. On obtient les alternatives suivantes analysées par le logiciel HDM-4 v2.0:

Alternative de base : Route en graveleux latéritique (GL)

Alternative 1 : Route en enrobé bitumineux (EB ou AC)

Alternative 2 : Route en béton armé continu (BAC ou CRCP)

c) Les normes d'entretien

Les normes d'entretien utilisées sont résumées dans les Tableaux 2.2, 2.3 et 2.4, respectivement pour la chaussée en graveleux latéritique, en enrobé et la chaussée en béton armé continue.

Tableau 2.2 Normes d'entretien de la chaussée en graveleux latéritique (GL)

Option	Opération de travaux	Critères
1	Rechargement à 50 mm	Épaisseur de grave ≤ 100 mm Intervalle ≥ 5 , ≤ 99 ans
2	Reprofilage tous les 6 mois	Intervalle ≥ 360 jours
3	Point à temps quand ép. < 100 mm	Épaisseur de grave ≤ 150 mm Intervalle ≥ 2 , ≤ 99 ans Quantité maximum $\leq 150 \text{ m}^3/\text{Km}/\text{An}$

Tableau 2.3 Normes d'entretien de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)

Option	Opération de travaux	Critères
1	Reconstruction à 10 IRI	Uni \geq 10 IRI
2	Rechargement 50 mm à 6 IRI	Uni \geq 6 IRI et Uni \leq 10 IRI Intervalle \geq 5 Ans
3	Enduit à 15 % fissuration	Fissuration totale \geq 15 % Intervalle \geq 5 ans, Uni \leq 10 IRI
4	Réparation nids de poules	Nids de poules \geq 50 nb / Km Intervalle \geq 1, \leq 99 ans, Uni \leq 12,5 IRI

Tableau 2.4 Normes d'entretien de la chaussée en béton armé continu (BAC)

Option	Opération de travaux	Critères
1	Rechargement en béton collé	Uni \geq 6 IRI
2	Réparation en pleine épaisseur	Uni \geq 4 IRI
3	Dépendances	Intervalle \geq 1, \leq 99 ans

d) La calibration du logiciel

Afin d'obtenir les résultats les plus précis il est nécessaire de calibrer le logiciel HDM-4 v2.0. Il est adapté pour les analyses des coûts sur le cycle de vie des chaussées dans les pays en voie de développement. Toutefois, pour avoir des résultats fiables, le logiciel doit être calibré aux conditions réelles du pays où la chaussée devra être réalisée (Tsunokawa & Ul-Islam, 2003). Ainsi les paramètres économiques, techniques et environnementaux du pays et du site du projet ont été utilisés à cette fin.

2.7.2 Rentabilité économique des projets

Il existe diverses approches de calcul de la viabilité économique des investissements routiers. La plupart des approches sont issues de l'analyse économique des projets. Ces différentes

approches de rentabilité sont basées sur l'analyse du coût du cycle de vie (ACCV ou LCCA). Une analyse des coûts du cycle de vie avec le logiciel HDM-4 déterminera les indicateurs économiques à savoir la valeur actuelle nette (VAN) et le taux de rendement interne (TRI). Ces indicateurs seront exploités. Cela implique l'actualisation de toutes les dépenses futures au présent, en utilisant un taux d'actualisation approprié.

La méthode de la valeur actuelle nette, malgré les inconvénients qui lui sont associés, est considérée comme celle qui donnera toujours la meilleure réponse par rapport aux autres méthodes (R. Haas, Hudson R., & Zaniewski, 1994; Wohl & Tversky, 1967). Cette méthode est habituellement utilisée pour les projets mutuellement exclusifs.

La méthode du taux de rendement interne, utilisée par un certain nombre d'administrations routières, tient compte à la fois des coûts et des avantages et détermine le taux d'actualisation auquel les coûts et les avantages d'un projet sont égaux (R. Haas et al., 1994). La méthode du taux de rendement interne présente un avantage majeur dans la mesure où les résultats sont bien compris par la plupart des gestionnaires et décideurs. Elle a été favorisée par plusieurs administrations routières. Cependant, il peut arriver que la méthode du taux de rendement interne donne des réponses ambiguës (Wohl & Tversky, 1967).

2.7.3 La comparaison des coûts initiaux et globaux du cycle de vie

À partir du dimensionnement réalisé une évaluation des coûts initiaux de construction avec les prix d'une entreprise locale a été faite. Les résultats obtenus ensuite par l'analyse économique du HDM-4 v2.0 permettent d'obtenir les coûts globaux sur le cycle de vie de 20 ans. Les graphiques sont élaborés pour permettre une analyse comparative des deux types de chaussées telle qu'expliquée dans les sections suivantes.

2.8 Résultats et analyse

Cette section est consacrée à la présentation des résultats obtenus et à leurs analyses. La section 5 sera consacrée à leurs discussions.

2.8.1 Dimensionnement des chaussées

En tenant compte de la variation du DJMA des poids lourds de 1 % à 21 % de croissance, le dimensionnement de la chaussée a été fait pour les deux options envisagées. Les structures de chaussées obtenues sont données dans les tableaux 5 et 6 qui suivent pour chaque section de route. Ces différentes épaisseurs de couches reposent sur une plateforme d'épaisseur 30 cm au-dessus du sol d'infrastructure pour les deux types de chaussées, de classe PF2. Les couches de base et de forme sont constituées de grave bitume de classe 3 (GB3) pour la chaussée en enrobé bitumineux (EB). La chaussée en béton armé continu (BAC) a une couche de base constituée en béton de ciment de classe 2 (BC2).

-Section 1 : Banco-Gesco

Les Tableaux 2.5 et 2.6 donnent respectivement le dimensionnement selon l'option EB et l'option BAC pour la section1.

La couche de surface en EB varie de 8 à 10 cm si le DJMA des poids lourds augmente de 1 % à 21 %. Le dimensionnement ne change pas entre les tranches de DJMA de 5 % à 17 %. Les couches de base et de fondation ne changent pas également pour cette même tranche.

La structure de chaussée en BAC est la même respectivement pour les plages de DJMA des poids lourds de 1 % à 5 %, de 9 % à 13 % et de 17 à 21 %. La dalle de béton armé continu varie de 18 à 20 cm d'épaisseur.

Tableau 2.5 Épaisseur des couches de la chaussée en EB

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EB (cm)	8	9	9	9	9	10
GB3 (cm)	15	20	20	20	20	22
GB3 (cm)	15	20	20	20	20	22

Tableau 2.6 Épaisseur des couches de la chaussée en BAC

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BAC (cm)	18	18	20	20	20	20
BC2 (cm)	18	18	20	20	20	20

- Section 2 : Gesco-Attinguié

Les Tableaux 2.7 et 2.8 donnent respectivement le dimensionnement selon l'option EB et l'option BAC pour la section 2.

La couche de surface en EB varie de 8 à 10 cm si le DJMA des poids lourds augmente de 1 % à 21 %. Le dimensionnement ne change pas entre les tranches de DJMA de 5 % à 17 %. Les couches de base et de fondation augmentent dans la plage de 5 % à 9 % puis dans la plage de 13 % à 21 %.

La structure de chaussée en BAC est la même respectivement pour les plages de DJMA des poids lourds de 5 % à 9 % et de 13 % à 21 %. La dalle de béton armé continu varie de 16 à 20 cm d'épaisseur.

Tableau 2.7 Épaisseur des couches de la chaussée en EB

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EB (cm)	8	9	9	9	9	10
GB3 (cm)	13	18	18	20	20	20
GB3 (cm)	13	18	18	20	20	20

Tableau 2.8 Épaisseur des couches de la chaussée en BAC

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BAC (cm)	16	18	18	20	20	20
BC2 (cm)	18	18	18	20	20	20

- Section 3 : Attinguié-PK50

Les Tableaux 2.9 et 2.10 donnent respectivement le dimensionnement selon l'option EB et l'option BAC pour la section 3.

La couche de surface en EB varie de 8 à 10 cm si le DJMA des poids lourds augmente de 1 % à 21 %. Le dimensionnement ne change pas entre les tranches de DJMA de 5 % à 13 %. Les

couches de base et de fondation augmentent dans la plage de 5 % à 13 % puis dans la plage de 17 % à 21 %.

La structure de chaussée en BAC est la même respectivement pour les plages de DJMA de 5 % à 9 % et de 13 % à 21 %. La dalle de béton armé continu varie de 16 à 20 cm d'épaisseur.

Tableau 2.9 Épaisseur des couches de la chaussée en EB

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EB (cm)	8	9	9	9	9	10
GB3 (cm)	13	18	18	18	20	20
GB3 (cm)	13	18	18	18	20	20

Tableau 2.10 Épaisseur des couches de la chaussée en BAC

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BAC (cm)	16	18	18	20	20	20
BC2 (cm)	18	18	18	20	20	20

2.8.2 Analyse comparative des chaussées en EB et en BAC à l'aide du logiciel HDM-4 v2.0

2.8.2.1 Taux de dégradation des chaussées en EB et en BAC sous l'effet du trafic

Les dégradations présentées dans cette section ainsi que leur évolution en fonction du trafic des poids lourds sont celles d'un trafic lourd faible correspondant au scénario de variation de 1 % et celles d'un trafic lourd élevé correspondant au scénario de variation de 21 %.

-Section 1 : Banco-Gesco

Les Figures 2.5 et 2.6 montrent le taux de dégradations de la chaussée par la mesure de l'IRI tout au long de la période d'analyse, respectivement pour le trafic faible et le trafic élevé.

Les deux options de chaussées ont une performance sensiblement identique en termes d'IRI sur les dix premières années dans le cas de trafic de poids lourds faible. Alors que la chaussée

en béton armé continu conserve le même IRI, celui de la chaussée en enrobé va varier de 3 à 4 m/km à la fin de la période d’analyse.

Dans le cas d’un trafic fort comme présenté à la Figure 2.6, l’IRI de la chaussée en enrobé bitumineux se détériore dès les trois premières années. Le niveau de l’IRI de l’option en enrobé bitumineux atteint un niveau de 6 m/km avant de redescendre à son niveau initial après un traitement en 2032 soit 15 ans après la mise en service de la chaussée. Le niveau de l’IRI pour l’option en béton armé continu ne change pas tout au long des 20 années d’analyse.

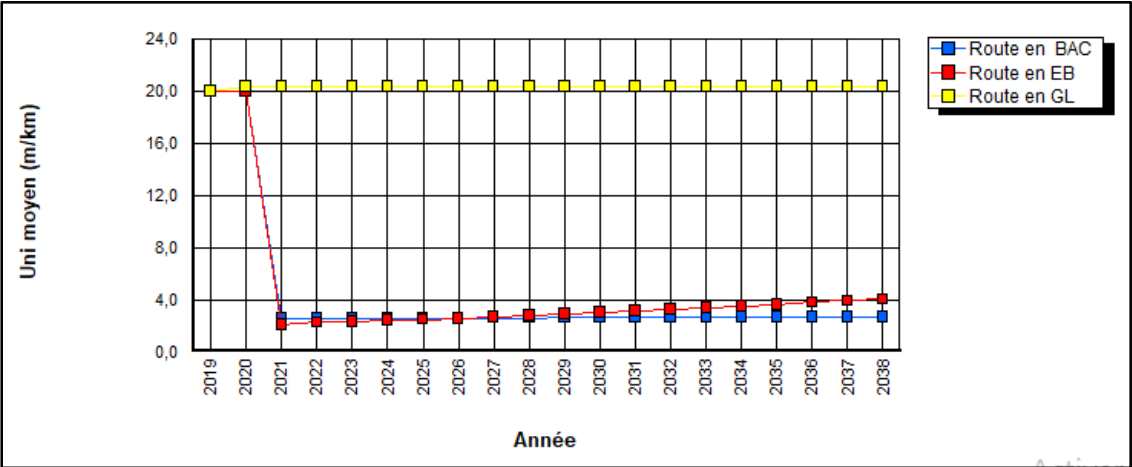


Figure 2.5 Évolution de l’IRI-Trafic lourd faible

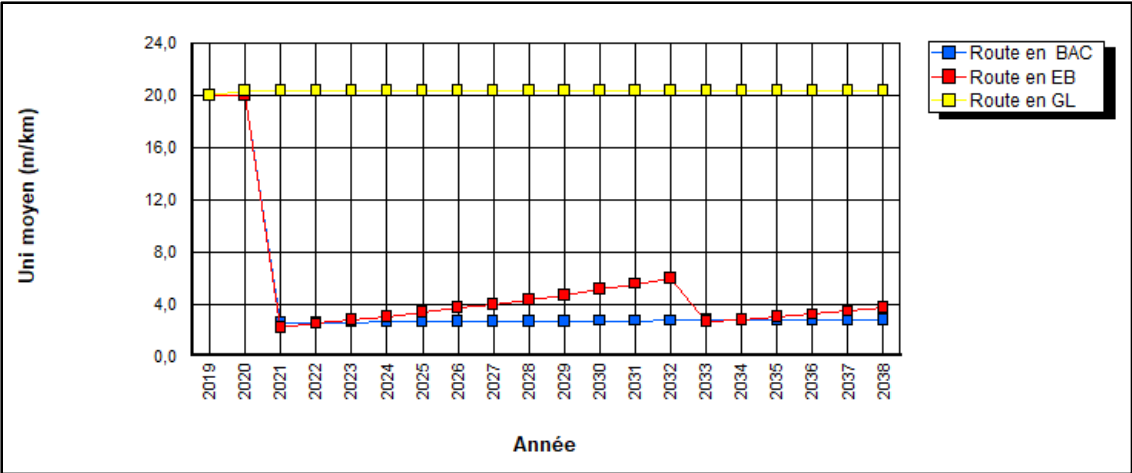


Figure 2.6 Évolution de l’IRI-Trafic lourd élevé

- Section 2 : Gesco-Attinguié

Dans le tronçon 2 et pour un trafic lourd faible tel qu'indiqué à la Figure 2.7 le fonctionnement des chaussées sera sensiblement identique sur près de douze (12) ans pour le trafic lourd faible. L'IRI de l'option en enrobé bitumineux va se dégrader pour atteindre la valeur de 4,0 m/km alors qu'il reste constant pour l'option en béton armé continu (Figure 2.7).

Dans le cas de trafic lourd fort comme présenté à la Figure 2.8, l'option en enrobé bitumineux reçoit un traitement seize (16) ans après sa mise en service pour ramener l'IRI à son état initial. Le comportement de la chaussée en béton armé continu reste constant. L'IRI ne varie pas sur toute la période d'analyse (Figure 2.8).

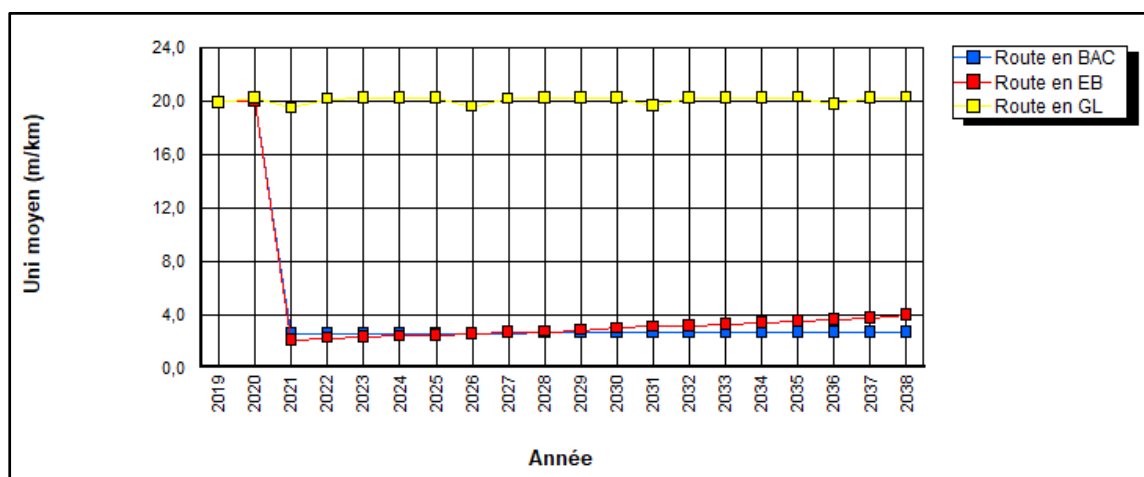


Figure 2.7 Évolution de l'IRI – Trafic lourd faible

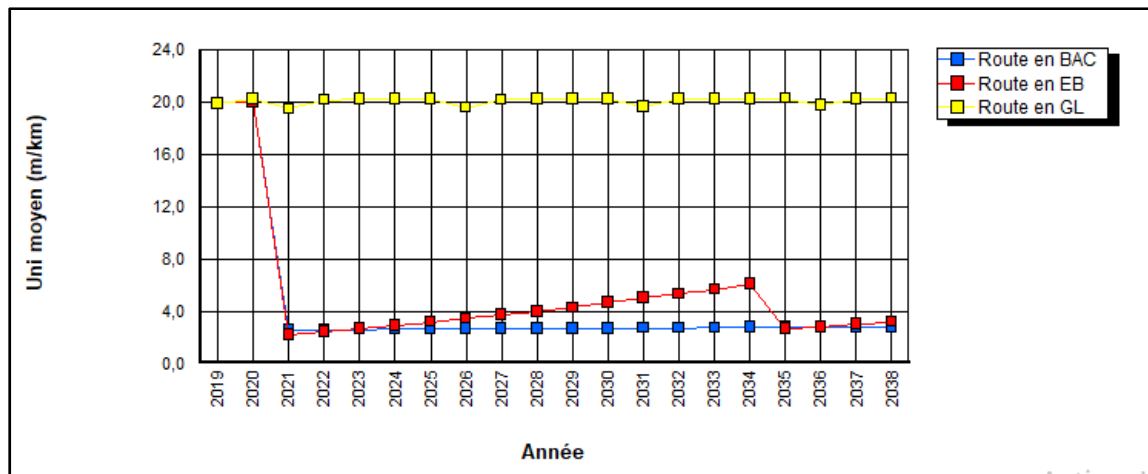


Figure 2.8 Évolution de l'IRI-Trafic lourd élevé

- Section3 : Attinguié-PK50

Les tendances observées et présentées pour un trafic lourd faible à la Figure 2.9 et pour un trafic lourd fort à la Figure 2.10, sont les mêmes que celles obtenues sur les deux premières sections.

Sur une première période de seize (16) ans, le fonctionnement est le même pour les deux options avant que l'IRI de l'option en enrobé bitumineux ne s'élève pour atteindre une valeur de 4,0 m/km.

Un traitement effectué à la seizième année remet l'IRI à son état initial pour le trafic lourd fort et pour la chaussée en enrobé bitumineux. Comme pour les tronçons précédents, l'IRI de l'option en béton armé continu ne change pas (Figure 2.10).

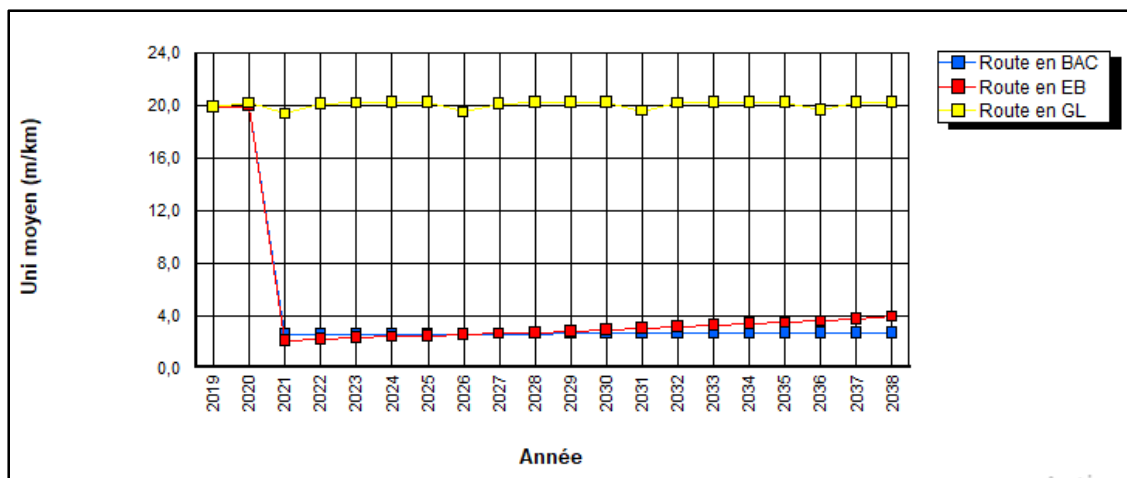


Figure 2.9 Évolution de l'IRI-Trafic lourd faible

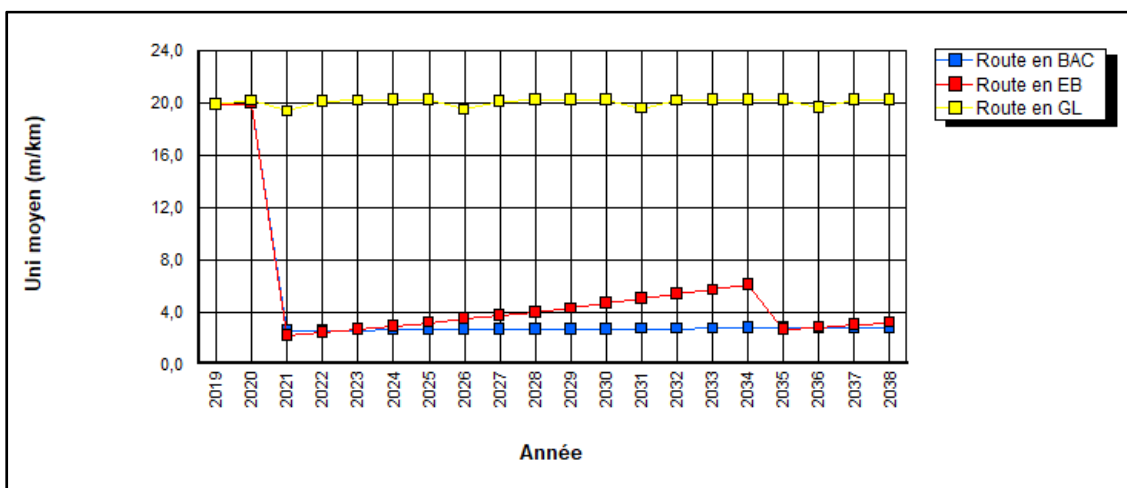


Figure 2.10 Évolution de l'IRI-Trafic lourd élevé

2.8.2.2 Coûts initiaux (CI)

-Section 1 : Banco-Gesco

Dans la section 1 dont le DJMA total est 70 000 véhicules / jours, la Figure 2.11 compare les coûts initiaux de construction pour chaque scénario de DJMA des poids lourds. Le coût initial de la chaussée en béton armé continu est supérieur à celui de la chaussée en enrobé bitumineux. Cet écart s'agrandit au fur et à mesure que le DJMA des poids lourds augmente et représente

une valeur moyenne de 20 %. L'écart entre les coûts initiaux est plus élevé si le DJMA des poids lourds est plus élevé et donc si la chaussée est fortement sollicitée.

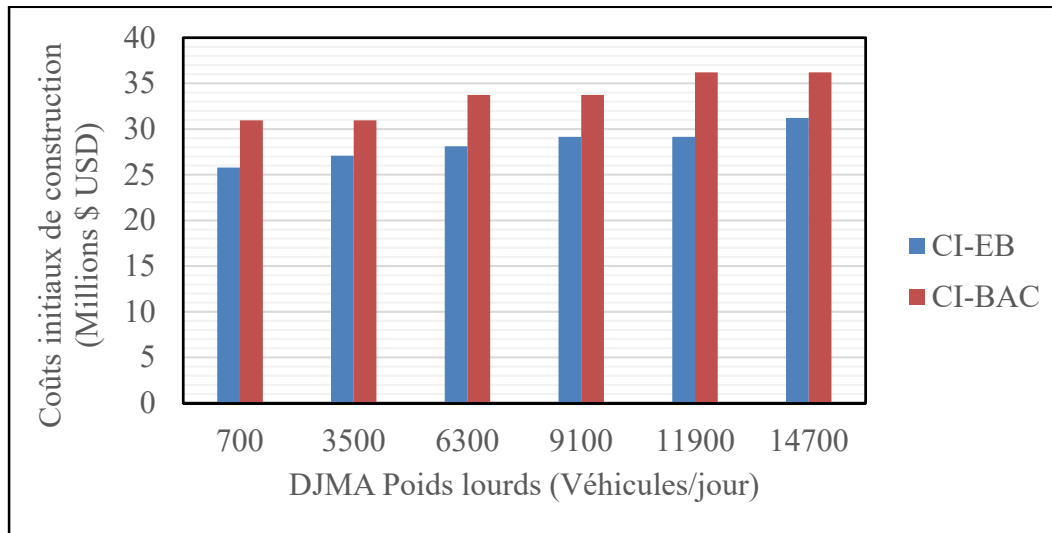


Figure 2.11 Coûts initiaux des chaussées

- Section 2 : Gesco-Attinguié

Le DJMA de cette section est inférieur à celui de la section 1 en passant de 70 000 à 53 375 véhicules / jour. Comme à la section précédente les coûts initiaux augmentent respectivement pour chaque option de chaussée avec la croissance du trafic des poids lourds. Le coût initial de la chaussée en BAC reste supérieur à celui de la chaussée en EB pour tous les niveaux de trafic envisagés. L'écart entre les deux coûts initiaux s'agrandit au fur et à mesure que le DJMA des poids lourds augmente et représente une valeur moyenne de 14 %. L'écart entre les coûts initiaux est plus élevé si le DJMA des poids lourds est plus élevé et donc si la chaussée est fortement sollicitée. Les résultats sont présentés à la Figure 2.12. Toutefois l'écart moyen est réduit si le DJMA diminue en comparaison avec la section 1.

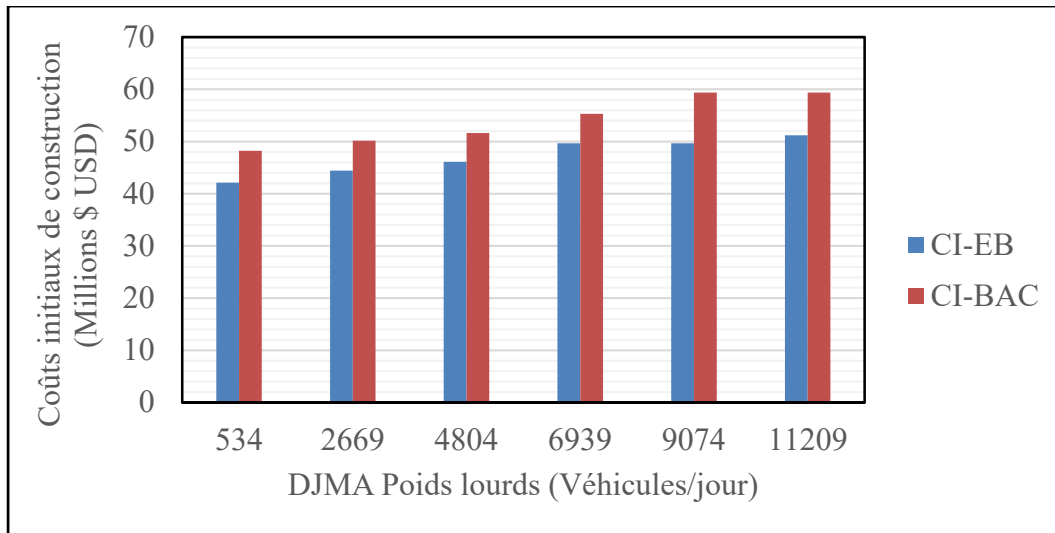


Figure 2.12 Coûts initiaux des chaussées

- Section 3 : Attinguié-PK50

En passant de la section 2 à la section 3, le DJMA connaît une baisse et est de 43750 véhicules / jour. Comme à la section précédente les coûts initiaux augmentent respectivement pour chaque option de chaussée avec la croissance du trafic des poids lourds. Le coût initial de la chaussée en BAC reste supérieur à celui de la chaussée en EB pour tous les niveaux de trafic envisagés. L'écart entre les deux coûts initiaux s'agrandit au fur et à mesure que le DJMA des poids lourds augmente et représente une valeur moyenne de 10 %. L'écart entre les coûts initiaux est plus élevé si le DJMA des poids lourds est plus élevé et donc si la chaussée est fortement sollicitée. Les résultats présentés à la Figure 2.13 gardent la même tendance que ceux de la section 2. Dans cette section aussi, l'écart est réduit si le DJMA diminue en comparaison avec les deux premières sections.

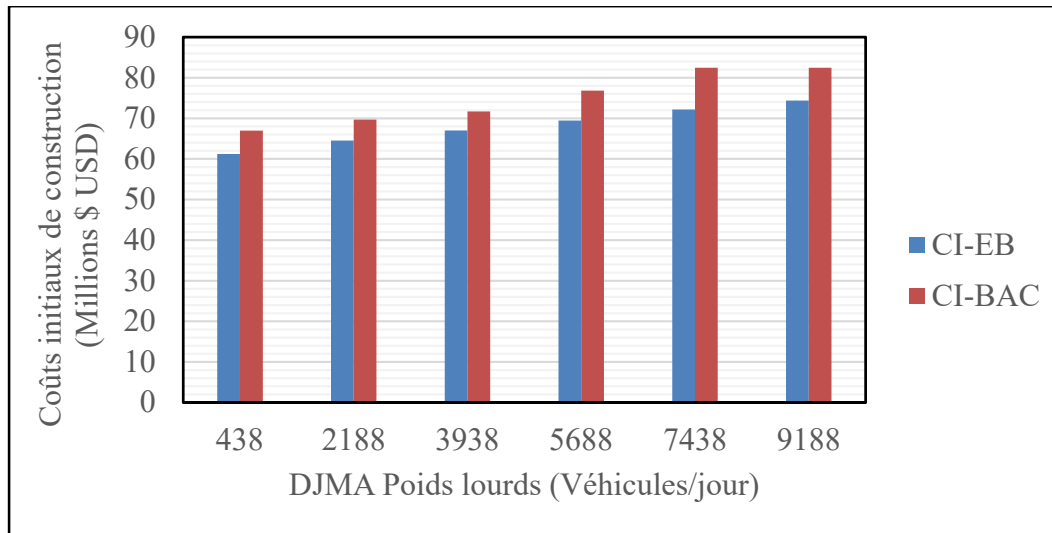


Figure 2.13 Coûts initiaux des chaussées

2.8.2.3 Coûts d'entretien (CE)

-Section 1 : Banco-Gesco

Les coûts d'entretien des deux options de chaussée sur le cycle de vie sont représentés à la Figure 2.14. Ils se composent des coûts de l'entretien périodique et de l'entretien courant. On constate que les coûts d'entretien croissent avec le DJMA des poids lourds pour la chaussée en enrobé bitumineux alors qu'ils restent quasiment constants pour la chaussée en béton armé continu.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 % les coûts d'entretien augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 110 % et 17 %.

Si l'on compare les coûts totaux d'entretien des deux options de chaussée sur le cycle de vie, l'écart entre ces coûts varie de 500 à 1000 % environ, lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds.

Sur le cycle de vie, la chaussée en enrobé bitumineux génère des coûts d'entretien plus élevés que ceux de la chaussée en béton armé continu.

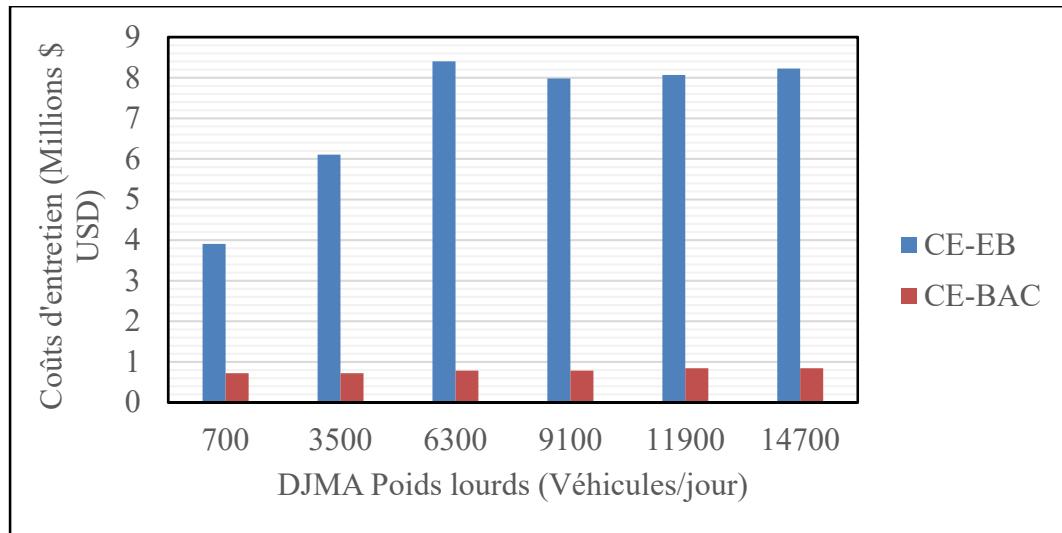


Figure 2.14 Coûts d'entretien

- Section 2 : Gesco-Attinguié

Dans cette section également, les coûts d'entretien de la chaussée en enrobé bitumineux augmentent avec l'accroissement du trafic des poids lourds alors qu'ils restent quasiment constants pour la chaussée en béton armé continu, tel que représentés à la Figure 2.15.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 % les coûts d'entretien augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 180 % et 10 %.

Si l'on compare les coûts totaux d'entretien des deux options de chaussée sur le cycle de vie, l'écart entre ces coûts varie de 130 à 300 % environ, lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds.

Sur le cycle de vie, la chaussée en enrobé bitumineux génère des coûts d'entretien plus élevés que ceux de la chaussée en béton armé continu.

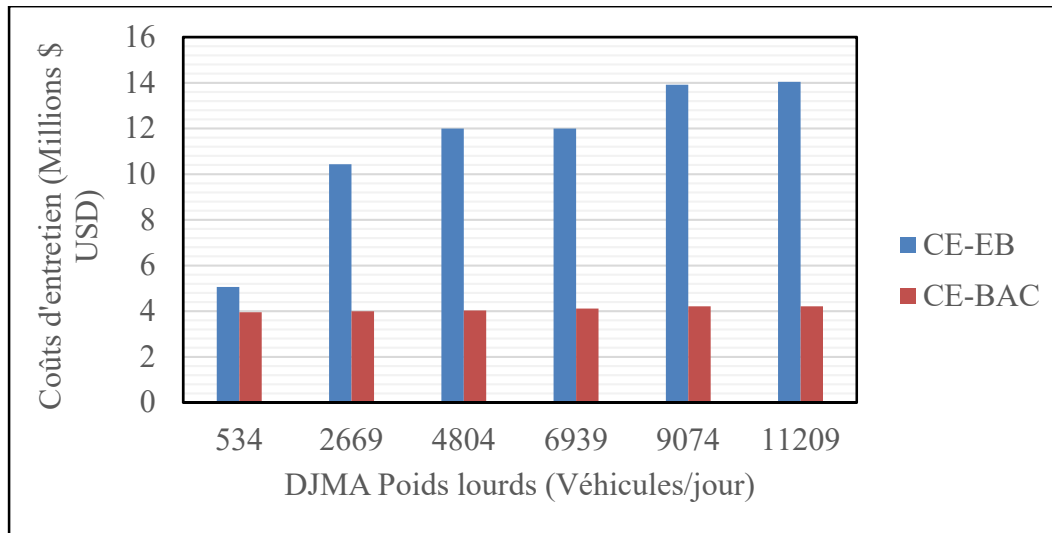


Figure 2.15 Coûts d'entretien

- Section 3 : Attinguié-PK50

La Figure 2.16 donne la même tendance pour les résultats dans cette troisième section. Les coûts d'entretien de la chaussée en enrobé bitumineux augmentent avec l'accroissement du trafic des poids lourds alors qu'ils restent quasiment constants pour la chaussée en béton armé continu.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 % les coûts d'entretien augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 180 % et 10 %.

Si l'on compare les coûts totaux d'entretien des deux options de chaussée sur le cycle de vie, l'écart entre ces coûts varie de 150 à 300 % environ, lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds.

Sur le cycle de vie, la chaussée en enrobé bitumineux génère des coûts d'entretien plus élevés que ceux de la chaussée en béton armé continu.

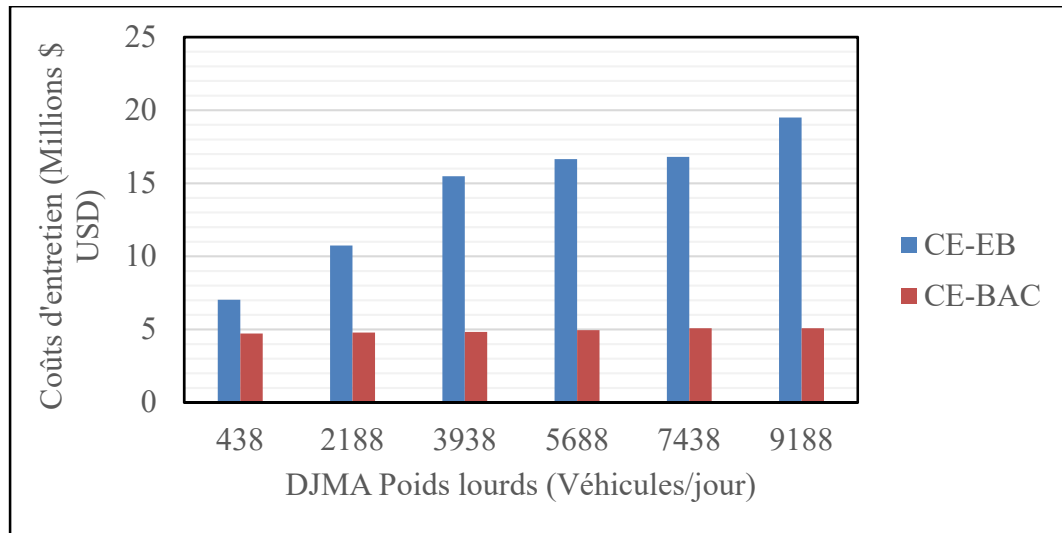


Figure 2.16 Coûts d'entretien

2.8.2.4 Coûts à l'administration (CA)

-Section 1 : Banco-Gesco

Les coûts à l'administration sont composés des coûts initiaux de construction et des coûts d'entretien sur le cycle de vie. Tel que présenté à la Figure 2.17, les coûts à l'administration croissent avec le niveau de trafic des poids lourds aussi bien pour la chaussée en enrobé bitumineux que pour la chaussée en béton armé continu. Pour les différents niveaux de variation du trafic, les coûts à l'administration de la chaussée en EB sont supérieurs à ceux de la chaussée en BAC.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 % les coûts à l'administration augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 33 % et 17 %.

Si l'on compare les coûts à l'administration des deux options de chaussée sur le cycle de vie, ceux de l'option BAC baissent d'environ 15 % en moyenne par rapport à ceux de l'option EB, lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds.

Sur le cycle de vie, les coûts à l'administration de la chaussée en enrobé bitumineux sont plus élevés que ceux de la chaussée en béton armé continu.

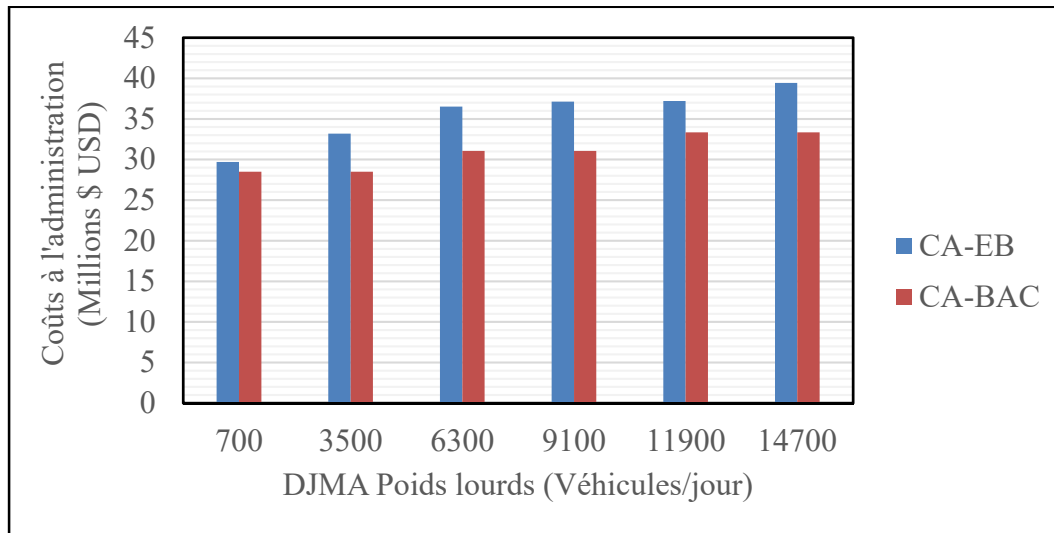


Figure 2.17 Coûts à l'administration de la section 1

- Section 2 : Gesco-Attinguié

Dans cette section, tel que présenté à la Figure 2.18, les coûts à l'administration sont quasiment équivalents pour le niveau de trafic des poids lourds de 1 %. Ils augmentent ensuite lorsque la variation du trafic des poids lourds passe de 5 % à 21 %. Dans cet intervalle, les coûts de l'option en enrobé bitumineux restent supérieurs à ceux de l'option en béton armé continu.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 % les coûts à l'administration augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 38 % et 22 %.

Si l'on compare les coûts à l'administration des deux options de chaussée sur le cycle de vie, ceux de l'option BAC baissent d'environ 12 % en moyenne par rapport à ceux de l'option EB, lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds.

Sur le cycle de vie, les coûts à l'administration de la chaussée en enrobé bitumineux sont plus élevés que ceux de la chaussée en béton armé continu.

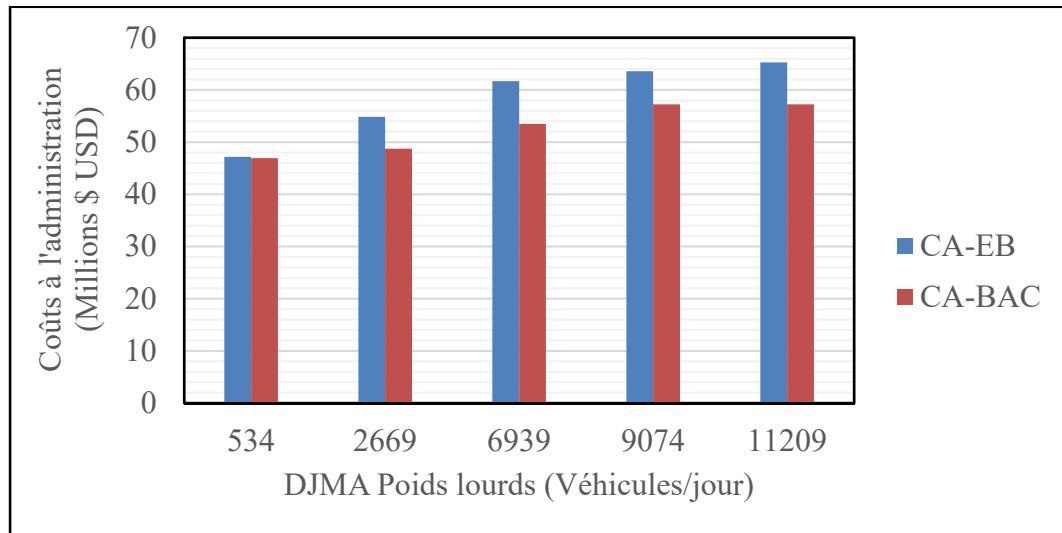


Figure 2.18 Coûts à l'administration de la section 2

- Section 3 : Attinguié-PK50

Tel que présenté par le graphique de la Figure 2.19, les coûts à l'administration croissent avec le niveau de trafic des poids lourds aussi bien pour la chaussée en enrobé bitumineux que pour la chaussée en béton armé continu. Pour les différents niveaux de variation du trafic, les coûts à l'administration de la chaussée en EB sont supérieurs à ceux de la chaussée en BAC.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 % les coûts à l'administration augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 36 % et 22 %.

Si l'on compare les coûts à l'administration des deux options de chaussée sur le cycle de vie, ceux de l'option BAC baissent d'environ 11 % en moyenne par rapport à ceux de l'option EB, lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds.

Sur le cycle de vie, les coûts à l'administration de la chaussée en enrobé bitumineux sont plus élevés que ceux de la chaussée en béton armé continu.

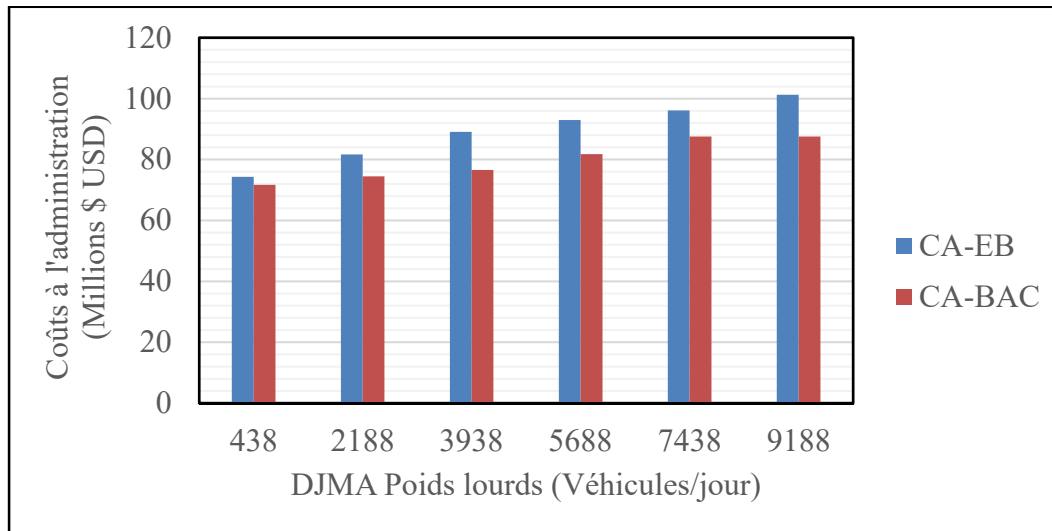


Figure 2.19 Coûts à l'administration de la section 3

2.8.2.5 Coûts aux usagers (CU)

-Section 1 : Banco-Gesco

Les coûts aux usagers (CU) représentent la somme des coûts liés à l'exploitation des véhicules (VOC), les délais et les accidents de la route. Ainsi, tel que présenté à la Figure 2.20 les coûts aux usagers augmentent avec la croissance du DJMA des poids lourds pour les deux options de chaussée. Pour les différents niveaux de variation du trafic, la chaussée en enrobé bitumineux totalise des coûts aux usagers supérieurs à ceux de la chaussée en béton armé continu.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 % les coûts aux usagers augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 51 % et 49 %.

Si l'on compare les coûts aux usagers des deux options de chaussée sur le cycle de vie, ceux de l'option BAC baissent d'environ 30 % en moyenne par rapport à ceux de l'option EB,

lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds.

Sur le cycle de vie, les coûts aux usagers de la chaussée en enrobé bitumineux sont plus élevés que ceux de la chaussée en béton armé continu.

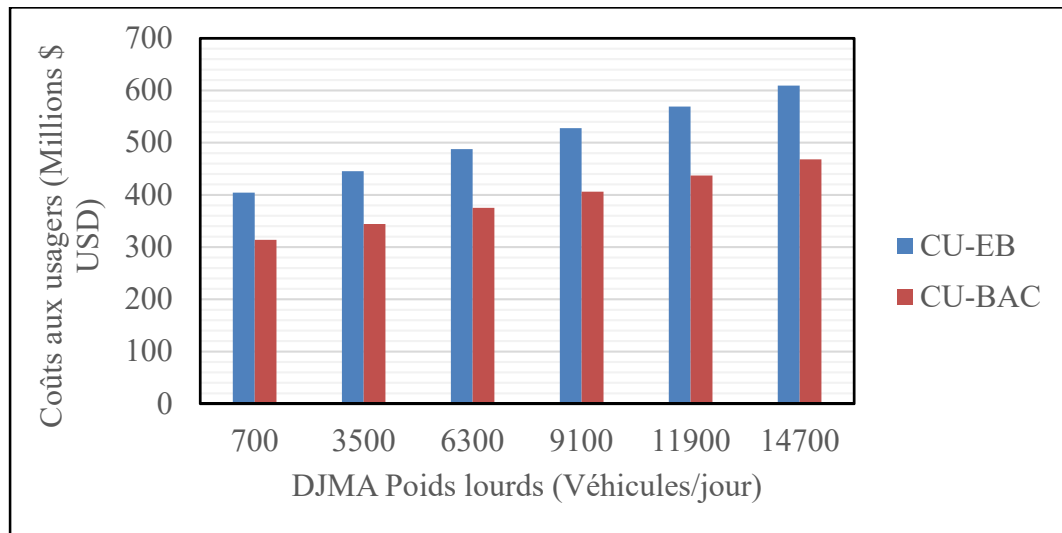


Figure 2.20 Coûts aux usagers de la section 1

- Section 2 : Gesco-Attinguié

Dans cette section, tel que présenté à la Figure 2.21 les coûts aux usagers augmentent également avec la croissance du DJMA des poids lourds pour les deux options de chaussée. Pour les différents niveaux de variation du trafic, la chaussée en enrobé bitumineux totalise des coûts aux usagers supérieurs à ceux de la chaussée en béton armé continu.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 % les coûts aux usagers augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 50 % et 47 %.

Si l'on compare les coûts aux usagers des deux options de chaussée sur le cycle de vie, ceux de l'option BAC baissent d'environ 22 % en moyenne par rapport à ceux de l'option EB,

lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds.

Sur le cycle de vie, les coûts aux usagers de la chaussée en enrobé bitumineux sont plus élevés que ceux de la chaussée en béton armé continu.

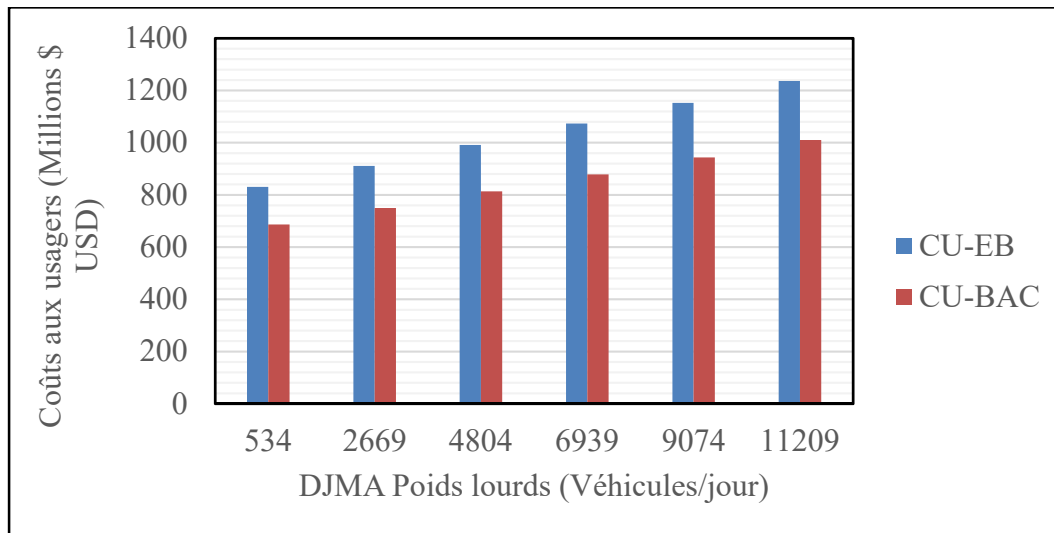


Figure 2.21 Coûts aux usagers de la section 2

- Section 3 : Attinguié-PK50

Dans la section 3, tel que présenté à la Figure 2.22, on obtient la même tendance observée aux sections 1 et 2. Pour les différents niveaux de variation du trafic, la chaussée en enrobé bitumineux totalise des coûts aux usagers supérieurs à ceux de la chaussée en béton armé continu.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 % les coûts aux usagers augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 58 % et 56 %.

Si l'on compare les coûts aux usagers des deux options de chaussée sur le cycle de vie, ceux de l'option BAC baissent d'environ 22 % en moyenne par rapport à ceux de l'option EB,

lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds.

Sur le cycle de vie, les coûts aux usagers de la chaussée en enrobé bitumineux sont plus élevés que ceux de la chaussée en béton armé continu.

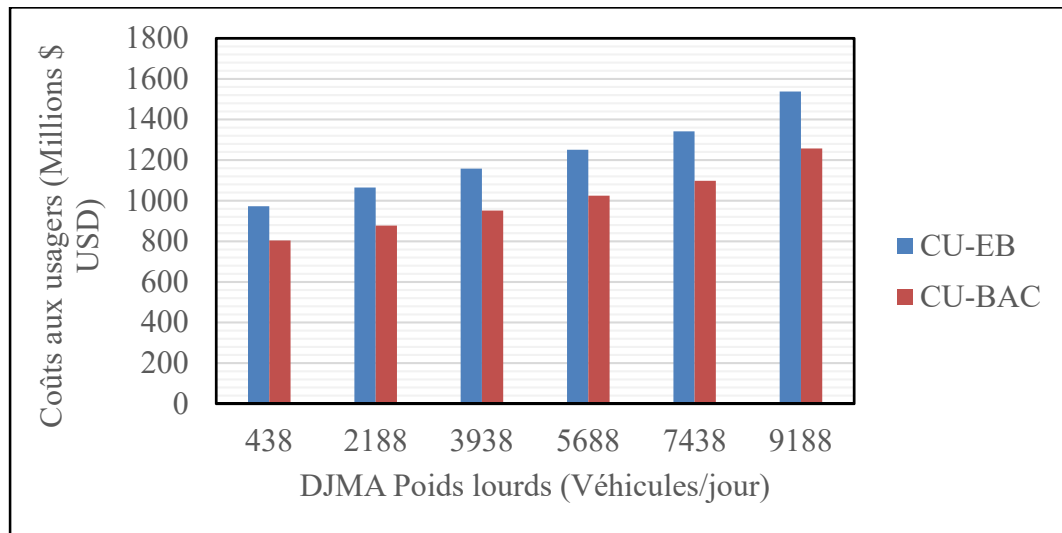


Figure 2.22 Coûts aux usagers de la section 3

2.8.2.6 Valeur actuelle nette (VAN)

-Section 1 : Banco-Gesco

Tel que présenté à la Figure 2.23, la valeur actuelle nette (VAN) de chaque option de chaussée croît avec le DJMA des poids lourds. La valeur actuelle nette de l'option en béton armé continu reste supérieure à celle de l'option en enrobé bitumineux dans les six scénarios de trafic des poids lourds. On observe une corrélation entre le DJMA et la valeur actuelle nette.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %, la valeur actuelle nette augmente respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 71 % et 76 %. L'écart entre

les valeurs actuelles nettes des deux options de chaussée varie de 1 à 10 % environ quand le DJMA des poids lourds varie de 1% à 21 %.

La chaussée en BAC ayant la plus grande valeur nette est la plus viable comparée à la chaussée en EB.

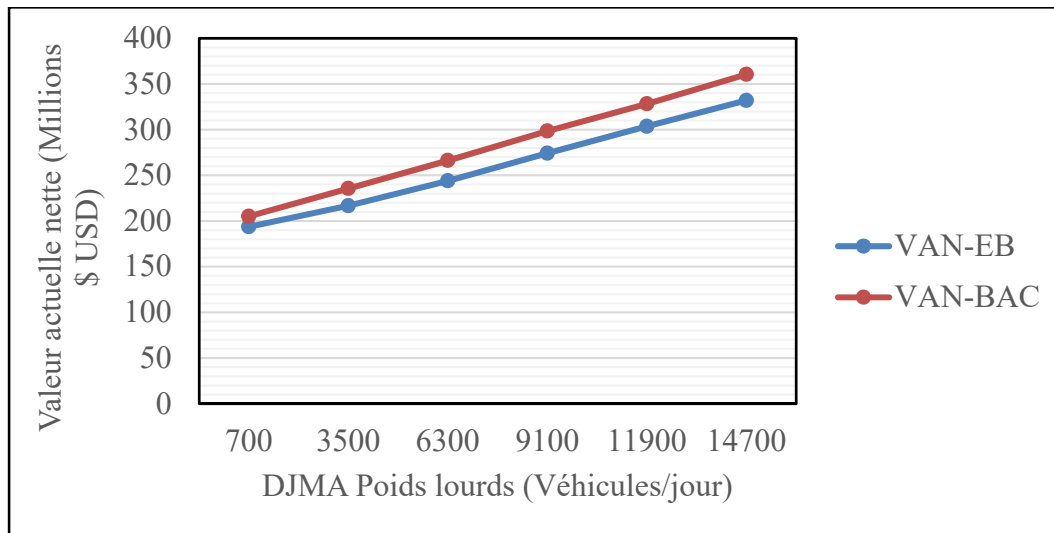


Figure 2.23 Valeurs actuelles nettes

- Section 2 : Gesco-Attinguié

Dans la section 2, les résultats représentés à la Figure 2.24 vont dans le même sens que ceux obtenus à la section 1. La valeur actuelle nette de l'option en béton armé continu reste supérieure à celle de l'option en enrobé bitumineux dans les six scénarios de trafic des poids lourds.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %, la valeur actuelle nette augmente respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 66 % et 69 %. L'écart entre les valeurs actuelles nettes des deux options de chaussée varie de 1 à 10 % environ quand le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %.

La chaussée en BAC ayant la plus grande valeur nette est la plus viable comparée à la chaussée en EB.

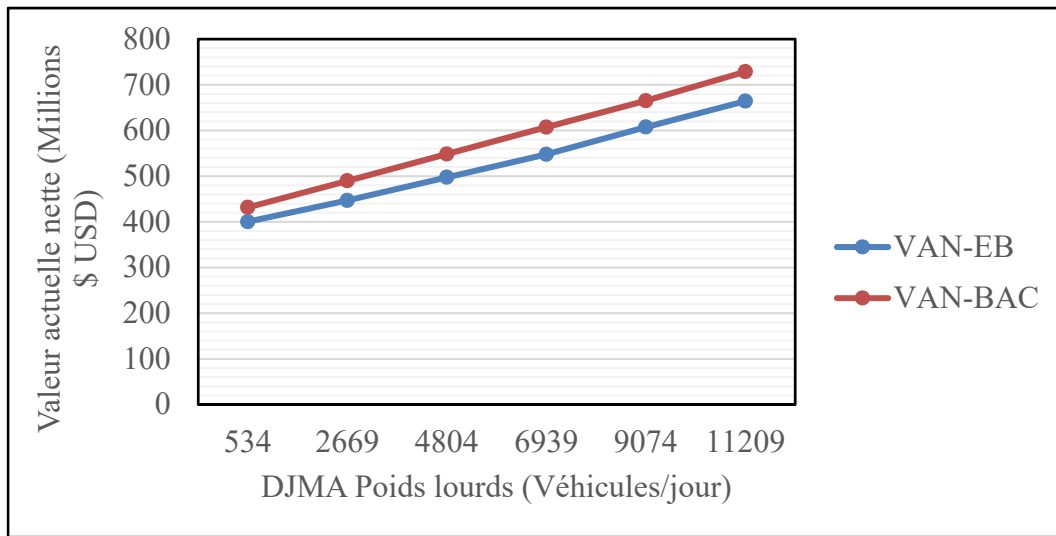


Figure 2.24 Valeurs actuelles nettes

- Section 3 : Attinguié-PK50

Dans la section 3, tels que représentés à la Figure 2.25 les résultats gardent la même tendance obtenue aux sections 1 et 2. La valeur actuelle nette de l'option en béton armé continu reste supérieure à celle de l'option en enrobé bitumineux dans les six scénarios de trafic des poids lourds.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %, la valeur actuelle nette augmente respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 80 % et 82 %. L'écart entre les valeurs actuelles nettes des deux options de chaussée varie de 1 à 10 % environ quand le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %.

La chaussée en BAC ayant la plus grande valeur nette est donc la plus viable comparée à la chaussée en EB.

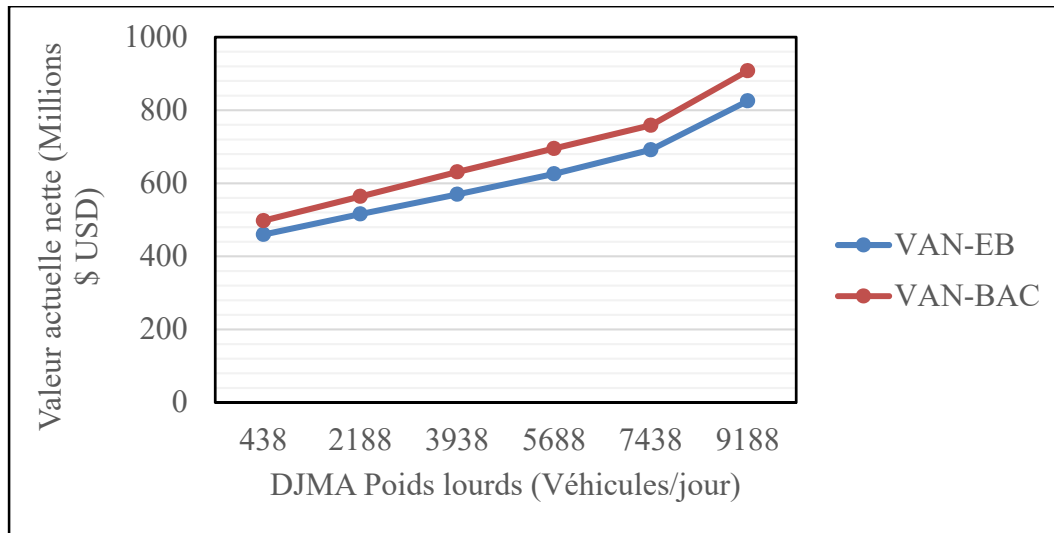


Figure 2.25 Valeurs actuelles nettes

2.8.2.7 Taux de rendement interne (TRI)

-Section 1 : Banco-Gesco

Le taux de rendement interne des deux options de chaussée est représenté à la Figure 2.26. Ce taux de rendement pour chaque option de chaussée est supérieur à zéro (0) d'une part et supérieur d'autre part au taux d'actualisation considéré de 12 %.

Le Taux de rendement interne de la chaussée en béton armé continu est supérieur à celui de la chaussée en enrobé bitumineux dans les six scénarios de trafic des poids lourds.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le taux de rendement interne augmente respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 28 % et 25 %. L'écart moyen entre les taux de rendement interne des deux options de chaussée est d'environ 10 % quand le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %.

Ces résultats indiquent que les deux options de chaussée sont viables. Mais l'avantage est à la chaussée en béton armé continu car son TRI reste supérieur à celui de la chaussée en enrobé bitumineux.

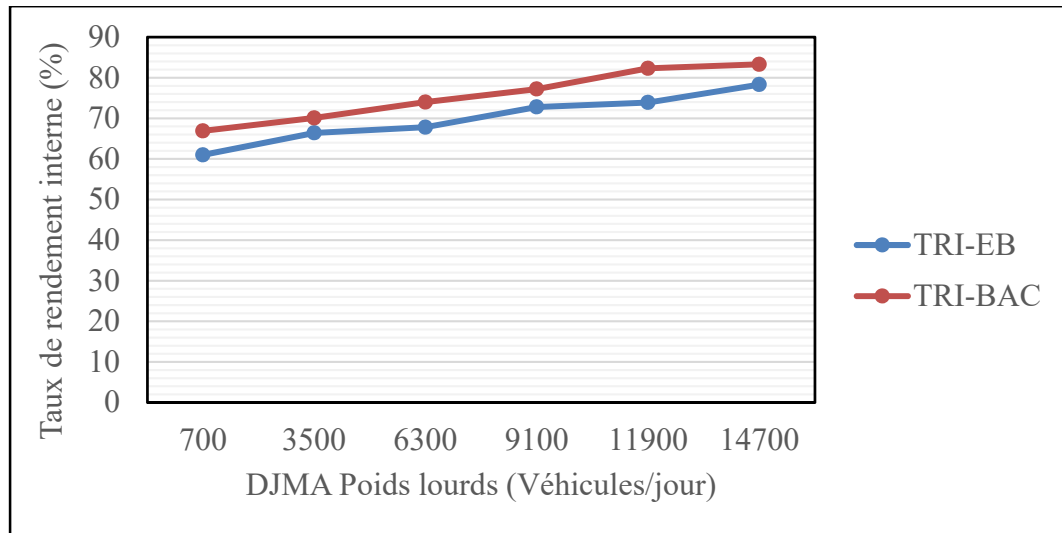


Figure 2.26 Taux de rendement internes dans la section 1

- Section 2 : Gesco-Attinguié

Dans cette section également le graphique de la Figure 2.27 présente la variation du taux de rendement interne (TRI) en fonction du DJMA et pour chaque type de chaussée. Le TRI de l'option en béton armé continu est supérieur à celui de l'option en enrobé bitumineux dans les six scénarios de trafic des poids lourds.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le taux de rendement interne augmente respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 20 % et 20 %. L'écart moyen entre les taux de rendement interne des deux options de chaussée est d'environ 5 % quand le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %.

Ces résultats indiquent également que les deux options de chaussée sont viables. Mais l'avantage est à la chaussée en béton armé continu car son TRI reste supérieur à celui de la chaussée en enrobé bitumineux.

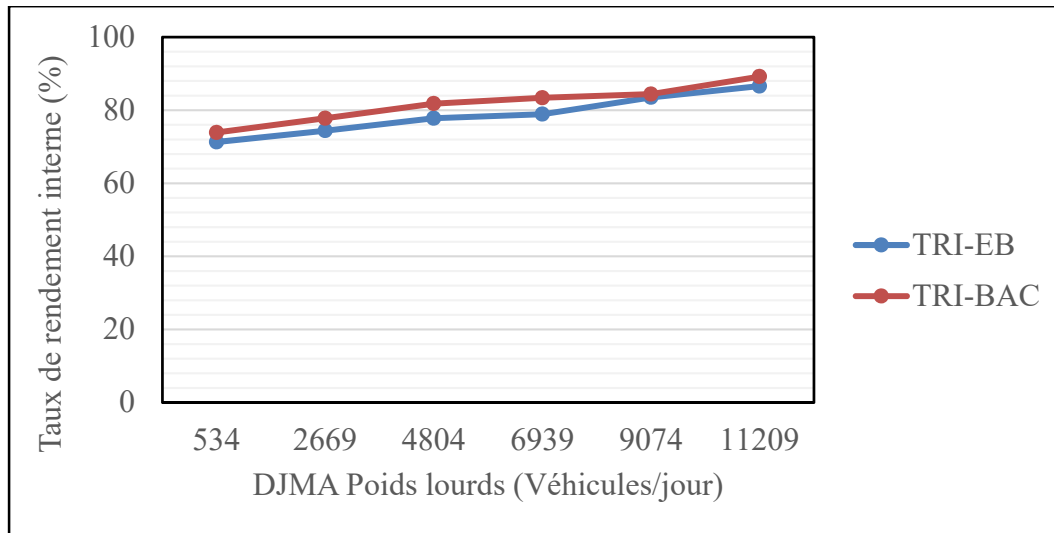


Figure 2.27 Taux de rendement internes dans la section 2

- Section 3 : Attinguié-PK50

Dans cette section également le graphique de la Figure 2.28 présente la variation du taux de rendement interne (TRI) en fonction du DJMA et pour chaque type de chaussée. Le TRI de l'option en béton armé continu est supérieur à celui de l'option en enrobé bitumineux dans les six scénarios de trafic des poids lourds.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le taux de rendement interne augmente respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 27 % et 26 %. L'écart moyen entre les taux de rendement interne des deux options de chaussée est d'environ 3 % quand le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %.

Ces résultats indiquent également que les deux options de chaussée sont viables. Mais l'avantage est à la chaussée en béton armé continu car son TRI reste supérieur à celui de la chaussée en enrobé bitumineux.

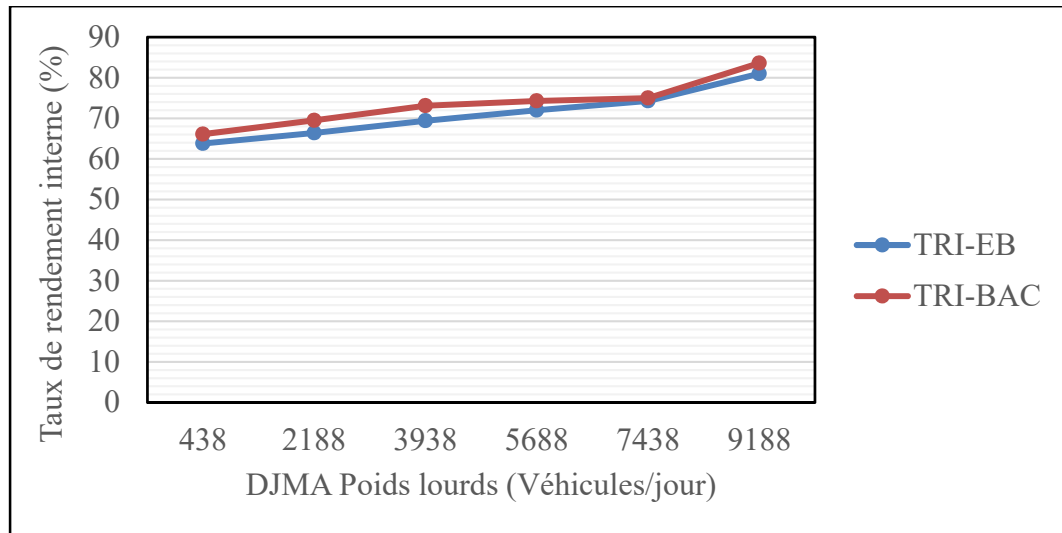


Figure 2.28 Taux de rendement internes dans la section 3

2.8.2.8 Coûts globaux du cycle de vie (CT)

-Section 1 : Banco-Gesco

Les coûts globaux sont les coûts totaux (CT) du cycle de vie et ils comprennent les coûts à l'administration et les coûts aux usagers.

Tel que représenté à la Figure 2.29, les coûts totaux (CT) augmentent avec la croissance du DJMA des poids lourds pour les deux options de chaussée. Pour les différents niveaux de variation du trafic, les coûts totaux de la chaussée en enrobé bitumineux sont supérieurs à ceux de la chaussée en béton armé continu.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %, les coûts totaux augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 50 % et 46 %.

Sur le cycle de vie, l'écart entre les coûts totaux des deux options de chaussée varie de 27 à 30 % environ lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds. L'écart moyen observé est de 28 %.

Ainsi, au terme du cycle de vie de 20 ans, les coûts totaux de la chaussée en béton armé continu baissent d'environ 28 % par rapport à ceux de la chaussée en enrobé bitumineux.

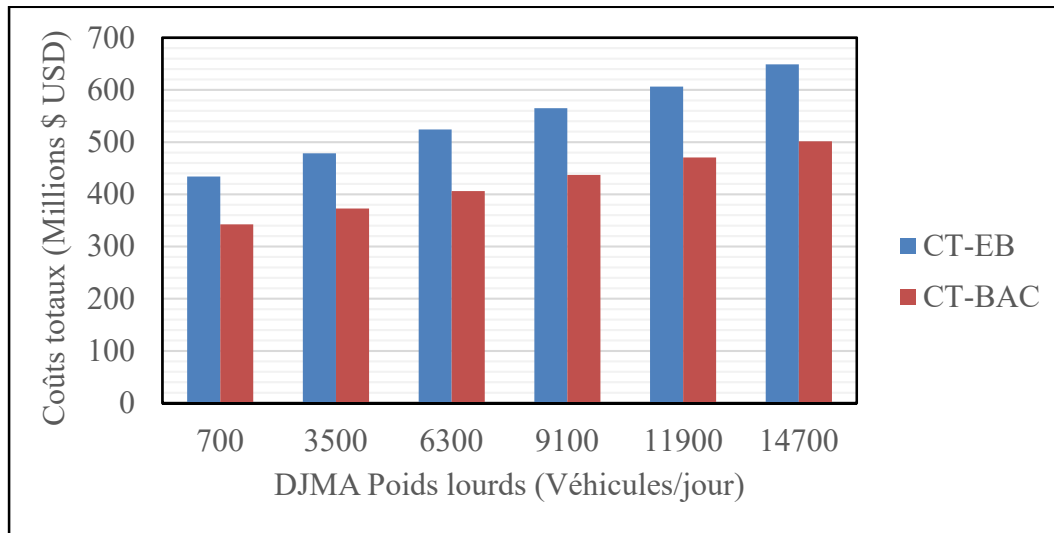


Figure 2.29 Coûts totaux du cycle de vie de la section 1

- Section 2 : Gesco-Attinguié

Dans cette section, tel que représenté à la Figure 2.30, les coûts totaux (CT) augmentent avec la croissance du DJMA des poids lourds pour les deux options de chaussée. Pour les différents niveaux de variation du trafic, les coûts totaux de la chaussée en enrobé bitumineux sont supérieurs à ceux de la chaussée en béton armé continu.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %, les coûts totaux augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 46 %.

Sur le cycle de vie, l'écart entre les coûts totaux des deux options de chaussée varie de 20 à 22 % environ lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds. L'écart moyen observé est de 21 %.

Ainsi, au terme du cycle de vie de 20 ans, les coûts totaux de la chaussée en béton armé continu baissent d'environ 21 % par rapport à ceux de la chaussée en enrobé bitumineux.

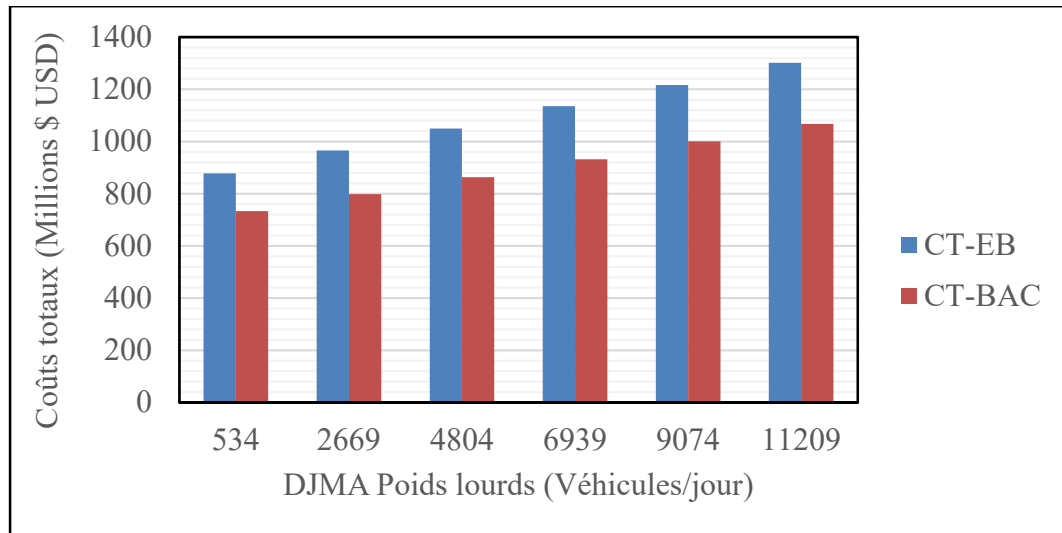


Figure 2.30 Coûts totaux du cycle de vie de la section 2

- Section 3 : Attinguié-PK50

Dans cette section, tel que représenté à la Figure 2.31, les coûts totaux (CT) augmentent également avec la croissance du DJMA des poids lourds pour les deux options de chaussée. Pour les différents niveaux de variation du trafic, les coûts totaux de la chaussée en enrobé bitumineux sont supérieurs à ceux de la chaussée en béton armé continu.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie de 1 % à 21 %, les coûts totaux augmentent respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 57 % et 54 %.

Sur le cycle de vie, l'écart entre les coûts totaux des deux options de chaussée varie de 20 à 22 % environ lorsqu'on passe d'un trafic lourd faible à un trafic lourd élevé soit de 1 % à 21 % d'augmentation du trafic des poids lourds. L'écart moyen observé est de 21 %.

Ainsi, au terme du cycle de vie de 20 ans, les coûts totaux de la chaussée en béton armé continu baissent d'environ 21 % par rapport à ceux de la chaussée en enrobé bitumineux.

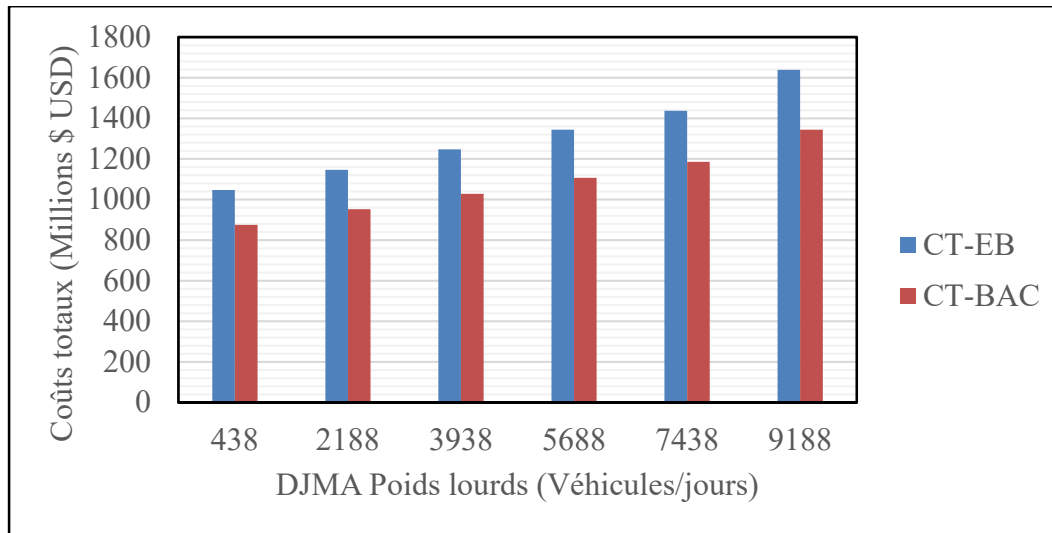


Figure 2.31 Coûts totaux du cycle de vie de la section 3

2.9 Discussions

2.9.1 Dimensionnement des chaussées

La structure de chaussée ne change pas à chaque accroissement du DJMA des poids lourds. L'augmentation de trafic doit atteindre un seuil caractérisé par le niveau du trafic pour nécessiter le changement des épaisseurs des couches des structures. Ainsi, on observe que les épaisseurs sont les mêmes dans des plages d'augmentation du trafic des poids lourds. Cette conclusion est en accord avec les résultats de l'étude de Asta Guciute (2011), comparant les chaussées en enrobé bitumineux à celles réalisées en béton armé continu en Islande (Asta Guciute, 2011).

La chaussée en béton comporte une épaisseur de dalle comprise dans les limites autorisées par le catalogue des chaussées utilisé pour la conception des chaussées neuves en enrobé bitumineux ou en béton armé continu, en France (Sétra-Lcpc, 1998). Cette conception est toutefois conservatrice. La dalle de béton peut être posée directement sur le sol d'infrastructure (Haseeb, 2017). Ainsi en évitant de mettre une dalle en béton maigre comme couche de base le coût initial de la structure diminuerait avec l'économie de la couche de base.

On observe que les structures sont influencées par le DJMA des poids lourds. Les épaisseurs de la structure augmentent dans le même sens que le DJMA des poids lourds. La couche de base n'est pas disposée pour des raisons structurales mais plutôt pour des raisons de fonctionnement permettant de réduire les affouillements et les effets de pompage (Assaf, 2018; R. Haas et al., 1994).

La plateforme de la chaussée de classe PF2 respecte les prescriptions du catalogue des chaussées de 1998. Les résultats d'observation du comportement des chaussées ont montré une forte relation entre le niveau de qualité de la plate-forme support de chaussée et le bon comportement des chaussées. Ces résultats conduisent d'une part à ne plus retenir la réalisation de plates-formes de classe PF1, dont le niveau de portance à long terme est trop faible pour garantir une bonne tenue des chaussées (Sétra-Lcpc, 1998).

Tenant compte du niveau de trafic de poids lourds relativement plus élevé dans le tronçon 1 puis décroissant dans les tronçons 2 et 3, il a été observé que la chaussée en béton armé continu, comparée à la chaussée en enrobé bitumineux, se comporte bien en conservant un IRI identique sur la période d'analyse de 20 ans et sur l'ensemble des trois sections.

2.9.2 Analyse comparative des deux options de chaussées

a) Taux de dégradations des chaussées en fonction du trafic des poids lourds

Pour la chaussée en enrobé bitumineux, que le trafic soit faible ou élevé, l'IRI se dégrade et donc la chaussée se détériore dès les cinq (5) premières années de service. Lorsque le trafic est élevé, un traitement devra toujours être fait pour ramener le niveau de l'IRI à un niveau acceptable. Au cours du cycle de vie, une chaussée typique peut avoir un IRI compris entre moins de 1 m / km et plus de 4 m / km, ce qui laisse supposer que la rugosité pourrait avoir un effet significatif sur la consommation de carburant (Santero, Masanet, & Horvath, 2011a).

Cette comparaison indique que la chaussée en enrobé bitumineux nécessite des travaux d'entretien pour ramener l'IRI à un niveau acceptable tout au long du cycle de vie alors que la chaussée en béton armé continu n'en a pas besoin.

b) Coût initial (CI)

Le coût initial de la chaussée en béton armé continu est supérieur à celui de la chaussée en enrobé bitumineux dans les trois sections étudiées. L'écart entre les coûts initiaux est de 20 % pour la section 1 avec un DJMA total de 70000 véhicules / jour. Il est respectivement de 14 % et 10 % pour la section 2 avec un DJMA total de 53375 véhicules / jour et la section 3 avec un DJMA total de 43750 véhicules / jour. À l'intérieur de chaque section, cet écart s'accroît avec l'augmentation du trafic des poids lourds si l'on passe d'un trafic lourd faible (1 %) à un trafic lourd élevé (21 %). D'une section à une autre lorsque le DJMA total augmente, l'écart augmente également. Le coût initial de la chaussée en BAC est plus élevé de l'ordre de 10 à 20 % que celui de la chaussée en EB. Une étude de cas réalisée par Kamal et al., indique un coût supplémentaire de 20 % par rapport à une conception de type chaussée perpétuelle (Kamal, Hafeez, & Khan, N.D.). Aux Etats-Unis, différentes études comparatives ont été effectuées par plusieurs auteurs. En particulier l'étude de CTL/Thompson (2002) dans le Colorado, indique que le coût initial de l'option béton est de 14 % plus cher, celle de Cross et Parsons (2002) dans le Kansas précise que la chaussée en béton est de 22 % plus chère et l'étude de Gibboney (1995) dans l'Ohio indique que les coûts de construction avec le béton peuvent aller jusqu'à 20 % plus chers que ceux de la chaussée en enrobé bitumineux.

Toutefois les coûts initiaux sont influencés par divers paramètres. Il y a notamment les matières premières entrant dans la confection des revêtements. Les prix du pétrole qui influencent le coût du bitume et donc de l'enrobé bitumineux et ceux du ciment qui influencent à leur tour le coût du béton armé continu sont donc deux paramètres à considérer selon le pays où sera réalisé la chaussée. Ces paramètres peuvent avantager l'une ou l'autre des deux options de chaussées (Ukar, Akakin, & Engin, 2007). En Afrique, les coûts sont largement influencés par des réalités telles que la corruption, les conflits et l'instabilité politique (Collier, Kirchberger, & Söderbom, 2013). En outre la Banque Mondiale indique que les estimations des coûts de la collusion et

des cartels dans le secteur routier sont importantes et varient entre 8 % et 60 % (Bank, 2011). Les coûts initiaux sont ainsi le plus souvent déterminés dans cet environnement.

c) Coûts d'entretien (CE)

Les coûts d'entretien s'accroissent lorsque le DJMA des poids lourds augmente en passant d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21%). Ainsi, dans la section 1, ils s'accroissent de 110 % et 17 % respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Pour les sections 2 et 3, le taux d'accroissement est de 180 % et 10 %, respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC.

Les coûts d'entretien de la chaussée en BAC sont quasiment constants sur le cycle de vie pour les différents scénarios de trafic alors qu'ils augmentent de manière sensible pour la chaussée en EB. L'écart entre ces coûts d'entretien, lorsque le trafic des poids lourds varie de 1 % à 21 %, varie de 500 à 1000 % dans la section 1, de 130 à 300 % dans la section 2 et de 150 à 300 % dans la section 3. Ainsi, cet écart de coûts d'entretien entre la chaussée en EB et la chaussée en BAC double, sur le cycle de vie. Les coûts d'entretien de la chaussée en EB sont de plus en plus élevés lorsque le DJMA total est de plus en plus élevé de la section 3 à la section 1. On en déduit que plus la chaussée est fortement sollicitée plus les coûts d'entretien de l'option en EB sont plus élevés comparés à ceux de l'option en BAC. Au Québec, depuis 1990 de nouveaux changements sont intervenus dans la conception et le choix du type de chaussée à construire au ministère des transports du Québec (MTQ). Ainsi, comme indique Claude et al., toujours dans le but d'optimiser nos façons de faire en fonction des ressources anticipées à l'entretien et à la réhabilitation des chaussées en béton de ciment, un nouveau type de dalle est proposé à cet effet : la dalle en béton armé continu (Claude, El-Nemr, Tighiouart, Ahmed, & Benmokrane, 2013). Le choix de la dalle en béton armé continu permet la réduction importante des coûts liés aux travaux de réhabilitation. Comparés à l'option en béton armé continu, les coûts d'entretien de la chaussée en enrobé bitumineux sont plus élevés (Haseeb, 2017). En Inde, une étude comparative entre les deux types de chaussée détermine un ratio coût de construction / coût d'entretien de 19 % plus faible pour la chaussée en béton par rapport à la

chaussée en enrobé bitumineux (Pradham Mantri Gram Sarak Yojana (PMGSY), 2006). Cela donne l'avantage à la chaussée en béton armé continu. Les principaux avantages de la solution dalle en béton armé continu sont l'absence quasi-totale d'entretien. La réduction des opérations d'entretien entraîne une diminution des coûts aux usagers. Les autres facteurs favorables sont le meilleur comportement à long terme et la pérennité de l'uni de surface (Thébeau, 2004).

d) Coûts à l'administration (CA)

Les coûts à l'administration s'accroissent lorsque le DJMA des poids lourds augmente en passant d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21%). Ainsi, dans la section 1, ils s'accroissent de 33 % et 17 % respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Ils s'accroissent, pour la section 2 de 38 % et 22 % et pour la section 3, de 36 % et 22 %, respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Lorsque le DJMA des poids lourds varie d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21 %), les coûts à l'administration de la chaussée en EB restent supérieurs à ceux de la chaussée en BAC dans les trois sections. L'écart moyen entre ces coûts est de 15 % pour la section 1, de 12 % et 11 % respectivement pour les sections 2 et 3 sur le cycle de vie. Les coûts à l'administration de la chaussée en BAC baissent de 11 à 15 % par rapport à ceux de la chaussée en EB dans les trois sections. Au terme du cycle de vie de 20 ans la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB pour les administrations routières.

e) Coûts aux usagers (CU)

Les coûts aux usagers s'accroissent lorsque le DJMA des poids lourds augmente en passant d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21%). Ainsi, dans la section 1, ils s'accroissent de 100 % et 49 % respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Ils s'accroissent, pour la section 2 de 50 % et 47 % et pour la section 3, de 58 % et 56 %, respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Lorsque le DJMA des poids lourds varie d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21 %), les coûts aux usagers de la chaussée en EB restent supérieurs à ceux de la chaussée en BAC dans les trois sections. L'écart moyen entre ces coûts est de 30 % pour la section 1 et de 22 % pour les sections 2 et 3 sur le cycle de vie. Les coûts aux usagers de la chaussée en BAC baissent de 22 à 30 % par

rapport à ceux de la chaussée en EB dans les trois sections. Au terme du cycle de vie de 20 ans la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB pour les usagers de la route. Il y a ainsi pour les usagers, une baisse des coûts liés aux accidents, à l'entretien des véhicules et aux délais de trajets.

f) Valeur actuelle nette (VAN)

Les valeurs actuelles nettes augmentent lorsque le DJMA des poids lourds augmente en passant d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21%). Ainsi, dans la section 1, ils s'accroissent de 71 % et 76 % respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Ils s'accroissent, pour la section 2 de 66 % et 69 % et pour la section 3, de 80 % et 82 %, respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21 %), la valeur actuelle nette de la chaussée en BAC reste supérieure à celle de la chaussée en EB dans les trois sections. L'écart moyen entre les valeurs actuelles nettes est de 7 % pour la section 1 et de 10 % pour les sections 2 et 3 sur le cycle de vie. Cet écart moyen sur les trois sections varie de 7 à 10 %. Une corrélation est observée entre la variation du DJMA des poids lourds et la valeur actuelle nette. Sur le cycle de vie de 20 ans, la chaussée en BAC ayant une valeur actuelle nette supérieure à celle de la chaussée en EB est la plus viable. Les deux projets sont mutuellement exclusifs et la valeur actuelle nette de la chaussée en BAC est supérieure à celle de la chaussée en enrobé (École de management Sorbonne, 2015). La valeur actuelle nette est un indicateur économique viable pour effectuer un meilleur choix de projet d'investissement (Huang, 2004). Une étude comparative réalisée au Ghana indiquait qu'en terme de VAN, le béton de grade 5 pouvait être utilisé comme matériau alternatif à l'enrobé bitumineux pour la construction routière selon une étude de cas effectuée (Okoe Adow, Allotey, & Sasraku-Neequaye, 2015). La valeur actuelle nette, habituellement utilisée pour les projets mutuellement exclusifs, est considérée comme celle qui donnera toujours la meilleure réponse par rapport aux autres méthodes (R. Haas et al., 1994; Wohl & Tversky, 1967). C'est une grandeur monétaire qui mesure la création de richesse. L'investisseur choisira donc le

projet qui crée le plus de richesse (École de management Sorbonne, 2015). Un investissement ne doit être retenu que si sa valeur actuelle nette est positive et entre plusieurs projets mutuellement exclusifs on doit retenir celui dont la valeur actuelle nette est la plus grande (Bejar, 2019).

g) Taux de rendement interne (TRI)

Les taux de rendement interne augmentent lorsque le DJMA des poids lourds augmente en passant d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21%). Ainsi, dans la section 1, ils s'accroissent de 28 % et 25 % respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Ils s'accroissent, pour la section 2 de 20 % et 20 % et pour la section 3, de 27 % et 26 %, respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC.

Lorsque le DJMA des poids lourds varie d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21 %), le taux de rendement interne de la chaussée en BAC reste supérieur à celui de la chaussée en EB dans les trois sections. L'écart moyen entre les taux de rendement interne est de 10 % pour la section 1, de 5 % pour la section 2 et de 3 % pour la section 3, sur le cycle de vie. Cet écart moyen sur les trois sections varie de 3 à 10 %. Le taux de rendement interne (TRI) pour chaque section et chaque scénario de trafic est toujours positif dans les trois sections. Une corrélation est observée entre la variation du DJMA des poids lourds et le taux de rendement interne. Le taux de rendement interne, en pratique, doit être supérieur au taux d'actualisation exigé par l'investisseur et dans le cas de projets mutuellement exclusifs, il faut retenir celui qui a le taux de rendement interne le plus élevé (Chrissos & Gillet, 2016). Si l'on considère, dans le cadre cette étude, un taux d'actualisation de 12 %, on peut déduire que les deux projets peuvent être acceptés mais avec l'avantage à la chaussée en béton armé continu. Le critère du taux de rendement interne conduit parfois à des conflits avec le critère de la valeur actuelle nette et de ce fait le TRI ne permet pas toujours de prendre des décisions d'investissement fiables. Il donne parfois des réponses ambiguës (Corporate Finance Institute (CFI), 2019; Wohl & Tversky, 1967).

h) Coûts globaux (CT)

Les coûts totaux augmentent lorsque le DJMA des poids lourds augmente en passant d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21%). Ainsi, dans la section 1, ils s'accroissent de 50 % et 46 % respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Ils s'accroissent, pour la section 2 de 48 % et 46 % et pour la section 3 de 57 % et 54 %, respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Lorsque le DJMA des poids lourds varie d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21 %), les coûts totaux de la chaussée en EB restent supérieurs à ceux de la chaussée en BAC dans les trois sections. L'écart moyen entre ces coûts est de 28 % pour la section 1 et de 21 % pour les sections 2 et 3 sur le cycle de vie. Les coûts totaux de la chaussée en BAC baissent de 21 à 28 % par rapport à ceux de la chaussée en EB de la section 3 à la section 1.

Les coûts totaux (CT) obtenus dans les trois sections étudiées et pour les deux options de chaussées, donne l'avantage à la solution de chaussée en béton armé continu sur la période d'analyse de 20 ans et la chaussée en béton armé continu coûte de 21 à 28 % moins cher. L'écart entre les coûts initiaux de construction qui était supérieur à 20 % donnait un avantage à la chaussée en enrobé bitumineux. Au terme de la période d'analyse, cette tendance s'est inversée. Une étude comparative sur 20 ans réalisée en Inde indiquait que le coût initial de la chaussée en béton armé continu était supérieur de 28 % par rapport à celui de la chaussée en enrobé bitumineux. À la fin du cycle de vie, les coûts de la chaussée en enrobé bitumineux étaient supérieurs de 20 à 25 % par rapport à ceux de la chaussée en béton armé continu (Pradham Mantri Gram Sarak Yojana (PMGSY), 2006). On peut donc conclure que la chaussée en béton armé continu se comporte mieux sur le long terme. L'avantage obtenu avec la chaussée en béton armé continu pourrait être plus important si la période d'analyse était prolongée à 30 ans ou au-delà tel qu'adopté dans les pays comme les États-Unis, le Canada ou l'Europe où celle-ci peut aller jusqu'à 50 ans. Pour l'étude comparative réalisée au Ghana, les coûts globaux de la chaussée en béton armé continu comparés à ceux de la chaussée en enrobé bitumineux indiquent que la chaussée en enrobé bitumineux représente un coût supérieur de 11 % par rapport à la chaussée en béton de grade 5.

La durée de la période d'analyse est souvent prise à 20 ans si l'on considère le trafic. Cette durée peut aller jusqu'à 30 ans en prenant en compte d'autres facteurs que le trafic (R. Haas et al., 1994). Ces autres facteurs en dehors du trafic peuvent être le type et le niveau de maintenance appliqué, la disponibilité des fonds correspondant au coût initial de construction, les coûts du cycle de vie ainsi que des considérations d'ingénierie diverses (Huang, 2004). Pour effectuer une bonne utilisation des fonds disponibles, poursuit-il, le guide de conception AASHTO encourage l'adoption d'une période d'analyse plus longue pour les chaussées à fort volume de trafic (Huang, 2004). En effet, le guide prescrit une période d'analyse de 20 à 50 années pour les autoroutes rurales à fort volume et 30 à 50 années pour les autoroutes urbaines à fort volume de trafic.

En outre, ces coûts totaux ne prennent pas dans cette première phase de l'étude les coûts environnementaux. Aussi, la deuxième phase de l'étude portera sur l'évaluation de l'empreinte environnementale des deux options de chaussées pour leur comparaison du point de vue environnemental.

2.10 Conclusion

L'autoroute du nord qui prolonge la voie de Yopougon Express est un axe routier sous régional de haute importance pour le développement des activités commerciales entre la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso, le Mali et le Niger. C'est l'une des liaisons routières fortement sollicitée en Côte d'Ivoire.

Cet article avait pour objet de faire sa conception structurale et d'envisager sa reconstruction en faisant un choix judicieux du type de revêtement de chaussée et de déterminer ainsi l'option la plus avantageuse entre la chaussée en enrobé bitumineux et la chaussée en béton armé continu. Les routes africaines doivent être construites pour durer dans le temps, pour résister aux fortes sollicitations et aux températures élevées et sans nécessiter un entretien important tout au long du cycle de vie. La route est aussi construite pour être économique aussi bien pour les administrations que pour les usagers. En d'autres termes les coûts investis par les

administrations doivent être minimisés de même que les coûts aux usagers. La solution à adopter doit être l'option de revêtement qui répond à cette double condition en constituant un partenariat gagnant-gagnant entre les administrations routières et les usagers de la route. Au moment où la reconstruction du tronçon Yopougon Express est programmée et les discussions engagées entre les différents partenaires du projet sur l'option de chaussée à réaliser, cette étude vient à point nommé pour participer au débat en cours et aider les décideurs à la prise d'une décision optimale. Cette contribution est d'autant plus utile dans le contexte où la Côte d'Ivoire n'a pas encore expérimenté d'autres types de revêtements de chaussée en dehors de l'enrobé bitumineux et où les spécialistes affichent une réticence à l'idée de changement vers l'adoption de nouveaux concepts pour les projets d'infrastructures routières en fonction du projet à réaliser.

Les principaux résultats de cette étude comparative se résument ainsi :

-Taux de dégradation en fonction du trafic

À mesure que le niveau du trafic des poids lourds augmente le taux de dégradations augmente pour la chaussée en enrobé bitumineux. L'IRI n'est pas conservé sans effectuer des travaux. La chaussée en béton armé continu quant à elle conserve son IRI.

-Coût initial

Le coût initial de la chaussée en EB est moins cher de l'ordre de 10 à 20 %. Le coût initial de construction de la chaussée en enrobé bitumineux est généralement plus faible que celui de la chaussée en béton armé continu selon différents auteurs en Afrique et dans le reste du monde. Cette tendance peut être inversée en fonction des prix des matières premières du moment, entrant dans la fabrication de l'enrobé bitumineux et du béton armé continu.

-Coûts d'entretien

Les coûts d'entretien de la chaussée en EB augmentent sensiblement avec l'augmentation du trafic des poids lourds alors qu'ils restent quasiment constants et relativement faibles pour la chaussée en BAC. Tous les auteurs à travers toutes les études réalisées sur le cycle de vie des

chaussées aboutissent à la même conclusion. Les coûts d'entretien sont relativement plus élevés pour la chaussée en enrobé bitumineux et à l'inverse, ils sont plus faibles pour la chaussée en béton armé continu. En termes d'entretien c'est l'option de chaussée qui convient aux pays qui ne disposent pas de ressources financières allouées à l'entretien des routes. L'entretien ici n'est pas compris comme un entretien ponctuel effectué à la demande mais celui qui s'inscrit dans une politique de gestion routière sur le cycle de vie de la chaussée.

-Coûts à l'administration et coûts aux usagers

Les coûts à l'administration de la chaussée en BAC baissent de 11 à 15 % en faveur de la chaussée en BAC sur le cycle de vie. Les coûts aux usagers de la chaussée en BAC baissent de 22 à 30 % par rapport à ceux de la chaussée en EB sur le cycle de vie. La solution BAC permet ainsi de réaliser le partenariat gagnant-gagnant entre les administrations routières et les usagers de la route.

-Indicateurs économiques

Les indicateurs économiques utilisés sont la valeur actuelle nette et le taux de rendement interne. L'utilisation de la valeur actuelle nette est préférable pour les décisions d'investissement des projets routiers et pour les projets mutuellement exclusifs. La chaussée en BAC a une valeur actuelle nette supérieure à celle de la chaussée en EB. Il en est de même pour le taux de rendement interne. Le projet à réaliser est celui qui a la plus grande valeur actuelle nette.

-Coûts globaux

Les coûts totaux du cycle de vie de la chaussée en BAC sont moins chers de 21 à 28 % par rapport à ceux de la chaussée en EB. Bien que les études réalisées dans le monde indiquent que d'une manière générale le coût initial de construction de la chaussée en béton armé continu est supérieur à celui de la chaussée en enrobé bitumineux, ces études démontrent qu'au terme du cycle de vie adopté, le coût global de la chaussée en béton armé continu est inférieur tout au moins du même écart que celui qui existait entre les coûts initiaux, à celui de la chaussée en enrobé bitumineux. L'attribution des marchés est souvent faite sur la base du coût initial en

préférant le projet le moins cher entre les deux options de chaussée. Ce critère d'attribution se traduit par une dépense moindre pour construire la route et d'importantes dépenses d'entretien pendant la phase d'exploitation de la chaussée. À l'inverse pour l'option BAC, il faut accepter de dépenser plus au départ pour la construction et faire de faibles dépenses d'entretien durant la phase d'exploitation de la chaussée. C'est pourquoi le choix de l'option de chaussée à réaliser doit être effectué de façon judicieuse en tenant compte de ces aspects. Si l'on tient compte des coûts globaux, la chaussée en béton armé continu représente le meilleur choix d'investissement routier pour les chaussées fortement sollicitées et particulièrement en Afrique subsaharienne. À l'inverse si l'on ne considère que les coûts initiaux, le choix de la chaussée à construire sera quasiment toujours porté sur la chaussée en enrobé bitumineux.

Les divers avantages de chacune de ces chaussées reliés aux phases d'exploitation et de fin de vie, viennent éclairer d'avantage sur le choix idéal.

-Incidence d'une chaussée en béton armé continu sur le règlement 14 de l'UEMOA

Dans le cas particulier de l'espace de l'union économique et monétaire en Afrique de l'ouest (UEMOA), une chaussée en béton armé continu, parce qu'elle résiste aux charges très lourdes, aura une incidence sur le règlement 14 devant harmoniser les charges d'essieux et les gabarits des véhicules roulants sur le réseau routier de cet espace. En effet, l'on serait tenté dans le cadre du territoire de l'UEMOA, d'augmenter le niveau des charges limites à l'essieu telles que définies par le règlement 14, si les corridors pour camionnage étaient en béton armé continu. Ainsi, au lieu de réduire la charge à l'essieu jusqu'à 6 tonnes, elle pourra au contraire être augmentée jusqu'à 10-12 tonnes comme aux États Unis ou 13 tonnes comme en Europe. Cela facilitera le transport des marchandises. Ainsi, cette situation pourrait apporter des richesses supplémentaires aux populations tout en accélérant la croissance des pays si le phénomène de la surcharge des poids lourds est par ailleurs maîtrisé.

Cette recherche montre que les sections homogènes fortement sollicitées pourraient être aménagées en béton armé continu. Le choix de l'option BAC n'est pas économique pour les

chaussées à faible trafic. Le choix de l'option de chaussée devrait donc s'appuyer sur une étude comparative sur le cycle de vie qui n'a pas pour vocation de s'imposer aux décideurs mais plutôt de les éclairer en les aidant à faire un choix judicieux du type de chaussée à construire. L'attribution des marchés devrait par conséquent considérer les coûts globaux sur le cycle de vie et non les coûts initiaux comme critère d'attribution.

La prise en compte du contexte particulier de chaque projet, les aspects environnementaux et les diverses considérations liées à la construction routière en Afrique subsaharienne nécessitent de futures recherches afin d'éclairer d'avantages les décideurs et l'ensemble des partenaires sur les choix d'investissements des projets routiers qui devraient se faire au cas par cas.

CHAPITRE 3

ÉVALUATION DE L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE D'UNE CHAUSSÉE EN ENROBÉ OU EN BÉTON ARMÉ CONTINU, EN FONCTION DU VOLUME DE POIDS LOURDS, SUR SON CYCLE DE VIE. CAS DE L'AUTOROUTE DU NORD EN CÔTE D'IVOIRE

Nahouo Soro¹, Gabriel J. Assaf¹

¹Département de génie de la construction, École de technologie supérieure
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3
Article soumis à la revue Annales du Bâtiment et des Travaux Publics
pour publication, avril 2020

3.1 Résumé

La préservation de l'environnement et le développement durable préoccupent fortement les nations du monde. La réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation d'énergie du fait de l'activité humaine est un objectif majeur pour les concepteurs et les ingénieurs. Les domaines de la construction et des transports sont particulièrement polluants.

Dans cette optique, cet article propose d'évaluer l'impact environnemental de deux options de chaussées autoroutières en Afrique subsaharienne : une chaussée en enrobé bitumineux (EB) et une chaussée en béton armé continu (BAC). L'évaluation est effectuée sur l'ensemble du cycle de vie des chaussées à l'aide des outils ECORCE 2.0 et HDM-4 v2.0.

Les impacts environnementaux liés aux phases d'extraction et de production des matériaux, de construction et d'exploitation sont évalués sur trois sections homogènes de l'Autoroute du Nord en Côte d'Ivoire en intégrant la variation du trafic des poids lourds.

Pour les phases d'extraction et de production des matériaux, les résultats indiquent une baisse des émissions de gaz à effet de serre d'environ 15 % pour l'option BAC pour les trafics lourds élevés (70000 véhicules par jour dont 21 % de poids lourds) par rapport à l'option EB. À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (43750 véhicules par jour dont 1 % de poids lourds),

l'option BAC consomme jusqu'à 27 % de plus que l'option EB. Pour les phases de construction et d'exploitation de la chaussée, l'option BAC pollue respectivement 55 % et 25 % de moins que l'option EB, et ce quel que soit le trafic.

Sur le cycle de vie de 20 ans, le taux des émissions globales de gaz à effet de serre de l'option BAC est 17 à 20 % inférieur à celui de l'option EB ; la consommation globale d'énergie est également 15 à 16 % plus basse. Ces taux s'accroissent avec l'augmentation du trafic des poids lourds. En se limitant à ces résultats, la chaussée en béton armé continu est plus avantageuse du point de vue environnemental, que la chaussée en enrobé bitumineux, sur le cycle de vie, en particulier pour les chaussées à trafic de poids lourds élevé. L'étude se limite aux émissions de gaz à effet de serre et à la consommation d'énergie pour les phases d'extraction et de production des matériaux, de construction et d'exploitation, comprenant donc les coûts aux usagers sur le cycle de vie. Les avantages du recyclage d'une chaussée en EB versus une chaussée en BAC ne sont toutefois pas quantifiés. De nombreux paramètres environnementaux restent encore à étudier dans le cadre de la construction de chaussées durables.

Mots clés : cycle de vie, environnement, empreinte environnementale, développement durable, gaz à effet de serre

3.2 Abstract

Environmental conservation and sustainable development are of great concern to all nations. The reduction of greenhouse gas emissions and energy consumption due to human activity is a major objective for designers and engineers. The construction and transport sectors are particularly polluting.

With this in mind, this paper performs an environmental assessment of two highway pavement options in sub-Saharan Africa: An Asphalt pavement (AC) and a continuous reinforced concrete pavement (CRCP). The assessment is carried out over the entire life cycle of pavements using the ECORCE 2.0 and HDM-4 v2.0 tools.

Extraction and production of materials, construction, use or operations, and maintenance phases are separately dealt with on three homogeneous sections of the Autoroute du Nord in Côte d'Ivoire incorporating trucks traffic growth.

The results obtained, in the extraction and production of construction materials phase, saw a drop in environmental greenhouse gas emissions of around 15 % for the Continuous Reinforced Concrete Pavement (CRCP) option with high heavy traffic (70000 vehicles per day with 21 % heavy vehicles) compared to the asphalt pavement (AC) option. Conversely, for low heavy traffic (43750 vehicles per day with 1 % heavy vehicles), the CRCP option pollutes up to 27 % more than AC option. For construction and operation phases the CRCP option pollutes 55 % and 25 % respectively less than AC option, regardless of traffic.

Over the 20-year life cycle, the overall CRCP option greenhouse gas emission rate is 17 to 20 % lower than that of the AC option; overall energy consumption rate is also 15 to 16 % lower. These rates are increasing with the increase in truck traffic. Considering these results, the continuous reinforced concrete pavement is more advantageous from the environmental point of view, than asphalt pavement over the life cycle, in particular for pavements with heavy trucks traffic. The study is limited to greenhouse gas emissions and energy consumption for the extraction and production of materials, construction and operation phases, thus including users costs over the life cycle. The advantages of recycling an AC pavement versus a CRCP pavement are not quantified, however. Many environmental parameters are still to be studied in the construction of sustainable pavements.

Keywords: life cycle, environment, environmental footprint, sustainable development, greenhouse gas

3.3 Introduction

Le transport routier en Afrique subsaharienne, et particulièrement en Afrique de l'Ouest, joue un rôle prépondérant dans les relations commerciales et l'économie des pays de la région. En effet, le coût du transport aérien est élevé et le réseau ferroviaire reliant les pays demeure inexistant. De grands projets d'infrastructures routières régionales sont planifiés ou en cours d'exécution pour favoriser les échanges commerciaux. Les corridors existants reliant les ports à l'arrière-continent permettent l'acheminement selon Ken et al. (2008) de plus de 200 milliards de dollars US de marchandises par an.

Bien que la nécessité de développer le réseau routier national et international s'impose à chaque pays, pour réaliser son développement et sa croissance économique, la construction routière en Afrique subsaharienne, comme dans le reste du monde, est considérée comme une activité contribuant significativement aux émissions de gaz à effet de serre et à la consommation d'énergie.

Ces dernières participent au potentiel de réchauffement global de la planète qui est, depuis la conférence des Nations Unies sur le climat (COP 21) tenue à Paris en 2015, une préoccupation mondiale (Nations Unies, 2015). En effet, selon Steinberger, Krausmann, et Eisenmenger (2010), globalement 47 à 59 milliards de tonnes de matériaux sont extraits chaque année et la part du sable et des gros granulats (agréats) représente la plus grande part, soit 68 % à 85 %. Le ciment comme l'indique Le Quéré (2015) est responsable de 5,5 % des émissions de gaz carbonique (Le Quéré et al., 2015). Les activités liées au secteur de la construction, en particulier la construction routière, sont ainsi parmi les activités humaines les plus productrices de gaz à effet de serre.

Sensibilisés aux effets dévastateurs du changement climatique, les concepteurs et les décideurs doivent adopter de nouvelles stratégies de gestion de l'ensemble du processus de construction des routes dans une perspective de développement durable.

Le choix d'une option de chaussée jusqu'alors basée sur des considérations techniques, économiques ou politiques, intègre de plus en plus les impacts environnementaux dans certains pays. Selon (Chan, Keoleian, & Gabler, 2008), plus de 40 états aux États-Unis font une analyse des coûts du cycle de vie pendant le processus de sélection de la chaussée à construire. Mais les coûts généralement considérés, engendrés par les phases de production des matériaux, de construction, d'utilisation et d'entretien de la chaussée, excluent encore souvent les coûts environnementaux. Ainsi, dans la plupart des états des États-Unis, l'application d'une étude du coût du cycle de vie se fait systématiquement avant le choix de l'option de chaussée entre l'enrobé et le béton, particulièrement pour les chaussées fortement sollicitées, c'est-à-dire des chaussées soumises à des charges de trafic lourd très élevées. L'application de l'analyse économique sur le cycle de vie a été reconnue très tôt comme un élément clé de la gestion des chaussées au niveau projet (Hudson, Finn, McCullough, Nair, & Vallerga, 1968; Hutchinson & Haas, 1968; Scrivener, Moore, McFarland, & Carey, 1968). Peu de temps après, il a également été reconnu comme un élément clé du niveau réseau (R. C. G. Haas & Hutchinson, 1970), et les principes et la méthodologie ont été complètement décrits dans (Ralph Haas & Hudson, 1978; RTAC, 1977). Cependant, l'utilisation réelle de l'analyse économique du cycle de vie ne s'est répandue parmi les exploitants que dans les années 1990 (Ralph Haas, 2001). Une bonne estimation des coûts sur le cycle de vie et des impacts environnementaux au niveau projet est l'une des étapes importantes du processus de prise de décision en matière d'investissement dans les autoroutes (Liu, Smartz, & Descheneaux, 2015). Cette même démarche s'applique également au niveau réseau pour déterminer les meilleurs choix d'investissements routiers. Le HDM-4 v2.0 joue en effet un rôle important dans la gestion des routes, selon Kerali, Odoki, et Stannard (2005) et ses applications permettent d'intervenir aux étapes de planification, programmation, préparation et réalisation des réseaux routiers.

Dans les pays d'Afrique subsaharienne, cette approche n'est cependant pas encore adoptée. Bien que de nombreuses études soient déjà effectuées dans les pays développés, les résultats ne peuvent cependant pas être transposés et généralisés en Afrique subsaharienne. Les outils utilisés nécessitent la prise en compte des paramètres locaux, de sorte que dans le même pays

on ne peut généraliser les conclusions d'une étude antérieure réalisée sur un autre site. C'est pourquoi l'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) et l'analyse environnementale du cycle de vie (ACV) doivent être faites pour chaque nouveau projet en vue de faire un choix éclairé. L'analyse du coût du cycle de vie (ACCV) peut évaluer les impacts économiques tandis que l'analyse du cycle de vie (ACV) peut estimer le fardeau environnemental d'une chaussée en examinant toutes les phases du cycle de vie (Liu et al., 2015).

Le choix d'une option de chaussée (flexible, en enrobé ou rigide, en béton) est une problématique toujours discutée dans la littérature, selon (Ralph Haas, 2001). La présente étude a pour objectif de proposer une analyse environnementale sur le cycle de vie des chaussées en enrobé bitumineux et en béton armé continu, dans le cas de l'Autoroute du Nord, en Côte d'Ivoire. Les conclusions seront proposées aux concepteurs, aux décideurs et à l'ensemble des partenaires pour leur prise en compte dans le choix du type de chaussée pour la reconstruction de l'Autoroute du Nord, en Côte d'Ivoire. Des recommandations sont également faites pour la construction de routes plus respectueuses de l'environnement dans la région.

3.4 Localisation du projet

La zone géographique de l'étude est située en Côte d'Ivoire sur le continent africain, tel que présenté à la Figure 3.1. L'Autoroute du Nord permet de relier le Burkina-Faso, la Côte d'Ivoire et le Mali, trois pays de l'espace de l'Union Économique et Monétaire Ouest Africain (UEMOA). Les pays membres de cet espace économique et monétaire sont le Bénin, le Burkina-Faso, la Côte d'Ivoire, la Guinée Bissau, le Mali, le Niger, le Sénégal et le Togo. Le tronçon du projet de cette étude est présenté à la Figure 3.2.



Figure 3.1 Carte de l'Afrique et de la Côte d'Ivoire

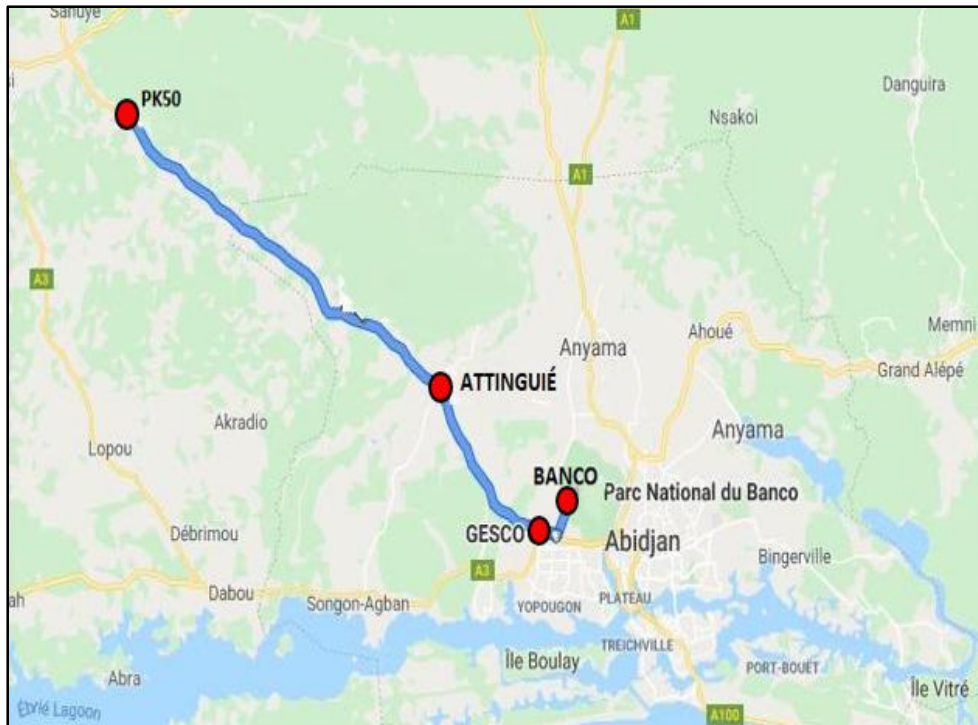


Figure 3.2 Tronçon de l'autoroute du nord en Côte d'Ivoire

3.5 Revue de littérature

3.5.1 Les matières premières

Les principaux matériaux de la construction routière sont pour la chaussée en béton armé continu, le ciment, l'acier et les granulats et pour la chaussée en enrobé bitumineux, le bitume et les agrégats.

Leur forte consommation liée à la réalisation de grandes infrastructures partout dans le monde, contribue significativement au changement climatique, principalement par les émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie.

La production de ciment est responsable de 5 % des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) mondiales et 60 % de ces 5 % sont issues de la décarbonatation de la roche calcaire utilisée comme matière première pour la construction (Fontaine & Anger, 2009). En 2008, le transport

routier a produit 33 % des émissions de GES aux États-Unis (soient 1 946 millions de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone [CO₂eq]), en deuxième position derrière la production d'électricité (EPA 2010). Plus du quart des émissions mondiales de gaz à effet de serre sont dues au transport et en particulier au transport routier. Il est essentiel que l'industrie de la construction routière fasse partie de la solution en mettant en œuvre de manière proactive, des technologies et des pratiques de construction qui aident à atteindre les objectifs de réduction des émissions (Uzarowski & Moore, 2008).

3.5.2 Les chaussées en béton versus en enrobé

Les réseaux autoroutiers sont constitués le plus souvent, par des chaussées en enrobé ou en béton de ciment. Si l'on considère l'ensemble du réseau routier interne des États, selon Zapata et Gambatese (2005), près de 83 % des routes et rues sont réalisées en enrobé, 7 % sont en béton de ciment avec ou sans revêtement bitumineux et environ 10 % sont des chaussées mixtes avec une couche de surface bitumineuse couvrant une couche de base en béton (FHWA, 1995).

Pour les autoroutes interétatiques, autres autoroutes et voies express, les statistiques sur le type de surface montrent que jusqu'à 57 % du kilométrage de ces routes sont en béton de ciment, soit comme revêtement, soit comme couche de base, tandis que les autres routes et rues sont largement réalisées en enrobé (Horvath & Hendrickson, 1998).

La technologie de construction des routes en béton s'applique de façon avantageuse sur les routes fortement sollicitées. Selon Thébeau (2004), la chaussée composée de dalles en béton armé continu comparée aux dalles avec joint, comporte de nombreux avantages comme un meilleur comportement à long terme, un entretien minimal et la pérennité de l'uni. Ces avantages méritent d'être considérés lors du choix d'un type de dalle pour une chaussée en béton, surtout dans les cas où la section de route supporte un trafic extrêmement lourd et qu'il n'y a pas de ressources financières planifiées pour l'entretien.

De plus, plusieurs administrations routières ont démontré que ce type de chaussée est plus économique à long terme bien que le coût initial soit plus élevé que pour les dalles avec joints. Les expériences dans plusieurs États américains et la Belgique, montrent le degré de succès que l'on peut obtenir avec ce type de dalle. Le Tableau 3.1, selon CIMbéton (2001) indique la part du béton dans le réseau routier de quelques pays. On observe en particulier que 13 % des autoroutes en France sont en béton alors que ce taux est de 60 % aux États-Unis.

Tableau 3.1 Part du béton dans le réseau routier de quelques pays
Tiré de CIMbéton (2001)

Réseaux Pays	Autoroutes béton	RN béton	CD béton
France	13 %	0,5 %	0,2 %
Allemagne	51 %	15 %	35 %
Belgique	40 %	20 %	31 %
États-Unis	60 %	40 %	40 %

3.5.3 Les modèles d'évaluation environnementale

Parmi les modèles les plus utilisés rencontrés dans la littérature pour l'évaluation des impacts environnementaux, il y a les modèles EIO-LCA et SETAC-EPA. Le modèle EIO-LCA est appelé modèle économique entrée-sortie développé par les chercheurs à Carnegie Mellon University's Green Design Initiative. La méthode SETAC-EPA est celle de la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) et la U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Ces deux modèles permettent l'évaluation des impacts environnementaux par des approches différentes. La technique SETAC-EPA divise chaque produit ou système en flux de processus individuels et tente de quantifier leurs effets environnementaux (Horvath & Hendrickson, 1998). Le modèle EIO-LCA utilise la matrice économique d'entrée-sortie 498 x 498 (produit par produit) de l'économie des États-Unis pour identifier l'ensemble de la chaîne de fournisseurs (à la fois directe et indirecte) à un produit (Horvath & Hendrickson, 1998) .

L'analyse du cycle de vie (LCA ou ACV) est une méthode utilisée pour l'évaluation des impacts environnementaux sur les différentes phases du cycle de vie depuis la phase extraction

des matières premières jusqu'à la fin de vie en passant par la mobilisation des ressources, la construction, la phase d'exploitation et d'entretien. Ce modèle permet la quantification du fardeau environnemental et identifie les zones où des améliorations peuvent être apportées pour la réduction des impacts (Horvath & Hendrickson, 1998).

Si les deux modèles permettent l'évaluation des impacts environnementaux d'un produit ou d'un procédé, les approches comportent des différences. Les études existantes diffèrent par le nombre d'effets environnementaux quantifiés et la portée de l'analyse. La portée de l'analyse est déterminée par l'endroit où la limite de l'analyse est fixée (Horvath & Hendrickson, 1998). Toujours selon Horvath et Hendrickson (1998), par exemple, au stade de la fabrication des produits, le modèle SETAC-EPA tente de remonter aussi loin (en amont) dans le flux que possible. Cette évaluation est généralement limitée par les données disponibles, le temps et les coûts. Elle comprend le premier niveau (direct) des fournisseurs mais rarement la hiérarchie complète des fournisseurs, c'est-à-dire tous les fournisseurs des fournisseurs (indirects). En revanche, le modèle EIO-LCA utilise la matrice économique des entrées-sorties de 498 x 498 (produit par produit) de l'économie américaine pour identifier l'ensemble de la chaîne de fournisseurs (directs et indirects) à une marchandise, fixant ainsi la limite de l'extraction des matériaux et de l'évaluation de l'étape de fabrication au niveau de l'économie nationale (Horvath & Hendrickson, 1998).

Les différences fondamentales sont relatives à la portée de l'analyse, au coût, au temps, à la disponibilité des données et à la frontière, sur l'ensemble du processus, où démarre l'analyse.

3.5.4 Les outils ecocompareurs

Plusieurs outils écocompareurs existent dans la littérature. On peut citer quelques logiciels selon (Techno-Bitume, 2011):

- « Lucas » développé par le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) de l'École Polytechnique de Montréal ;

- « SEVE » pour « Système d'évaluation des variantes environnementales » de l'Union des syndicats de l'industrie routière française (USIRF) ;
- « Écorce 1.0 » signifiant « Écocomparateur routes : construction et entretiens » de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) ;
- « GAÏA B. E. » de la compagnie Eurovia ;
- « ÉcoLogicieL » de la compagnie Colas ; et,
- « PaLATE » (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects) développé aux Etats-Unis.

Tous ces logiciels écomparateurs ont l'avantage de permettre de comparer des conceptions de chaussées en évaluant les impacts environnementaux de chacune des options aux fins de comparaison. Cependant, leur portée varie selon le nombre d'indicateurs évalués, leur nature visant les impacts régionaux et/ou locaux, la quantité des données nécessaires et leur disponibilité, etc. Ces écomparateurs n'étudient pas les phases d'exploitation et de fin de vie. De tous ces logiciels, l'outil ECORCE 2.0 est celui qui convient le mieux à l'environnement de cette recherche pour les raisons suivantes :

- 1) À défaut d'un logiciel écomparateur dans la région de l'étude, les normes françaises s'appliquant en Afrique de l'Ouest, le logiciel ECORCE 2.0 peut être utilisé.
- 2) Utiliser ECORCE 2.0 dont la conception a bénéficié de la contribution appréciable du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) permet de conserver une cohérence méthodologique avec le logiciel Alizé LCPC, utilisé pour la conception des structures des chaussées qui sont évaluées dans cet article.

L'outil ECORCE 2.0 est par ailleurs destiné à tous utilisateurs français et étrangers. Il a été développé pour mener avec une même interface graphique deux types d'analyses environnementales (M. Dauvergne et al., 2013):

- L'évaluation « a posteriori » qui consiste à réaliser des bilans environnementaux pour des configurations routières existantes (scenarios de construction et/ou entretien structurel).
- L'évaluation « a priori » qui vise à proposer des approches environnementales prédictives de scenarios de construction et/ou entretien structurel au stade du projet ou de l'appel d'offres (M. Dauvergne et al., 2013).

En lien avec la présente recherche l'évaluation « a priori » est celle qui sera utilisée avec le logiciel ECORCE 2.0.

3.5.5 Le choix d'une option de chaussée entre l'enrobé et le béton

Diverses études ont déjà été réalisées par les chercheurs et elles diffèrent les unes des autres de par leur contexte et leurs limites. Elles ont pour objet d'éclairer les décideurs lors de la sélection d'une option de chaussée pour chaque projet à réaliser. Si un consensus se dégage sur l'avantage de l'option en béton pour les chaussées fortement sollicitées, il n'en est pas de même suite à une comparaison sur les plans technique, économique et environnemental. Selon les conditions considérées, l'une devient avantageuse par rapport à l'autre.

Cependant, la question du choix des chaussées flexibles et rigides est loin d'être réglée. La plupart des ingénieurs de chaussées ont été interrogés d'innombrables fois « quel type de chaussée est le meilleur : l'enrobé ou le béton? » La réponse est "ça dépend ; quelle réponse voulez-vous entendre ? " Bien que cette réponse puisse sembler facétieuse, les particuliers ou les organismes ayant des intérêts particuliers dans les chaussées en enrobé peuvent donner une réponse définitive qui favorise leurs intérêts, et bien sûr, il en va de même pour ceux qui ont des intérêts particuliers dans les chaussées en béton de ciment Portland (PCC) (Ralph Haas, 2001).

Les émissions peuvent varier régionalement et localement, également en raison de différents types d'entrée énergétiques et de technologies utilisées, de réglementations environnementales

plus strictes et d'autres raisons. Par conséquent, il est important que les impacts environnementaux de la production de matériaux de construction soient analysés à l'aide de données aux niveaux géographiques appropriés afin d'éviter des généralisations incorrectes (Horvath, 2004).

3.6 Méthodologie

La méthodologie de cette étude environnementale s'est déroulée en plusieurs étapes telles que décrites ci-après. Elle a d'abord consisté à la recherche des données sur le tronçon de route étudié comprenant trois sections homogènes, et au dimensionnement structural des solutions selon les options de chaussées en béton armé continu ou en enrobé bitumineux. Les sections considérées sont homogènes par rapport au trafic, à la géométrie et à la nature des sols. Le dimensionnement effectué par la méthode du catalogue des structures types de chaussées neuves de 1998 du SETRA-LCPC a été validé à l'aide du logiciel Alizé-LCPC v1.3. L'étude des impacts environnementaux est faite sur le cycle de vie de la chaussée en utilisant le logiciel HDM-4 v2.0 pour la phase d'exploitation, en complément du logiciel-Eco comparateur Écorce 2.0 pour les phases matériaux et construction. Ces deux logiciels travaillent de façon complémentaire.

La consommation énergétique ainsi que les émissions de gaz à effet de serre sont calculées phase par phase, aux fins de comparaison des options de chaussées sur chacune des phases du cycle de vie en prenant en compte la mobilisation des ressources notamment les matériaux, la construction de l'ouvrage, l'exploitation et l'entretien. L'analyse globale des deux options de chaussée est ensuite faite sur l'ensemble des phases pour déterminer les impacts globaux reliés à la consommation énergétique et aux émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie.

3.6.1 La recherche des données

Les données nécessaires à l'étude sont d'une part, les données techniques à utiliser pour le dimensionnement structural des deux options de chaussées et d'autre part, les données environnementales se rapportant aux matériaux sur les différentes phases du cycle de vie. Ces

données sont ensuite utilisées avec les logiciels Alizé V1.3, Écorce 2.0 et HDM-4. Les principales données à rechercher pour le modèle Alizé V1.3 sont la nature des sols, le débit moyen journalier annuel (DJMA), les caractéristiques géométriques de la chaussée, les matériaux utilisés et leur propriétés. Pour le modèle Écorce 2.0, il faut les détails des matières premières nécessaires, les distances de transport et d'acheminement des carrières vers les usines puis vers le chantier, l'utilisation des engins, etc. Les données spécifiques au modèle HDM-4 se rapportent principalement à la flotte de véhicule, au nombre de véhicules par type de véhicule, aux normes d'entretien et diverses données essentiellement locales (climat, économie, etc).

Les données techniques pour la conception et le dimensionnement structural sont récoltées auprès des grandes firmes locales de construction selon les dossiers d'appels d'offres sur des projets similaires.

Les données environnementales sont obtenues d'une part, à l'aide d'une revue de littérature et d'autre part, à travers les rencontres avec les responsables de l'industrie locale de la construction pour la production des matériaux des types de chaussées étudiés.

3.6.2 Les outils utilisés

3.6.2.1 Le catalogue des chaussées SETRA-LCPC 1998 et le logiciel Alizé-LCPC V1.3

Le dimensionnement structural des deux options de chaussées sur les trois sections homogènes est effectué à l'aide du catalogue des chaussées des structures types de chaussées neuves de 1998 du Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes et du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (SETRA-LCPC), en France.

Le dimensionnement obtenu a ensuite été optimisé à l'aide du logiciel Alizé du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) afin de retenir la solution qui supporte un important trafic de poids lourds et les contraintes mécaniques associées.

3.6.2.2 Le logiciel ECORCE 2.0

Le logiciel ECORCE 2.0 de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) est par excellence un éco-comparateur. Tel qu'indiqué au chapitre 3.4, il est non seulement compatible sur le plan de la réglementation acceptée dans la zone d'étude mais aussi il offre la possibilité de calculer un plus grand nombre d'indicateurs environnementaux. Basé sur la méthodologie du cycle de vie des chaussées, il permet le calcul des indicateurs environnementaux des deux options de chaussées de l'étude. Les indicateurs dont l'effet est global, sont interprétés et analysés. Selon M. Dauvergne et al. (2013), les indicateurs calculés ne sont que la représentation d'une pression exercée sur l'environnement par différentes solutions techniques. Pour un même indicateur, la valeur n'a de sens que comparativement (une technique par rapport à une autre) (M. Dauvergne et al., 2013). La pression totale exercée sur l'environnement sera obtenue par la somme des pressions de chaque indicateur calculé ayant un effet global et pour chaque option de chaussée. Les deux options de chaussées étudiées sont ensuite comparées par rapport aux effets globaux qu'elles engendrent. Ces effets globaux sont représentés dans les graphiques à la section « Résultats et analyses » pour les phases matériaux et construction.

3.6.2.3 Le logiciel HDM-4 v2.0

Le logiciel HDM-4 v2.0 de l'Association mondiale de la route (AIPCR), parrainé par la Banque Mondiale, est le plus approprié pour la gestion des chaussées dans les pays en voie de développement et particulièrement en Afrique subsaharienne en l'état actuel de l'avancement des technologies. Bien qu'étant avant tout un outil d'analyse économique, il permet, entre autres, la détermination des impacts environnementaux ayant un effet global, en fournissant le bilan énergétique et en quantifiant les émissions de gaz à effet de serre lors de la phase d'utilisation de la chaussée. Les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie

sont analysées pour les deux options de chaussées. La pression totale recherchée aux fins de comparaison est la somme des impacts de chaque indicateur pour chaque option. Ces effets globaux sont représentés dans les graphiques à la section « Résultats et analyses » pour la phase d'exploitation.

3.6.2.4 Les hypothèses

a) Les données du dimensionnement des chaussées

Le Tableau 3.2 présente les trois sections homogènes et leurs caractéristiques. Le dimensionnement préalablement effectué est récapitulé dans les Tableaux 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 et 3.10 pour chacune des trois sections avec la prise en compte d'une augmentation annuelle du trafic des poids lourds tel qu'indiqué au Tableau 3.3. Le Tableau 3.4 quant à lui, donne les propriétés des matériaux des structures de chaussées.

Tableau 3.2 Sections homogènes

SECTIONS HOMOGÈNES	BANCO- GESCO	GESCO- ATTINGUIE	ATTINGUIE- PK50
LONGUEUR (km)	7	18	25
LARGEUR (m)	23	16	16
TYPE	2 x 3 voies	2 x 2 voies	2 x 2 voies
DJMA	70 000	53 375	43 750

Tableau 3.3 Hypothèses sur le pourcentage de poids lourds (véhicules / jours)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BANCO-GESCO	750	3500	6300	9100	11900	14700
GESCO-ATTINGUIÉ	534	2669	4804	6939	9074	11209
ATTINGUIÉ-PK50	438	2188	3938	5688	7488	9188

Tableau 3.4 Propriétés des matériaux

Matériaux	E (MPa)	nu	Epsi 6 (10°C)	Sigma6 (MPa)	-1/b	SN
EB	5400	0,35	100	N/A	5	0,25
GB3	9300	0,35	90	N/A	5	0,30
BC5	35000	0,25	N/A	2,15	16	1
BC2	20000	0,25	N/A	1,37	14	1

EB : Enrobé bitumineux; GB3 : Grave bitume de classe 3

BC5 : Béton de ciment de classe 5; BC2 : Béton de ciment de classe 2

-Section 1 : Banco-Gesco

Tableau 3.5 Épaisseur des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EB (cm)	8	9	9	9	9	10
GB3 (cm)	15	20	20	20	20	22
GB3 (cm)	15	20	20	20	20	22

Tableau 3.6 Épaisseur des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BAC (cm)	18	18	20	20	20	20
BC2 (cm)	18	18	20	20	20	20

-Section 2 : Gesco-Attinguié

Tableau 3.7 Épaisseur des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EB (cm)	8	9	9	9	9	10
GB3 (cm)	13	18	18	20	20	20
GB3 (cm)	13	18	18	20	20	20

Tableau 3.8 Épaisseur des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BAC (cm)	16	18	18	20	20	20
BC2 (cm)	18	18	18	20	20	20

-Section 3 : Attinguié-PK50

Tableau 3.9 Épaisseur des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EB (cm)	8	9	9	9	9	10
GB3 (cm)	13	18	18	18	20	20
GB3 (cm)	13	18	18	18	20	20

Tableau 3.10 Épaisseur des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BAC (cm)	16	18	18	20	20	20
BC2 (cm)	18	18	18	20	20	20

b) Les données des distances de transport et de fabrication des matériaux

Les hypothèses établies pour la production des matériaux, la fabrication des matériaux composites et l'acheminement sont indiquées respectivement pour la chaussée en béton armé continu et la chaussée en enrobé dans les Tableaux 3.11 et 3.12. Ces distances de transport sont effectuées par voie routière. Elles constituent des données d'entrée de l'outil ECORCE 2.0.

Tableau 3.11 Données de transport pour l'option de chaussée en BAC

OPTION BÉTON ARMÉ CONTINU (BAC)			
Parcours	Distance (km)		
	BANCO- GESCO	GESCO- ATTINGUIE	ATTINGUIE- PK50
Acheminement de l'acier au chantier	20	35	50
Centrale béton à chantier	20	10	20
Carrière de granulats à centrale	15	15	15
Acheminement du ciment à la centrale	20	20	20

Tableau 3.12 Données de transport pour l'option de chaussée en EB

OPTION ENROBÉ BITUMINEUX (EB)			
Parcours	Distance (km)		
	BANCO- GESCO	GESCO- ATTINGUIE	ATTINGUIE- PK50
Distance acheminement bitume à centrale	20	20	20
Carrière de granulats à centrale	70	70	70
Distance acheminement bitume de centrale à chantier	50	65	80

c) Les normes d'entretien des deux options de chaussées

L'application du HDM-4 nécessite une alternative de base pour comparer les deux options : en enrobé bitumineux et en béton armé continu. Ainsi les trois alternatives suivantes sont considérées :

- Alternative de base : Route en graveleux latéritique (GL)

- Alternative 1 : Route en enrobé bitumineux (EB ou AC)
- Alternative 2 : Route en béton armé continu (BAC ou CRCP)

Les normes d'entretien de ces trois alternatives sont données dans les Tableaux 3.13 à 3.15.

Tableau 3.13 Normes d'entretien de la chaussée en graveleux latéritique (GL)

Option	Types de travaux	Critères
1	Rechargement à 50 mm	Epaisseur de grave ≤ 100 mm Intervalle ≥ 5 , ≤ 99 ans
2	Reprofilage tous les 6 mois	Intervalle ≥ 360 jours
3	Point à temps quand ép. < 100 mm	Epaisseur de grave ≤ 150 mm Intervalle ≥ 2 , ≤ 99 ans Quantité maximum ≤ 150 m ³ /Km/An

Tableau 3.14 Normes d'entretien de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)

Option	Opération de travaux	Critères
1	Reconstruction à 10 IRI	Uni ≥ 10 IRI
2	Rechargement 50 mm à 6 IRI	Uni ≥ 6 IRI et Uni ≤ 10 IRI Intervalle ≥ 5 Ans
3	Enduit à 15 % fissuration	Fissuration totale ≥ 15 % Intervalle ≥ 5 ans, Uni ≤ 10 IRI
4	Réparation nids de poules	Nids de poules ≥ 50 nb / Km Intervalle ≥ 1 , ≤ 99 ans, Uni $\leq 12,5$ IRI

Tableau 3.15 Normes d'entretien de la chaussée en béton armé continu (BAC)

Option	Opération de travaux	Critères
1	Rechargement en béton collé	Uni ≥ 6 IRI
2	Réparation en pleine épaisseur	Uni ≥ 4 IRI
3	Dépendances	Intervalle ≥ 1 , ≤ 99 ans

3.6.3 Le modèle ECORCE-HDM-4

Le logiciel HDM-4 v2.0 et le logiciel ECORCE 2.0 sont utilisés pour évaluer les impacts environnementaux de toutes les phases du cycle de vie de la chaussée.

En effet, le logiciel ECORCE 2.0 détermine les impacts environnementaux sur les phases matériaux et construction, alors que le logiciel HDM-4 détermine la consommation d'énergie (soit la consommation de carburant des véhicules) et les émissions de gaz à effet de serre émises par ces véhicules pendant la phase d'exploitation de la chaussée. La durée du cycle de vie adoptée est de 20 ans pour les chaussées de la région. La Figure 3.3 présente les phases du cycle de vie d'une chaussée.

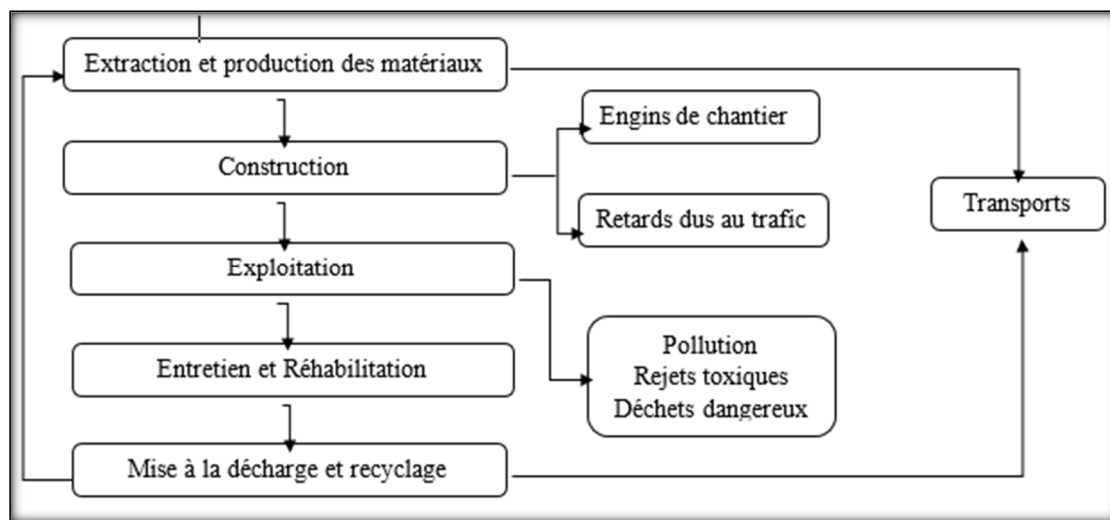


Figure 3.3 Cycle de vie type des chaussées
Adaptée de Kunhee, Hyun Woo, Zhuting, Lavy, et Boong Yeol (2016)

L'étude des impacts environnementaux proposée dans cet article, va au-delà de la phase exploitation généralement étudiée dans les études rencontrées dans la revue de littérature, et comprend les premières phases du cycle de vie à savoir celles relatives à l'extraction des matériaux, et à leur fabrication ainsi qu'à la construction. Les phases étudiées sont représentées à la Figure 3.4.

D'une façon générale, les activités liées à chaque phase du cycle de vie, sont détaillées comme suit, pour ce qui concerne principalement les impacts environnementaux en considérant la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre :

Extraction des matériaux et production :

Cela comprend les opérations exécutées par les véhicules motorisés du lieu d'extraction des matières premières (la carrière) au lieu de fabrication des matériaux (les usines).

Construction :

Cela comprend les opérations exécutées par les véhicules motorisés pour la construction de la route et des délais de trafic occasionnés ainsi que les transports nécessaires.

Utilisation :

Cela comprend la prise en compte du trafic roulant sur la chaussée durant la durée du cycle de vie.

Entretien et réhabilitation :

Cette phase prend en compte les impacts de toutes les activités liées à l'entretien et à la réhabilitation durant la période du cycle de vie.

Mise à la décharge et recyclage :

Cette dernière phase comprend les activités effectuées dans le cadre du recyclage des matériaux en place en vue de leur réutilisation ou tout simplement de leur dépôt à la décharge. Cette phase n'est pas étudiée dans cet article.

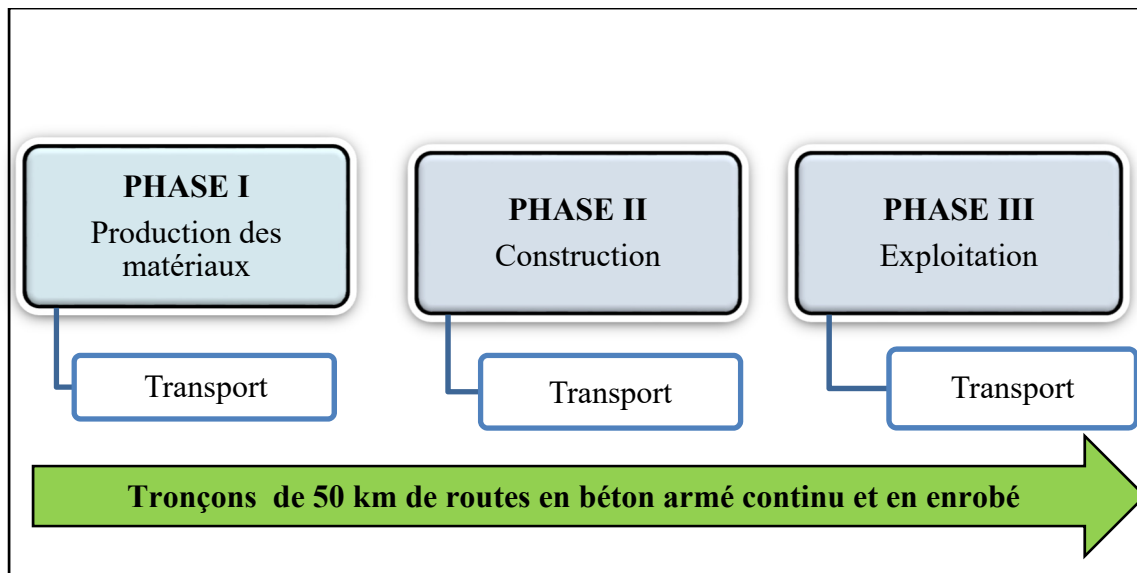


Figure 3.4 Phases du cycle de vie étudiées

3.6.4 Les limites de l'étude

Les logiciels utilisés comportent des limites :

- L'épuisement des ressources naturelles extraites pour la construction n'est pas prise en compte ;
- Les distances de parcours pour les matières premières importées de l'étranger (pétrole, clinker, acier, etc.) sont mesurées du port d'arrivée jusqu'à la centrale de fabrication ;
- Les données sont fonction du contexte locale et des technologies utilisées et cela ne permet pas de généraliser les conclusions de l'étude à d'autres régions du monde;
- L'étude concerne les facteurs environnementaux qui ont un effet global et non régional sur le réchauffement de la planète. Seules les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie sont prises en compte sur les phases du cycle de vie étudiées. Ainsi, le logiciel HDM-4 v2.0 permet l'évaluation des impacts de sept émissions polluantes (HC, CO, NOx, SO2, CO2, PM et Pb) sur la phase d'exploitation tandis que le logiciel ECORCE 2 est limité aux phases matériaux et construction et permet par ailleurs de quantifier l'impact environnemental de ces mêmes émissions.

3.7 Résultats et analyse

Les résultats des trois phases étudiées sont présentés dans cette section.

3.7.1 Phase de production des matériaux de construction

Les résultats, relatifs à l'extraction et à la fabrication des matériaux, de cette section sont obtenus à l'aide du logiciel ECORCE 2.0 qui traite les phases matériaux et construction. Pour chaque option de chaussée et pour chaque niveau de trafic des poids lourds qui correspond à une structure de chaussée préalablement établie, l'impact global tel que présenté dans les histogrammes est la somme de toutes les émissions des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique de la planète. De même, pour chaque niveau de trafic de poids lourds, la consommation totale d'énergie est la somme de toutes les consommations d'énergie des opérations faites au cours de chaque phase. Les histogrammes des sommes totales à chaque niveau de trafic de poids lourds sont établis pour les deux options de chaussée aux fins de comparaison.

Le logiciel ECORCE 2.0 utilise les données de transport et les épaisseurs des couches de chaussée correspondantes à chaque niveau de trafic de poids lourds. L'épaisseur des couches varie avec l'augmentation annuelle du trafic des poids lourds et il en est de même pour la quantité des matériaux à produire.

3.7.1.1 Section Banco-Gesco

Les Figures 3.5 et 3.6 représentent respectivement les émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie pour chaque cas de pourcentage de poids lourds.

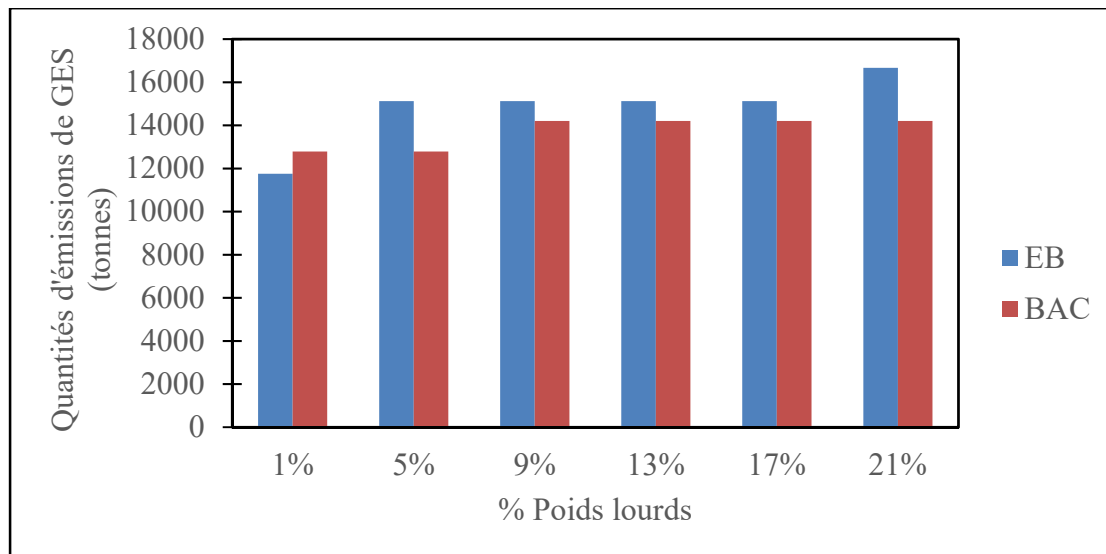


Figure 3.5 Émissions de GES pour la Section Banco-Gesco-Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

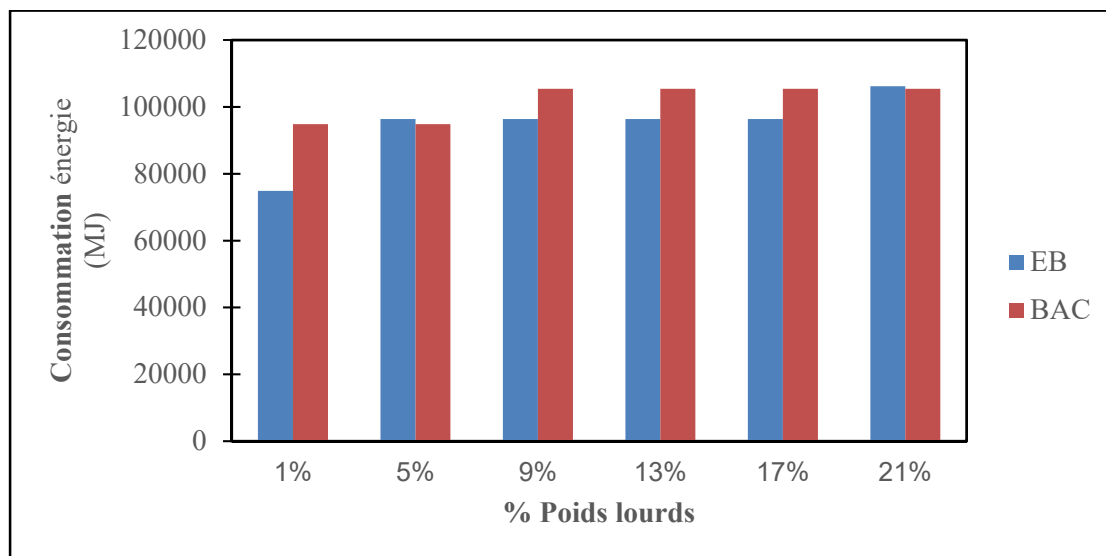


Figure 3.6 Consommation d'énergie pour la Section Banco-Gesco-Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

En prenant comme solution de référence l'option en enrobé bitumineux (EB), le niveau de l'option en béton armé continu (BAC) est le rapport indiqué dans les Tableaux 3.16 et 3.17, respectivement pour les émissions de GES et la consommation d'énergie. Ce rapport est obtenu

en divisant les valeurs totales des émissions de GES ou de la consommation d'énergie de l'option BAC par celles de l'option EB. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option EB à l'option BAC.

Pour les émissions de GES, on observe que le rapport des valeurs de la solution BAC sur celles de la solution EB est d'environ 1, selon le Tableau 3.16. Pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds), les émissions de GES du BAC baissent d'environ 15 % par rapport à celles de la chaussée en EB. À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds), les émissions de GES de la chaussée en BAC augmentent d'environ 9 % par rapport à celles de la chaussée en EB. Dans l'intervalle de 5 à 17 %, la solution en EB est plus polluante que la solution en BAC.

Pour la consommation d'énergie, on observe que le rapport est d'environ 1 pour les différents niveaux de trafic, tel qu'indiqué au Tableau 3.17. Toutefois pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds), la consommation d'énergie de la chaussée en BAC augmente d'environ 27 % par rapport à la consommation d'énergie de la chaussée en EB.

En comparant les deux options de chaussée, on observe d'une part que le volume d'émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie engendrés par l'option BAC baissent avec l'augmentation du trafic des poids lourds. D'autre part, pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds), la chaussée en EB génère des quantités d'émissions de GES et une consommation d'énergie moins importantes. Il est donc constaté que la chaussée en béton armé continue se comporte mieux que la chaussée en enrobé pour les trafics lourds élevés. À l'inverse, la chaussée en enrobé bitumineux se comporte mieux que la chaussée en béton armé continu pour les trafics faibles lourds.

Tableau 3.16 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	1,09	0,85	0,94	0,94	0,94	0,85
Taux %	8,8	-15,5	-6,1	-6,1	-6,1	-14,8

Tableau 3.17 Comparaison de la consommation d’énergie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	1,27	0,98	1,09	1,09	1,09	0,99
Taux %	26,7	-1,5	9,4	9,4	9,4	-0,7

3.7.1.2 Section Gesco-Attinguié

Dans cette section, les Figures 3.7 et 3.8 représentent respectivement les émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d’énergie pour chaque cas de pourcentage de poids lourds.

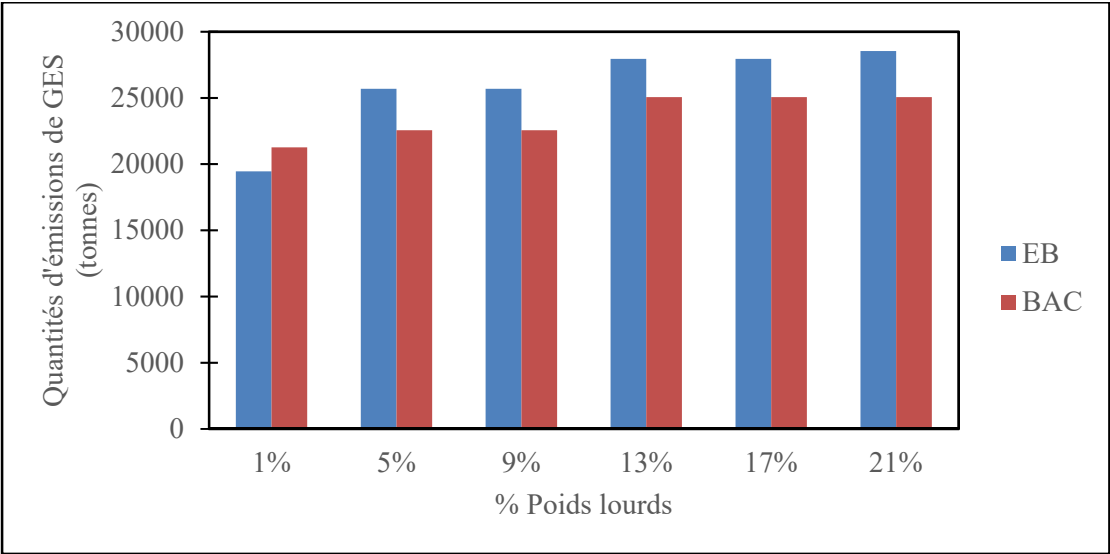


Figure 3.7 Émissions de GES pour la Section Gesco-Attinguié – Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

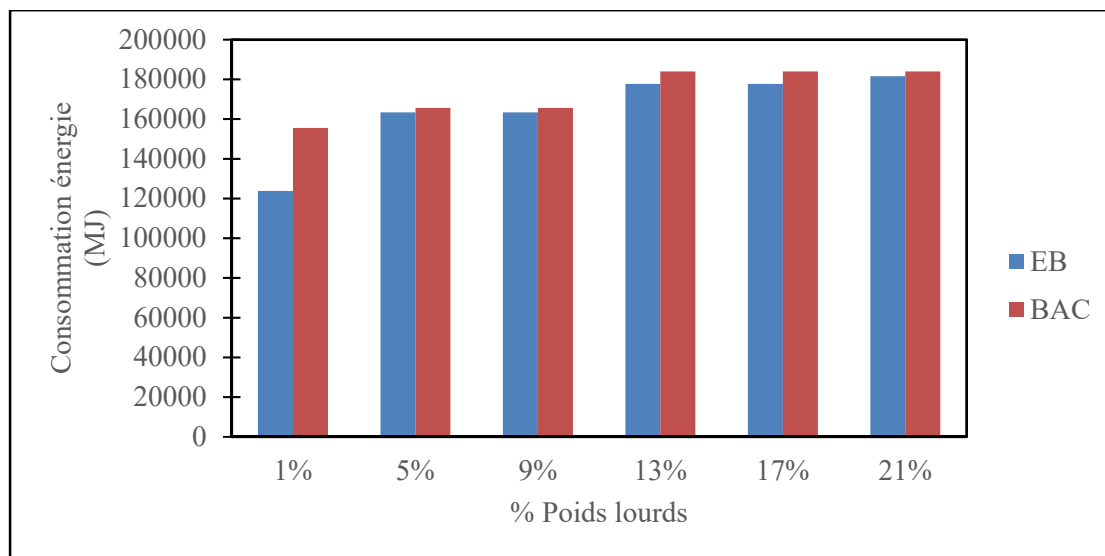


Figure 3.8 Consommation d'énergie pour la Section Gesco-Attinguié – Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

Comme à la section précédente, en prenant comme solution de référence l'option en enrobé bitumineux (EB), le niveau de l'option en béton armé continu (BAC) est le rapport indiqué dans les Tableaux 3.18 et 3.19, respectivement pour les émissions de GES et la consommation d'énergie. Ce rapport est obtenu en divisant les valeurs totales des émissions de GES ou de la consommation d'énergie de l'option BAC par celles de l'option EB. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option EB à l'option BAC.

Pour les émissions de GES, on observe que le rapport des valeurs de la solution BAC sur celles de la solution EB est d'environ 0,9, selon le Tableau 3.18. Pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds), les émissions de GES du BAC baissent d'environ 12 % par rapport à celles de la chaussée en EB. À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds), les émissions de GES de la chaussée en BAC augmentent d'environ 9 % par rapport à celles de la chaussée en EB. Dans l'intervalle de 5 à 17 %, la solution en EB est plus polluante que la solution en BAC.

Pour la consommation d'énergie, on observe que le rapport est d'environ 1 pour les différents niveaux de trafic, tel qu'indiqué au Tableau 3.19. Toutefois pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds), la consommation d'énergie de la chaussée en BAC augmente d'environ 26 % par rapport à la consommation d'énergie de la chaussée en EB. De 5 à 21 %, la consommation de la solution en BAC est légèrement supérieure à celle de la solution en EB.

En comparant les deux options de chaussée, on observe d'une part que l'option en BAC engendre des émissions de gaz à effet de serre et une consommation d'énergie qui baissent avec l'augmentation du trafic des poids lourds. D'autre part, pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds), la chaussée en EB génère des émissions de GES et une consommation d'énergie moins élevées que celles de la chaussée en BAC. Il est constaté également dans cette section que la chaussée en béton armé continu se comporte mieux que la chaussée en enrobé pour les trafics lourds élevés. À l'inverse, la chaussée en enrobé bitumineux se comporte mieux que la chaussée en béton armé continu pour les trafics faibles lourds.

Tableau 3.18 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
Rapport	1,09	0,88	0,88	0,9	0,8	0,88
Taux %	9,28	-12,19	-12,19	-10,3	-10,3	-12,19

Tableau 3.19 Comparaison de la consommation d'énergie

% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
Rapport	1,26	1,01	1,01	1,04	1,04	1,01
Taux %	25,66	1,36	1,36	3,56	3,56	1,36

3.7.1.3 Section Attinguié-PK50

Dans cette section, les Figures 3.9 et 3.10 représentent respectivement les émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie pour chaque cas de pourcentage de poids lourds.

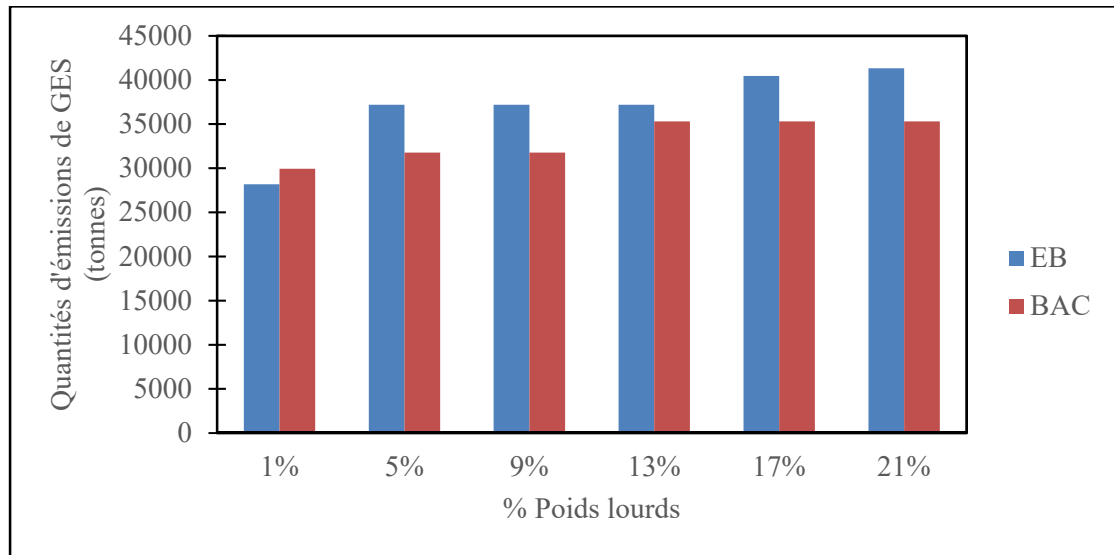


Figure 3.9 Émissions de GES pour la Section Attinguié-PK50 – Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

production

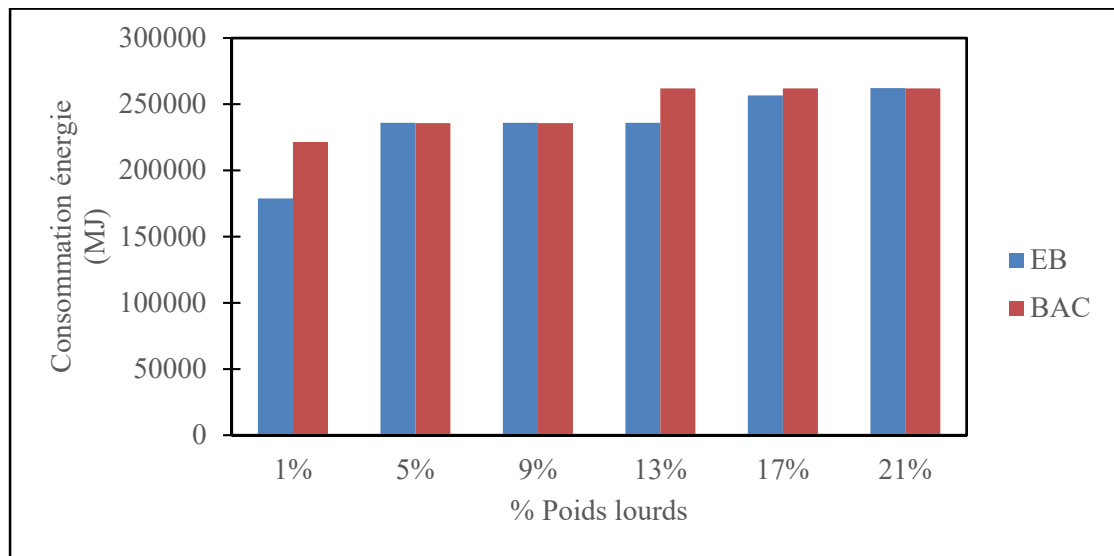


Figure 3.10 Consommation d'énergie pour la Section Attinguié-PK50 – Phase de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

Suivant la même démarche que les sections précédentes, en prenant comme solution de référence l'option en enrobé bitumineux (EB), le niveau de l'option en béton armé continu

(BAC) est le rapport indiqué dans les Tableaux 3.20 et 3.21, respectivement pour les émissions de GES et la consommation d'énergie. Ce rapport est obtenu en divisant les valeurs totales des émissions de GES ou de la consommation d'énergie de l'option en BAC par celles de l'option en EB. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option EB à l'option BAC.

Pour les émissions de GES, on observe que le rapport des valeurs de la solution BAC sur celles de la solution EB est d'environ 0,9, selon le Tableau 3.20. Pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds), les émissions de GES du BAC baissent d'environ 15 % par rapport à celles de la chaussée en EB. À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds), les émissions de GES de la chaussée en BAC augmentent d'environ 6 % par rapport à celles la chaussée en EB. Dans l'intervalle de 5 à 17 %, la solution en EB est plus polluante que la solution en BAC.

Pour la consommation d'énergie, on observe que le rapport est d'environ 1 pour les différents niveaux de trafic tel qu'indiqué au Tableau 21. Toutefois pour les trafics lourds faibles (1% de poids lourds), la consommation d'énergie de la chaussée en BAC augmente d'environ 24 % par rapport à la consommation d'énergie de la chaussée en EB. De 5 à 21 %, la consommation de la solution en BAC est légèrement supérieure à celle de la solution en EB.

En comparant les deux options de chaussée, on observe d'une part que l'option BAC engendre des émissions de GES et une consommation d'énergie qui baissent avec l'augmentation du trafic des poids lourds. D'autre part, pour les trafics lourds faibles (1% de poids lourds), la chaussée en EB génère des émissions de GES et une consommation d'énergie moins élevées que celles de la chaussée en BAC. Il est constaté également dans cette section que la chaussée en béton armé continue se comporte mieux que la chaussée en enrobé pour les trafics lourds élevés. À l'inverse, la chaussée en enrobé bitumineux se comporte mieux que la chaussée en béton armé continu pour les trafics faibles lourds.

Tableau 3.20 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
Rapport	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Taux %	6,2	-14,6	-14,6	-5,1	-12,8	-14,6

Tableau 3.21 Comparaison de la consommation d'énergie

% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
Rapport	1,24	1	1	1,11	1,02	1
Taux %	23,9	-0,1	-0,1	11	2,1	-0,1

3.7.2 Phase de construction

3.7.2.1 Section Banco-Gesco

Les Figures 3.11 et 3.12 représentent respectivement la production d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie.

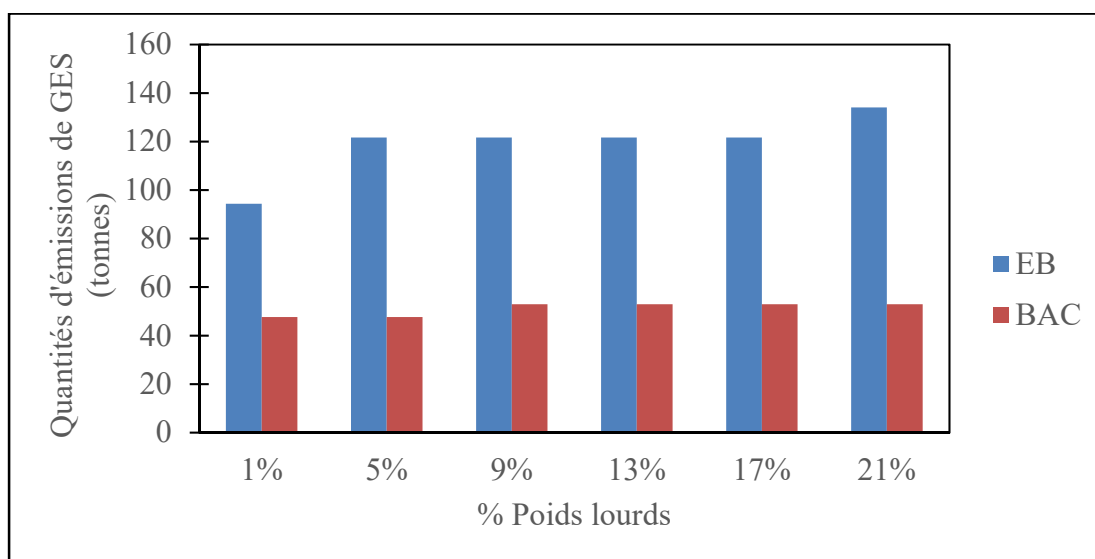


Figure 3.11 Émissions de GES pour la Section Banco-Gesco-Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)

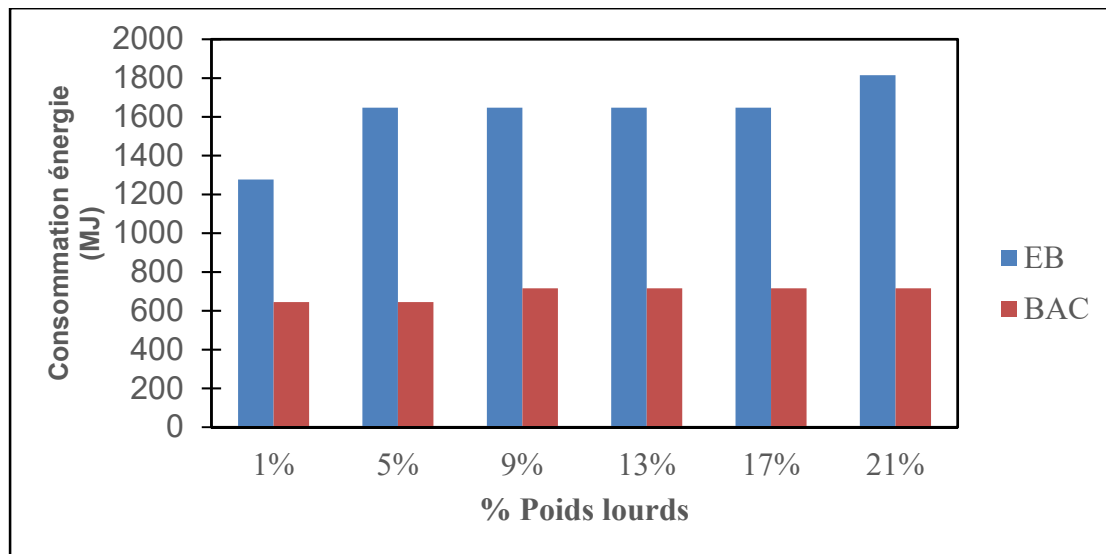


Figure 3.12 Consommation d'énergie pour la Section Banco-Gesco-
Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)

En considérant la solution en EB comme étant la solution de référence, on obtient les rapports et les taux calculés dans les Tableaux 3.22 et 3.23. Le rapport moyen entre la chaussée en béton armé continu et la chaussée en enrobé est de 0,4 et les émissions de GES comparées sont de -57 % pour la solution en béton armé continu par rapport à la chaussée en enrobé bitumineux. On obtient les mêmes résultats pour la consommation d'énergie. Le couple moyen (rapport, taux) est (0,4, -57 %) aussi bien pour les émissions de GES que pour la consommation d'énergie. La solution en béton armé continu prend l'avantage sur la solution en enrobé bitumineux.

Tableau 3.22 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
Rapport	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Taux %	-50	-61	-57	-57	-57	-61

Tableau 3.23 Comparaison de la consommation d'énergie

% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
Rapport	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Taux %	-50	-61	-57	-57	-57	-61

3.7.2.2 Section Gesco-Attingué

Les Figures 3.13 et 3.14 représentent respectivement la production d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie.

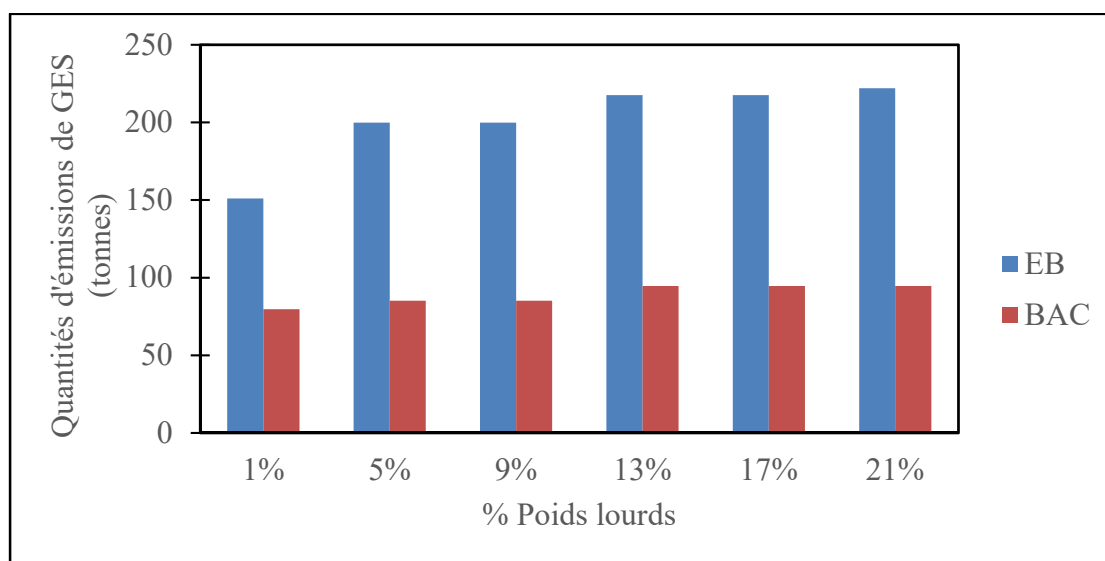


Figure 3.13 Émissions de GES pour la Section Gesco-Attingué-
Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)

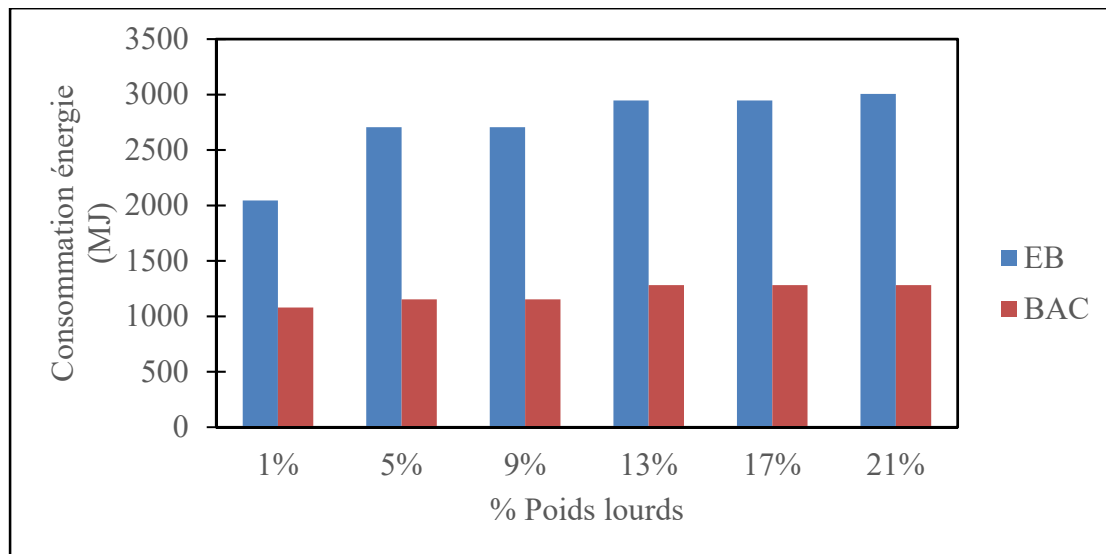


Figure 3.14 Consommation d'énergie pour la Section Gesco-Attinguié-Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)

En adoptant la chaussée en enrobé bitumineux comme étant la solution de référence, on obtient les rapports et les taux calculés dans les Tableaux 3.24 et 3.25. Le rapport moyen entre la chaussée en béton armé continu et la chaussée en enrobé bitumineux est de 0,5 et les émissions de GES sont réduites de 50 % pour la solution en béton armé continu. Les résultats obtenus gardent la même tendance pour la consommation d'énergie. Le couple moyen (rapport, taux) est (0,5, 50 %) aussi bien pour les émissions de GES que pour la consommation d'énergie. La solution en béton armé continu prend l'avantage sur la solution en enrobé bitumineux.

Tableau 3.24 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
Rapport	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Taux %	-47	-57	-57	-57	-57	-57

Tableau 3.25 Comparaison de la consommation d'énergie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Taux %	-47	-57	-57	-57	-57	-57

3.7.2.3 Section Attinguié-PK50

Les Figures 3.15 et 3.16 représentent respectivement la production d'émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie.

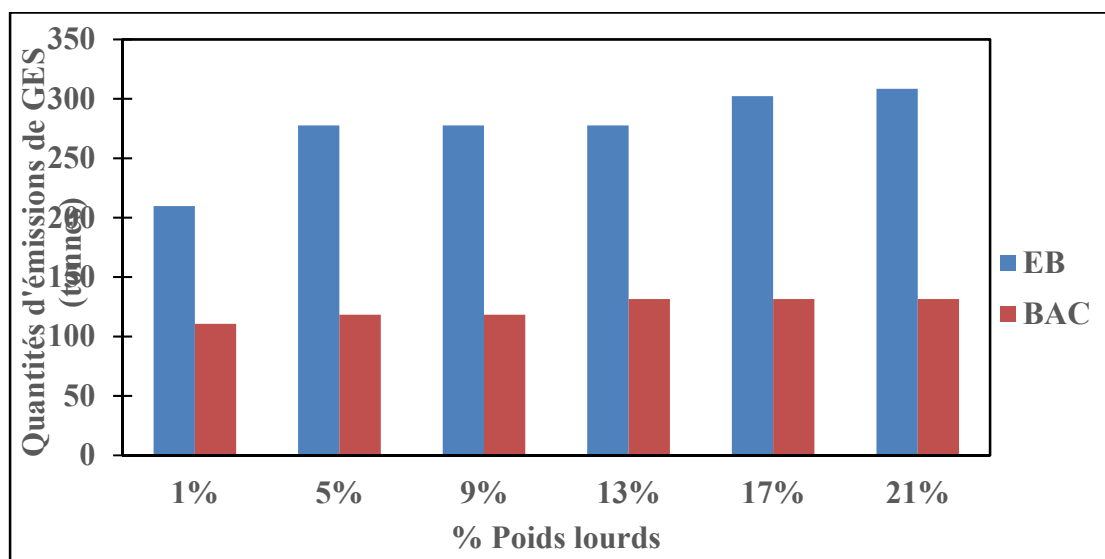


Figure 3.15 Émissions de GES pour la Section Attinguié-PK50-
Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)

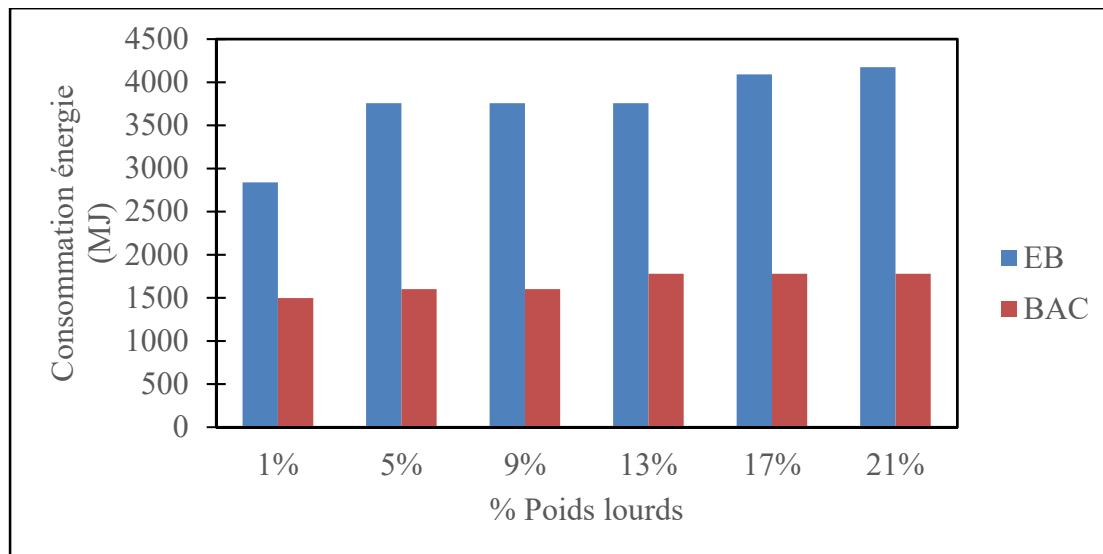


Figure 3.16 Consommation d'énergie pour la Section Attinguié-PK50-
Phase de construction (logiciel ECORCE 2.0)

En adoptant la chaussée en enrobé bitumineux comme étant la solution de référence, on obtient les rapports et les taux calculés dans les Tableaux 3.26 et 3.27. Le rapport moyen entre la chaussée en béton armé continu et la chaussée en enrobé bitumineux est de 0,5 et les émissions de GES sont réduites de 50 % pour la solution en béton armé continu. On obtient les mêmes résultats pour la consommation d'énergie. Le couple moyen (rapport, taux) est (0,5, 50 %) aussi bien pour les émissions de GES que pour la consommation d'énergie. La solution en béton armé continu prend l'avantage sur la solution en enrobé bitumineux.

Tableau 3.26 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
Rapport	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Taux %	-47	-57	-57	-57	-57	-57

Tableau 3.27 Comparaison de la consommation d'énergie

% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
Rapport	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Taux %	-47	-57	-57	-53	-57	-57

3.7.3 Phase d'exploitation

Les résultats de cette section sont obtenus à l'aide du logiciel HDM-4 v2.0 qui traite la phase d'exploitation. Pour chaque option de chaussée (enrobé bitumineux ou béton armé continu) et pour chaque niveau de trafic des poids lourds qui correspond à une structure de chaussée préalablement établie, l'impact global tel que présenté dans les histogrammes est la somme de toutes les émissions des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique de la planète. La somme de toutes les consommations d'énergie des opérations faites dans cette phase donne également l'impact global donné par l'histogramme relatif à la consommation d'énergie et pour chaque niveau de variation du trafic des poids lourds.

Le logiciel HDM-4 v2.0 utilise les données de trafic, du dimensionnement de la structure de chaussée correspondant à chaque niveau de trafic de poids lourds et des normes d'entretien.

3.7.3.1 Section Banco-Gesco

Les Figures 3.17 et 3.18 représentent respectivement la production d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie.

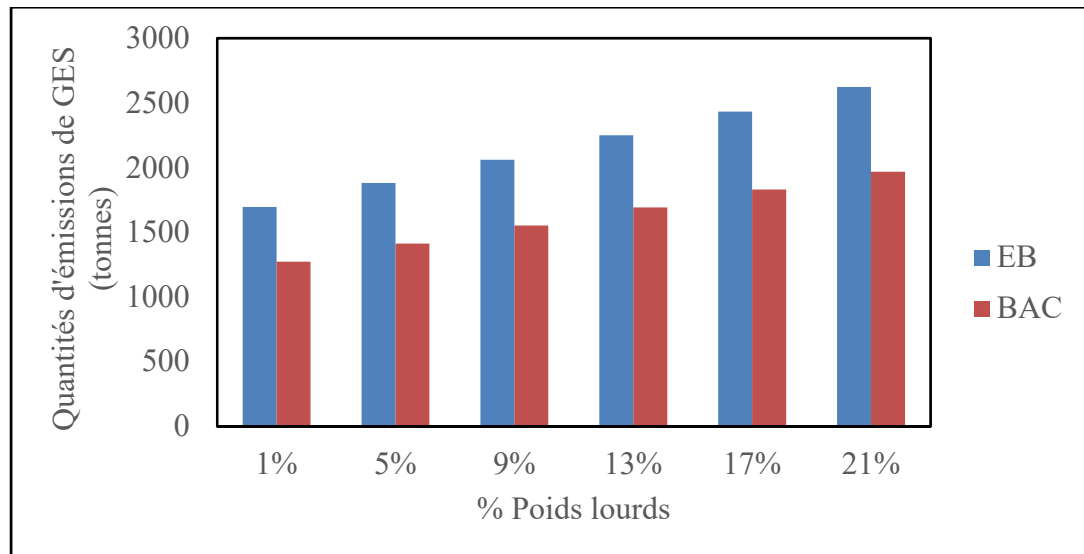


Figure 3.17 Émissions polluantes pour la Section Banco-Gesco-
Phase d'exploitation (logiciel HDM-4)

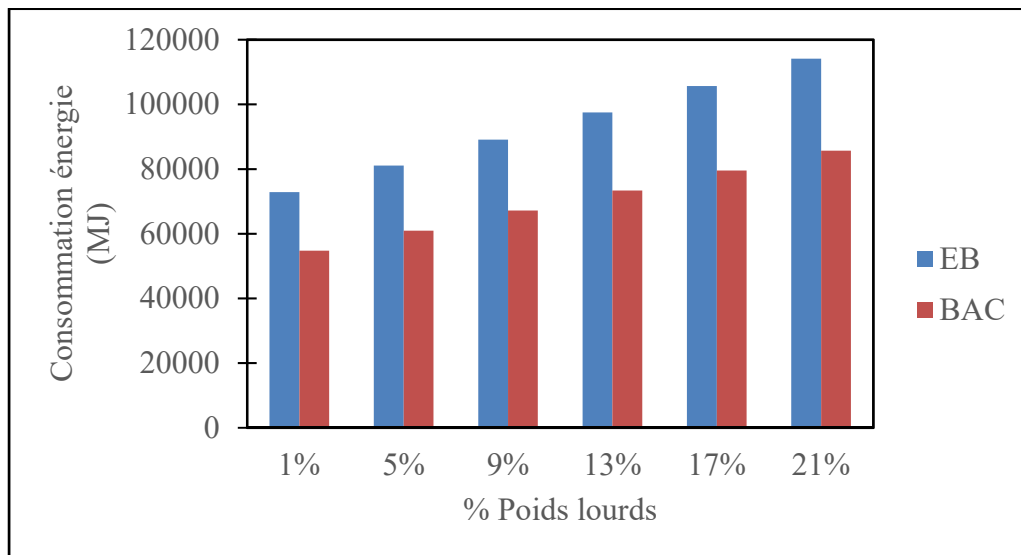


Figure 3.18 Consommation d'énergie pour la Section Banco-Gesco-
Phase d'exploitation (logiciel HDM-4)

Comme pour les phases précédentes, en prenant comme solution de référence l'option en enrobé bitumineux (EB), le niveau de l'option en béton armé continu (BAC) est le rapport indiqué dans les Tableaux 3.28 et 3.29, respectivement pour les émissions de GES et la consommation d'énergie. Ce rapport est obtenu en divisant les valeurs totales des émissions de GES ou de la consommation d'énergie de l'option en BAC par celles de l'option en EB. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option en EB à l'option en BAC.

Pour les émissions de GES, on observe que le rapport des valeurs de la solution BAC sur celles de la solution EB est d'environ 0,75, selon le Tableau 28.

Pour la consommation d'énergie, on observe que le rapport est d'environ 0,75 pour les différents niveaux de trafic tel qu'indiqué au Tableau 3.29.

En comparant les deux options de chaussée, on observe d'une part que l'option en BAC engendre des émissions de gaz à effet de serre et une consommation d'énergie inférieures d'environ 25 % à celles de l'option en EB, quel que soit le pourcentage de poids lourds. Sur le cycle de vie de 20 ans, il est constaté dans cette section que la chaussée en béton armé continue se comporte mieux que la chaussée en enrobé bitumineux.

Tableau 3.28 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
Rapport	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Taux %	-24,9	-24,9	-24,6	-24,8	-24,8	-25,0

Tableau 3.29 Comparaison de la consommation d'énergie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Taux %	-24,8	-24,9	-24,6	-24,7	-24,7	-24,9

3.7.3.2 Section Gesco-Attingué

Les Figures 3.19 et 3.20 représentent respectivement la production d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie.

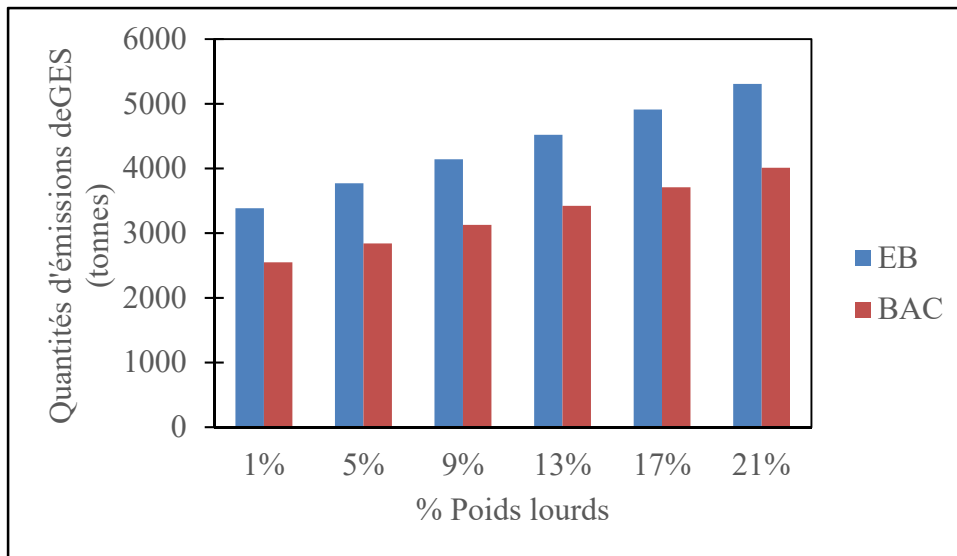


Figure 3.19 Émissions de GES pour la Section Gesco-Attinguié-Phase d'exploitation (logiciel HDM-4)

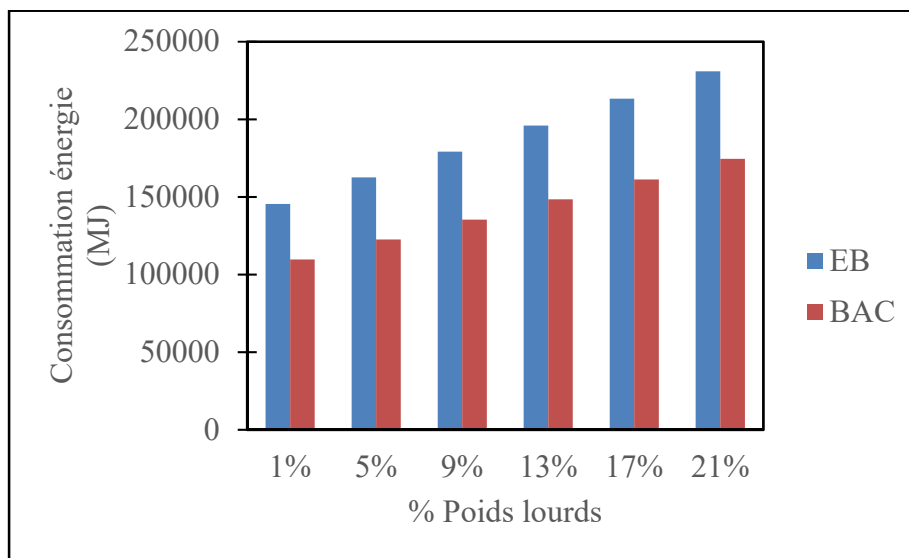


Figure 3.20 Consommation d'énergie pour la Section Gesco-Attinguié-Phase d'exploitation (logiciel HDM-4)

Comme pour les phases précédentes, en prenant comme solution de référence l'option en enrobé bitumineux (EB), le niveau de l'option en béton armé continu (BAC) est le rapport indiqué dans les Tableaux 3.30 et 3.31, respectivement pour les émissions de GES et la

consommation d'énergie. Ce rapport est obtenu en divisant les valeurs totales des émissions de GES ou de la consommation d'énergie de l'option en BAC par celles de l'option en EB. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option en EB à l'option en BAC.

Pour les émissions de GES, on observe que le rapport des valeurs de la solution BAC sur celles de la solution EB est d'environ 0,75, selon le Tableau 3.30.

Pour la consommation d'énergie, on observe que le rapport est d'environ 0,75 pour les différents niveaux de trafic tel qu'indiqué au Tableau 3.31.

En comparant les deux options de chaussée, on observe d'une part que l'option en BAC engendre des émissions de gaz à effet de serre et une consommation d'énergie inférieures d'environ 25 % à celles de l'option en EB, quel que soit le pourcentage de poids lourds. Sur le cycle de vie de 20 ans, il est constaté dans cette section que la chaussée en béton armé continue se comporte mieux que la chaussée en enrobé bitumineux.

Tableau 3.30 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76
Taux %	-24,7	-24,7	-24,5	-24,3	-24,5	-24,5

Tableau 3.31 Comparaison de la consommation d'énergie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,75	0,75	0,76	0,76	0,076	0,76
Taux %	-24,6	-24,6	-24,4	-24,3	-24,4	-24,4

3.7.3.3 Section Attinguié-PK50

Les Figures 3.21 et 3.22 représentent respectivement la production d’émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d’énergie.

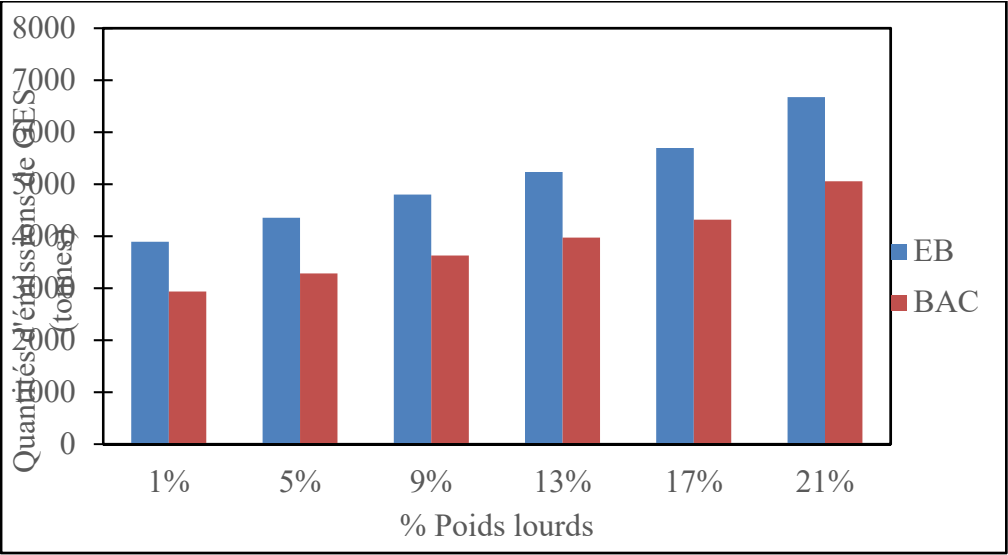


Figure 3.21 Émissions de GES pour la Section Attinguié-PK50-Phase d’exploitation (logiciel HDM-4)

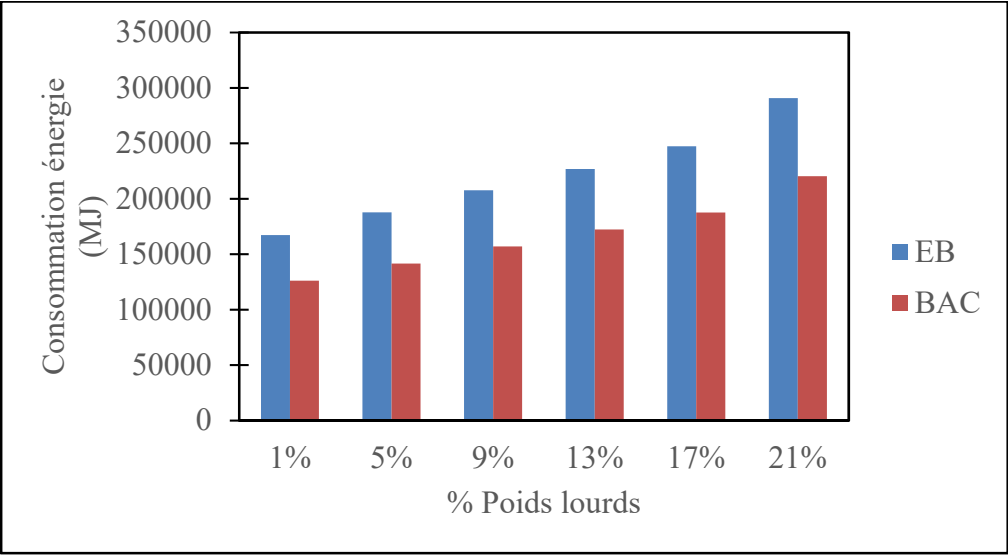


Figure 3.22 Consommation d’énergie pour la Section Attinguié-PK50-Phase d’exploitation (logiciel HDM-4)

En prenant comme solution de référence l'option en enrobé bitumineux (EB), le niveau de l'option en béton armé continu (BAC) est le rapport indiqué dans les Tableaux 3.32 et 3.33, respectivement pour les émissions de GES et la consommation d'énergie. Ce rapport est obtenu en divisant les valeurs totales des émissions de GES ou de la consommation d'énergie de l'option en BAC par celles de l'option en EB. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option EB à l'option BAC.

Pour les émissions de GES, on observe que le rapport des valeurs de la solution BAC sur celles de la solution EB est d'environ 0,75, selon le Tableau 3.32.

Pour la consommation d'énergie, on observe que le rapport est d'environ 0,75 pour les différents niveaux de trafic tel qu'indiqué au Tableau 3.33.

En comparant les deux options de chaussée, on observe d'une part que l'option en BAC engendre des émissions de gaz à effet de serre et une consommation d'énergie inférieures d'environ 25 % à celles de l'option en EB, quel que soit le pourcentage de poids lourds. Sur le cycle de vie de 20 ans, il est constaté dans cette section que la chaussée en béton armé continue se comporte mieux que la chaussée en enrobé bitumineux.

Tableau 3.32 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76
Taux %	-24,6	-24,6	-24,1	-24,1	-24,2	-24,3

Tableau 3.33 Comparaison de la consommation d'énergie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76
Taux %	-24,5	-24,6	-24,4	-24,1	-24,2	-24,2

3.7.4 Impacts environnementaux globaux

Cette section présente les graphiques des résultats globaux sur les trois phases étudiées (matériaux, construction et exploitation). Les résultats présentés aux sections précédentes sont additionnés pour chaque section, afin d’obtenir les effets globaux sur le cycle de vie de 20 ans de la chaussée pour chaque section homogène.

3.7.4.1 Section Banco-Gesco

Les Figures 3.23 et 3.24 représentent respectivement la production d’émissions de gaz à effet de serre globales et la consommation d’énergie globale.

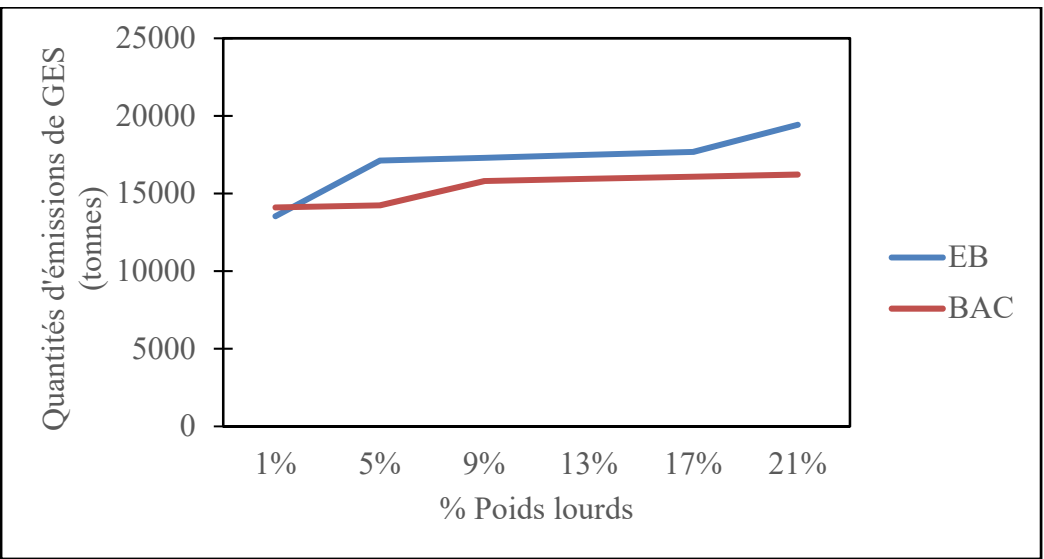


Figure 3.23 Émissions de GES globales pour la Section Banco-Gesco

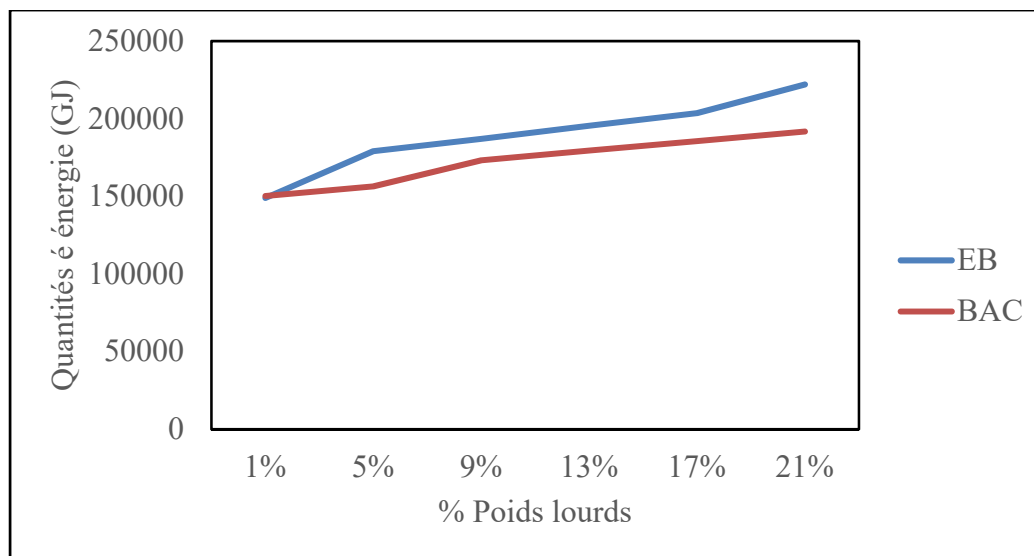


Figure 3.24 Consommation d'énergie globale pour la Section Banco-Gesco

Selon la même démarche que les étapes précédentes, la comparaison des résultats globaux sur le cycle de vie indiquent les rapports et les taux tel qu'indiqués aux Tableaux 3.34 et 3.35.

Pour les émissions de GES, la chaussée en EB a un taux d'émission supérieur de 20 % par rapport à la chaussée en BAC pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds). À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (1% de poids lourds), la chaussée en BAC a un taux d'émission supérieur de 4 % par rapport à la chaussée en EB.

Pour la consommation d'énergie, la chaussée en EB a un taux de consommation supérieur de 16 % par rapport à la chaussée en BAC pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds). À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (1%), la chaussée en BAC a un taux de consommation supérieur de 1 % par rapport à la chaussée en EB.

Tableau 3.34 Comparaison des émissions de GES globales sur le cycle de vie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,96	1,2	1,09	1,1	1,1	1,2
Taux %	-4	20	9,5	9,7	9,9	20

Tableau 3.35 Comparaison de la consommation globale d'énergie sur le cycle de vie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,99	1,14	1,08	1,1	1,1	1,16
Taux %	-0,84	14,5	8	9	10	16

3.7.4.2 Section Gesco-Attinguié

Les Figures 3.25 et 3.26 représentent respectivement la production d'émissions de gaz à effet de serre globales et la consommation d'énergie globale.

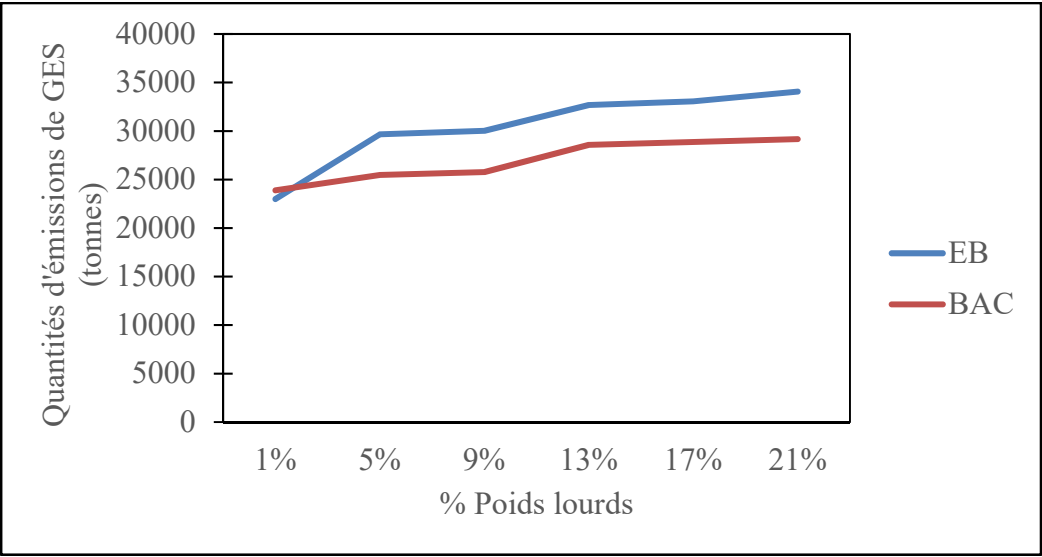


Figure 3.25 Émissions de GES globales pour la section Gesco-Attinguié

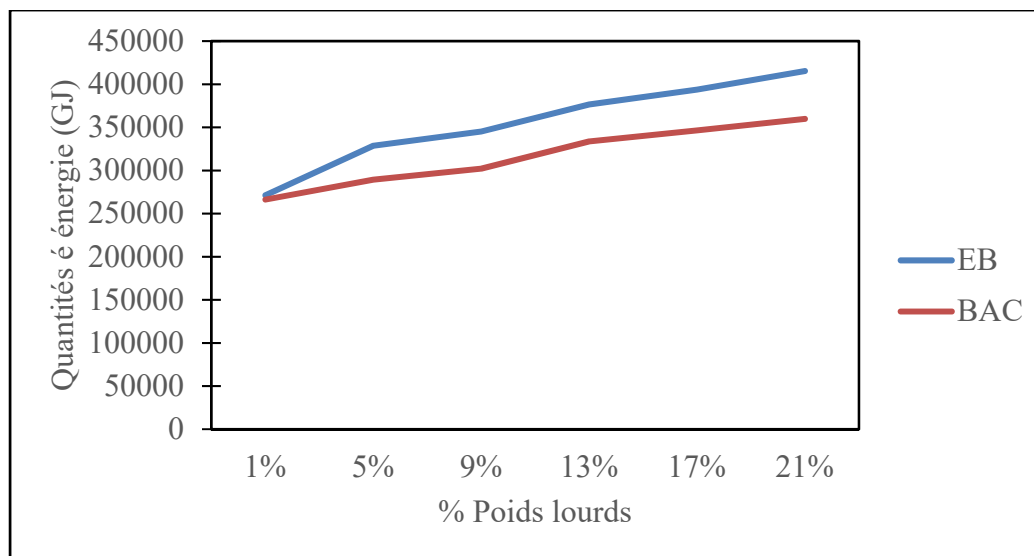


Figure 3.26 Consommation d'énergie globale pour la section Gesco-Attinguié

Dans cette section, la comparaison des résultats globaux sur le cycle de vie indiquent les rapports et les taux tel qu'indiqués aux Tableaux 3.36 et 3.37.

Pour les émissions de GES, la chaussée en EB a un taux d'émission supérieur de 17 % par rapport à la chaussée en BAC pour les trafics lourds élevés (21 %). À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (1%), la chaussée en BAC a un taux d'émission supérieur d'environ 4% par rapport à la chaussée en EB.

Pour la consommation d'énergie, la chaussée en EB a un taux de consommation supérieur de 15 % par rapport à la chaussée en BAC pour les trafics lourds élevés (21 %). Pour les trafics lourds faibles (1 %), la chaussée en BAC a un taux de consommation supérieur d'environ 2 % par rapport à la chaussée en EB.

Tableau 3.36 Comparaison des émissions de GES globales sur le cycle de vie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,96	1,16	1,17	1,14	1,15	1,17
Taux %	-3,8	16,4	16,5	14,3	15	17

Tableau 3.37 Comparaison de la consommation d'énergie globale sur le cycle de vie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	1,02	1,14	1,14	1,13	1,14	1,15
Taux %	1,9	13,6	14,2	12,8	13,7	15,4

3.7.4.3 Section Attinguié-PK50

Les Figures 3.27 et 3.28 représentent respectivement la production d'émissions de gaz à effet de serre globales et la consommation d'énergie globale.

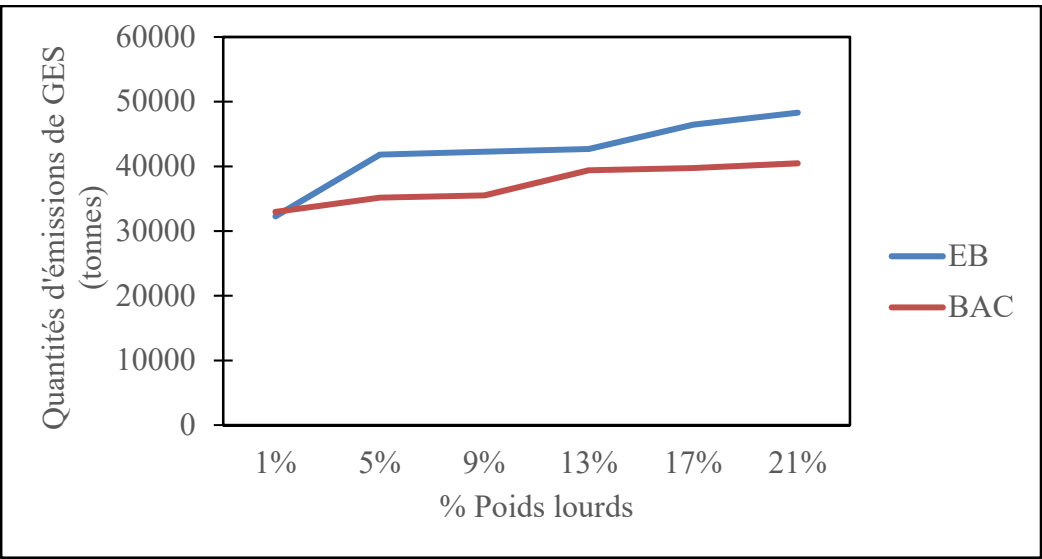


Figure 3.27 Émissions de GES globales pour la section Attinguié-PK50

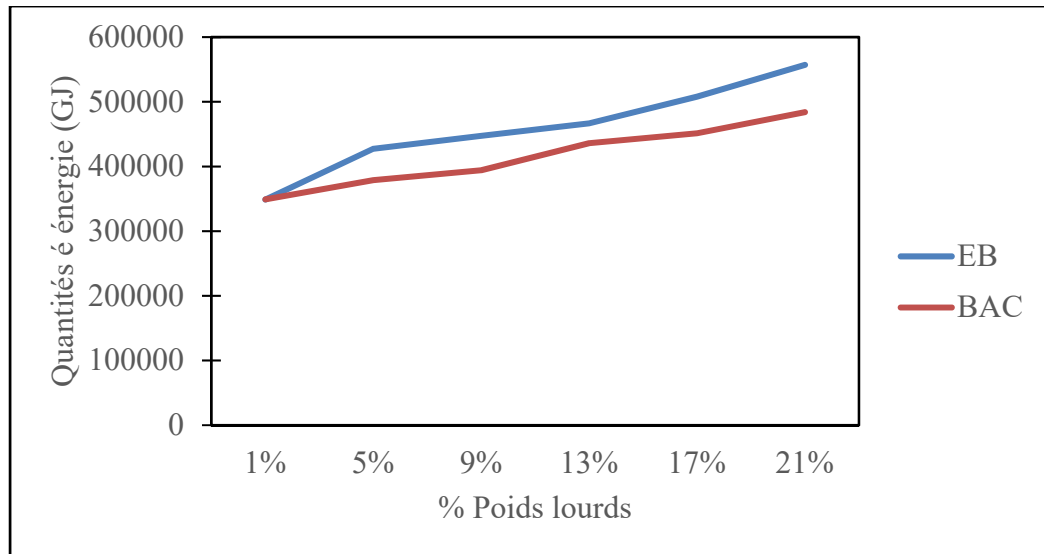


Figure 3.28 Consommation d'énergie globale pour la section Attinguié-PK50

Dans cette section, la comparaison des résultats globaux sur le cycle de vie indiquent les rapports et les taux tel qu'indiqués aux Tableaux 3.38 et 3.39.

Pour les émissions de GES, la chaussée en EB a un taux d'émission supérieur de 17 % par rapport à la chaussée en BAC pour les trafics lourds élevés (21 %). Le taux est équivalent pour les trafics lourds faibles (1 %).

Pour la consommation d'énergie, la chaussée en EB a un taux de consommation supérieur de 15 % par rapport à la chaussée en BAC pour les trafics lourds élevés (21 %). Le taux est équivalent pour les trafics lourds faibles (1 %).

Tableau 3.38 Comparaison des émissions de GES globales sur le cycle de vie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,98	1,19	1,19	1,08	1,17	1,17
Taux %	-0,1	18,9	19	8,4	16,9	16,9

Tableau 3.39 Comparaison de la consommation d'énergie globale sur le cycle de vie

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	1	1,13	1,13	1,07	1,13	1,15
Taux %	-0,1	12,8	13,4	7	12,6	15,1

3.8 Discussions

3.8.1 Phase de production des matériaux de construction

Les résultats de cette phase sont tributaires des données et informations obtenues auprès des industries, des entreprises locales de la construction et de la littérature. Les distances de transport des matériaux, matériels et des engins ont une contribution significative dans la production des émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie. Les distances d'acheminement retenues sont celles effectuées par la route.

Chaussée en enrobé :

Le Tableau 3.40 montre que le bitume et la centrale d'enrobage sont responsables de la plus grande consommation en énergie et en rejet de gaz à effet de serre.

Chaussée en béton armé continu :

Les résultats des Tableaux 3.40 et 3.41, présentant les taux de consommation d'énergie et de production des gaz à effet de serre se rapprochent de ceux rencontrés dans la littérature.

En effet, pour la chaussée en enrobé, la fabrication de l'enrobé engendre la plus grande consommation d'énergie et également en rejet d'émissions de GES (Zapata & Gambatese, 2005). Ainsi pour le tronçon Banco-Gesco en enrobé avec un pourcentage de poids lourds de 21 %, la centrale d'enrobage consomme près de 52 % d'énergie avec un taux d'environ 55 % pour la production des émissions de GES. Le bitume lui obtient un taux de près de 17 % pour

la consommation d'énergie et près de 15 % pour le rejet des émissions de GES tels que présenté au Tableau 40.

Les résultats du même tronçon réalisé en béton armé continu attribuent au ciment un taux d'environ 76 % pour la consommation d'énergie et près de 90 % pour la production des émissions de GES. L'acier à béton quant à lui est responsable de près 9 % de consommation d'énergie et près de 4 % des émissions de gaz à effet de serre (GES). Tel qu'indiqué au Tableau 3.41, les matériaux pour le béton, le ciment et l'acier, engendrent la plus grande part de consommation en énergie et en rejet de gaz à effet de serre.

Pour Zapata et Gambatese (2005), de l'extraction des matériaux à la construction de la chaussée, le ciment et les armatures consomment environ 94 % de l'énergie totale pour les chaussées en béton armé continu. Dans le cas de la chaussée en enrobé, la plus grande consommation d'énergie se produit lors de la fabrication de l'enrobé en centrale avec un taux de 48 % suivi de la production du bitume pour un taux de 40 %.

Chaussée en enrobé / Banco-Gesco/ 21 % de poids lourds :

Tableau 3.40 Taux de consommation d'énergie
et de production des gaz à effet de serre

BANCO-GESCO / OPTION CHAUSSÉE EN ENROBÉ (EB)			
Désignation	Energie (%)	Désignation	Effet de serre (%)
Agrégats	7,86	Agrégats	5,73
Bitume	16,27	Bitume	14,30
Centrale d'enrobage	52,06	Centrale d'enrobage	54,63
Engins	1,56	Engins	1,64
Transport route	22,26	Transport route	23,71

Chaussée en béton armé continu / Banco-Gesco/ 21% de poids lourds :

Tableau 3.41 Taux de consommation d'énergie
et de production de gaz à effet de serre

BANCO-GESCO / OPTION CHAUSSEE EN BÉTON ARMÉ CONTINU (BAC)			
Désignation	Energie (%)	Désignation	Effet de serre (%)
Acier	9,18	Acier	3,75
Centrale à béton	4,57	Centrale à béton	1,41
Ciment	76,24	Ciment	90,13
Engins	0,55	Engins	0,31
Granulats	4,36	Granulats	1,43
Transport route	5,10	Transport route	2,96

Dans la première section homogène **Banco-Gesco**, les niveaux de rejet des émissions de GES sont quasiment équivalents et se situent dans les proportions de 1 pour les deux options. Toutefois pour les trafics lourds élevés (21 %), les émissions de GES de la chaussée en BAC baissent de 15 % par rapport à celles de la chaussée en EB. À l'inverse, elles augmentent de 9 % pour les trafics lourds faibles (1%). Pour la consommation d'énergie, il y a également une quasi équivalence entre les deux options. Toutefois pour les trafics lourds faibles (1 %), la consommation de l'option BAC augmente de 27 % par rapport à celle de l'option EB. La chaussée en béton armé continu est plus avantageuse pour les trafics lourds élevés et la chaussée en enrobé bitumineux est plus avantageuse pour les trafics lourds faibles.

Dans la deuxième section homogène **Gesco-Attinguié**, les niveaux de rejet des émissions de GES sont quasiment équivalents et se situent dans les proportions de 1 pour l'option EB et de 0,9 pour l'option BAC. Toutefois pour les trafics lourds élevés (21 %), les émissions de GES de la chaussée en BAC baissent de 12 % par rapport à celles de la chaussée en EB. À l'inverse, elles augmentent de 9 % pour les trafics lourds faibles (1 %). Pour la consommation d'énergie, les proportions de consommation sont de 1 pour l'option EB et de 1 pour l'option BAC. Toutefois pour les trafics lourds faibles (1 %), la consommation de l'option BAC augmente de 26 % par rapport à celle de l'option EB. Comme dans la première section, la chaussée en béton

armé continu est plus avantageuse pour les trafics lourds élevés et la chaussée en enrobé bitumineux est plus avantageuse pour les trafics lourds faibles.

Dans la troisième section homogène **Attinguié-PK50**, les niveaux de rejet des émissions de GES sont quasiment équivalents et se situent dans les proportions de 1 pour l'option EB et de 0,9 pour l'option BAC. Toutefois pour les trafics lourds élevés (21 %), les émissions de GES de la chaussée en BAC baissent de 15 % par rapport à celles de la chaussée en EB. À l'inverse, elles augmentent de 9 % pour les trafics lourds faibles (1 %). Pour la consommation d'énergie, les proportions de consommation sont de 1 pour l'option EB et de 1 pour l'option BAC. Toutefois pour les trafics lourds faibles (1 %) de variation du trafic des poids lourds, la consommation de l'option BAC augmente de 24 % par rapport à celle de l'option EB. Dans cette section également, la chaussée en béton armé continu est plus avantageuse pour les trafics lourds élevés et la chaussée en enrobé bitumineux est plus avantageuse pour les trafics lourds faibles.

Les résultats obtenus sur les trois sections homogènes se rapprochent de ceux de l'étude Colas Group qui obtient des proportions de 1 pour l'enrobé et de 2,6 pour le béton et pour la consommation d'énergie, celles-ci sont respectivement de 1 et 1,4 (Chappat & Bilal, 2003). L'étude de Techno-Bitume indique que pour la production des émissions de GES puis la consommation d'énergie les proportions sont respectivement de 1 et 3,4 puis de 1 et 2,1 entre la chaussée en enrobé bitumineux et la chaussée en béton armé continu (Techno-Bitume, 2011). Les résultats obtenus dans les trois sections indiquent que la chaussée en enrobé bitumineux est la plus avantageuse (Chappat & Bilal, 2003), pour les trafics lourds faibles. Pour l'option béton armé continu, le rejet moyen de gaz à effet de serre par véhicule baisse avec l'augmentation du trafic des poids lourds. Il en est de même pour la consommation d'énergie. La solution en BAC a un meilleur comportement avec l'augmentation du pourcentage des poids lourds. Les résultats d'une étude en Chine montrent que la production de mélange d'asphalte représente la plus grande proportion de la consommation d'énergie et

est bien plus que les autres étapes. Par rapport à la production du mélange, les consommations énergétiques des autres étapes sont beaucoup moins (Feng et al., N.D.)

3.8.2 Phase construction

Dans la première section homogène **Banco-Gesco**, la production des émissions de GES se situe dans les proportions moyennes de 1 pour l'option EB et de 0,4 pour l'option BAC avec un niveau de production de -57 % par rapport à l'option EB. Ces résultats sont les mêmes pour la consommation d'énergie.

Lorsque le pourcentage des poids lourds augmente de 1 % à 21 %, le rapport diminue et passe de 0,5 à 0,4 alors que le taux d'émissions passe de -50 % à -61 %.

Dans la deuxième section homogène **Gesco-Attinguié**, la production des émissions de GES se situe dans les proportions moyennes de 1 pour l'option EB et de 0,4 pour l'option BAC avec un niveau de production de -55 % par rapport à l'option EB. Ces résultats sont les mêmes pour la consommation d'énergie.

Lorsque le pourcentage des poids lourds augmente de 1 % à 21 % le rapport diminue et passe de 0,5 à 0,4 alors que le taux d'émissions passe de -47 % à -57 %.

Dans la troisième section homogène **Attinguié-PK50**, la production des émissions de GES se situe dans les proportions moyennes de 1 pour l'option EB et de 0,5 pour l'option BAC avec un niveau de production de -55 % par rapport à l'option EB. Ces résultats sont les mêmes pour la consommation d'énergie.

Lorsque le pourcentage des poids lourds augmente de 1 % à 21 % le rapport diminue et passe de 0,5 à 0,4 alors que le taux d'émissions passe de -47 % à -57 %.

Selon Zapata et Gambatese (2005), la construction d'une chaussée en béton armé continu consomme environ plus de 21 % d'énergie que la construction d'une chaussée en enrobé bitumineux sur les premières phases du cycle de vie allant de l'extraction des matériaux, la fabrication et la pose sur le chantier. Toutefois cette étude a fixé des limitations et néglige, entre autres, la consommation d'énergie occasionnée par la distance de transport et d'acheminement des matériaux ainsi que les équipements utilisés. Il poursuit en indiquant que la consommation sur le cycle de vie d'une chaussée dépendra entièrement des conditions locales, de l'utilisation et de la maintenance d'une chaussée donnée (Zapata & Gambatese, 2005).

La chaussée en enrobé bitumineux, pour la construction initiale de conception de chaussées équivalentes, semble avoir un apport énergétique plus élevé, mais des besoins en minéral et en engrais plus faibles et des émissions toxiques plus faibles. Elle a une génération et une gestion des déchets dangereux associés plus élevés que le béton armé (Horvath & Hendrickson, 1998). La durabilité du béton contribue au fait que moins d'énergie est requise pour son entretien sur sa durée de vie par rapport à d'autres matériaux de pavage (Conseil canadien du béton, 2014).

3.8.3 Phase exploitation

Les résultats obtenus dans les trois sections indiquent un niveau d'émissions de GES de 1 pour la chaussée en enrobé bitumineux et de 0,75 pour la chaussée en béton armé continu. L'option BAC génère des émissions de GES qui baissent de 25 % au cours du cycle de vie de 20 ans. Ces mêmes proportions sont observées pour la consommation d'énergie. Le couple moyen (rapport, taux) est (0,75, -25 %) pour les émissions de GES que la consommation d'énergie en faveur de la chaussée en béton armé continu.

La chaussée en béton armé continu est moins polluante que la chaussée en enrobé lors de la phase d'exploitation (20 ans). La chaussée en béton est viable sur le long terme (Maillard, 2010).

Si la durée de vie des chaussées est couramment considérée à 20 ans en Afrique subsaharienne, celle-ci varie de 30 à 50 ans dans les études de cycles de vie effectuées dans les pays développés qui utilisent des matériaux et des technologies de construction routières de plus en plus sophistiquées. En effet, diverses études existantes dans la littérature considèrent une durée du cycle de vie au-delà de 30 ans aux États-Unis, au Canada ou en Europe (Chappat & Bilal, 2003; Techno-Bitume, 2011).

Durant la phase d'exploitation, la consommation de carburant des véhicules a un impact négatif significatif. Plus important, le béton permet de réduire l'impact de la période d'utilisation. En effet, des recherches du MIT et du Conseil national de recherches Canada montrent qu'il peut y avoir une économie significative de carburant lorsque les véhicules circulent sur des pavages rigides en béton (Conseil canadien du béton, 2014). Il y a un avantage environnemental de la chaussée rigide par rapport à la chaussée souple concluent Abdelaziz et Ouellet-Plamondon (2019) pour la majorité des paramètres évalués durant les quatre étapes du cycle de vie analysées (production des matériaux, construction, entretien et réhabilitation, interaction chaussée-véhicule) (Abdelaziz & Ouellet-Plamondon, 2019).

3.8.4 Phase de fin de vie

Lors de la prise en compte de l'incertitude dans les données et lors de l'annualisation des effets environnementaux sur la durée de vie moyenne supposée des deux types de chaussées, les besoins en ressources et les sorties environnementales sont à peu près comparables pour les deux types de chaussée (Horvath & Hendrickson, 1998).

Cependant, les chaussées en enrobé sont recyclées en plus grande quantité que les chaussées en béton, avec pour conséquence les économies de ressources et la pollution évitée, ce qui suggère que l'enrobé serait un meilleur choix du point de vue du développement durable (Horvath & Hendrickson, 1998).

3.8.5 Impacts environnementaux globaux sur le cycle de vie

Les résultats obtenus dans les trois (3) sections sont la somme respectivement des émissions de GES et de la consommation d'énergie pour chaque phase du cycle de vie. Pour les émissions de gaz à effet de serre, le taux d'émission de GES varie de 17 à 20 % en faveur de la chaussée en béton armé continu. Le taux de la consommation d'énergie, quant à lui, varie de 15 à 16 % en faveur de la chaussée en béton armé continu, pour le niveau de trafics lourds élevés. Ces taux augmentent quand le trafic des poids lourds augmente ce qui donne un avantage à la chaussée en béton armé continu.

Selon la nouvelle approche de sélection d'une option de chaussée en considérant les coûts globaux, la chaussée en béton armé continu est celle qui doit être retenue dans le contexte de cette étude, caractérisé par un trafic de poids lourds de plus en plus élevé et un entretien faible, pour la reconstruction de l'Autoroute du Nord, en Côte d'Ivoire.

3.9 Conclusion

L'objet de l'étude était d'évaluer du point de vue environnemental, dans le cadre du projet de construction de l'Autoroute du Nord en Côte d'Ivoire, deux options de chaussée : la chaussée en enrobé bitumineux et la chaussée en béton armé continu. À cette fin les outils ECORCE 2.0 et HDM-4 v2.0 ont été utilisés pour la détermination des émissions de gaz à effet de serre ainsi que la consommation d'énergie, respectivement pour les phases de production des matériaux et de construction (ECORCE 2.0) et d'exploitation (HDM-4 v2.0).

L'étude est effectuée sur le cycle de vie de la chaussée en considérant les phases de production et d'acheminement des matériaux, de construction et d'exploitation. Les indicateurs environnementaux analysés sont les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie. En outre, l'étude intègre la croissance annuelle projetée du trafic des poids lourds. Dans la littérature, les études rencontrées traitent le plus souvent que la phase d'exploitation.

Ces éléments la différentient des études couramment effectuées et encore plus dans la région d'exécution du projet. Il faut, par ailleurs, préciser que l'analyse environnementale comparative se fait pour des chaussées fortement sollicitées où la construction des chaussées en béton peut être envisagée. La chaussée en enrobé bitumineux quant à elle peut être réalisée sur les chaussées à faible ou fort volume.

Les résultats analysés, phase par phase, sur les trois sections homogènes ainsi que sur l'ensemble de ces trois phases pour chaque section sont résumés ci-après :

- En phase de production des matériaux, les émissions de gaz à effet de serre de la solution en BAC baissent d'environ 15 % par rapport à celles de la solution en EB pour les trafics élevés. À l'inverse, pour les trafics faibles, la solution en BAC consomme jusqu'à 27 % de plus que la solution en EB. La solution en BAC est plus avantageuse pour les trafics lourds élevés et la solution en EB est plus avantageuse pour les trafics lourds faibles.
- En phase de construction, les écarts obtenus sont respectivement de -55 %, au minimum et respectivement pour les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie. La solution en BAC est plus avantageuse que la solution en EB.
- En phase exploitation et au terme du cycle de vie de 20 ans, les écarts sont respectivement de -25 %, au minimum et respectivement pour les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie. La solution en BAC est plus avantageuse que la solution en EB.
- Sur l'ensemble des trois phases au terme du cycle de vie de 20 ans, les émissions de gaz à effet de serre de la chaussée en enrobé bitumineux sont de 17 à 20 % supérieures à celles de la chaussée en béton armé continu. La consommation d'énergie de la chaussée en enrobé bitumineux est de 15 à 16 % supérieure à celle de la chaussée en béton armé continu.

Du point de vue environnemental, la présente étude indique que la chaussée en béton armé continu est plus avantageuse que la chaussée en enrobé bitumineux sur l'ensemble du cycle de vie.

Force est de constater, qu'au terme de cette étude, des limites sont à relever :

- La fiabilité des données: les données ont été acquises auprès des producteurs des matériaux, principalement les cimenteries, les aciéries, les producteurs de bitume et d'enrobé. Celles-ci influencent d'un côté ou de l'autre, les résultats et ne sont pas toujours accessibles au public. Les réalités locales et les technologies utilisées ne permettent pas de généraliser les résultats obtenus pour un site de projet à un autre ou d'un pays à un autre.
- Les distances parcourues pour la production, la fabrication et l'acheminement des matériaux au chantier : l'organisation optimale du chantier pour minimiser les distances peut amener à une réduction des gaz à effet de serre et la consommation d'énergie.
- Les impacts environnementaux régionaux (acidification, eutrophisation, éco-toxicité, etc.) et ceux dus à diverses nuisances occasionnées par la réalisation du projet (bruit, vibration, etc.) ainsi que les impacts sociaux (santé, accidents, bien être, éclairage, albédo, eaux de ruissellement, agriculture, etc.) ne sont pas pris en compte.
- Les paramètres pris en compte dans la conception des logiciels conçus dans les pays développés, d'une façon générale, n'intègrent pas toujours les données locales de chaque région du monde. Cela s'applique aux logiciels utilisés dans cette étude. De même, les connaissances scientifiques ne permettent pas de prendre en compte de façon quantitative de nombreux indicateurs dans les évaluations environnementales.

C'est pourquoi, la prise en compte globale de tous les indicateurs environnementaux dans les projets d'infrastructures est loin d'être réalisée. Cela appelle de nombreuses études à travers le monde et pour chaque projet à réaliser.

CHAPITRE 4

APPROCHE DE CALCUL DE COÛTS SOCIAUX SUR LE CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSÉE EN ENROBÉ OU EN BÉTON ARMÉ CONTINU ET APPLICATION

Nahouo Soro¹, Gabriel J. Assaf¹

¹Département de génie de la construction, École de technologie supérieure

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

Article soumis à la revue Annales du Bâtiment et des Travaux Publics
pour publication, juillet 2020

4.1 Résumé

Les concepteurs des projets d'infrastructure privilégient depuis toujours le critère économique lorsqu'il s'agit de choisir le revêtement d'une chaussée. Depuis quelques années, les effets du réchauffement de la planète et les dommages inhérents aux travaux routiers sur la santé humaine et les écosystèmes, amènent les concepteurs à considérer les trois piliers du développement durable à savoir l'économie, l'environnement et le social, dans le processus de prise de décision pour un investissement routier.

A ce titre, cet article propose d'évaluer les coûts sociaux de deux options de chaussées autoroutières en Afrique subsaharienne : une chaussée en enrobé bitumineux (EB) et une chaussée en béton armé continu (BAC). L'évaluation est effectuée sur l'ensemble du cycle de vie des chaussées à l'aide des outils ECORCE 2.0 et HDM-4 v2.0.

Les coûts sociaux liés aux phases d'extraction et de production des matériaux, de construction et d'exploitation sont évalués sur trois sections de l'Autoroute du Nord en Côte d'Ivoire en intégrant la variation du trafic des poids lourds.

En phase d'extraction et de production des matériaux, les résultats sur trois des cinq indicateurs de dommages sur la santé humaine et sur la qualité des écosystèmes à savoir l'eutrophisation (EI), l'acidification (AP) et l'écotoxicité (EP) indiquent que la chaussée en BAC est plus

avantageuse que la chaussée en EB pour les routes subissant un volume élevé de trafic lourd. Pour les indicateurs de dommage relatifs à l'ozone troposphérique (POCP) et la toxicité (TP), elle est plus avantageuse quel que soit le volume de trafic lourd. Par conséquent lorsque le trafic lourd est peu élevé, la chaussée en EB est plus avantageuse que la chaussée en BAC pour les dommages reliés aux indicateurs EI, AP et EP.

En phase construction, les dommages occasionnés par la chaussée en BAC sur la santé des populations et sur les écosystèmes sont plus faibles que ceux de la chaussée en EB, quel que soit le niveau de trafic lourd.

En phase d'exploitation, les coûts sociaux de la chaussée en BAC reliés à l'indicateur coûts aux usagers (CU) sont plus faibles que ceux de la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic lourd.

La monétisation de ces externalités sur le cycle de vie indique que le coût total des dommages de la chaussée en EB est supérieur de 15 à 19 % environ pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds). À l'inverse le coût total des dommages de la chaussée en BAC est supérieur de 7 à 8 % environ pour les trafics lourds faibles (1% de poids lourds). La chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB, particulièrement pour les trafics lourds élevés.

Mots clés : Coûts sociaux, cycle de vie, santé humaine, écosystèmes, développement durable, chaussées

4.2 Abstract

Decisions makers of road projects have always favored the economic criterion when selecting a pavement surface. In recent years, the effects of global warming and the damage inherent in road works on human health and on ecosystems have led designers to consider the three pillars of sustainable development, namely the economy, the environment and the social, in the decision-making process for road investments.

This paper proposes to assess social costs of two different pavement options: an asphalt pavement (AC) and a continuous reinforced concrete pavement (CRCP). The assessment is carried out over the entire life cycle of pavements, using the ECORCE 2.0 and HDM-4 v2.0 tools.

The social costs related to the extraction and production of materials, construction and operation are assessed on three sections of the Autoroute du Nord in Côte d'Ivoire by incorporating the variation in heavy goods vehicle traffic volume.

In the extraction and materials production phase, the results of three over the five indicators of damage to human health and ecosystem quality namely eutrophication (EI), acidification (AP) and ecotoxicity (EP) indicate that the CRCP pavement is more advantageous than the AC pavement for roads with a high volume of heavy traffic. For the damage indicators of tropospheric ozone (POCP) and toxicity (TP), CRCP is more advantageous regardless of the volume of heavy traffic. As a result, only when heavy traffic volume is low, the AC pavement is more advantageous than the CRCP pavement for damage related to the EI, AP and EP indicators.

During the construction phase, the damage caused by CRCP pavement on the health of populations and ecosystems is lower than that of AC pavement, regardless of the level of heavy traffic.

During the operating phase, the social costs of CRCP pavement linked to user's costs indicators (CU) are lower than those of AC pavement, regardless of the level of heavy traffic.

The monetization of these externalities over the life cycle indicates that AC pavement social damage total cost is around 15 to 19 % higher for heavy traffic (21 % heavy vehicles). Conversely, CRCP pavement social damage total cost is around 7 to 8 % higher for light heavy traffic (1 % heavy vehicles). Thus, CRCP pavement is more advantageous than AC pavement, particularly for heavy traffic.

Keywords: Social costs, pavement, lifecycle, human health, ecosystems, sustainable development

4.3 Introduction

Les coûts et avantages sociaux du transport routier sont parfois mentionnés dans une section identifiant les bénéficiaires prévus du projet (Hook, 2006). Ils sont traditionnellement intégrés, en partie, dans l'évaluation économique, et dans l'évaluation des impacts social et environnemental, durant la phase d'exploitation seulement. Les coûts sociaux ne se limitent pas cependant à la phase d'exploitation de la route. Ils devraient comprendre également les autres phases couvrant l'ensemble du cycle de vie de la chaussée.

En effet, les coûts sociaux représentent les impacts négatifs supportés par les usagers de la route, la société et l'environnement, sur l'ensemble du cycle de vie de la route et doivent comprendre non seulement la phase d'exploitation mais aussi, les phases d'extraction et de construction.

En phase d'exploitation, les coûts aux usagers comprennent les coûts de temps de déplacement ainsi que les coûts d'exploitation des véhicules. Les coûts à la société incluent également les coûts d'entretien et de réhabilitation des chaussées assumés par l'administration, ainsi que les coûts des accidents assumés par la population et l'État. Par ailleurs, les coûts environnementaux intègrent les frais de santé liés aux impacts de la pollution sonore et de la pollution atmosphérique, et les coûts de dégradation de l'environnement et des écosystèmes.

Selon Margorínová et Trojanová (2019), les coûts sociaux sont composés des coûts des externalités et des coûts aux usagers. Les externalités se rapportent aux impacts négatifs liés aux volets social et environnemental, alors que les coûts aux usagers se rapportent aux aspects négatifs liés au transport motorisé et au transport non motorisé (Margorínová & Trojanová, 2019).

La monétisation de tous ces impacts peut se révéler ardue compte tenu de l'indisponibilité des données, de l'état actuel des connaissances scientifiques et de l'absence de modèle précis.

L'intégration des coûts sociaux dans la prise de décision pour la construction routière est pourtant nécessaire pour garantir la durabilité du projet.

Les coûts sociaux des projets, en particulier les infrastructures routières, sont supportés par les populations et non seulement par les administrations routières. De ce fait, les administrations routières ont souvent ignoré les impacts sociaux sur les usagers dans les évaluations économiques. C'est ainsi que le choix d'une option de revêtement de chaussée ne tient pas compte des effets sociaux d'un revêtement en béton plutôt qu'un revêtement en enrobé.

Ces coûts associés aux impacts négatifs sur la santé humaine, sur la viabilité économique du projet et sur l'environnement, posent le problème d'acceptabilité des projets par la population. De nombreux projets à travers le monde, dont l'intérêt national et la viabilité économique sont avérés, n'ont pu être réalisés face à l'opposition des populations. Ainsi pour chaque projet, les décideurs doivent consulter les populations afin de prendre en compte les préoccupations de toutes les parties prenantes. Cette étape est une condition nécessaire à la durabilité des projets. Pour qu'un projet respecte les critères de développement durable, il doit en effet satisfaire les considérations économiques, environnementales et sociales, tel que schématisé à la Figure 4.1.

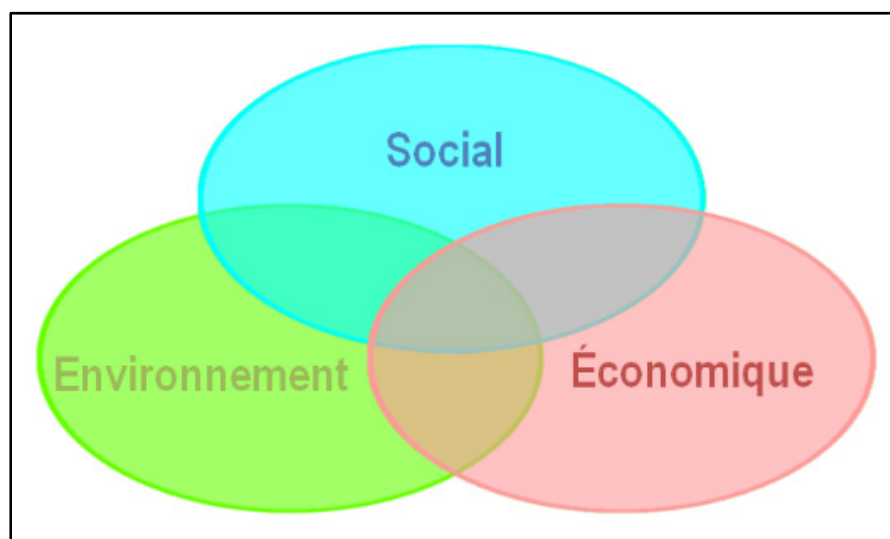


Figure 4.1 Les 3 piliers du développement durable

Les coûts sociaux, bien que largement reconnus, sont rarement pris en compte dans les phases de conception, de planification ou d'évaluation des offres des projets de construction en Amérique du Nord. Cela est attribué à la difficulté associée à la quantification des coûts sociaux à l'aide de méthodes d'estimation standards et au fait que ces coûts sont supportés par la communauté plutôt que par les parties contractuelles (Gilchrist & Allouche, 2005). Ce constat est malheureusement le même ailleurs, y compris en Afrique subsaharienne.

Cet article décrit et intègre sur une plateforme unique, l'ensemble des coûts sociaux d'une chaussée en enrobé en comparaison avec une chaussée en béton armé continu, sur son cycle de vie. Cette intégration est illustrée par un cas pratique pour lequel les données sont disponibles, soit l'Autoroute du Nord, en Côte d'Ivoire.

L'évaluation des coûts sociaux sur le cycle de vie reconnaît l'importance du volume de trafic des poids lourds. L'intérêt de cette démarche est de faire ressortir la durabilité de ces options au sens de la définition du développement durable, qui requière un équilibre entre l'économie, l'environnement et le social. Cet équilibre ne peut être obtenu qu'en mettant les trois critères précités sur une plateforme unique, et en reconnaissant l'ensemble des composantes sur le cycle de vie, depuis l'extraction à l'exploitation, en passant par la construction.

La contribution de cet article est la formulation d'une plateforme qui intègre les trois critères et qui couvre l'ensemble des activités du cycle de vie, pour mettre en œuvre une politique de développement durable pour les chaussées en Afrique subsaharienne.

Quoique cet article permette de prendre en compte les coûts sociaux pour évaluer le véritable coût d'un projet routier, il ne fournit pas de recommandations pour les prendre en considération dans le processus d'appels d'offres pour la construction d'infrastructures routières durables.

4.4 Le développement de routes durables

L'application des notions de développement durable au niveau des routes requière la recherche d'un équilibre entre l'économie, l'environnement et le social. A ce titre, il est important pour la mise en œuvre de cet équilibre, de déterminer l'ensemble des composantes sous-jacentes à chacun des trois critères précités, et de les intégrer selon une seule mesure ou métrique, selon leurs impacts tout au long de la durée de vie de la chaussée depuis l'extraction au recyclage, en passant par la construction et l'exploitation.

Cette section décrit l'ensemble des composantes associées à ces trois critères ainsi que leur mise en œuvre pour le choix du type de revêtement en enrobé ou en béton selon le niveau de trafic lourd.

Il n'existe toutefois pas de processus reconnu pour évaluer quantitativement et économiquement le niveau des nuisances sociales et environnementales. Les impacts négatifs liés à la construction routière sont donc traduits sous la forme de nombreux indicateurs, sans intégration selon une mesure commune.

4.4.1 Indicateurs en phase d'extraction des matériaux et de construction

L'éco-comparateur ECORCE 2.0 permet l'évaluation des indicateurs traduisant les dommages sur la santé et les écosystèmes, lors des phases d'extraction des matériaux et de construction (Joliet O et al., 2003; Kicak & Ménard, 2009), telle que décrit ci-dessous :

Eutrophisation (EI)

L'eutrophisation est une réduction de la qualité de l'eau. Celle-ci devient opaque, malodorante et de goût déplaisant, due à un excès de matière organique et à la présence de micro-organismes. L'eutrophisation modifie aussi la composition des espèces. Elle est suspectée d'être la cause de la prolifération d'algues toxiques, et d'épidémies de choléra en Inde (EPA,

2000). Ainsi, plus la valeur de cet indicateur est élevée, plus la santé des populations et les écosystèmes sont menacés.

Acidification (AP)

L'acidification est due à une augmentation dans l'air, de substances à propriétés acides. Au contact de l'humidité atmosphérique, elles forment des pluies ou brouillards acides qui corrodant les métaux, altèrent les édifices en pierre, détruisent la végétation et acidifient les lacs, entraînant la disparition de certaines espèces aquatiques (Khalifa, 2000; SETRA, 2001).

Ozone troposphérique (POCP)

La formation d'ozone troposphérique est liée à une série de réactions impliquant des espèces carbonées et l'action de rayons ultraviolets (SETRA, 2001). Le principal effet de l'augmentation de ces photo-oxydants est la formation d'un brouillard (smog) en milieu urbain, renfermant des acides, des nitrates, des sulfates, des sels d'ammonium, des métaux, des composés carbonés oxydés et de l'eau. Seuls les effets de l'ozone sont bien connus car ils accentuent les difficultés respiratoires des personnes fragiles et sont reconnus pour augmenter les taux de mortalité chez ces populations (EPA, 1996; SETRA, 2001).

Toxicité (TP)

La toxicité reflète les effets néfastes de substances sur l'homme exposé à leur présence de manière chronique (M. Dauvergne et al., 2013). Elle est une source de maladies cancérogènes sur les populations (Kicak & Ménard, 2009).

Écotoxicité (EP)

L'écotoxicité est liée aux effets toxiques de substances causant la disparition directe ou indirecte (par exemple en affectant la reproduction) des espèces animales ou végétales appartenant à un écosystème (M. Dauvergne et al., 2013).

4.4.2 Indicateurs en phase d'exploitation

Pendant la phase d'exploitation, les usagers de la route subissent divers types d'impacts négatifs. Ces impacts incluent : les coûts d'opération des véhicules motorisés (MT), les temps de parcours et les coûts des accidents, selon NDLI (1995). L'outil HDM-4 calcule ces coûts subis par les usagers (CU), pendant la phase d'exploitation de la route seulement.

4.4.3 Caractéristiques des chaussées en enrobé et en béton armé continu

La chaussée en béton armé continu consomme moins de granulats et s'intègre à l'environnement (CIMbéton, 2001). La couleur pâle des pavages de béton permet de réduire de 30 % la puissance nécessaire pour éclairer les routes, ce qui entraîne des économies et aide à réduire l'effet d'îlot de chaleur urbaine, réduit la réflexion des rayons solaires et l'impact sur la couche d'ozone, réduit les exigences de climatisation et la formation de smog (FEBELCEM, 2019). Il y a également une absence d'orniérage (Conseil canadien du béton, 2013; FEBELCEM, 2019), ce qui contribue à la réduction des accidents de la route.

Les pavages en béton sont peu sensibles à la formation de nids de poules (Conseil canadien du béton, 2013). L'épaisseur totale des couches de la chaussée en BAC est légèrement plus faible que celle de la chaussée en EB. Les pavages en béton réduisent le potentiel d'aquaplanage car il ne s'y forme pas d'ornières. Ils sont plus clairs, ce qui permet de voir plus facilement les objets sur la route et améliorent ainsi la sécurité (Conseil canadien du béton, 2013). Pour d'autres auteurs, les avantages sociaux des chaussées en béton, entre autres comprennent: un potentiel réduit pour l'aquaplanage; bonne visibilité nocturne; distance d'arrêt améliorée et conduite et confort améliorés (Smith, 2006; Smith & Jolly, 2005).

Les chaussées en EB sont toutefois, plus silencieuses que les chaussées en BAC. Les pavages de béton construits actuellement peuvent avoir un faible niveau de bruit qui est comparable à

celui de l'EB et fournissent une excellente qualité de roulement (Conseil canadien du béton, 2013).

Le revêtement en EB ne peut pas être posé directement sur le sol d'infrastructure, contrairement au revêtement en BAC (Haseeb, 2017).

La résistance de la route en EB dépend fortement de la résistance du sol de support. Elle dépend moins de la résistance du sol de support pour la route BAC (Haseeb, 2017).

La force de frottement est faible pour la chaussée en EB et elle est plus élevée pour la chaussée en BAC (Haseeb, 2017).

La route en EB peut être ouverte à la circulation dans les 24 heures après la mise en place du revêtement. La route en BAC ne peut pas être utilisée avant 14 jours de cure, selon le béton utilisé (Haseeb, 2017). Les nouvelles technologies utilisant les bétons à prise rapide ou les dalles préfabriquées de béton permettent toutefois une mise en service rapide de la chaussée en BAC.

4.4.4 La durabilité des chaussées

Le développement durable ne se limite pas à l'environnement. Il faut également tenir compte de l'aspect économique et social. Ainsi, pour qu'un projet soit durable, il faut accorder une importance égale à ces trois paramètres qui sont l'économie, l'environnement et le social et qui constituent les trois piliers du développement durable. L'aspect social implique de garantir l'acceptabilité sociale des projets en faisant un choix judicieux du projet à réaliser.

Dans le cas particulier de la construction routière, l'ingénieur concepteur doit se préoccuper certes de la viabilité économique et de la viabilité environnementale du projet mais aussi de sa viabilité sociale. Toutes les actions doivent être engagées pour prendre en compte les préoccupations de toutes les parties prenantes au projet routier à réaliser.

L'option de revêtement de chaussée qui satisfait le mieux les trois piliers du développement durable répondrait donc à la définition d'une chaussée durable. Pour être considérée comme une chaussée durable, le résultat des évaluations économique, environnementale et sociale de tout projet à réaliser doit se situer dans la zone durable de la Figure 4.2.

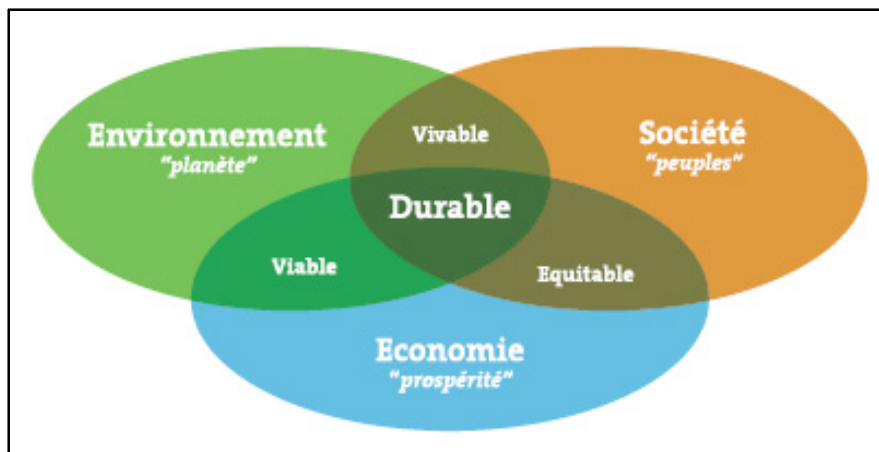


Figure 4.2 Critère de durabilité d'un projet
Tirée de (FEBELCEM, 2019)

4.5 Méthodologie

Le développement de la plateforme est réalisé à l'aide de deux outils, les logiciels ECORCE 2.0 et HDM-4, qui traitent les aspects sociaux du projet respectivement sur les phases d'extraction des matériaux, de construction et d'exploitation.

4.5.1 Les outils utilisés

Logiciel ECORCE 2.0

L'outil ECORCE 2.0 est utilisé pour la phase d'extraction et de production des matériaux et la phase construction. Il permet de calculer les indicateurs d'Eutrophisation (EI), d'Acidification (AP), d'Ozone Troposphérique (POCP), de Toxicité (TP) et d'Éco-toxicité (EP) tels que présentés au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Indicateurs sociaux
calculés par l'outil ECORCE 2.0

Indicateur sociaux	Index
Eutrophisation	EI
Acidification	AP
Ozone Troposphérique	POCP
Toxicité	TP
Ecotoxicité	EP

Logiciel HDM-4

L'outil HDM-4 est utilisé pour la phase d'exploitation. Il permet de déterminer les coûts aux usagers (CU). Tel que défini au Tableau 4.2, cet indicateur exprimera les effets négatifs subis par les usagers pendant la phase d'exploitation de la chaussée sur le cycle de vie.

Tableau 4.2 Indicateur social
calculé par l'outil HDM-4

Indicateur social	Index
Coûts aux usagers	CU

4.5.2 Recherche des données

Les données de la validation de l'approche ont été obtenues auprès des firmes locales et dans la revue de littérature.

4.5.3 Intégration sur une plateforme

Les indicateurs calculés sur les différentes phases sont monétisés en utilisant la méthode d'évaluation monétaire européenne dite Écotax développée en 1998 en Suède. Les coûts de

référence sont actualisés et ramenés au prorata des PIB de la Suède et de la Côte d'Ivoire tels que présentés au Tableau 4.3. L'utilisation d'une plate-forme commune pour les coûts exprimés en dollars US permet la comparaison des coûts globaux des dommages des deux options de chaussée sur le cycle de vie.

Tableau 4.3 Hypothèse d'évaluation
des dommages des externalités
Adapté de Laratte et al. (2016)

Indicateur	Coût des dommages (\$ US / Kg)
Eutrophisation	0,6
Acidification	1,9
Ozone Troposphérique	47,2
Toxicité	0,1
Écotoxicité	6,9

4.5.4 Hypothèses

Les hypothèses considérées pour l'approche d'évaluation des dommages dus aux externalités des travaux de construction en fonction du dimensionnement des chaussées et du trafic sont résumées dans les tableaux de cette section de même que la localisation de la région du projet de construction.

Application : Localisation du projet

Le projet de l'Autoroute du Nord est un axe routier interrégional qui part d'Abidjan en Côte d'Ivoire pour relier les capitales des pays frontaliers au nord soit Ouagadougou au Burkina-Faso et Bamako au Mali, comme le montre la Figure 4.3. Cet axe permet de relier également Niamey au Niger plus au nord.



Figure 4.3 Localisation du site du projet
Tirée de (Levoyageducalao, 2018)

Cette étude utilise le dimensionnement structural des deux revêtements de chaussée en fonction de la variation du trafic des poids lourds, section par section, tels qu'indiqués dans les Tableaux 4.4 à 4.10.

Tableau 4.4 Pourcentage de poids lourds (véhicules / jours)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BANCO-GESCO	750	3500	6300	9100	11900	14700
GESCO-ATTINGUIÉ	534	2669	4804	6939	9074	11209
ATTINGUIÉ-PK50	438	2188	3938	5688	7488	9188

Tableau 4.5 Section Banco-Gesco - Épaisseurs des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EB (cm)	8	9	9	9	9	10
GB3 (cm)	15	20	20	20	20	22
GB3 (cm)	15	20	20	20	20	22

Tableau 4.6 Section Banco-Gesco - Épaisseurs des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BAC (cm)	18	18	20	20	20	20
BC2 (cm)	18	18	20	20	20	20

Tableau 4.7 Section Gesco-Attinguié - Épaisseurs des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EB (cm)	8	9	9	9	9	10
GB3 (cm)	13	18	18	20	20	20
GB3 (cm)	13	18	18	20	20	20

Tableau 4.8 Section Gesco-Attinguié - Épaisseurs des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)

JMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BAC (cm)	18	18	20	20	20	20
BC2 (cm)	18	18	20	20	20	20

Tableau 4.9 Section Attinguié-PK50 - Épaisseurs des couches de la chaussée en enrobé bitumineux (EB)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EB (cm)	8	9	9	9	9	10
GB3 (cm)	13	18	18	18	20	20
GB3 (cm)	13	18	18	18	20	20

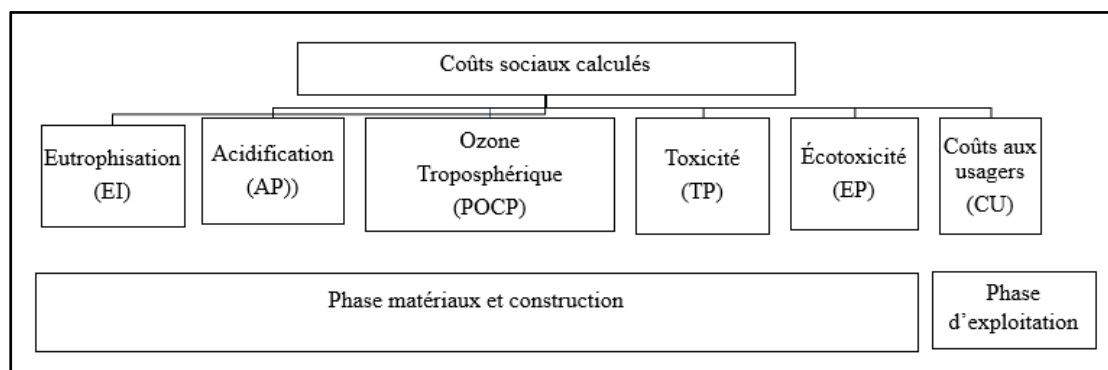
Tableau 4.10 Section Attinguié-PK50 - Épaisseurs des couches de la chaussée en béton armé continu (BAC)

DJMA	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
BAC (cm)	16	18	18	20	20	20
BC2 (cm)	18	18	18	20	20	20

4.5.5 Synthèse des indicateurs calculés

Le Tableau 4.11 synthétise les indicateurs calculés par les outils ECORCE 2.0 et HDM-4 v2.0 dans cette étude, respectivement pour les phases d'extraction et de production des matériaux, construction et pour la phase d'exploitation.

Tableau 4.11 Synthèse des indicateurs calculés



4.5.6 Comparaison des coûts des externalités

Les indicateurs calculés respectivement par les outils ECORCE 2.0 et HDM-4 v2.0 en prenant en compte la variation du trafic des poids lourds sont illustrés pour faire les graphiques aux fins de comparaison des deux options de chaussées. La chaussée la plus avantageuse pour les populations riveraines, les usagers de la route, la société en générale et l'environnement, est celle qui produira les plus faibles coûts occasionnés par les travaux routiers.

4.6 Résultats et analyse

Cette section présente les résultats obtenus ainsi que leur analyse selon les trois phases du cycle de vie étudiées à savoir la phase d'extraction et de production des matériaux, la phase construction et la phase d'exploitation.

4.6.1 Phase d'extraction et de production des matériaux de construction

4.6.1.1 Section Banco-Gesco

Les graphiques des Figures 4.4 à 4.8 représentent respectivement les résultats des dommages indicateurs sociaux EI, AP, POCP, TP et EP, pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Banco-Gesco.

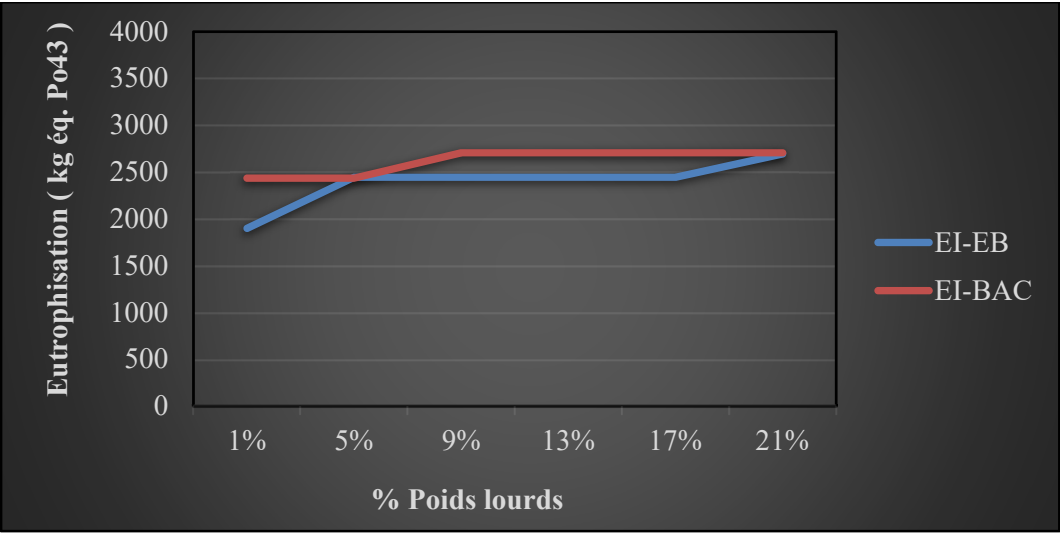


Figure 4.4 Eutrophication pour la section Banco-Gesco-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

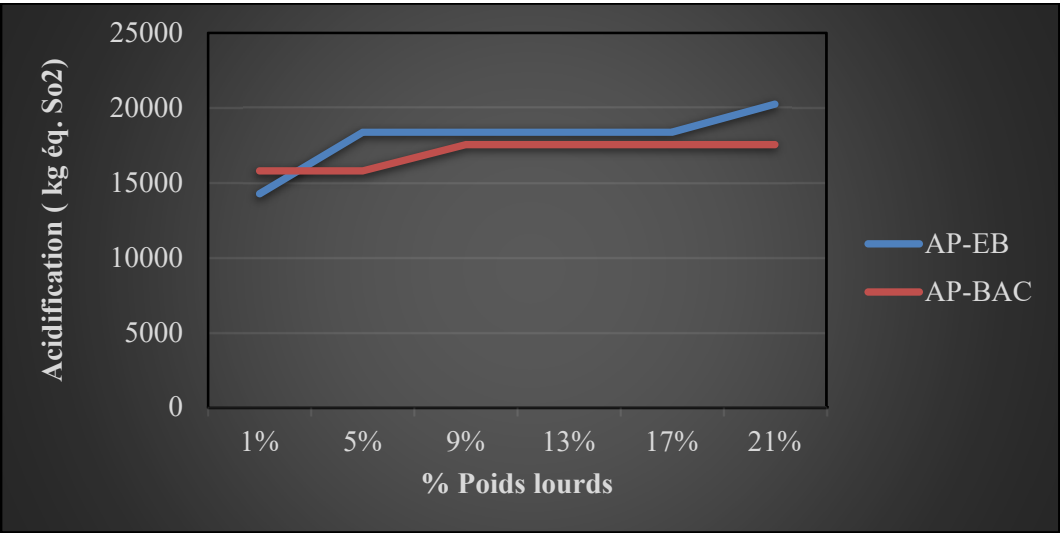


Figure 4.5 Acidification pour la section Banco-Gesco-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

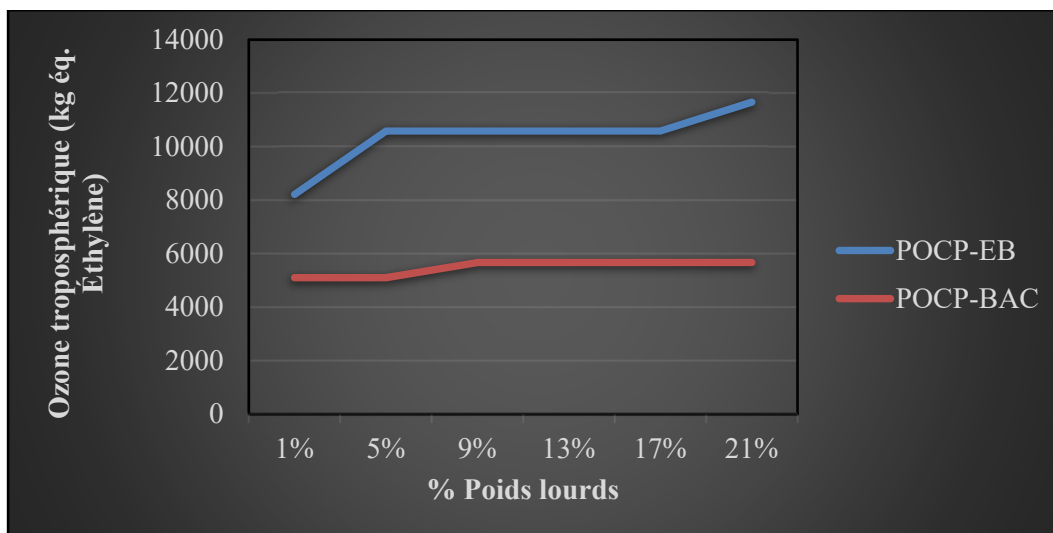


Figure 4.6 Ozone troposphérique pour la section Banco-Gesco-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

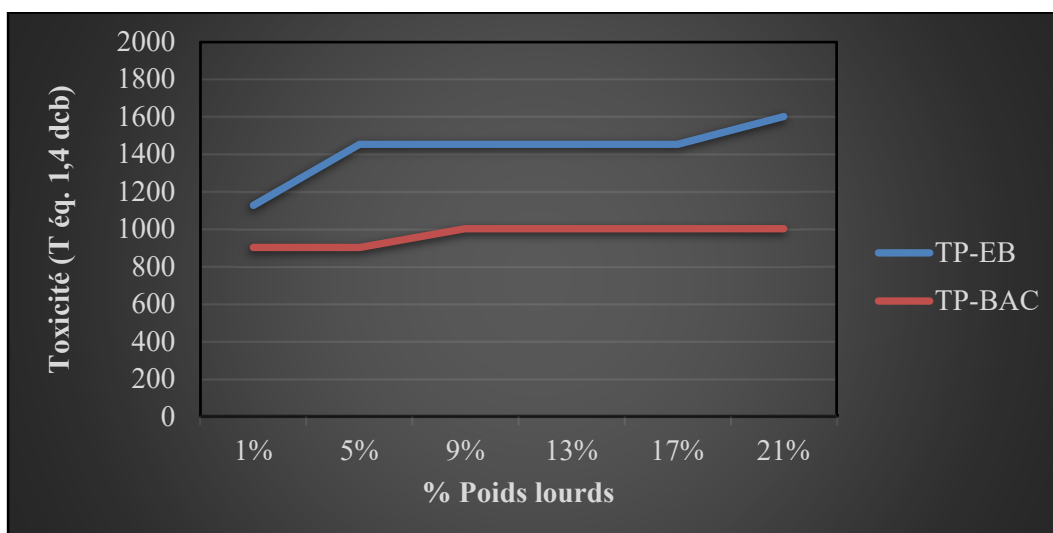


Figure 4.7 Toxicité pour la section Banco-Gesco-phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

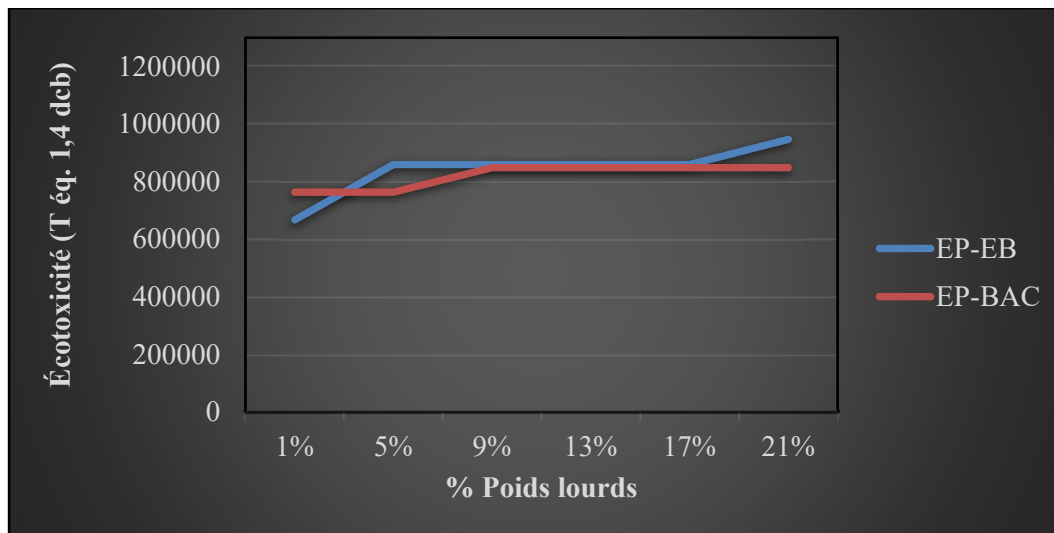


Figure 4.8 Écotoxicité pour la section Banco-Gesco-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

Le Tableau 4.12 présente pour chaque indicateur, le rapport des valeurs et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1% de poids lourds) au trafic lourd élevé (21% de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant les valeurs de la chaussée en enrobé (EB) par celles de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option BAC à l'option EB.

-Indicateur EI

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EI varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 42 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 0,78 à 1 et de -22 % à 0 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EI inférieur de 22 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) les deux chaussées ont le même niveau EI. Toutefois le niveau EI de la

chaussée en BAC reste constant alors que celui de la chaussée en EB anticipe une hausse après le niveau de trafic lourd élevé de 21 % tel qu'indiqué à la Figure 4.4.

Pour les niveaux de trafic lourds allant de 5 % à 17 %, les deux chaussées ont un niveau EI quasiment équivalent avec une légère baisse du niveau EI de 10 % en faveur de la chaussée en EB.

On en déduit donc que plus le trafic des poids lourds augmente, plus le niveau EI de la chaussée en EB augmente, alors que celui de la chaussée en BAC se stabilise et reste constant.

La chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds) et à l'inverse la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics lourds faibles de 1 à 17 % de poids lourds.

-Indicateur AP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 42 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 0,90 à 1,15 et de -10 % à 15 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP inférieur de 10 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP supérieur de 15 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour le niveau de trafic lourd de 5 % la chaussée en EB a un niveau AP supérieur de 16 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour les niveaux de trafic allant de 9 % à 17 %, les deux chaussées ont un niveau AP quasiment équivalent avec une légère baisse du niveau AP de 5 % en faveur de la chaussée en BAC. Les niveaux AP des deux

chaussées restent constants à partir du niveau de trafic lourd de 9 %. Celui de la chaussée en EB augmente toutefois à partir du niveau de trafic de 17 %.

On observe que la chaussée en EB est plus avantageuse pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) alors que la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les autres niveaux de trafic allant de 5 % à 21 % de poids lourds.

La chaussée en BAC est donc plus avantageuse que la chaussée en EB pour les trafics lourds élevés.

-Indicateur POCP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 42 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,61 à 2,06 et de 61 % à 106 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque le trafic des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur TP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 42 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,25 à 1,60 et de 25 % à 60 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque le trafic des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur EP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 42 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 0,87 à 1,12 et de -13 % à 12 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP inférieur de 13 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP supérieur de 12 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour le niveau de trafic lourd de 5 % la chaussée en EB a un niveau EP supérieur de 13 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour les niveaux de trafic allant de 9 % à 17 %, les deux chaussées ont un niveau EP quasiment équivalent. Les niveaux EP des deux chaussées restent constants à partir du niveau de trafic lourd de 9 %. Celui de la chaussée en EB augmente toutefois à partir du niveau de trafic de 17 %.

On observe que la chaussée en EB est plus avantageuse pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) alors que la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les autres niveaux de trafic allant de 5 % à 21 % de poids lourds.

La chaussée en BAC est donc plus avantageuse que la chaussée en EB pour les trafics lourds élevés.

Tableau 4.12 Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Banco-Gesco-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction

	% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EI	Rapport	0,78	1,00	0,90	0,90	0,90	1,00
	Taux (%)	-22	0	-10	-10	-10	0
AP	Rapport	0,90	1,16	1,05	1,05	1,05	1,15
	Taux (%)	-10	16	5	5	5	15
POCP	Rapport	1,61	2,07	1,87	1,87	1,87	2,06
	Taux (%)	61	107	87	87	87	106
TP	Rapport	1,25	1,61	1,45	1,45	1,45	1,60
	Taux (%)	25	61	45	45	45	60
EP	Rapport	0,87	1,13	1,01	1,01	1,01	1,12
	Taux (%)	-13	13	1	1	1	12

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.1.2 Section Gesco-Attinguié

Les graphiques des Figures 4.9 à 4.13 représentent respectivement les résultats des indicateurs sociaux EI, AP, POCP, TP et EP, pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Gesco-Attinguié.

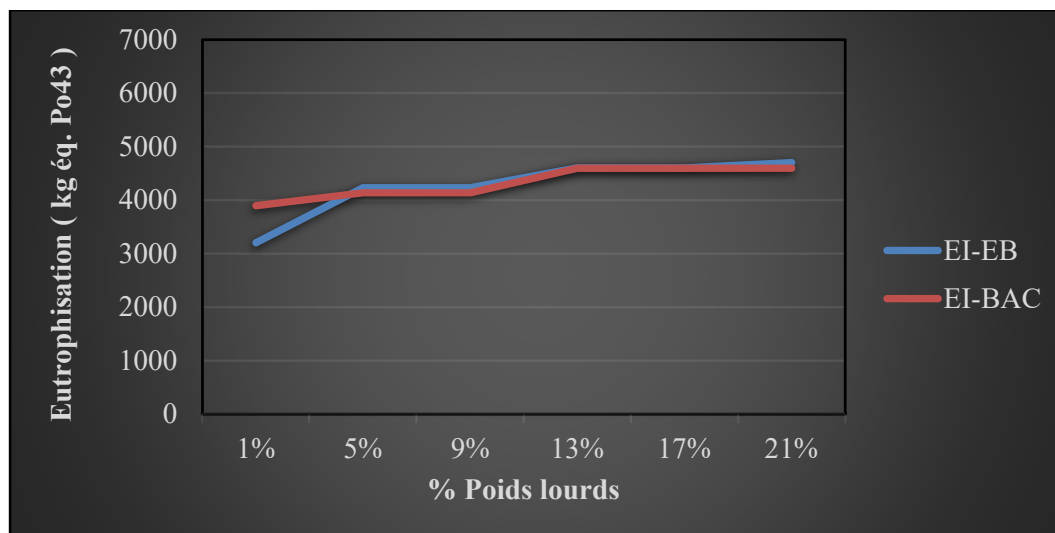


Figure 4.9 Eutrophication pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

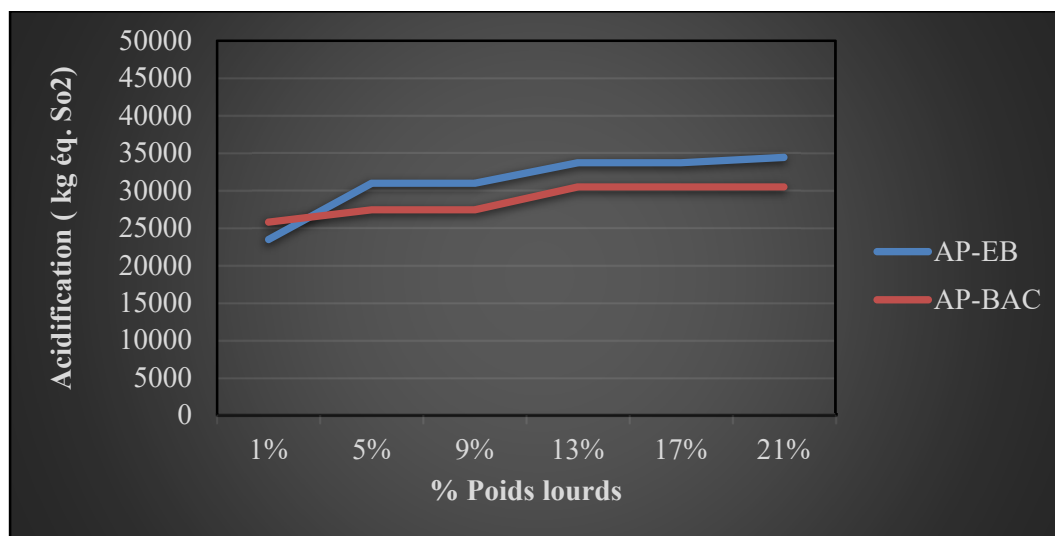


Figure 4.10 Acidification pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

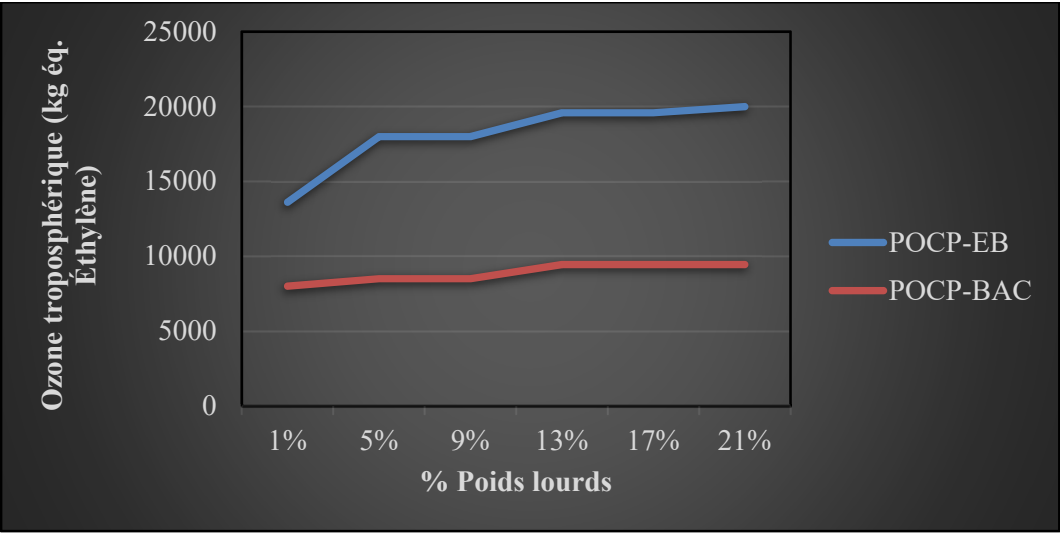


Figure 4.11 Ozone troposphérique pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

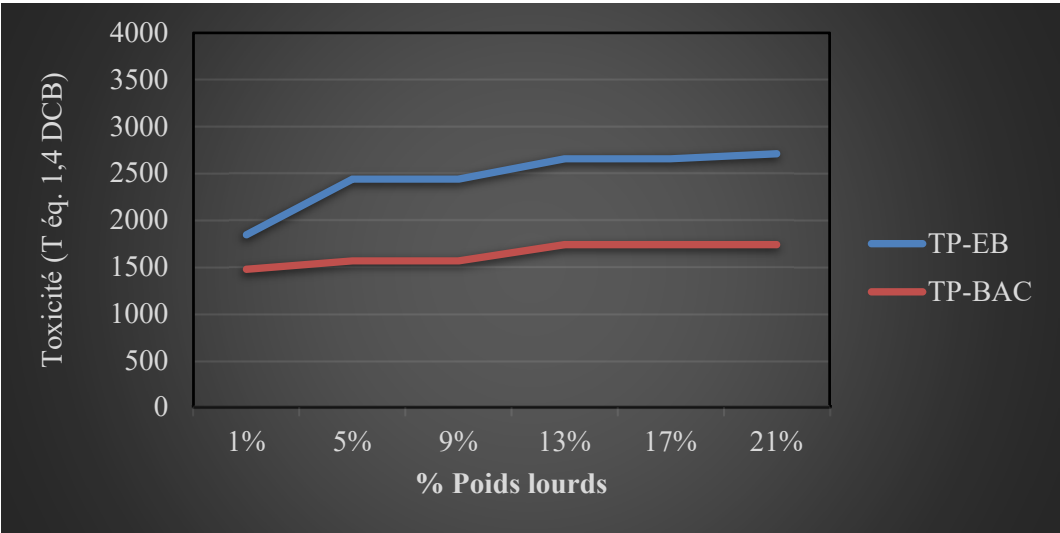


Figure 4.12 Toxicité pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

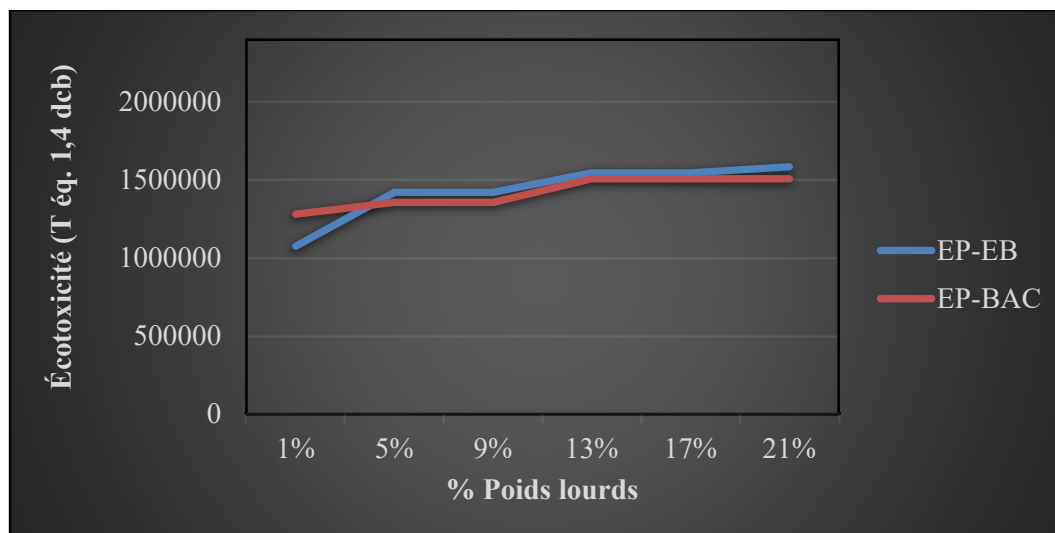


Figure 4.13 Écotoxicité pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

Le Tableau 13 présente pour chaque indicateur, le rapport des valeurs et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1% de poids lourds) au trafic lourd élevé (21% de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant les valeurs de la chaussée en enrobé (EB) par celles de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option BAC à l'option EB.

-Indicateur EI

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EI varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 0,82 à 1,02 et de -18 % à 2 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EI inférieur de 18 % par rapport à celui de la chaussée en BAC et pour le trafic lourd élevé (21

% de poids lourds) elle a un niveau EI supérieur de 2 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Dans l'intervalle du niveau de trafic lourd de 5 % à 17 %, les deux chaussées ont un niveau EI quasiment équivalent avec une légère baisse pour la chaussée en BAC de 2 % et 0 % respectivement pour les niveaux de trafic de poids lourds de 5 % à 9 % et de 13 % à 17 %. À partir du niveau de trafic de poids lourds de 13 % les niveaux EI des deux chaussées sont équivalents et constants mais celui de la chaussée en EB a une tendance à la hausse à partir du niveau de trafic de poids lourds de 17 %.

On en déduit donc que plus le trafic des poids lourds augmente, plus le niveau EI de la chaussée en EB augmente. Le niveau EI de la chaussée en BAC augmente également en restant inférieur ou égal à celui de la chaussée en EB. Toutefois le niveau EI de la chaussée en BAC reste constant à partir du niveau de trafic de poids lourds de 13 %.

La chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés de 5 % à 21 % de poids lourds et à l'inverse la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics lourds faibles de 1 % de poids lourds.

-Indicateur AP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 0,91 à 1,13 et de -9 % à 13 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP inférieur de -9 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP supérieur de 13 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour les niveaux de trafic lourd de 5 % à 17 % le niveau AP de la chaussée en EB augmente. Le niveau AP de la chaussée en BAC augmente également et reste inférieur

par rapport à celui de la chaussée en EB de 13 % et 11 % respectivement pour les niveaux de trafic de poids lourds de 5 % à 9 % et de 13 % à 17 %.

On observe que la chaussée en EB est plus avantageuse pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) alors que la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les autres niveaux de trafic allant de 5 % à 21 % de poids lourds.

La chaussée en BAC est donc plus avantageuse que la chaussée en EB pour les trafics lourds élevés.

-Indicateur POCP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,70 à 2,11 et de 70 % à 111 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque le trafic des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur TP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,25 à 1,56 et de 25 % à 56 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque le trafic des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur EP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 0,84 à 1,05 et de -16 % à 5 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP inférieur de 16 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP supérieur de 5 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Dans l'intervalle du niveau de trafic lourd de 5 % à 17 %, les deux chaussées sont quasiment équivalentes avec une légère baisse pour la chaussée en BAC de 5 % et 3 % respectivement pour les niveaux de trafic de poids lourds de 5 % à 9 % et de 13 % à 17 %.

On observe que la chaussée en EB est plus avantageuse pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) alors que la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les autres niveaux de trafic allant de 5 % à 21 % de poids lourds.

La chaussée en BAC est donc plus avantageuse que la chaussée en EB pour les trafics lourds élevés.

Tableau 4.13 Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction

	% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EI	Rapport	0,82	1,02	1,02	1,00	1,00	1,02
	Taux (%)	-18	2	2	0	0	2
AP	Rapport	0,91	1,13	1,13	1,11	1,11	1,13
	Taux (%)	-9	13	13	11	11	13
POCP	Rapport	1,70	2,11	2,11	2,07	2,07	2,11
	Taux (%)	70	111	111	107	107	111
TP	Rapport	1,25	1,56	1,56	1,53	1,53	1,56
	Taux (%)	25	56	56	53	53	56
EP	Rapport	0,84	1,05	1,05	1,03	1,03	1,05
	Taux (%)	-16	5	5	3	3	5

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.1.3 Section Attinguié-PK50

Les graphiques des 4.14 à 4.18 représentent respectivement les résultats des indicateurs sociaux EI, AP, POCP, TP et EP, pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Attinguié-PK50.

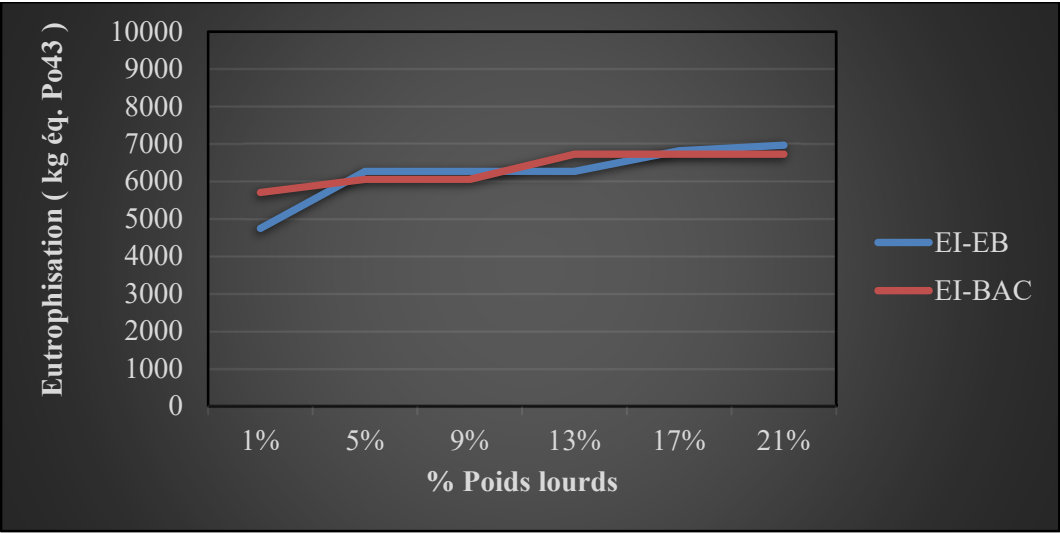


Figure 4.14 Eutrophisation pour la section Attinguié-PK50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

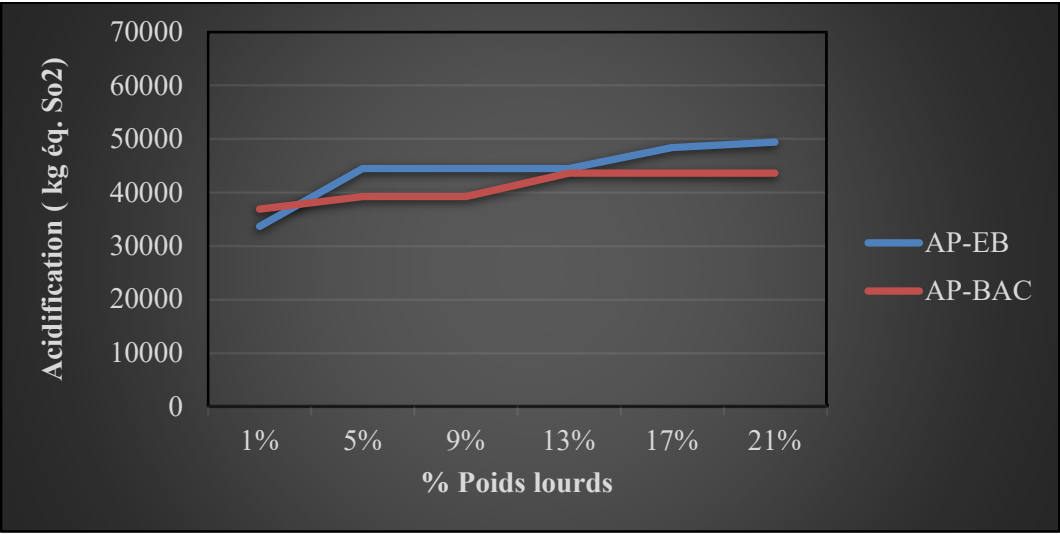


Figure 4.15 Acidification pour la section Attinguié-PK50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

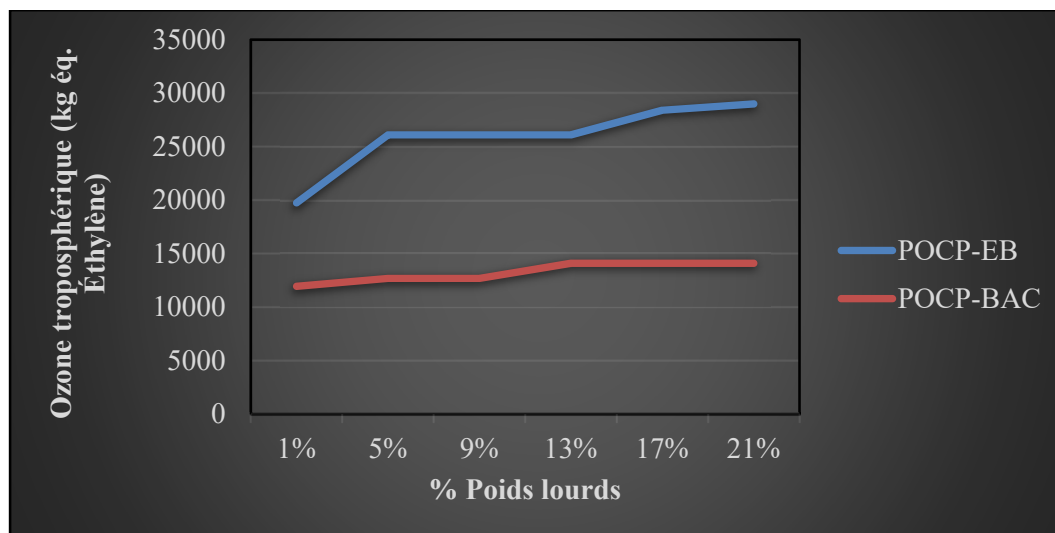


Figure 4.16 Ozone troposphérique pour la section Attinguié-PK50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

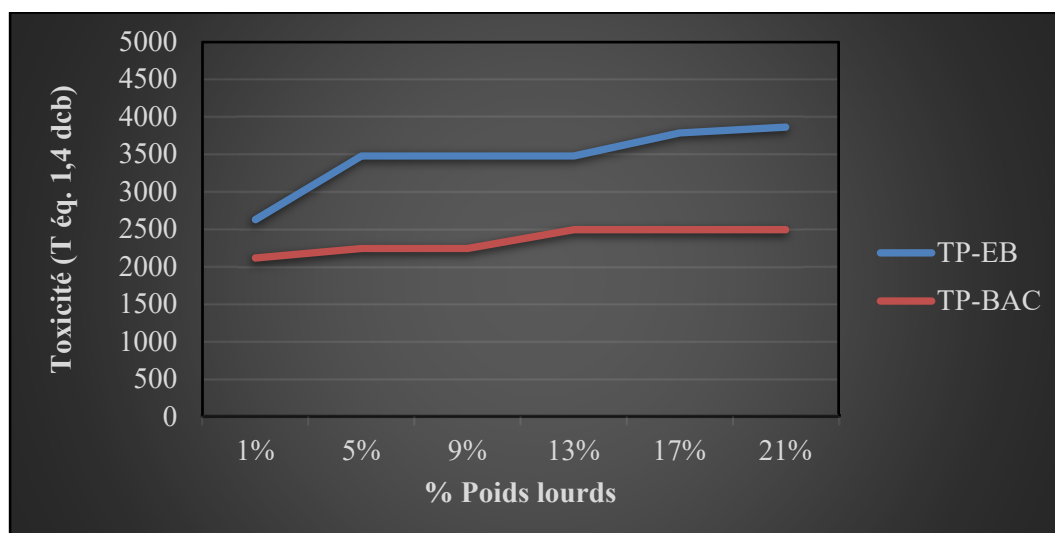


Figure 4.17 Toxicité pour la section Attinguié-PK 50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

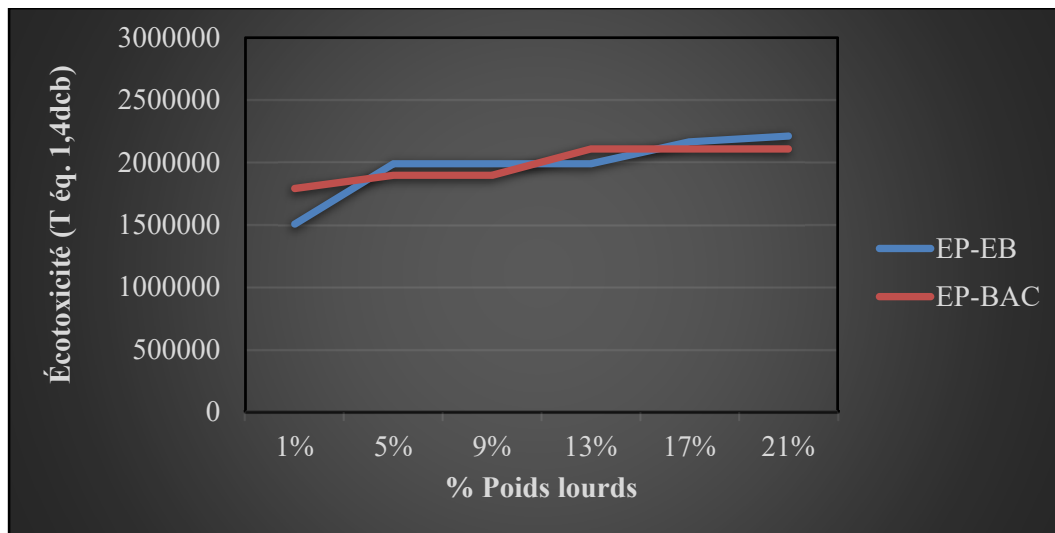


Figure 4.18 Écotoxicité pour la section Attinguié-PK50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction (logiciel ECORCE 2.0)

Le Tableau 4.14 présente pour chaque indicateur, le rapport des valeurs et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1% de poids lourds) au trafic lourd élevé (21% de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant les valeurs de la chaussée en enrobé (EB) par celles de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option BAC à l'option EB.

-Indicateur EI

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EI varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 0,83 à 1,04 et de -17 % à 4 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EI inférieur de 17 % par rapport à celui de la chaussée en BAC et pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) elle a un niveau EI supérieur de 4 % par rapport à celui de la chaussée en

BAC. Dans l'intervalle du niveau de trafic de poids lourds de 5 % à 9 %, la chaussée en EB a un niveau EI supérieur de 4 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Elle a ensuite un niveau EI inférieur de 7 % par rapport à la chaussée en BAC pour le niveau de trafic de poids lourds de 13 %. Pour les niveaux de trafic de poids lourds variant de 17 % à 21 %, elle a un niveau EI supérieur de 1 à 4 % par rapport à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit donc que plus le trafic des poids lourds augmente, plus le niveau EI de la chaussée en EB augmente. Le niveau EI de la chaussée en BAC augmente également dans le même temps et reste inférieur et constant à partir du trafic de poids lourds de 13 % jusqu'à 21 %. Ainsi, la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics de poids lourds de 1 % et 13 %. Pour les autres niveaux de trafics, la chaussée en BAC est plus avantageuse.

La chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds) alors que la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds).

-Indicateur AP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 0,91 à 1,13 et de -9 % à 13 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP inférieur de -9 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP supérieur de 13 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour les niveaux de trafic lourd de 5 % à 17 % le niveau AP de la chaussée en EB augmente. Le niveau AP de la chaussée en BAC augmente également et reste inférieur

par rapport à celui de la chaussée en EB de 13 %, 11 % et 2 % respectivement pour les niveaux de trafic de poids lourds de 5 % à 9 %, de 13 % et 17 %.

On observe que la chaussée en EB est plus avantageuse pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) alors que la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les autres niveaux de trafic allant de 5 % à 21 % de poids lourds.

La chaussée en BAC est donc plus avantageuse que la chaussée en EB pour les trafics lourds élevés.

-Indicateur POCP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,65 à 2,06 et de 65 % à 106 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur TP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,24 à 1,55 et de 24 % à 55 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur EP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 0,84 à 1,05 et de -16 % à 5 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP inférieur de 16 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP supérieur de 5 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Dans l'intervalle du niveau de trafic de poids lourds de 5 % à 9 %, la chaussée en EB a un niveau EI supérieur de 5 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Elle a ensuite un niveau EI inférieur de 6 % par rapport à la chaussée en BAC pour le niveau de trafic de poids lourds de 13 %. Pour les niveaux de trafic de poids lourds variant de 17 % à 21 %, elle a un niveau EI supérieur de 3 à 5 % par rapport à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit donc que plus le trafic des poids lourds augmente, plus le niveau EI de la chaussée en EB augmente. Le niveau EI de la chaussée en BAC augmente également dans le même temps et reste inférieur et constant à partir du trafic de poids lourds de 13 % jusqu'à 21 %.

Ainsi, la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics de poids lourds de 1 % et 13 % de poids lourds. Pour les autres niveaux de trafics, la chaussée en BAC est plus avantageuse.

La chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds) alors que la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds).

Tableau 4.14 Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Attinguié-PK50-Phase d'extraction et de production des matériaux de construction

	% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EI	Rapport	0,83	1,04	1,04	0,93	1,01	1,04
	Taux (%)	-17	4	4	-7	1	4
AP	Rapport	0,91	1,13	1,13	1,02	1,11	1,13
	Taux (%)	-9	13	13	2	11	13
POCP	Rapport	1,65	2,06	2,06	1,85	2,01	2,06
	Taux (%)	65	106	106	85	101	106
TP	Rapport	1,24	1,55	1,55	1,39	1,52	1,55
	Taux (%)	24	55	55	39	52	55
EP	Rapport	0,84	1,05	1,05	0,94	1,03	1,05
	Taux (%)	-16	5	5	-6	3	5

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.2 Phase de construction

4.6.2.1 Section Banco-Gesco

Les graphiques des Figures 4.19 à 4.23 représentent respectivement les résultats des indicateurs sociaux EI, AP, POCP, TP et EP, pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Banco-Gesco.

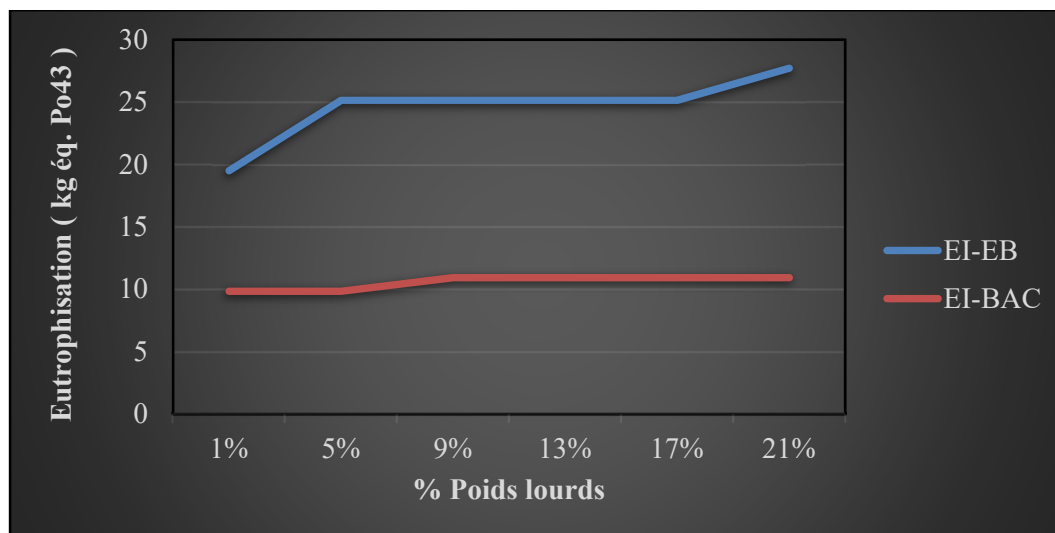


Figure 4.19 Eutrophisation pour la section Banco-Gesco-Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

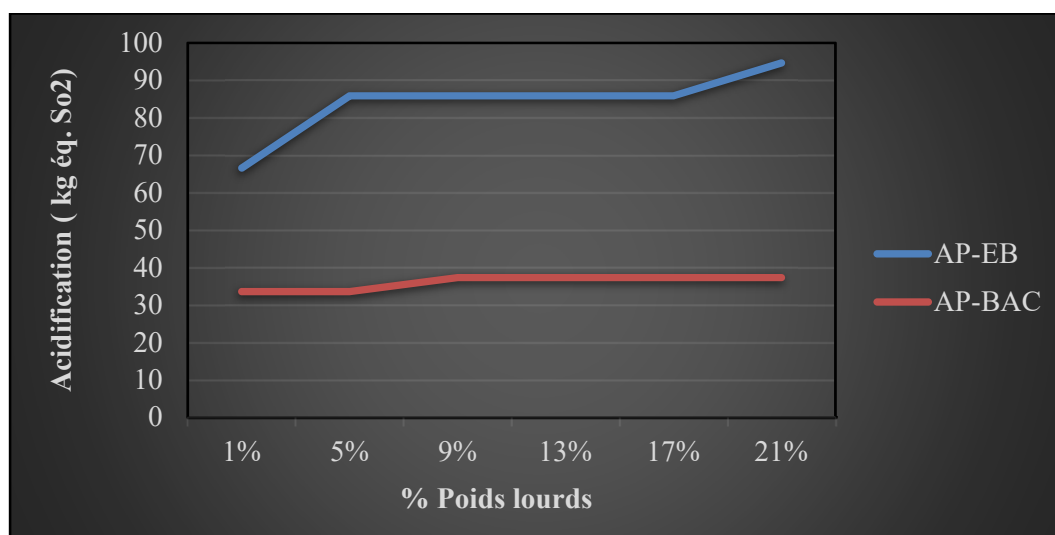


Figure 4.20 Acidification pour la section Banco-Gesco-Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

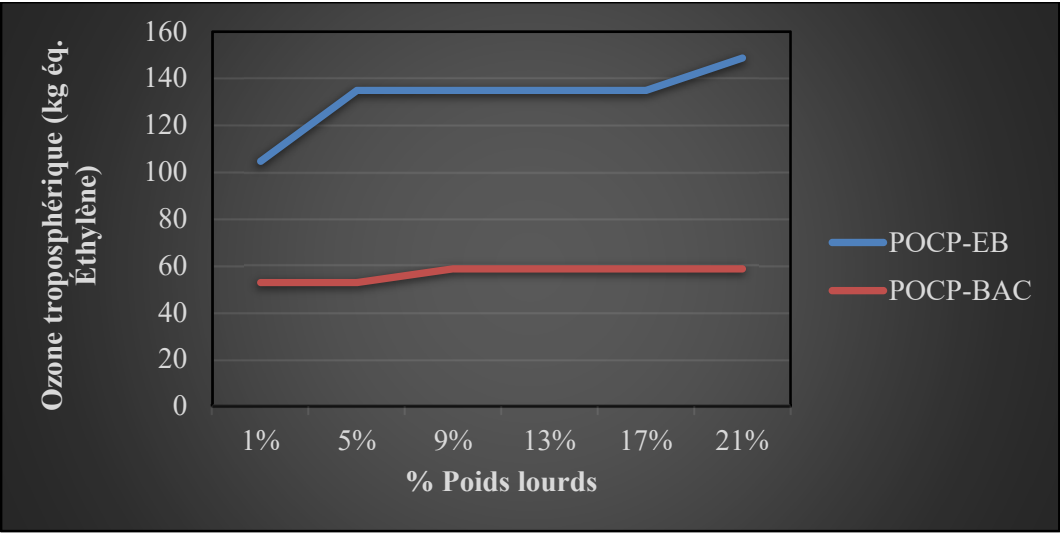


Figure 4.21 Ozone troposphérique pour la section Banco-Gesco-Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

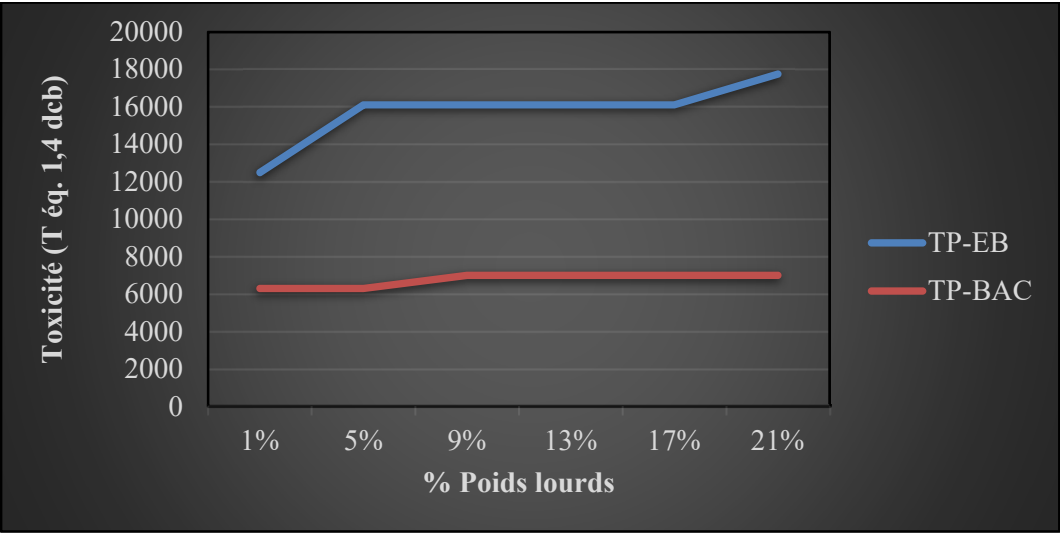


Figure 4.22 Toxicité pour la section Banco-Gesco-Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

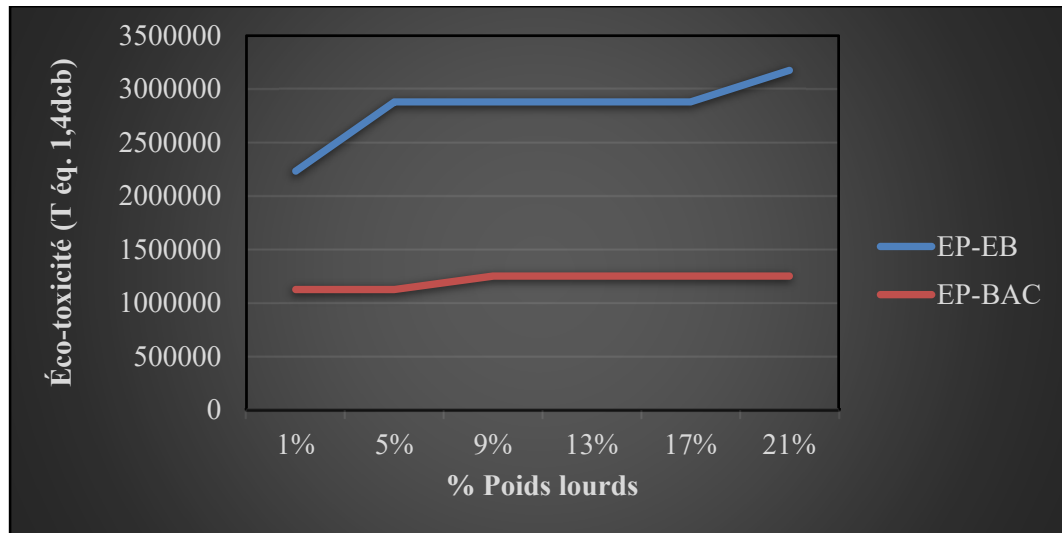


Figure 4.23 Écotoxicité pour la section Banco-Gesco-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

Le Tableau 4.15 présente pour chaque indicateur, le rapport des valeurs et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1% de poids lourds) au trafic lourd élevé (21% de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant les valeurs de la chaussée en enrobé (EB) par celles de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option BAC à l'option EB.

-Indicateur EI

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EI varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 43 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,98 à 2,53 et de 98 % à 153 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EI de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur AP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 43 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,98 à 2,53 et de 98 % à 153 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau AP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur POCP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 43 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,98 à 2,53 et de 98 % à 153 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur TP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 43 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,98 à 2,53 et de 98 % à 153 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur EP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 43 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,98 à 2,53 et de 98 % à 153 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Tableau 4.15 Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Banco-Gesco-Phase construction

	% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EI	Rapport	1,98	2,55	2,30	2,30	2,30	2,53
	Taux (%)	98	155	130	130	130	153
AP	Rapport	1,98	2,55	2,30	2,30	2,30	2,53
	Taux (%)	98	155	130	130	130	153
POCP	Rapport	1,98	2,55	2,30	2,30	2,30	2,53
	Taux (%)	98	155	130	130	130	153
TP	Rapport	1,98	2,55	2,30	2,30	2,30	2,53
	Taux (%)	98	155	130	130	130	153
EP	Rapport	1,98	2,55	130	130	130	2,53
	Taux (%)	98	155	130	130	130	153

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.2.2 Section Gesco-Attinguié

Les graphiques des Figures 4.24 à 4.28 représentent respectivement les résultats des indicateurs sociaux EI, AP, POCP, TP et EP, pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Gesco-Attinguié.

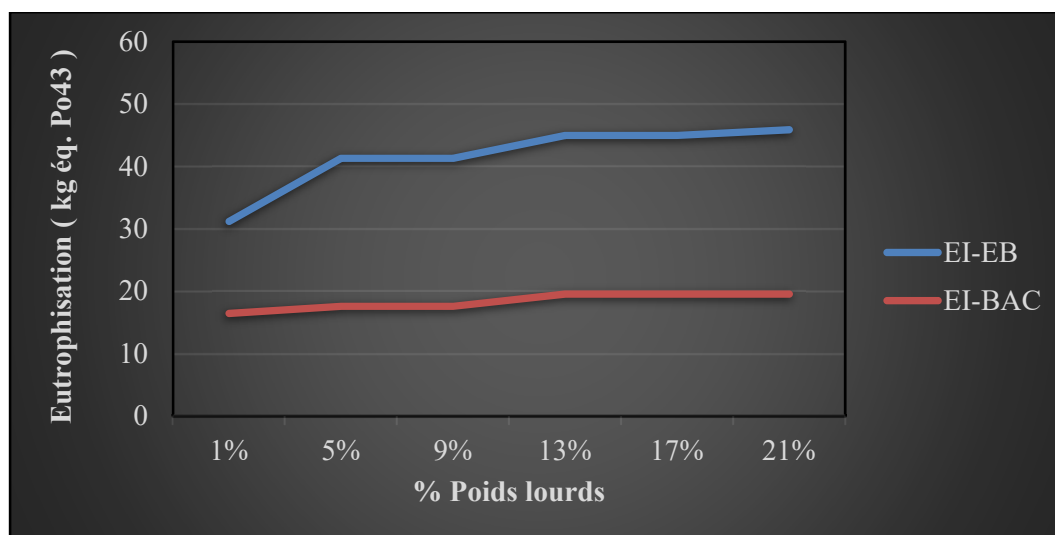


Figure 4.24 Eutrophisation pour la section Gesco-Attinguié-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

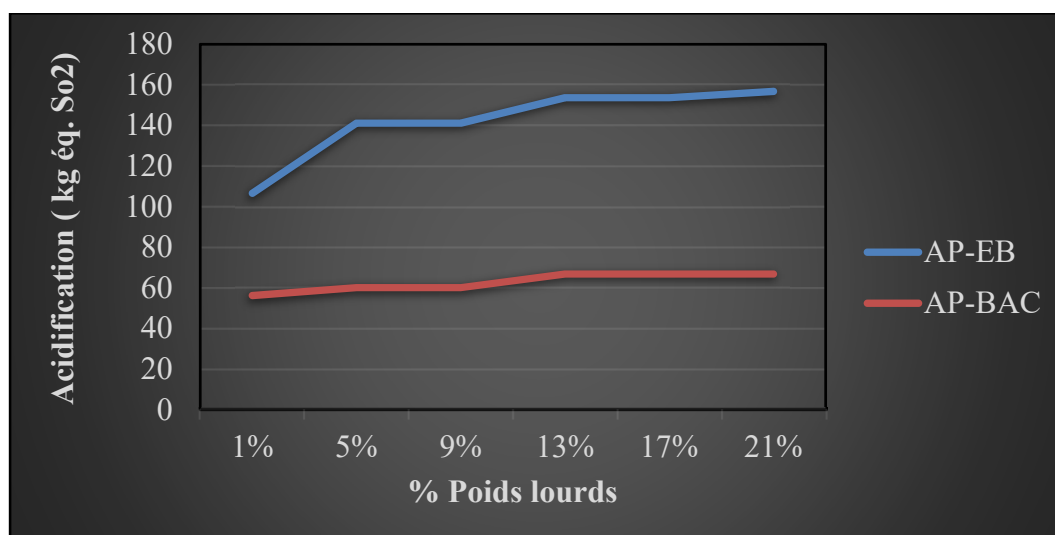


Figure 4.25 Acidification pour la section Gesco-Attinguié-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

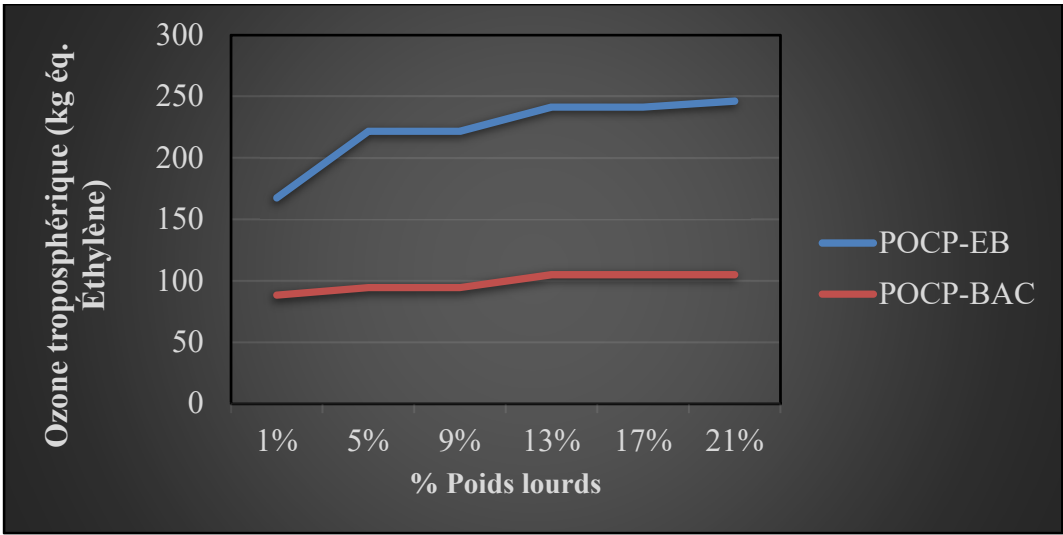


Figure 4.26 Ozone troposphérique pour la section Gesco-Attinguié-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

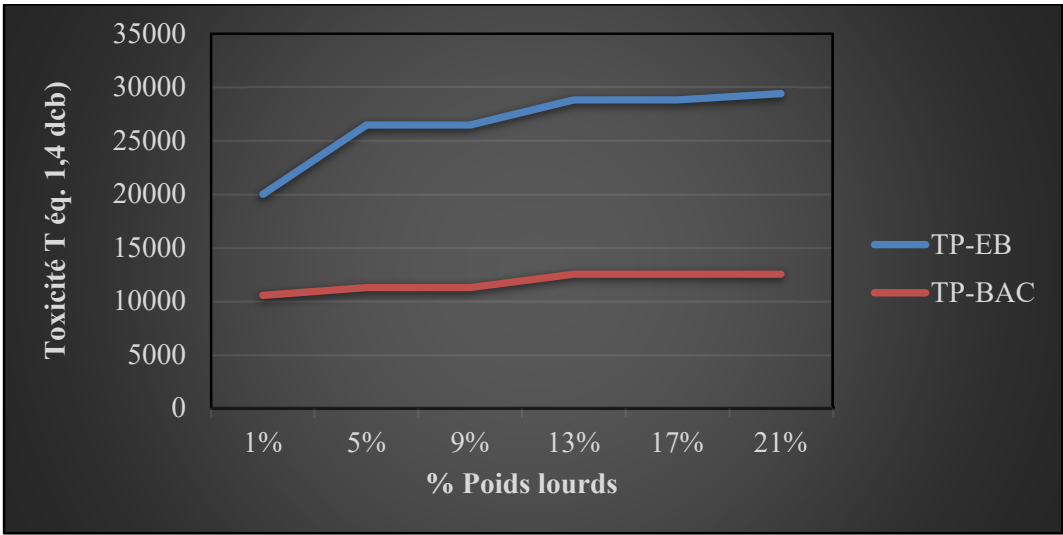


Figure 4.27 Toxicité pour la section Gesco-Attinguié-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

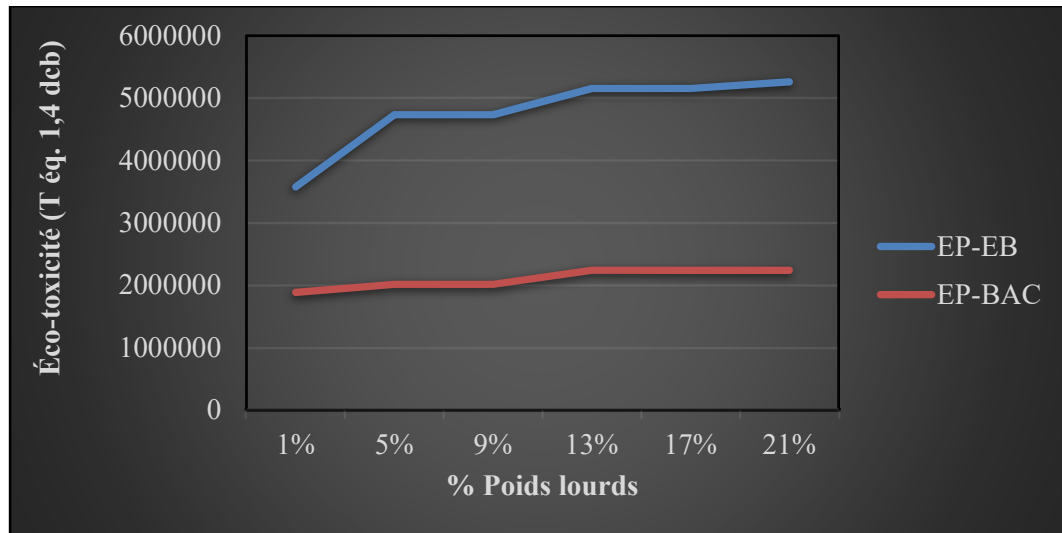


Figure 4.28 Écotoxicité pour la section Gesco-Attinguié-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

Le Tableau 4.16 présente pour chaque indicateur, le rapport des valeurs et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1% de poids lourds) au trafic lourd élevé (21% de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant les valeurs de la chaussée en enrobé (EB) par celles de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option BAC à l'option EB.

-Indicateur EI

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EI varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EI de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur AP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau AP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur POCP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur TP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur EP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Tableau 4.16 Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Gesco-Attinguié-Phase construction

	% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EI	Rapport	1,90	2,35	2,35	2,30	2,30	2,35
	Taux (%)	90	135	135	130	130	135
AP	Rapport	1,90	2,35	2,35	2,30	2,30	2,35
	Taux (%)	90	135	135	130	130	135
POCP	Rapport	1,90	2,35	2,35	2,30	2,30	2,35
	Taux (%)	90	135	135	130	130	135
TP	Rapport	1,90	2,35	2,35	2,30	2,30	2,35
	Taux (%)	90	135	135	130	130	135
EP	Rapport	1,90	2,35	2,35	2,30	2,30	2,35
	Taux (%)	90	135	135	130	130	135

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.2.3 Section Attinguié-PK50

Les graphiques des Figures 4.29 à 4.33 représentent respectivement les résultats des indicateurs sociaux EI, AP, POCP, TP et EP, pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Attinguié-PK50.

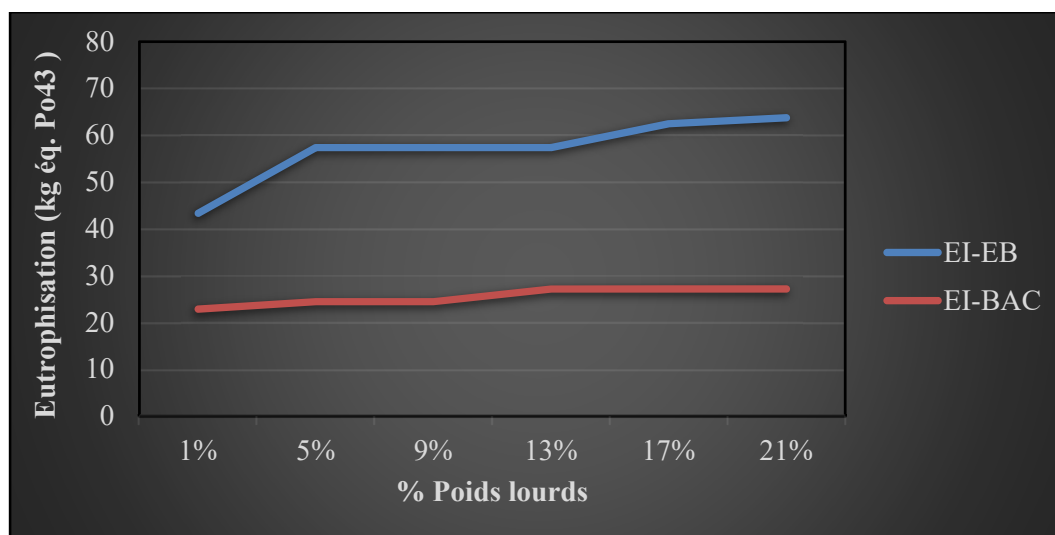


Figure 4.29 Eutrophisation pour la section Attinguié-PK50-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

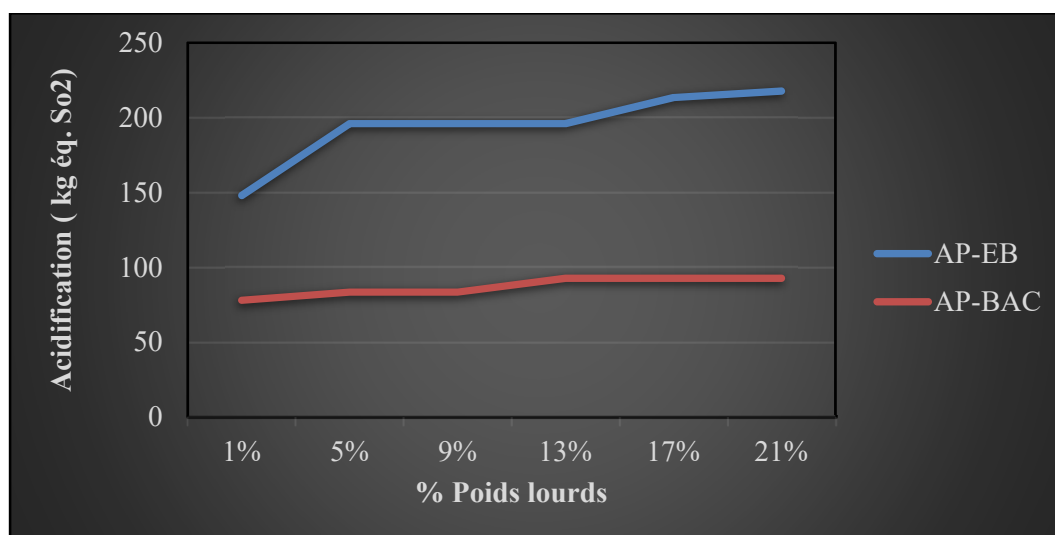


Figure 4.30 Acidification pour la section Attinguié-PK50-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

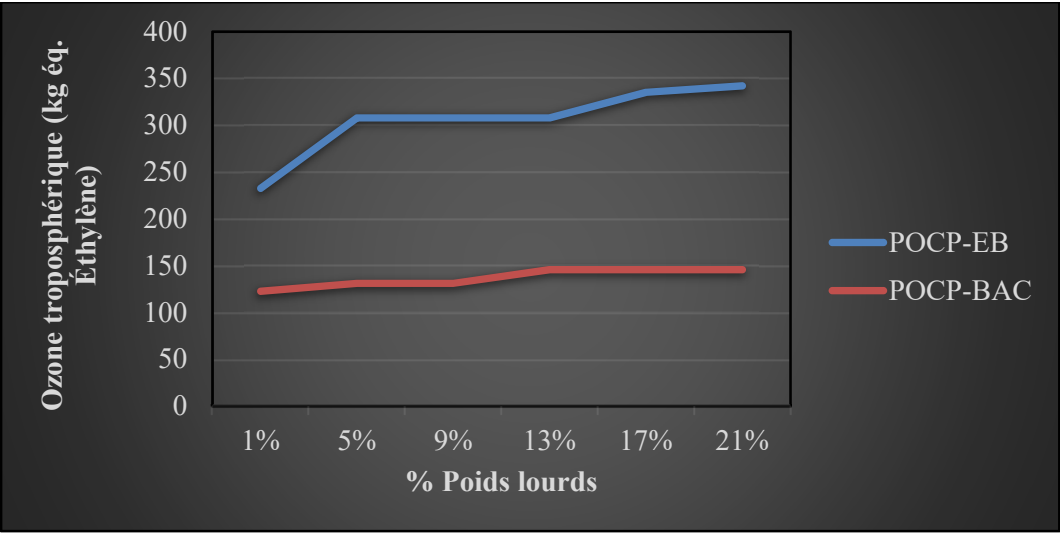


Figure 4.31 Ozone troposphérique pour la section Attinguié-PK50-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

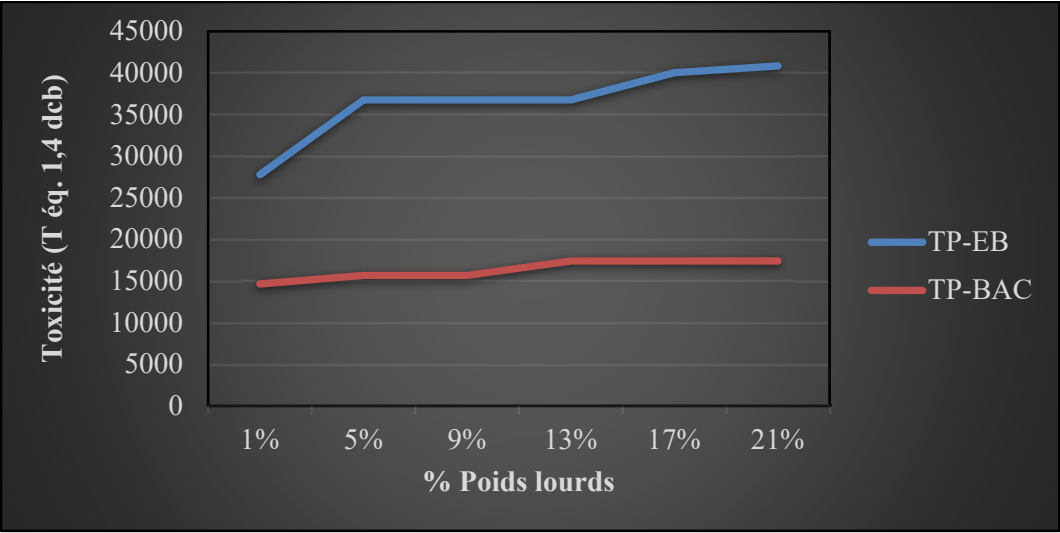


Figure 4.32 Toxicité pour la section Attinguié-PK50-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

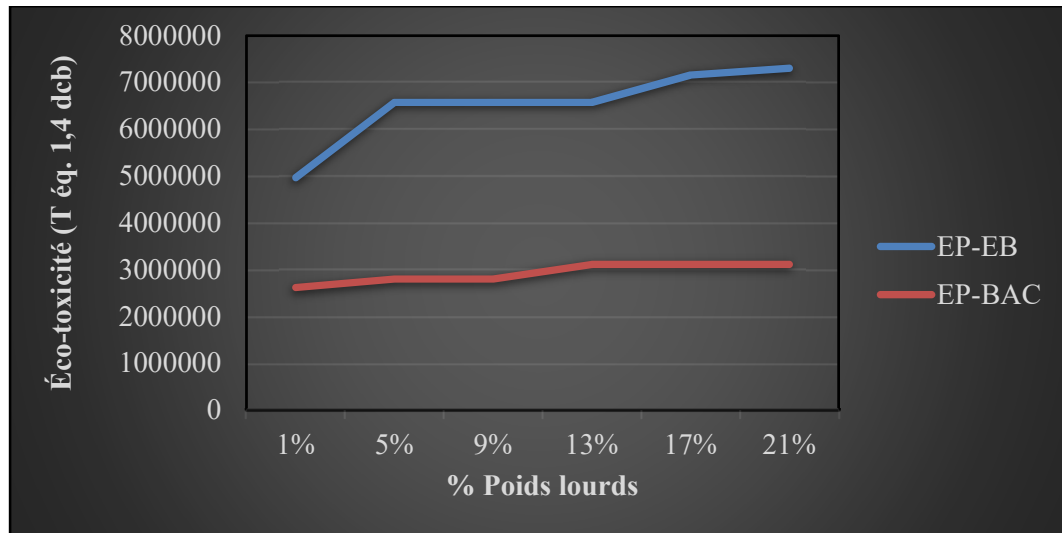


Figure 4.33 Écotoxicité pour la section Attinguié-PK50-
Phase construction (logiciel ECORCE 2.0)

Le Tableau 4.17 présente pour chaque indicateur, le rapport des valeurs et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1% de poids lourds) au trafic lourd élevé (21% de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant les valeurs de la chaussée en enrobé (EB) par celles de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option BAC à l'option EB.

-Indicateur EI

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EI varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EI de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur AP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau AP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur POCP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur TP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

-Indicateur EP

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Tableau 4.17 Récapitulatif des résultats des cinq indicateurs pour la section Attinguié-PK50-Phase construction

	% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
EI	Rapport	1,90	2,35	2,35	2,11	2,30	2,35
	Taux (%)	90	135	135	111	130	135
AP	Rapport	1,90	2,35	2,35	2,11	2,30	2,35
	Taux (%)	90	135	135	111	130	135
POCP	Rapport	1,90	2,35	2,35	2,11	2,30	2,35
	Taux (%)	90	135	135	111	130	135
TP	Rapport	1,90	2,35	2,35	2,11	2,30	2,35
	Taux (%)	90	135	135	111	130	135
EP	Rapport	1,90	2,35	2,35	2,11	2,30	2,35
	Taux (%)	90	135	135	111	130	135

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.3 Phase d'exploitation

4.6.3.1 Section Banco-Gesco

Le graphique de Figure 4.34 représente les résultats des indicateurs sociaux CU, pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Banco-Gesco.

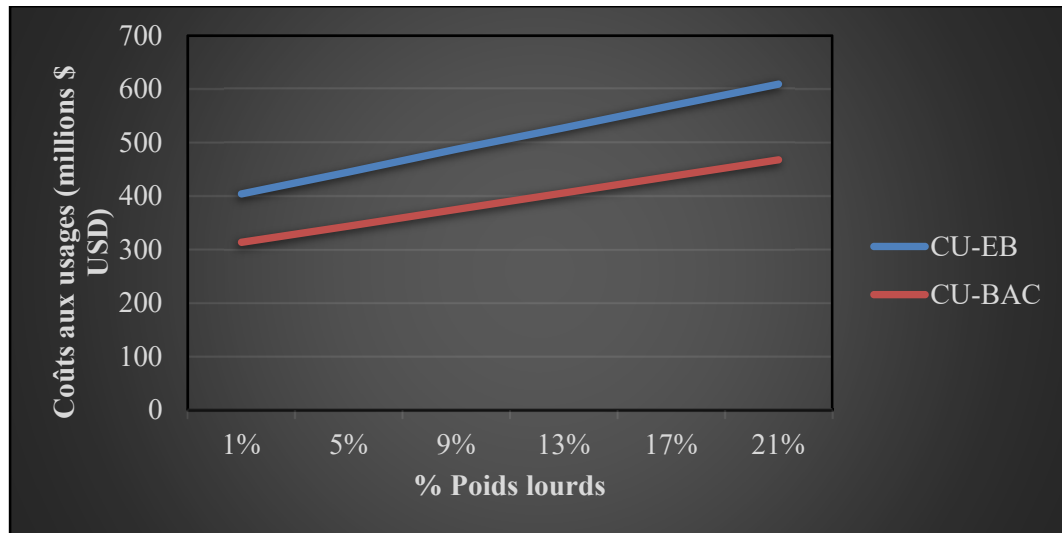


Figure 4.34 Coûts aux usagers pour la section Banco-Gesco-
Phase d'utilisation (logiciel HDM-4 v2.0)

Le Tableau 4.18 présente le rapport des valeurs et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1% de poids lourds) au trafic lourd élevé (21% de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant les valeurs de la chaussée en enrobé (EB) par celles de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option BAC à l'option EB.

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur CU varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 51 % et 49 %.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,29 à 1,30 et de 29 % à 30 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les coûts aux usagers (CU) de la chaussée en EB sont toujours supérieurs à ceux de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Tableau 4.18 Résultats de l'indicateur CU pour la section Banco-Gesco-Phase d'utilisation

	% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
CU	Rapport	1,29	1,29	1,30	1,30	1,30	1,30
	Taux (%)	29	29	30	30	30	30

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.3.2 Section Gesco-Attinguié

Le graphique de Figure 4.35 représente les résultats des indicateurs sociaux CU, pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Gesco-Attinguié.

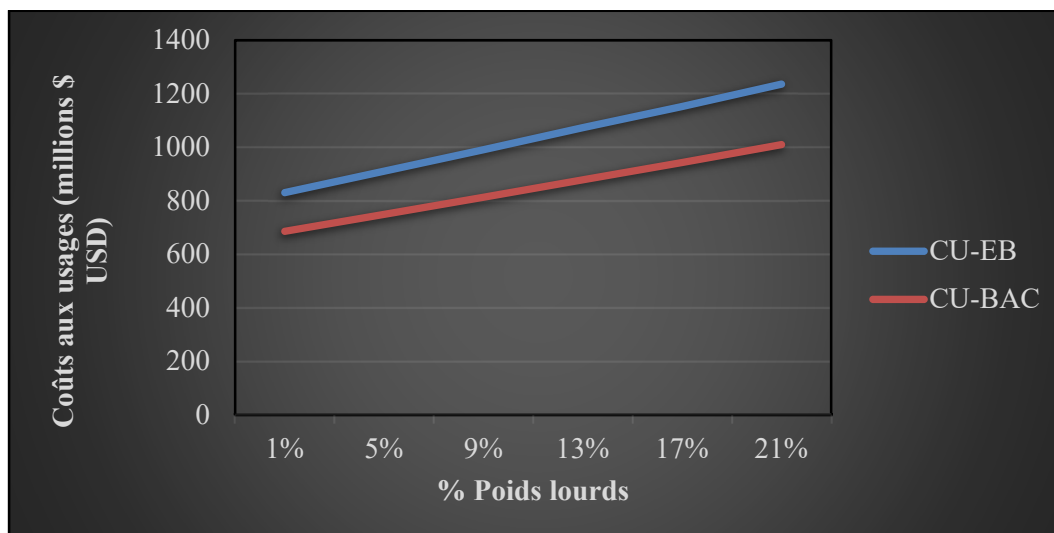


Figure 4.35 Coûts aux usagers pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'utilisation (logiciel HDM-4 v2.0)

Le Tableau 4.19 présente le rapport des valeurs et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1 % de poids lourds) au trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant les valeurs de la chaussée en enrobé (EB) par celles de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option BAC à l'option EB.

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur CU varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 50 % et 47 %.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,21 à 1,22 et de 21 % à 22 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 %) à un trafic lourd élevé (21 %).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les coûts aux usagers (CU) de la chaussée en EB sont toujours supérieurs à ceux de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Tableau 4.19 Résultats de l'indicateur CU
pour la section Gesco-Attinguié-Phase d'utilisation

	% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
CU	Rapport	1,21	1,21	1,22	1,22	1,22	1,22
	Taux (%)	21	21	22	22	22	22

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.3.3 Section Attinguié-PK50

Le graphique de la Figure 4.36 représente les résultats des indicateurs sociaux CU, pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Attinguié-PK50.

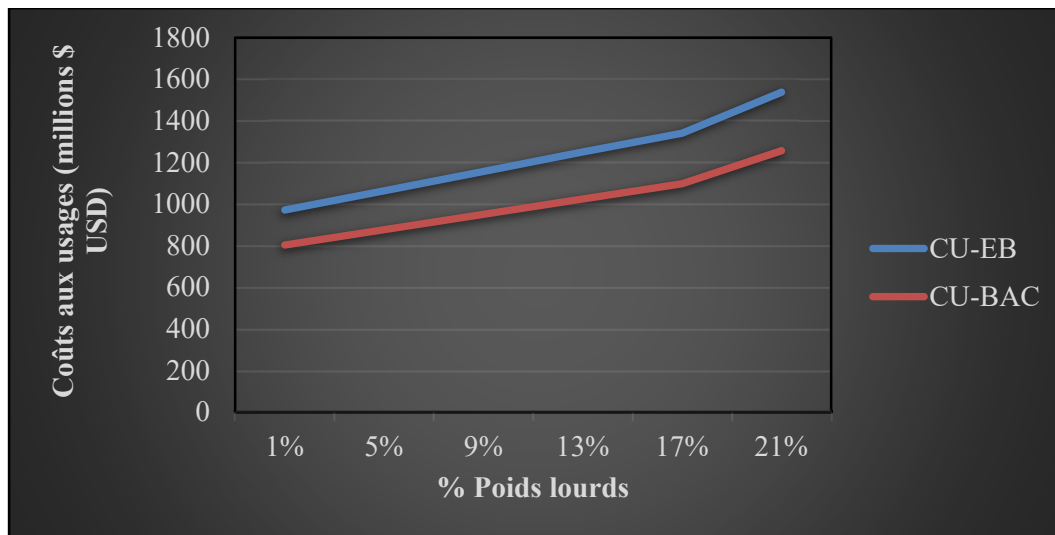


Figure 4.36 Coûts aux usagers pour la section Attinguié-PK50-
Phase d'utilisation (logiciel HDM-4 v2.0)

Le Tableau 4.20 présente le rapport des valeurs et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1 % de poids lourds) au trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant les valeurs de la chaussée en enrobé (EB) par celles de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des valeurs de l'option BAC à l'option EB.

Lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur CU varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 58 % et 56 %.

Le rapport et le taux varient respectivement de 1,21 à 1,22 et de 21 % à 22 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds).

Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les coûts aux usagers (CU) de la chaussée en EB sont toujours supérieurs à ceux de la chaussée en BAC.

On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Tableau 4.20 Résultats de l'indicateur CU
pour la section Attinguié-PK50-phase d'utilisation

	% PL	1 %	5 %	9 %	13 %	17 %	21 %
CU	Rapport	1,21	1,21	1,22	1,22	1,22	1,22
	Taux (%)	21	21	22	22	22	22

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.4 Évaluation monétaire globale des dommages des externalités sur le cycle de vie

Les résultats de l'évaluation monétaire des externalités des travaux sur les phases du cycle de vie sont présentés dans cette section.

4.6.4.1 Section Banco-Gesco

Le graphique de la Figure 4.37 représente les coûts totaux des dommages des externalités évaluées sur le cycle de vie pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Banco-Gesco.

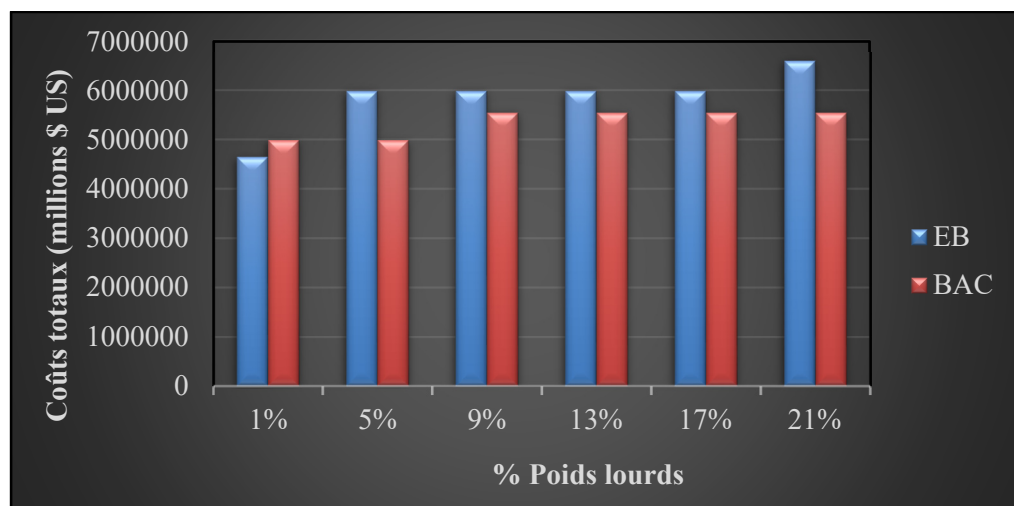


Figure 4.37 Évaluation monétaire comparative des dommages des externalités pour la section Banco-Gesco

Le Tableau 4.21 présente le rapport des coûts totaux des dommages dus aux externalités et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1 % de poids lourds) au trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant le coût total des externalités de la chaussée en enrobé (EB) par celui de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des coûts totaux de l'option BAC à l'option EB.

La comparaison des coûts totaux des externalités sur le cycle de vie indique que la chaussée en EB a un coût total supérieur de 18,9 % par rapport à la chaussée en BAC pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds). À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (1% de poids lourds), la chaussée en BAC a un coût total supérieur de 6,8 % par rapport à la chaussée en EB.

Tableau 4.21 Résultats de l'évaluation monétaire comparative
pour la section Banco-Gesco

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,93	1,2	1,08	1,08	1,08	1,19
Taux	-6,8	19,9	7,9	7,9	7,9	18,9

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.4.2 Section Gesco-Attinguié

Le graphique de la Figure 4.38 représente les coûts totaux des dommages des externalités évaluées sur le cycle de vie pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Gesco-Attinguié.

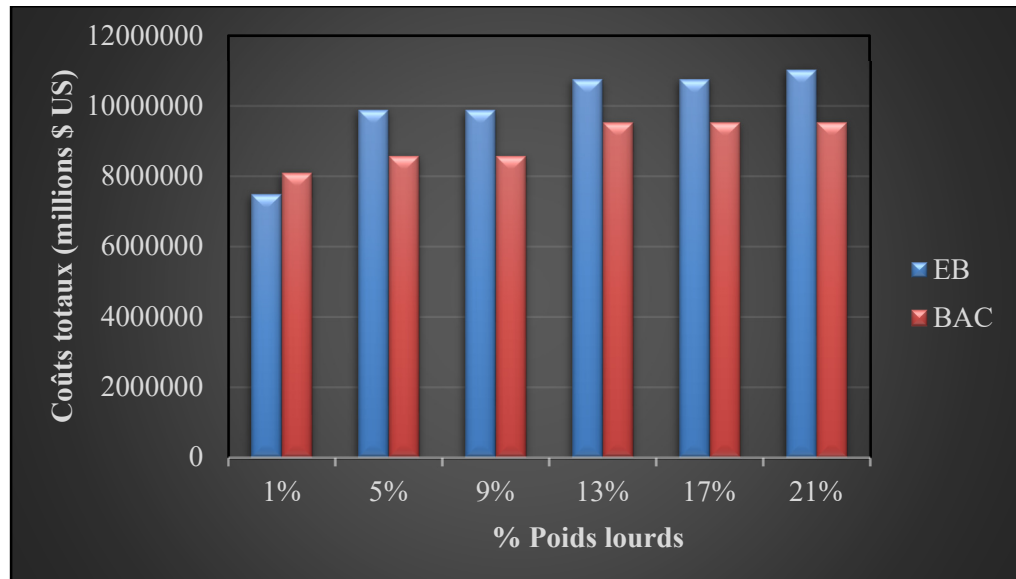


Figure 4.38 Évaluation monétaire comparative des dommages des externalités pour la section Gesco-Attinguié

Le Tableau 4.22 présente le rapport des coûts totaux des dommages dus aux externalités et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1 % de poids lourds) au trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant le coût total des externalités de la chaussée en enrobé (EB) par celui de la chaussée en béton armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des coûts totaux de l'option BAC à l'option EB.

La comparaison des coûts totaux des externalités sur le cycle de vie indique que la chaussée en EB a un coût total supérieur de 16 % par rapport à la chaussée en BAC pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds). À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (1% de poids lourds), la chaussée en BAC a un coût total supérieur de 8 % par rapport à la chaussée en EB.

Tableau 4.22 Résultats de l'évaluation monétaire comparative pour la section Gesco-Attinguié

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,92	1,15	1,15	1,13	1,13	1,16
Taux	-8	15	15	13	13	16

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.6.4.3 Section Attinguié-PK50

Le graphique de la Figure 4.39 représente les coûts totaux des dommages des externalités évaluées sur le cycle de vie pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC, dans la section Attinguié-PK50.

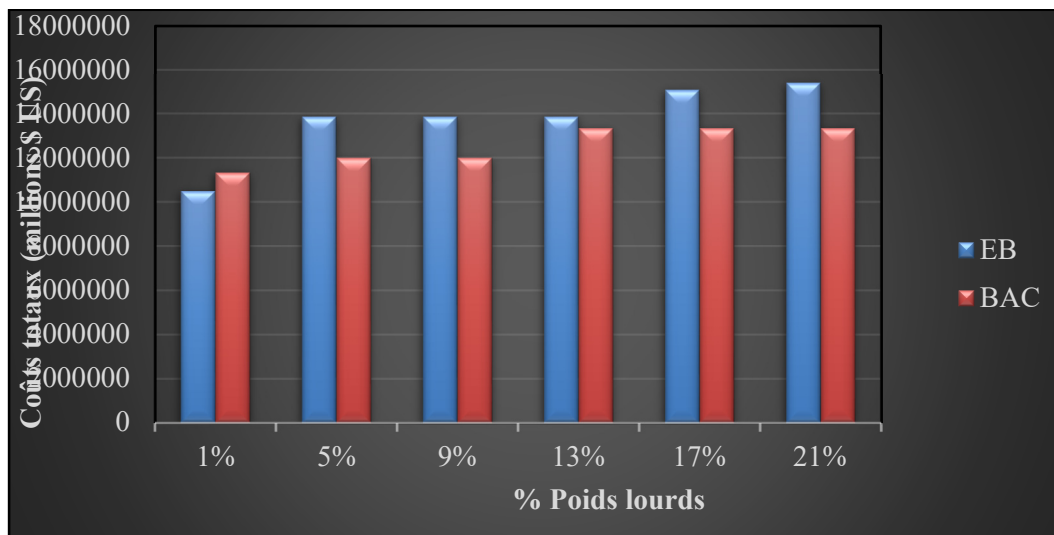


Figure 4.39 Évaluation monétaire comparative des dommages des externalités pour la section Attinguié-PK50

Le Tableau 4.23 présente le rapport des coûts totaux des dommages dus aux externalités et le taux d'accroissement déterminés pour chaque niveau de trafic allant du trafic lourd faible (1 % de poids lourds) au trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Le rapport est obtenu en divisant le coût total des externalités de la chaussée en enrobé (EB) par celui de la chaussée en béton

armé continu (BAC) à chaque niveau de trafic. Le taux en pourcentage est l'accroissement des coûts totaux de l'option BAC à l'option EB.

La comparaison des coûts totaux des externalités sur le cycle de vie indique que la chaussée en EB a un coût total supérieur de 15,5 % par rapport à la chaussée en BAC pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds). À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (1% de poids lourds), la chaussée en BAC a un coût total supérieur de 7 % par rapport à la chaussée en EB

Tableau 4.23 Résultats de l'évaluation monétaire comparative pour la section Attinguié-PK50

% PL	1%	5%	9%	13%	17%	21%
Rapport	0,93	1,15	1,15	1,05	1,13	1,15
Taux	-7	15	15	4	13	15,5

% PL : Accroissement du trafic des poids lourds

4.7 Discussions

Cette section est consacrée à la discussion des principaux résultats obtenus à partir de l'application de l'approche de calcul des coûts sociaux sur le projet de construction de l'Autoroute du Nord en Côte d'Ivoire. Les discussions sont faites sur les phases d'extraction et de production des matériaux, de construction et d'exploitation.

4.7.1 Phase d'extraction et de production des matériaux de construction

Dans la section **Banco-Gesco**, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs des indicateurs calculés, soient EI, AP, POCP, TP et EP, varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 42 % et 12 %. Le niveau de chaque indicateur calculé croît plus vite pour la chaussée en EB que pour la chaussée en BAC.

Pour l'indicateur EI, le rapport et le taux varient respectivement de 0,78 à 1 et de -22 % à 0 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EI inférieur de 22 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) les deux chaussées ont le même niveau EI. Toutefois le niveau EI de la chaussée en BAC reste constant alors que celui de la chaussée en EB a une tendance à la hausse après le niveau de trafic lourd élevé de 21 %. Pour les niveaux de trafic lourds allant de 5 % à 17 %, les deux chaussées sont quasiment équivalentes avec une légère baisse du niveau EI de 10 % en faveur de la chaussée en EB. On en déduit donc que plus le trafic des poids lourds augmente, plus le niveau EI de la chaussée en EB augmente, alors que celui de la chaussée en BAC se stabilise. La chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés et à l'inverse la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics lourds faibles de 1 à 17 % de poids lourds.

Pour l'indicateur AP, le rapport et le taux varient respectivement de 0,90 à 1,15 et de -10 % à 15 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP inférieur de 10 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP supérieur de 15 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour le niveau de trafic lourd de 5 % la chaussée en EB a un niveau AP supérieur de 16 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour les niveaux de trafic allant de 9 % à 17 %, les deux chaussées sont quasiment équivalentes avec une légère baisse du niveau AP de 5 % en faveur de la chaussée en BAC. Les niveaux AP des deux chaussées restent constants à partir du niveau de trafic lourd de 9 %. Celui de la chaussée en EB augmente toutefois à partir du niveau de trafic de 17 %. On observe que la chaussée en EB est plus avantageuse pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) alors que la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les autres niveaux de trafic allant de 5 % à 21 % de poids lourds. La chaussée en BAC est donc plus avantageuse que la chaussée en EB pour les trafics lourds élevés.

Pour l'indicateur POCP, le rapport et le taux varient respectivement de 1,61 à 2,06 et de 61 % à 106 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque le trafic des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur TP, le rapport et le taux varient respectivement de 1,25 à 1,60 et de 25 % à 60 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque le trafic des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur EP, le rapport et le taux varient respectivement de 0,87 à 1,12 et de -13 % à 12 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP inférieur de 13 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 %) la chaussée en EB a un niveau EP supérieur de 12 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour le niveau de trafic lourd de 5 % la chaussée en EB a un niveau EP supérieur de 13 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour les niveaux de trafic allant de 9 % à 17 %, les deux chaussées sont quasiment équivalentes. Les niveaux EP des deux chaussées restent constants à partir du niveau de trafic lourd de 9 %. Celui de la chaussée en EB augmente toutefois à partir du niveau de trafic de 17 %. On observe que la chaussée en EB est plus avantageuse pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) alors que la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les autres niveaux de trafic allant de 5 % à 21 %. La chaussée en BAC est donc plus avantageuse que la chaussée en EB pour les trafics lourds élevés.

Selon les résultats des cinq indicateurs calculés, la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les indicateurs POCP et TP quel que soit le niveau de trafic des poids lourds. Pour les indicateurs EI, AP et EP, la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds et au-delà) alors que la chaussée en EB est plus avantageuse pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds). La chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés car elle impacte moins la santé humaine et les écosystèmes (Jolliet O et al., 2003; Kicak & Ménard, 2009).

Dans la section **Gesco-Attinguié**, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs des indicateurs calculés, soient EI, AP, POCP, TP et EP, varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Pour l'indicateur EI, le rapport et le taux varient respectivement de 0,82 à 1,02 et de -18 % à 2 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EI inférieur de 18 % par rapport à celui de la chaussée en BAC et pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) elle a un niveau EI supérieur de 2 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Dans l'intervalle du niveau de trafic lourd de 5 % à 17 %, les deux chaussées sont quasiment équivalentes avec une légère baisse pour la chaussée en BAC de 2 % et 0 % respectivement pour les niveaux de trafic de poids lourds de 5 % à 9 % et de 13 % à 17 %. À partir du niveau de trafic de poids lourds de 13 % les niveaux EI des deux chaussées sont équivalents et constants mais celui de la chaussée en EB a une tendance à la hausse à partir du niveau de trafic de poids lourds de 17 %. On en déduit donc que plus le trafic des poids lourds augmente, plus le niveau EI de la chaussée en EB augmente. Le niveau EI de la chaussée en BAC augmente également en restant inférieur ou égal à celui de la chaussée en EB. Toutefois le niveau EI de la chaussée en BAC reste constant à partir du niveau de trafic de poids lourds de 13 %. La chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés de 5 % à 21 % de poids lourds et à l'inverse la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics lourds faibles de 1% de poids lourds.

Pour l'indicateur AP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 0,91 à 1,13 et de -9 % à 13 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP inférieur de -9 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP supérieur de 13 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour les niveaux de trafic lourd de 5 % à 17 % le niveau AP de la chaussée en EB augmente. Le niveau AP de la chaussée en BAC augmente également et reste inférieur par rapport à celui de la chaussée en EB de 13 % et 11 % respectivement pour les niveaux de trafic de poids lourds de 5 % à 9 % et de 13 % à 17 %. On observe que la chaussée en EB est plus avantageuse pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) alors que la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les autres niveaux de trafic allant de 5 % à 21 %. La chaussée en BAC est donc plus avantageuse que la chaussée en EB pour les trafics lourds élevés.

Pour l'indicateur POCP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,70 à 2,11 et de 70 % à 111 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque le trafic des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur TP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de

47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,25 à 1,56 et de 25 % à 56 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque le trafic des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur EP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 0,84 à 1,05 et de -16 % à 5 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP inférieur de 16 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP supérieur de 5 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Dans l'intervalle du niveau de trafic lourd de 5 % à 17 %, les deux chaussées ont un niveau EP quasiment équivalent avec une légère baisse pour la chaussée en BAC de 5 % et 3 % respectivement pour les niveaux de trafic de poids lourds de 5 % à 9 % et de 13 % à 17 %. On observe que la chaussée en EB est plus avantageuse pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) alors que la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les autres niveaux de trafic allant de 5 % à 21 % de poids lourds. La chaussée en BAC est donc plus avantageuse que la chaussée en EB pour les trafics lourds élevés.

Selon les résultats des cinq indicateurs calculés, la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les indicateurs POCP et TP quel que soit le niveau de trafic des poids lourds. Pour les indicateurs EI, AP et EP, la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds et au-delà) alors que la chaussée en EB est plus avantageuse pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds). Dans cette section, la chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés. Elle aura un effet moindre sur la santé des

populations (maladies cancérigènes, problèmes respiratoires, etc.) et la destruction des écosystèmes (Jolliet O et al., 2003; Kicak & Ménard, 2009).

Dans la section **Attinguié-PK50**, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs des indicateurs calculés, soient EI, AP, POCP, TP et EP, varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Pour l'indicateur EI, le rapport et le taux varient respectivement de 0,83 à 1,04 et de -17 % à 4 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 %) à un trafic lourd élevé (21 %). Ainsi, pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EI inférieur de 17 % par rapport à celui de la chaussée en BAC et pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) elle a un niveau EI supérieur de 4 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Dans l'intervalle du niveau de trafic de poids lourds de 5 % à 9 %, la chaussée en EB a un niveau EI supérieur de 4 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Elle a ensuite un niveau EI inférieur de 7 % par rapport à la chaussée en BAC pour le niveau de trafic de poids lourds de 13 %. Pour les niveaux de trafic de poids lourds variant de 17 % à 21 %, elle a un niveau EI supérieur de 1 à 4 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. On en déduit donc que plus le trafic des poids lourds augmente, plus le niveau EI de la chaussée en EB augmente. Le niveau EI de la chaussée en BAC augmente également dans le même temps et reste inférieur et constant à partir du trafic de poids lourds de 13 % jusqu'à 21 %. Ainsi, la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics de poids lourds de 1 % et 13 %. Pour les autres niveaux de trafics, la chaussée en BAC est plus avantageuse. La chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds) alors que la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds).

Pour l'indicateur AP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de

la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 0,91 à 1,13 et de -9 % à 13 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP inférieur de -9 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau AP supérieur de 13 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Pour les niveaux de trafic lourd de 5 % à 17 % le niveau AP de la chaussée en EB augmente. Le niveau AP de la chaussée en BAC augmente également et reste inférieur par rapport à celui de la chaussée en EB de 13 %, 11 % et 2 % respectivement pour les niveaux de trafic de poids lourds de 5 % à 9 %, de 13 % et 17 %. On observe que la chaussée en EB est plus avantageuse pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) alors que la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les autres niveaux de trafic allant de 5 % à 21 % de poids lourds. La chaussée en BAC est donc plus avantageuse que la chaussée en EB pour les trafics lourds élevés.

Pour l'indicateur POCP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,65 à 2,06 et de 65 % à 106 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur TP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 47 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,24 à 1,55 et de 24 % à 55 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd

varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur EP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 18 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 0,84 à 1,05 et de -16 % à 5 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, pour le trafic lourd faible (1 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP inférieur de 16 % par rapport à celui de chaussée en BAC. Pour le trafic lourd élevé (21 % de poids lourds) la chaussée en EB a un niveau EP supérieur de 5 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Dans l'intervalle du niveau de trafic de poids lourds de 5 % à 9 %, la chaussée en EB a un niveau EI supérieur de 5 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. Elle a ensuite un niveau EI inférieur de 6 % par rapport à la chaussée en BAC pour le niveau de trafic de poids lourds de 13 %. Pour les niveaux de trafic de poids lourds variant de 17 % à 21 %, elle a un niveau EI supérieur de 3 à 5 % par rapport à celui de la chaussée en BAC. On en déduit donc que plus le trafic des poids lourds augmente, plus le niveau EI de la chaussée en EB augmente. Le niveau EI de la chaussée en BAC augmente également dans le même temps et reste inférieur et constant à partir du trafic de poids lourds de 13 % jusqu'à 21 %. Ainsi, la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics de poids lourds de 1 % et 13 %. Pour les autres niveaux de trafics, la chaussée en BAC est plus avantageuse. La chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds) alors que la chaussée en EB est avantageuse pour les trafics lourds faibles (1 % de poids lourds).

Selon les résultats des cinq indicateurs calculés, la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les indicateurs POCP et TP quel que soit le niveau de trafic des poids lourds. Pour les indicateurs EI, AP et EP, la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les trafics lourds élevés (21 % de poids lourds et au-delà) alors que la chaussée en EB est plus avantageuse pour les

trafics lourds faibles (1 % de poids lourds). Dans cette section également, la chaussée en BAC est donc plus avantageuse pour les trafics lourds élevés. Les dommages occasionnés par cette chaussée sur la santé des populations et les écosystèmes seront inférieurs à ceux de la chaussée en EB (Jolliet O et al., 2003; Kicak & Ménard, 2009).

4.7.2 Phase de construction

Dans la section **Banco-Gesco**, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs des indicateurs calculés, soient EI, AP, POCP, TP et EP, varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 43 % et 12 %. Le niveau de chaque indicateur calculé croît plus vite pour la chaussée en EB que pour la chaussée en BAC.

Pour l'indicateur EI, le rapport et le taux varient respectivement de 1,98 à 2,53 et de 98 % à 153 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EI de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur AP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 43 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,98 à 2,53 et de 98 % à 153 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau AP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur POCP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 43 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,98 à 2,53 et de 98 % à 153 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur TP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 43 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,98 à 2,53 et de 98 % à 153 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur EP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 43 % et 12 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,98 à 2,53 et de 98 % à 153 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Dans la section Banco-Gesco, les résultats des cinq indicateurs calculés, soient EI, AP, POCP, TP et EP sont plus élevés pour la chaussée en EB que celle en BAC. Cela implique que la chaussée en EB engendre plus de pollution et de maladies que la chaussée en BAC (EPA, 1996, 2000; Khalifa, 2000; SETRA, 2001). Les coûts sociaux plus faibles de la chaussée en BAC lui donnent l'avantage par rapport à la chaussée en EB.

Dans la section Gesco-Attinguié, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs des indicateurs calculés, soient EI, AP, POCP, TP et EP, varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Pour l'indicateur EI, le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 %) à un trafic lourd élevé (21 %). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EI de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur AP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau AP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur POCP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35

et de 90 % à 135 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur TP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur EP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Dans la section Gesco-Attinguié, les résultats des cinq indicateurs calculés, soient EI, AP, POCP, TP et EP sont plus élevés pour la chaussée en EB que pour celle en BAC. Cela implique que la chaussée en EB engendre plus de pollution et de maladies que la chaussée en BAC

(EPA, 1996, 2000; Khalifa, 2000; SETRA, 2001). Les coûts sociaux plus faibles de la chaussée en BAC lui donnent l'avantage par rapport à la chaussée en EB.

Dans la section Attinguié-PK50, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs des indicateurs calculés, soient EI, AP, POCP, TP et EP, varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC.

Pour l'indicateur EI, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EI varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur EI de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau EI de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur AP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur AP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur AP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau AP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur POCP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur POCP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en

BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur POCP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau POCP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur TP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur TP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur TP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, le niveau TP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Pour l'indicateur EP, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur EP varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 48 % et 19 %. Le niveau de l'indicateur EP de la chaussée en EB croît plus vite que celui de la chaussée en BAC. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,90 à 2,35 et de 90 % à 135 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque le trafic des poids lourds varie de 1 % à 21 %, le niveau EP de la chaussée en EB est toujours supérieur à celui de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Dans la section Attinguié-PK50, les résultats des cinq indicateurs calculés, soient EI, AP, POCP, TP et EP sont plus élevés pour la chaussée en EB que celle en BAC. Cela implique que la chaussée en EB engendre plus de pollution et de maladies que la chaussée en BAC (EPA, 1996, 2000; Khalifa, 2000; SETRA, 2001). Les coûts sociaux plus faibles de la chaussée en BAC lui donnent l'avantage par rapport à la chaussée en EB.

4.7.3 Phase d'exploitation

Dans la section Banco-Gesco, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur CU varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 51 % et 49 %. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,29 à 1,30 et de 29 % à 30 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les coûts aux usagers (CU) de la chaussée en EB sont toujours supérieurs à ceux de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Dans la section Banco-Gesco, les coûts aux usagers de la chaussée en EB sont toujours supérieurs à ceux de la chaussée en BAC quel que soit le niveau de trafic des poids lourds. Ces coûts dits récurrents (Pienaar, 2018) donnent l'avantage à la chaussée en BAC qui a les coûts inférieurs par rapport à la chaussée en EB. Les coûts des délais représentent une grande part soit environ 50 % des coûts sociaux de cette phase (Pienaar, 2018; Wang, Ling, & Qian, 2012) et donnent l'avantages à la chaussée en BAC qui nécessite peu d'entretien durant la phase d'exploitation.

Dans la section Gesco-Attinguié, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur CU varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 50 % et 47 %. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,21 à 1,22 et de 21 % à 22 %, lorsque le trafic varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les coûts aux usagers (CU) de la chaussée en EB sont toujours supérieurs à ceux de la

chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Dans la section Gesco-Attinguié, les coûts aux usagers de la chaussée en EB sont toujours supérieurs à ceux de la chaussée en BAC quel que soit le niveau de trafic des poids lourds. Ces coûts dits récurrents (Pienaar, 2018) donnent l'avantage à la chaussée en BAC qui a les coûts inférieurs par rapport à la chaussée en EB. Les coûts des délais représentent une grande part soit environ 50 % des coûts sociaux de cette phase (Pienaar, 2018; Wang et al., 2012) et donnent l'avantages à la chaussée en BAC qui nécessite peu d'entretien durant la phase d'exploitation, comme dans la section précédente.

Dans la section Attinguié-PK50, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les valeurs de l'indicateur CU varient respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC de 58 % et 56 %. Le rapport et le taux varient respectivement de 1,21 à 1,22 et de 21 % à 22 %, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie d'un trafic lourd faible (1 % de poids lourds) à un trafic lourd élevé (21 % de poids lourds). Ainsi, lorsque l'accroissement du trafic lourd varie de 1 % à 21 %, les coûts aux usagers (CU) de la chaussée en EB sont toujours supérieurs à ceux de la chaussée en BAC. On en déduit que la chaussée en BAC est plus avantageuse que la chaussée en EB quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Dans la section Attinguié-PK50, les coûts aux usagers de la chaussée en EB sont également toujours supérieurs à ceux de la chaussée en BAC quel que soit le niveau de trafic des poids lourds. Ces coûts dits récurrents (Pienaar, 2018) donnent l'avantage à la chaussée en BAC qui a les coûts inférieurs par rapport à la chaussée en EB. Les coûts des délais représentent une grande part soit environ 50 % des coûts sociaux de cette phase (Pienaar, 2018; Wang et al., 2012) et donnent là aussi un avantages à la chaussée en BAC qui nécessite peu d'entretien durant la phase d'exploitation.

4.7.4 Comparaison des coûts totaux des externalités sur le cycle de vie

La comparaison des résultats de l'évaluation monétaire des dommages sociaux déterminés sur les trois (3) sections montre que le coût des dommages sociaux de la chaussée en EB est supérieur à celui de la chaussée en BAC de 15 à 19 % sur le cycle de vie. Ce taux est plus grand pour les trafics lourds élevés. La chaussée en BAC est avantageuse du point de vue des dommages des externalités des travaux routiers et particulièrement pour les trafics lourds élevés.

4.8 Conclusion

L'objet de cette étude est le développement d'une approche commune pour intégrer l'ensemble des coûts sociaux sur le cycle de vie, sur un tronçon de l'Autoroute du Nord en Côte d'Ivoire composé de trois sections homogènes en vue de vérifier l'acceptabilité sociale de la chaussée en enrobé bitumineux (EB) et de la chaussée en béton armé continu (BAC).

L'étude est effectuée sur le cycle de vie des chaussées à l'aide des outils ECORCE 2.0 et HDM-4 v2.0 en considérant les phases d'extraction et de production des matériaux, de construction et d'exploitation.

Les coûts sociaux analysés sur les phases d'extraction et de production des matériaux et de construction sont relatifs à l'eutrophisation, à l'acidification, à l'ozone troposphérique, à la toxicité et à l'écotoxicité et sur la phase exploitation ils se rapportent aux coûts aux usagers comprenant les coûts d'exploitation des véhicules, les accidents, la consommation d'huiles et accessoires de pneumatiques, etc.

Les principaux résultats obtenus indiquent :

Phase extraction et production des matériaux

Sur l'ensemble des trois sections étudiées, la chaussée en BAC est socialement plus acceptable pour les trafics lourds élevés (43 750 à 70 000 véhicules / jour dont 5 à 21 % de poids lourds)

et à l'inverse la chaussée en EB est socialement plus acceptable pour les trafics lourds faibles (43 750 à 70 000 véhicules / jour dont 1 % de poids lourds) en considérant les cinq indicateurs étudiés. En particulier la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les indicateurs POCP et TP quel que soit le niveau de trafic des poids lourds.

Phase Construction

Les impacts sociaux de la chaussée en BAC sont toujours plus faibles que ceux de la chaussée en EB, sur l'ensemble des trois sections et ce quel que soit le niveau de trafic. La chaussée en BAC est toujours plus avantageuse socialement que la chaussée en EB.

Phase d'exploitation

Les impacts sociaux de la chaussée en BAC sont toujours plus faibles que ceux de la chaussée en EB, sur l'ensemble des trois sections et ce quel que soit le niveau de trafic. La chaussée en BAC est toujours plus avantageuse socialement que la chaussée en EB.

Sur l'ensemble des trois phases, la monétisation des dommages des externalités donne des coûts moins élevés pour la chaussée en BAC ce qui fait d'elle un choix optimal du point de vue des impacts sociaux analysés sur le cycle de vie, particulièrement pour les trafics lourds élevés.

Outre les coûts économiques et environnementaux, les coûts sociaux devraient être pris en compte pour déterminer le véritable coût d'un projet de construction à prendre en compte dans le processus des appels d'offres pour désigner une entreprise contractante.

Les difficultés liées à la monétisation des dommages des impacts négatifs et l'internalisation des externalités dans les soumissions des entreprises nécessitent toujours de nouvelles recherches. L'objectif final à atteindre reste la construction d'infrastructures routières durables en Côte d'Ivoire et en Afrique subsaharienne.

CHAPITRE 5

PRINCIPALES DISCUSSIONS

5.1 Synthèse des principales discussions des articles

Ce chapitre récapitule les principales discussions faites dans les trois articles de la recherche en rapport avec la nouvelle approche de sélection d'une option de chaussée. L'approche préconise la prise en compte des coûts globaux sur le cycle de vie et inclue les aspects économiques, environnementaux et sociaux, pour le choix de l'option de chaussée à réaliser, et plus particulièrement pour les chaussées fortement sollicitées. La prise en compte du niveau de trafic des poids lourds est donc essentielle.

5.1.1 Sur le plan économique

Les coûts totaux augmentent lorsque le DJMA des poids lourds augmente en passant d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21%). Ainsi, dans la section 1, ils accroissent de 50 % et 46 % respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Ils accroissent, pour la section 2 de 48 % et 46 % et pour la section 3 de 57 % et 54 %, respectivement pour la chaussée en EB et la chaussée en BAC. Lorsque le DJMA des poids lourds varie d'un trafic lourd faible (1%) à un trafic lourd élevé (21 %), les coûts totaux de la chaussée en EB restent supérieurs à ceux de la chaussée en BAC dans les trois sections. L'écart moyen entre ces coûts est de 28 % pour la section 1 et de 21 % pour les sections 2 et 3 sur le cycle de vie. Les coûts totaux de la chaussée en BAC baissent de 21 à 28 % par rapport à ceux de la chaussée en EB de la section 3 à la section 1.

Les coûts totaux (CT) obtenus dans les trois sections étudiées et pour les deux options de chaussées, donnent l'avantage à la solution de chaussée en béton armé continu sur la période d'analyse de 20 ans : la chaussée en béton armé continu coûte de 21 à 28 % moins cher. À titre de comparaison, l'écart entre les coûts initiaux de construction qui était supérieur à 20 %

donnait pourtant un avantage à la chaussée en enrobé bitumineux. Au terme de la période d'analyse, cette tendance s'est inversée.

Une étude comparative sur 20 ans réalisée en Inde, en 2006, indique que le coût initial de la chaussée en béton armé continu était supérieur de 28 % par rapport à celui de la chaussée en enrobé bitumineux. À la fin du cycle de vie, les coûts de la chaussée en enrobé bitumineux étaient supérieurs de 20 à 25 % par rapport à ceux de la chaussée en béton armé continu (Pradham Mantri Gram Sarak Yojana (PMGSY), 2006). On peut donc conclure que la chaussée en béton armé continu se comporte mieux sur le long terme. L'avantage obtenu avec la chaussée en béton armé continu pourrait être plus important si la période d'analyse était prolongée à 30 ans ou 50 ans, tel qu'adopté dans les pays comme les États-Unis, le Canada ou l'Europe (AASHTO, 1993; Techno-Bitume, 2011). Pour l'étude comparative réalisée au Ghana, les coûts globaux de la chaussée en béton armé continu comparés à ceux de la chaussée en enrobé bitumineux indiquent que la chaussée en enrobé bitumineux représente un coût supérieur de 11 % par rapport à la chaussée en béton de grade 5. Les coûts initiaux de la chaussée en enrobé étaient inférieurs de 25 % par rapport à ceux de la chaussée en béton armé continu.

Ces résultats rejoignent donc les conclusions de différents auteurs (Cross & Parsons, 2002; Gibboney, 1995; Kamal et al., N.D.; Santero, Masanet, & Horvath, 2011b; Thébeau, 2004) et corroborent ceux obtenus au cours de cette recherche.

5.1.2 Sur le plan environnemental

Les résultats analysés phase par phase, ont été comparés à ceux obtenus dans des études antérieures. Ainsi, en phase d'extraction et de production des matériaux de construction, on obtient la même tendance que dans certaines recherches comme : (Chappat & Bilal, 2003; Feng et al., N.D.; Techno-Bitume, 2011; Zapata & Gambatese, 2005). En phase construction, un rapprochement des résultats est aussi obtenu avec d'autres auteurs tels que : (Conseil canadien du béton, 2014; Zapata & Gambatese, 2005). En phase exploitation, il y a également des

similarités avec (Abdelaziz & Ouellet-Plamondon, 2019; Chappat & Bilal, 2003; Maillard, 2010; Techno-Bitume, 2011).

Les résultats globaux sur le cycle de vie discutés dans cette recherche, sont les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie dans les trois (3) sections de l'étude. Pour les émissions de gaz à effet de serre, le taux d'émission varie de 17 à 20 % en faveur de la chaussée en béton armé continu. Le taux de la consommation d'énergie, quant à lui, varie de 15 à 16 % en faveur de la chaussée en béton armé continu, pour le niveau de trafics lourds élevés. Ces taux augmentent quand le trafic des poids lourds augmente ce qui donne un avantage à la chaussée en béton armé continu (Chappat & Bilal, 2003; Techno-Bitume, 2011).

5.1.3 Sur le plan social

Les résultats des indicateurs sociaux étudiés ne sont pas tous en faveur d'une option de chaussée. En ce sens, ils se rapprochent ainsi des conclusions de l'analyse comparative des chaussées en béton de ciment et en enrobé bitumineux effectuée par Kicak et Ménard (2009).

La comparaison des résultats de l'évaluation monétaire des dommages sociaux déterminés sur les trois (3) sections montre que le coût des dommages sociaux de la chaussée en EB est supérieur à celui de la chaussée en BAC, de 15 à 19 % sur le cycle de vie. Ce taux est plus grand pour les trafics lourds élevés. La chaussée en BAC est avantageuse du point de vue des dommages des externalités des travaux routiers et particulièrement pour les trafics lourds élevés. Cependant, la définition des impacts, leurs coûts et leurs méthodes d'estimation manquent d'interopérabilité et une norme universelle pour évaluer les coûts et les impacts E&S n'est pas disponible étant donné l'état actuel des connaissances (Surahyo & El-Diraby, 2009). Bien qu'il soit nécessaire d'intégrer les coûts sociaux dans les coûts des projets, la difficulté de leur évaluation amène les décideurs à les mettre de côté (Gilchrist & Allouche, 2005; McKim, 1997; Wang et al., 2012). La présente recherche recommande la prise en compte des

dommages dus aux externalités. À cette fin la méthode européenne d'évaluation dite Ecotax peut être adoptée en l'adaptant au contexte local.

5.1.4 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été effectuée à l'aide du logiciel HDM-4. Elle a permis de vérifier la robustesse des résultats des indicateurs économiques relatifs à la VAN et le TRI, pour les trois sections de route étudiées, en faisant varier selon les scénarios du Tableau 5.1, les données du DJMA, de la croissance du trafic et des coûts d'investissement. Cette robustesse est aussi vérifiée par la comparaison avec les résultats de d'autres études à travers la revue de littérature scientifique disponible.

Tableau 5.1 Scénarios de l'analyse de sensibilité

Paramètres	Plage de variation
DJMA	+ ou – 25 %
Croissance du trafic	+ ou – 25 %
Coûts d'investissement	+ ou – 25 %

5.2 Conclusion

L'analyse des résultats de la validation de l'approche proposée de sélection du revêtement des chaussées faite sur les trois sections en intégrant l'accroissement du trafic des poids lourds, apporte un éclairage aux décideurs sur le processus de choix d'une option de chaussée entre l'enrobé bitumineux et le béton armé continu.

Dans le contexte de l'Afrique subsaharienne et particulièrement celui du projet étudié, le béton armé continu apparaît comme le premier choix pour les chaussées dont les niveaux de trafics lourds sont élevés. Cette approche permet par ailleurs de respecter les trois piliers de développement durable.

Toutefois, la précision des résultats des études existantes est liée à la frontière c'est-à-dire les limites de l'étude. Plus cette frontière sera élargie plus les résultats seront améliorés parce que de nombreux paramètres seront pris en compte. Les analyses nécessiteront beaucoup de données et beaucoup de temps. La prise en compte des phases d'extraction et de production des matériaux et la phase construction en plus de la phase d'exploitation paraît appropriée pour éclairer les agences et les décideurs.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Des autoroutes durables représentent un enjeu primordial pour les gouvernements dont les politiques sont orientées vers la croissance et le développement de leurs pays. Cet enjeu se présente avec encore plus d'acuité dans les pays d'Afrique subsaharienne où le financement pour l'entretien du réseau autoroutier existant d'une part, et pour son extension d'autre part, se fait rare à cause de la rentabilité insuffisante de ces projets. La raison principale est la détérioration prématurée des chaussées en enrobé en lien avec les charges très lourdes qui y circulent. La solution est dans le recours à des revêtements durables. C'est dans cet esprit que cette étude pose la problématique de la construction de routes à longue durée de vie, nécessitant peu d'entretien, résistant aux charges très lourdes et pouvant supporter les températures élevées qui prévalent dans les pays d'Afrique subsaharienne. Les infrastructures routières doivent également répondre aux contraintes du développement durable.

Dans ce contexte, l'étude préconise une méthodologie de conception originale qui ne repose pas sur le calcul des épaisseurs d'une chaussée en enrobé mais sur une analyse technique, économique et environnementale. Il s'agit ainsi d'une nouvelle approche pour une sélection optimale du revêtement de la chaussée. L'approche est basée sur le concept des coûts globaux du cycle de vie des chaussées ainsi que sur une considération de l'impact environnemental des phases d'extraction et de production des matériaux, de construction et d'exploitation. Il s'agit d'une démarche originale et une contribution à la pratique de l'ingénierie routière qui se doit de s'adapter aux attentes des accords de Paris. En effet, le transport routier contribue à la dégradation de l'environnement et des efforts substantiels se doivent d'être déployés pour en limiter l'impact. C'est dans cette perspective que s'inscrit cette contribution. L'Afrique subsaharienne est également concernée et doit aussi faire sa part. C'est pour cela que la validation de la méthodologie est effectuée sur un tronçon de l'Autoroute du Nord en Côte d'Ivoire, pour trois sections.

Le premier axe de cette étude est la validation de l'approche nouvelle à travers une analyse économique à l'aide de différents outils applicables dans le pays du projet (Alizé et HDM-4). Les coûts initiaux et les coûts globaux des deux options de chaussées ont été analysés.

Le deuxième axe a permis de traiter des aspects environnementaux. Face aux effets néfastes des changements climatiques, leur prise en compte est devenue une préoccupation mondiale.

Le troisième axe est la prise en compte des externalités dans le processus de choix du revêtement de chaussée. Les dommages des externalités sont subis par les populations riveraines des travaux. Bien que celles-ci soient des parties prenantes des projets, elles ne sont pas toujours consultées pour garantir l'acceptabilité sociale des projets routiers. La consultation des populations impactées par les travaux et la prise en compte de leurs préoccupations est indispensable pour réaliser un projet durable.

Ainsi, au terme de cette recherche, les contributions suivantes peuvent être relevées :

- L'étude propose une méthodologie de conception originale ne reposant pas sur le calcul des épaisseurs mais sur une analyse technique, économique, environnementale et sociale;
- Elle constitue une démarche originale et une contribution à la pratique de l'ingénierie qui se doit de s'adapter aux accords de Paris sur le climat;
- C'est une étude d'application pratique Elle vient par une démarche scientifique, contribuer au débat en cours entre les différents acteurs pour le choix de l'option de chaussée de différentes infrastructures autoroutières en Côte d'Ivoire déjà programmées;
- Pour les trafics lourds et élevés (43 750 à 70 000 véhicules par jour dont 5 à 21 % de poids lourds), la réalisation de chaussées en béton armé continu dans un pays qui n'en a jamais fait aura des retombées qui permettront entre autres une avancée des technologies de construction

et la documentation du processus de choix d'une option de chaussée en Côte d'Ivoire et dans la sous-région ;

- L'étude apporte une contribution à la monétisation des externalités. La monétisation de celles-ci et leur intégration dans le coût des projets à réaliser permettra d'assurer la protection et la sécurité des populations. Cela n'a jamais été fait dans la région ;

- Le caractère innovant de l'approche préconisée en Afrique subsaharienne est une réalité et elle pourrait aboutir pour la première fois à la construction de chaussées en béton armé continu.

Les contributions de cette recherche ainsi énoncées confèrent un impact scientifique à la thèse. L'approche préconisée va conduire au changement des critères d'attribution des marchés aux entreprises. Elle peut relancer la croissance et le développement des routes conçues pour résister aux charges lourdes et influencera positivement la réglementation sur les routes au profit des utilisateurs et finalement de l'ensemble des populations.

Au terme de cette étude, les principales conclusions découlant des analyses effectuées sont énumérées au plan économique, environnemental et social.

Aspects économiques de la sélection d'un revêtement de chaussée

- Taux de dégradation en fonction du trafic

À mesure que le niveau du trafic des poids lourds augmente, le taux de dégradations augmente pour la chaussée en enrobé bitumineux. L'IRI n'est pas conservé sans effectuer des travaux. La chaussée en béton armé continu quant à elle conserve son IRI.

- Coût initial

Le coût initial de la chaussée en EB est moins cher de l'ordre de 10 à 20 %. Le coût initial de construction de la chaussée en enrobé bitumineux est généralement plus faible que celui de la chaussée en béton armé continu selon différents auteurs en Afrique et dans le reste du monde.

Cette tendance peut être inversée en fonction des prix des matières premières du moment, entrant dans la fabrication de l'enrobé bitumineux et du béton armé continu. .

-Coûts d'entretien

Les coûts d'entretien de la chaussée en EB augmentent sensiblement avec l'augmentation du trafic des poids lourds alors qu'ils restent quasiment constants et relativement faibles pour la chaussée en BAC. Tous les auteurs à travers toutes les études réalisées sur le cycle de vie des chaussées aboutissent à la même conclusion. Les coûts d'entretien sont relativement plus élevés pour la chaussée en enrobé bitumineux et à l'inverse, ils sont plus faibles pour la chaussée en béton armé continu. En termes d'entretien, c'est l'option de chaussée qui convient aux pays qui ne disposent pas de ressources financières allouées à l'entretien des routes. L'entretien ici n'est pas compris comme un entretien ponctuel effectué à la demande mais celui qui s'inscrit dans une politique de gestion routière sur le cycle de vie de la chaussée.

-Coûts à l'administration et coûts aux usagers

Les coûts à l'administration baissent de 11 à 15 % en faveur de la chaussée en BAC sur le cycle de vie. Les coûts aux usagers de la chaussée en BAC baissent de 22 à 30 % par rapport à ceux de la chaussée en EB sur le cycle de vie. La solution BAC permet ainsi de réaliser le partenariat gagnant-gagnant entre les administrations routières et les usagers de la route.

-Indicateurs économiques

Les indicateurs économiques utilisés sont la valeur actuelle nette et le taux de rendement interne. L'utilisation de la valeur actuelle nette est préférable pour les décisions d'investissement des projets routiers et pour les projets mutuellement exclusifs. La chaussée en BAC a une valeur actuelle nette supérieure à celle de la chaussée en EB. Il en est de même pour le taux de rendement interne. Le projet à réaliser est celui qui a la plus grande valeur actuelle nette.

-Coûts globaux

Les coûts totaux du cycle de vie de la chaussée en BAC sont moins chers de 21 à 28 % par rapport à ceux de la chaussée en EB. Bien que les études réalisées dans le monde indiquent que d'une manière générale le coût initial de construction de la chaussée en béton armé continu est supérieur à celui de la chaussée en enrobé bitumineux, ces études démontrent qu'au terme du cycle de vie adopté, le coût global de la chaussée en béton armé continu est inférieur tout au moins du même écart que celui qui existait entre les coûts initiaux, à celui de la chaussée en enrobé bitumineux. L'attribution des marchés est souvent faite sur la base du coût initial en préférant le projet le moins cher entre les deux options de chaussée. Ce critère d'attribution se traduit par une dépense moindre pour construire la route et d'importantes dépenses d'entretien pendant la phase d'exploitation de la chaussée. À l'inverse pour l'option BAC, il faut accepter de dépenser plus au départ pour la construction et faire de faibles dépenses d'entretien durant la phase d'exploitation de la chaussée. C'est pourquoi le choix de l'option de chaussée à réaliser doit être effectué de façon judicieuse en tenant compte de ces aspects. Si l'on tient compte des coûts globaux, la chaussée en béton armé continu représente le meilleur choix d'investissement routier pour les chaussées fortement sollicitées et particulièrement en Afrique subsaharienne. À l'inverse si l'on ne considère que les coûts initiaux, le choix de la chaussée à construire sera quasiment toujours porté sur la chaussée en enrobé bitumineux.

Les divers avantages de chacune de ces chaussées selon les phases d'exploitation et de fin de vie, viennent éclairer d'avantage sur le choix idéal.

-Incidence d'une chaussée en béton armé continu sur le règlement 14 de l'UEMOA

Dans le cas particulier de l'espace de l'Union Économique et Monétaire en Afrique de l'Ouest (UEMOA), une chaussée en béton armé continu, parce qu'elle résiste aux charges très lourdes, aura une incidence sur le règlement 14 devant harmoniser les charges d'essieux et les gabarits des véhicules roulants sur le réseau routier de cet espace. En effet, l'on serait tenté dans le cadre du territoire de l'UEMOA, d'augmenter le niveau des charges limites à l'essieu telles que définies par le règlement 14, si les corridors pour camionnage étaient en béton armé continu. Ainsi, au lieu de réduire la charge à l'essieu jusqu'à 6 tonnes, elle pourra au contraire

être augmentée jusqu'à 10-12 tonnes comme aux États-Unis ou 13 tonnes comme en Europe. Cela pourra accroître le flux de transport des marchandises et les revenus des populations tout en accélérant la croissance des pays. Il faut cependant maîtriser la pratique de la surcharge routière.

Cette recherche montre que les sections homogènes fortement sollicitées pourraient être aménagées en béton armé continu. Le choix de l'option BAC n'est pas économique pour les chaussées à faible trafic. Le choix de l'option de chaussée devrait donc s'appuyer sur une étude comparative sur le cycle de vie qui n'a pas pour vocation de s'imposer aux décideurs mais plutôt de les éclairer en les aidant à faire un choix judicieux du type de chaussée à construire. L'attribution des marchés devrait par conséquent considérer les coûts globaux sur le cycle de vie et non les coûts initiaux comme critère d'attribution.

Aspects environnementaux de la sélection d'un revêtement de chaussée

Les résultats analysés, phase par phase, sur les trois sections homogènes ainsi que sur l'ensemble des trois phases pour chaque section sont résumés ci-après :

- En phase d'extraction et de production des matériaux, les émissions de gaz à effet de serre de la solution en BAC baissent d'environ 15 % par rapport à celles de la solution en EB pour les trafics lourds élevés (43 750 à 70 000 véhicules par jour dont 5 à 21 % de poids lourds). À l'inverse, pour les trafics lourds faibles (43 750 à 70 000 véhicules par jour dont 1 % de poids lourds), la solution en BAC consomme jusqu'à 27 % de plus que la solution en EB. La solution en BAC est plus avantageuse pour les trafics lourds élevés et la solution en EB est plus avantageuse pour les trafics lourds faibles.
- En phase de construction, les écarts obtenus sont respectivement de -55 %, au minimum et respectivement pour les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie. La solution en BAC est plus avantageuse que la solution en EB.

- En phase exploitation et au terme du cycle de vie de 20 ans, les écarts sont respectivement de -25 %, au minimum et respectivement pour les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie. La solution en BAC est plus avantageuse que la solution en EB.

- Sur l'ensemble des trois phases au terme du cycle de vie de 20 ans, les émissions de gaz à effet de serre de la chaussée en enrobé bitumineux sont de 17 à 20 % supérieures à celles de la chaussée en béton armé continu. La consommation d'énergie de la chaussée en enrobé bitumineux est de 15 à 16 % supérieure à celle de la chaussée en béton armé continu.

Du point de vue environnemental, la présente étude indique que la chaussée en béton armé continu est plus avantageuse que la chaussée en enrobé bitumineux sur l'ensemble du cycle de vie.

Aspects sociaux de la sélection d'un revêtement de chaussée

Les principaux résultats obtenus indiquent :

Phase d'extraction et de production des matériaux

Sur l'ensemble des trois sections étudiées, la chaussée en BAC est socialement plus acceptable pour les trafics lourds élevés (43 750 à 70 000 véhicules par jour dont 5 à 21 % de poids lourds) et à l'inverse la chaussée en EB est socialement plus acceptable pour les trafics lourds faibles (43 750 à 70 000 véhicules par jour dont 1 % de poids lourds) en considérant les cinq indicateurs étudiés. En particulier la chaussée en BAC est plus avantageuse pour les indicateurs POCP et TP quel que soit le niveau de trafic des poids lourds (43 750 à 70 000 véhicules par jour dont 1 à 21 % de poids lourds).

Phase Construction

Les impacts sociaux de la chaussée en BAC sont toujours plus faibles que ceux de la chaussée en EB, sur l'ensemble des trois sections et ce quel que soit le niveau de trafic (43 750 à 70 000

véhicules par jour dont 1 à 21 % de poids lourds). La chaussée en BAC est toujours plus avantageuse socialement que la chaussée en EB.

Phase d'exploitation

Les impacts sociaux de la chaussée en BAC sont toujours plus faibles que ceux de la chaussée en EB, sur l'ensemble des trois sections et ce quel que soit le niveau de trafic (43 750 à 70 000 véhicules par jour dont 1 à 21 % de poids lourds). La chaussée en BAC est toujours plus avantageuse socialement que la chaussée en EB.

Sur l'ensemble des trois phases, la monétisation des dommages des externalités donne des coûts moins élevés pour la chaussée en BAC ce qui fait d'elle un choix optimal du point de vue des impacts sociaux analysés sur le cycle de vie, particulièrement pour les trafics lourds élevés (43 750 à 70 000 véhicules par jour dont 5 à 21 % de poids lourds).

Par ailleurs, l'étude d'indicateurs sociaux notamment l'eutrophisation présente un intérêt particulier pour la région du projet. L'eutrophisation est suspectée entre autres d'être la cause de la prolifération d'algues toxiques. Le plan d'eau lagunaire d'Abidjan en Côte d'Ivoire est couvert d'algues à chaque saison de pluies. Ces algues sont drainées par les eaux de ruissellement, les rivières et les fleuves. La pollution du plan d'eau lagunaire qui en résulte est un phénomène préoccupant depuis plusieurs années pour les autorités touristiques de Côte d'Ivoire et plus généralement le gouvernement. Cette question mérite d'être approfondie dans le cadre de la recherche de solutions environnementales pour le traitement des plans d'eau lagunaires.

L'on pourrait se poser la question de savoir qu'advierait-il si le taux de surcharge des camions soudainement devenait nul ? Cette situation idéale correspond aux objectifs et aux hypothèses de la conception des projets routiers. Les conclusions obtenues dans cette étude conserveraient leur validité. Toutefois, il y aura des conséquences importantes dont quelques-unes peuvent être énumérées comme suit :

- (i) La charge à l'essieu calculée et limitée à 6 tonnes pour un essieu simple doublera en passant à 10 à 13 tonnes.
- (ii) Si une chaussée est réalisée en béton armé continu, notamment dans les cas de trafic lourd élevé (43 750 à 70 000 véhicules par jour dont 5 à 21 % de poids lourds), la charge à l'essieu simple sera supérieure à 13 tonnes et peut aller jusqu'à 20 tonnes environ tel que pratiqué actuellement sur le réseau routier.
- (iii) Il y aura un changement important dans la politique de législation en matière de transport routier dans l'espace UEMAO et le règlement 14 deviendrait caduque.

Les résultats dépendent du volume des poids lourds selon les calculs effectués. Le revêtement en béton armé continu sera la meilleure option pour les chaussées dont le DJMA varie de 43 750 à 70 000 véhicules par jour dont 5 à 21 % de poids lourds, selon les conclusions de cette étude.

Les résultats de la présente recherche comportent cependant des limites :

- De nombreuses données sont nécessaires pour les analyses comparatives. L'accessibilité des données, leur disponibilité et leur fiabilité doivent être considérées. Par conséquent, les données d'entrée ont un impact primordial sur les résultats obtenus.
- Les outils ECORCE 2.0 et HDM-4 utilisés doivent être améliorés. Un seul outil couvrant toutes les phases du cycle de vie est souhaitable pour améliorer la précision des résultats ;
- La non disponibilité à l'état actuel d'un outil informatique permettant la prise en compte d'une partie des paramètres environnementaux (bruit, vibration, odeurs, poussière, santé, accidents, bien être, éclairage, albédo, eaux de ruissellement, agriculture, ... etc) qui sont finalement mis de côté dans les évaluations comparatives sur le cycle de vie. La prise en compte exhaustive de tous ces paramètres pourraient influencer les résultats obtenus. À l'heure actuelle ils sont difficilement quantifiables. Il n'est donc pas encore possible d'aller au-delà de ces limites dans les études d'évaluation comparatives des options de chaussées.

Ainsi, de nombreuses études sont encore nécessaires dans les perspectives de construction de routes vertes en Afrique subsaharienne. En particulier, l'amélioration des outils d'évaluation, la prise en compte de la variation du taux de camions surchargés dans les analyses comparatives, la prise en compte globale de tous les indicateurs environnementaux, la monétisation des externalités et leur intégration dans les coûts de construction des projets en phase d'appels d'offres pour la sélection d'une entreprise sont des axes de recherches futures.

RECOMMANDATIONS

Les recommandations suivantes sont faites :

-Introduire le concept de développement durable dans l'ingénierie routière ;

Le choix du revêtement de chaussée est basé sur des considérations non techniques dans certains pays. Si les aspects économiques sont quelques fois pris en compte, les aspects environnementaux et sociaux ont souvent été écartés dans le processus de sélection. Au moment où tous les pays du monde sont appelés à prendre des mesures contraignantes en vue de lutter contre le réchauffement de la planète, les ingénieurs et les concepteurs des projets routiers ne doivent pas rester en marge.

-Instaurer une formation de niveau maîtrise dans les universités d'Afrique subsaharienne et particulièrement en Côte d'Ivoire, relative à la gestion des infrastructures durables ;

Il serait approprié d'instaurer un programme de master en génie civil à l'attention des professionnels de la construction routière. Cette formation pourrait bénéficier aux cadres de la sous-région et elle facilitera le transfert des technologies de constructions avec les nouveaux matériaux entre les pays développés et la région d'Afrique subsaharienne.

-Introduire la prise en compte des coûts environnementaux et sociaux dans le processus d'attribution des marchés de travaux d'infrastructures routières ;

Faire la sensibilisation de tous les acteurs visant au changement de mentalités favorisant la prise en compte des coûts environnementaux et sociaux sans se limiter aux seuls coûts économiques des projets pour la prise de décision d'investissement.

-Réaliser un tronçon d'essai ;

Un tronçon de chaussée fortement sollicitée pourrait être réalisé en béton armé continu. Ce tronçon ferait l'objet d'une observation du comportement dans le temps et les résultats de cette observation documenteront la technologie de construction des chaussées en béton.

-Système de gestion des chaussées ;

Les administrations routières ou organismes de gestion des routes dans les différents pays devraient adopter un système de management des chaussées (PMS) pour la préservation des réseaux routiers et la bonne gestion des financements alloués. Il faut pour cela créer des unités de gestion routière et investir dans la surveillance du réseau et la collecte des données sur toutes les routes revêtues de chaque réseau national pour constituer une base de données fiable.

-Contrôle de la surcharge routière par la mesure des charges-essieux des véhicules ;

Installer le système de pesée en mouvement ou sous la chaussée lors des travaux. Tenant compte des échecs antérieurs avec le système de pesée aux ponts bascules, ce système autonome expérimenté dans des pays comme le Canada, n'a pas besoin de fonctionnaires pour faire les pesées. Le risque de corruption des fonctionnaires sera réduit.

-Marquer l'intérêt du contrôle des surcharges routières;

Sensibiliser les utilisateurs et l'ensemble des parties prenantes à la gestion des réseaux routiers et à l'enjeu que représente le contrôle des surcharges à savoir la préservation du réseau routier. C'est un enjeu à la fois économique, environnemental et social.

-Effectuer la réglementation et la gestion de la circulation routière des véhicules;

Les camions dont la charge dépasse la charge limite autorisée doivent être interdits de circuler sur les routes et les ponts. Des aires aménagées à proximité des routes doivent être prévues pour recevoir ces véhicules surchargés et les y garer en fourrière.

-Faire une réglementation pénalisant les fabricants et / ou les importateurs de camions;

Les camions de conception non adaptée au réseau routier ne doivent pas circuler sur les routes et les fabricants et / ou les importateurs de ceux-ci doivent être pénalisés par une réglementation à mettre en place.

-Internaliser les externalités ;

Les décideurs doivent inclure les externalités dans les marchés des appels d'offres. Cela contribuera à protéger les populations des dommages dus aux externalités.

-Consulter les populations;

La consultation des populations doit être systématique en amont du projet et durant son cycle de vie s'il est réalisé. La position des populations doit être prise en compte et il doit être possible de modifier un projet ou d'annuler sa construction s'il y a lieu.

-Créer un ordre des ingénieurs ;

Œuvrer à la création d'un ordre des ingénieurs en Côte d'Ivoire et dans les pays qui n'en ont pas encore. Car l'existence d'un ordre dont le but principal est la protection du public, contribuera à une meilleure conception des chaussées, à une meilleure conduite des opérations de construction et de gestion des réseaux routiers de façon générale. L'existence d'un ordre des ingénieurs permet également d'assainir le secteur de la construction d'une manière générale.

ANNEXE I

PARC DE VÉHICULES

CARACTÉRISTIQUES DE LA FLOTTE DE VÉHICULES

Cette annexe présente la flotte de véhicules utilisée dans cette étude ainsi que ses caractéristiques. Les données utilisées dans le logiciel HDM-4 décrites ci-après concernent les généralités des véhicules, les caractéristiques physiques de base et les coûts unitaires.

La distribution des véhicules sur les trois sections de route étudiées dans cette thèse est indiquée au Tableau-AI-1 ci-dessous.

Tableau-AI-1 Parc de véhicules et DJMA sur les trois sections

Section Banco-Gesco		Section Gesco-Attinguié		Section Attinguié-PK50	
Survey Year	2016	Survey Year	2016	Survey Year	2016
A Voitures	33539,0	A Voitures	30022,00	A Voitures	26870,0
B Camionnette	4339,00	B Camionnette	3688,00	B Camionnette	2800,00
C Taxis	16425,00	C Taxis	6570,00	C Taxis	3085,00
D Camion 2 essieux	1336,00	D Camion 2 essieux	1202,00	D Camion 2 essieux	962,00
E Camion 3 essieux	774,00	E Camion 3 essieux	697,00	E Camion 3 essieux	697,00
F Camion articulé 2+2	578,00	F Camion articulé 2+2	520,00	F Camion articulé 2+2	520,00
G camion articulé 2+3	943,00	G camion articulé 2+3	849,00	G camion articulé 2+3	849,00
H Camion articulé	462,00	H Camion articulé	416,00	H Camion articulé	416,00
I Bus	1273,00	I Bus	1146,00	I Bus	974,00
J Minibus	10331,00	J Minibus	8265,00	J Minibus	6577,00
Total AADT	70000,00	Total AADT	53375,00	Total AADT	43750,00

Généralités :

Les généralités incluent : le nom du véhicule tel que défini par l'utilisateur, ainsi que le type de véhicule, la classe et la catégorie du véhicule en accord avec la documentation du logiciel et une description pour l'utilisateur du logiciel, comme présentée dans les tableaux en exemple ci-dessous :

Tableau-AI-2 Bus

Caractéristiques du véhicule : Bus		
Généralités	Caractéristiques de base	Coûts unitaires économiques
Nom :	Bus	
Type de base :	Bus Moyen	
Classe :	Bus	
Catégorie :	Motorisé	
Description :	Bus moyen (3,5 - 8,0 tonnes)	
Durée de vie : <input type="radio"/> Constante <input checked="" type="radio"/> Optimale		

Tableau-AI-3 Camion articulé

Caractéristiques du véhicule : Camion articulé		
Généralités	Caractéristiques de base	Coûts unitaires économiques
Nom :	Camion articulé	
Type de base :	Véhicule articulé	
Classe :	Camions	
Catégorie :	Motorisé	
Description :	Camion articulé, semi-remorque ou camion avec remorque	
Durée de vie : <input type="radio"/> Constante <input checked="" type="radio"/> Optimale		

Caractéristiques de base :

Les caractéristiques de base des véhicules rassemblent les données physiques, les données liées à l'utilisation moyenne du véhicule, ainsi que les charges en ECAS et le poids total roulant.

Les caractéristiques de bases sont rappelées pour chaque type de véhicule dans les Tableaux ci-après :

Tableau-AI-4 Caractéristiques des voitures

Caractéristiques du véhicule : Voiture

Généralités | **Caractéristiques de base** | Coûts unitaires économiques

Données physiques		Pneumatiques	
Equiv. d'occupation VL :	1	Type de pneu :	Radial
Nombre de roues :	4	Nbe de rechapages :	1.3
Nombre d'essieux :	2	Coût de rechapage :	15 %
Utilisation			
km annuels :	18000 km	Usage privé :	100 %
heures ann. :	800 h	Passagers :	3 pers.
Vie moyenne :	10 ans	Voyages professionnels :	50 %
Charges			
ESALF :	0	Poids roulant :	3,5 tonnes

Tableau-AI-5 Caractéristiques des camionnettes

Caractéristiques du véhicule : Camionnette

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Données physiques

Equiv. d'occupation VL :

Nombre de roues :

Nombre d'essieux :

Pneumatiques

Type de pneu :

Nbe de rechapages :

Coût de rechapage : %

Utilisation

km annuels : km

heures ann. : h

Vie moyenne : ans

Usage privé : %

Passagers : pers.

Voyages professionnels : %

Charges

ESALF :

Poids roulant : tonnes

Calculer...

Tableau-AI-6 Caractéristiques des Taxis

Caractéristiques du véhicule : Taxis

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Données physiques

Equiv. d'occupation VL :

Nombre de roues :

Nombre d'essieux :

Pneumatiques

Type de pneu :

Nbe de rechapages :

Coût de rechapage : %

Utilisation

km annuels : km

heures ann. : h

Vie moyenne : ans

Usage privé : %

Passagers : pers.

Voyages professionnels : %

Charges

ESALF :

Poids roulant : tonnes

Calculer...

Tableau-AI-7 Caractéristiques des camions 2 essieux

Caractéristiques du véhicule : Camion 2 essieux

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Données physiques		Pneumatiques	
Equiv. d'occupation VL :	1.4	Type de pneu :	Diagonal ▼
Nombre de roues :	6	Nbe de rechapages :	0
Nombre d'essieux :	2	Coût de rechapage :	0 %
Utilisation			
km annuels :	40000 km	Usage privé :	0 %
heures ann. :	2200 h	Passagers :	0 pers.
Vie moyenne :	8 ans	Voyages professionnels :	0 %
Charges			
ESALF :	0.88	Poids roulant :	16.4 tonnes ▼

Tableau-AI-8 Caractéristiques des camions 3 essieux

Caractéristiques du véhicule : Camion 3 essieux

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Données physiques		Pneumatiques	
Equiv. d'occupation VL :	1.6	Type de pneu :	Diagonal ▼
Nombre de roues :	10	Nbe de rechapages :	0
Nombre d'essieux :	3	Coût de rechapage :	0 %
Utilisation			
km annuels :	80000 km	Usage privé :	0 %
heures ann. :	2500 h	Passagers :	0 pers.
Vie moyenne :	8 ans	Voyages professionnels :	0 %
Charges			
ESALF :	2.7	Poids roulant :	30.7 tonnes ▼

Tableau-AI-9 Caractéristiques des camions articulés 2+2

Caractéristiques du véhicule : Camion articulé 2+2

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Données physiques		Pneumatiques	
Equiv. d'occupation VL :	1.8	Type de pneu :	Diagonal
Nombre de roues :	14	Nbe de rechapages :	0
Nombre d'essieux :	4	Coût de rechapage :	0 %

Utilisation			
km annuels :	80000 km	Usage privé :	0 %
heures ann. :	2500 h	Passagers :	0 pers.
Vie moyenne :	8 ans	Voyages professionnels :	0 %

Charges			
ESALF :	2.88	Poids roulant :	39.9 tonnes

Tableau-AI-10 Caractéristiques des camions articulés 2+3

Caractéristiques du véhicule : Camion articulé 2+3

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Données physiques		Pneumatiques	
Equiv. d'occupation VL :	1.8	Type de pneu :	Diagonal
Nombre de roues :	18	Nbe de rechapages :	0
Nombre d'essieux :	5	Coût de rechapage :	0 %

Utilisation			
km annuels :	80000 km	Usage privé :	0 %
heures ann. :	2500 h	Passagers :	0 pers.
Vie moyenne :	8 ans	Voyages professionnels :	0 %

Charges			
ESALF :	3.07	Poids roulant :	47.8 tonnes

Tableau-AI-11 Caractéristiques des camions articulés

Caractéristiques du véhicule : Camion articulé

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Données physiques

Equiv. d'occupation VL :

Nombre de roues :

Nombre d'essieux :

Pneumatiques

Type de pneu :

Nbe de rechapages :

Coût de rechapage : %

Utilisation

km annuels : km

heures ann. : h

Vie moyenne : ans

Usage privé : %

Passagers : pers.

Voyages professionnels : %

Calculer...

Charges

ESALF :

Poids roulant : tonnes

Calculer...

Tableau-AI-12 Caractéristiques des bus

Caractéristiques du véhicule : Bus

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Données physiques

Equiv. d'occupation VL :

Nombre de roues :

Nombre d'essieux :

Pneumatiques

Type de pneu :

Nbe de rechapages :

Coût de rechapage : %

Utilisation

km annuels : km

heures ann. : h

Vie moyenne : ans

Usage privé : %

Passagers : pers.

Voyages professionnels : %

Calculer...

Charges

ESALF :

Poids roulant : tonnes

Calculer...

Tableau-AI-13 Caractéristiques des Minibus

Caractéristiques du véhicule : Minibus

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Données physiques

Equiv. d'occupation VL :

Nombre de roues :

Nombre d'essieux :

Pneumatiques

Type de pneu :

Nbe de rechapages :

Coût de rechapage : %

Utilisation

km annuels : km

heures ann. : h

Vie moyenne : ans

Usage privé : %

Passagers : pers.

Voyages professionnels : %

Charges

ESALF :

Poids roulant : tonnes

Le tableau suivant récapitule les hypothèses de charges des véhicules

Tableau-AI-14 Poids des véhicules

Désignation	Poids (tonnes)
Voiture	3,5
Camionnette	3,5
Taxis	3,5
Camion 2 essieux	16,4
Camion 3 essieux	30,7
Camion articulé 2+2	39,9
Camion articulé 2+3	47,8
Camion articulé	62,3
Bus	14
Minibus	3,5

L'équivalent de charge axial simple (ÉCAS) est pris en compte par un facteur d'équivalent de charge axial (ESALF) que le logiciel calcule. Toutefois les facteurs ESALF peuvent être obtenus aux postes de pesage des véhicules sur le réseau, comme l'a fait Joubert (2015), lors du calage du HDM-4 pour la Côte d'Ivoire avec les données de 2015. Les données relatives aux facteurs ESALF proviennent des mesures effectuées en Côte et confortées avec celles mesurées dans des pays de l'espace UEMOA à savoir le Bénin et le Sénégal. Les hypothèses d'ESALF ainsi utilisées se rapprochent de l'hypothèse de Joubert en 2015 comme présentée dans le Tableau-AI-15 ci-dessous :

Tableau-AI-15 Facteur ESALF selon l'hypothèse de Joubert, Côte d'Ivoire
Tirée de Joubert (2016)

Type de PL	ESALF
P11	0,81
P12	1,28
T11S2	3,30
T11S3	3,03
Autres art.	4,48

Coûts unitaires économiques

Le dernier menu du HDM-4 pour décrire les véhicules concerne les coûts unitaires utilisés, comme présenté dans les tableaux suivants. Ces coûts aux usagers rassemblent les coûts d'exploitation du véhicule et les coûts du temps.

Tableau-AI-15 Coûts unitaires-Voiture

Caractéristiques du véhicule : Voiture

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Ressources véhicule

Achat véhicule :	9980	Main d'oeuvre entretien :	2,44	par heure
Pneumatique :	33	Équipage :	0	par heure
Carburant :	0,6	Frais gén. annuels :	366	
Lubrifiant :	1	Taux d'intérêt :	15	%

Coût du temps

Passager (trajets professionnels)	1,3	par heure	Marchandises :	0	par heure
Passager (trajets privés)	0,65	par heure			

Tableau-AI-16 Coûts unitaires-Camionnette

Caractéristiques du véhicule : Camionnette

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Ressources véhicule

Achat véhicule :	13307	Main d'oeuvre entretien :	2,44	par heure
Pneumatique :	43	Équipage :	0	par heure
Carburant :	0,6	Frais gén. annuels :	444	
Lubrifiant :	1	Taux d'intérêt :	15	%

Coût du temps

Passager (trajets professionnels)	1,3	par heure	Marchandises :	0	par heure
Passager (trajets privés)	0	par heure			

Tableau-AI-17 Coûts unitaires-Taxis

Caractéristiques du véhicule : Taxis

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Ressources véhicule

Achat véhicule :	4436	Main d'oeuvre entretien :	2,44	par heure
Pneumatique :	33	Équipage :	1,11	par heure
Carburant :	0,6	Frais gén. annuels :	444	
Lubrifiant :	1	Taux d'intérêt :	15	%

Coût du temps

Passager (trajets professionnels)	0	par heure	Marchandises :	0	par heure
Passager (trajets privés)	0	par heure			

Tableau-AI-18 Coûts unitaires-Camions 2 essieux

Caractéristiques du véhicule : Camion 2 essieux

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Ressources véhicule

Achat véhicule :	22179	Main d'oeuvre entretien :	2,44	par heure
Pneumatique :	114	Équipage :	2	par heure
Carburant :	0,6	Frais gén. annuels :	1553	
Lubrifiant :	1	Taux d'intérêt :	15	%

Coût du temps

Passager (trajets professionnels)	0	par heure	Marchandises :	3	par heure
Passager (trajets privés)	0	par heure			

Tableau-AI-19 Coûts unitaires-Camions 3 essieux

Caractéristiques du véhicule : Camion 3 essieux

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Ressources véhicule

Achat véhicule :	33268	Main d'oeuvre entretien :	2,44	par heure
Pneumatique :	114	Équipage :	2	par heure
Carburant :	0,6	Frais gén. annuels :	1553	
Lubrifiant :	1	Taux d'intérêt :	15	%

Coût du temps

Passager (trajets professionnels)	0	par heure	Marchandises :	4	par heure
Passager (trajets privés)	0	par heure			

Tableau-AI-20 Coûts unitaires-Camion articulé 2+2

Caractéristiques du véhicule : Camion articulé 2+2

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Ressources véhicule

Achat véhicule :	55447	Main d'oeuvre entretien :	2,44	par heure
Pneumatique :	208	Équipage :	2	par heure
Carburant :	0,6	Frais gén. annuels :	3149	
Lubrifiant :	1	Taux d'intérêt :	6	%

Coût du temps

Passager (trajets professionnels)	0	par heure	Marchandises :	8	par heure
Passager (trajets privés)	0	par heure			

Tableau-AI-21 Coûts unitaires-Camion articulé 2+3

Caractéristiques du véhicule : Camion articulé 2+3

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Ressources véhicule

Achat véhicule :	55447	Main d'oeuvre entretien :	2,44	par heure
Pneumatique :	208	Équipage :	2	par heure
Carburant :	0,5	Frais gén. annuels :	3149	
Lubrifiant :	1	Taux d'intérêt :	15	%

Coût du temps

Passager (trajets professionnels)	0	par heure	Marchandises :	9	par heure
Passager (trajets privés)	0	par heure			

Tableau-AI-21 Coûts unitaires-Camion articulé

Caractéristiques du véhicule : Camion articulé

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Ressources véhicule

Achat véhicule :	55447	Main d'oeuvre entretien :	2,44	par heure
Pneumatique :	208	Équipage :	2	par heure
Carburant :	0,6	Frais gén. annuels :	3149	
Lubrifiant :	1	Taux d'intérêt :	15	%

Coût du temps

Passager (trajets professionnels)	0	par heure	Marchandises :	14	par heure
Passager (trajets privés)	0	par heure			

Tableau-AI-22 Coûts unitaires-Bus

Caractéristiques du véhicule : Bus

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Ressources véhicule

Achat véhicule :	49902	Main d'oeuvre entretien :	2,44	par heure
Pneumatique :	120	Équipage :	1,15	par heure
Carburant :	0,6	Frais gén. annuels :	2462	
Lubrifiant :	1	Taux d'intérêt :	15	%

Coût du temps

Passager (trajets professionnels)	0,68	par heure	Marchandises :	1	par heure
Passager (trajets privés)	0	par heure			

Tableau-AI-23 Coûts unitaires-Minibus

Caractéristiques du véhicule : Minibus

Généralités | Caractéristiques de base | Coûts unitaires économiques

Ressources véhicule

Achat véhicule :	7763	Main d'oeuvre entretien :	2,44	par heure
Pneumatique :	52	Équipage :	1,11	par heure
Carburant :	0,6	Frais gén. annuels :	932	
Lubrifiant :	1	Taux d'intérêt :	15	%

Coût du temps

Passager (trajets professionnels)	0	par heure	Marchandises :	0	par heure
Passager (trajets privés)	0,34	par heure			

ANNEXE II

COMPARAISON DES CHAUSSEES FLEXIBLES ET DES CHAUSSEES RIGIDES

Tableau-AII-1 Caractéristiques des chaussées en EB et en BAC
Adapté de (Haseeb, 2017)

N° d'ordre	Flexible	Rigide
1	La déformation dans la sous-catégorie est transférée aux couches supérieures	La déformation dans la sous-catégorie n'est pas transférée aux couches suivantes
2	La conception est basée sur les caractéristiques de répartition de la charge des couches de composants	La conception est basée sur la force de flexion ou l'action de la dalle
3	A une faible résistance à la flexion	A une haute résistance à la flexion
4	La charge est transférée par contact de grain à grain	Il n'y a pas de phénomène de transfert de charge grain-grain existant
5	Faible coût de construction, coûts de réparations élevés	Coût de construction plus élevé, coûts de réparation faibles
6	A une faible durée de vie	A une durée de vie plus longue
7	Le revêtement ne peut pas être posé directement sur le sous-sol, mais une sous-couche est nécessaire	Le surfacage peut être directement posé sur le sous-sol
8	Aucune contrainte thermique n'est induite car la chaussée a la capacité de se contracter et de se dilater librement	Les contraintes thermiques sont plus vulnérables à être induites que la capacité à se contracter et à se dilater est très moins dans le béton
9	C'est pourquoi les joints de dilatation ne sont pas nécessaires	C'est pourquoi les joints de dilatation sont nécessaires
10	La résistance de la route dépend fortement de la solidité de la sous-catégorie	La résistance de la route dépend moins de la solidité de la sous-catégorie
11	Le roulage de la surface est nécessaire	Le roulage du revêtement n'est pas nécessaire
12	La route peut être utilisée pour la circulation dans les 24 heures	La route ne peut pas être utilisée avant 14 jours de durcissement
13	La force de frottement est moindre. La déformation dans la sous-couche n'est pas transférée aux couches supérieures.	La force de friction est élevée

La principale différence entre la chaussée en enrobé et la chaussée en béton est la distribution des contraintes dans le sol dues aux charges de trafic comme présenté à la Figure –AII-1.

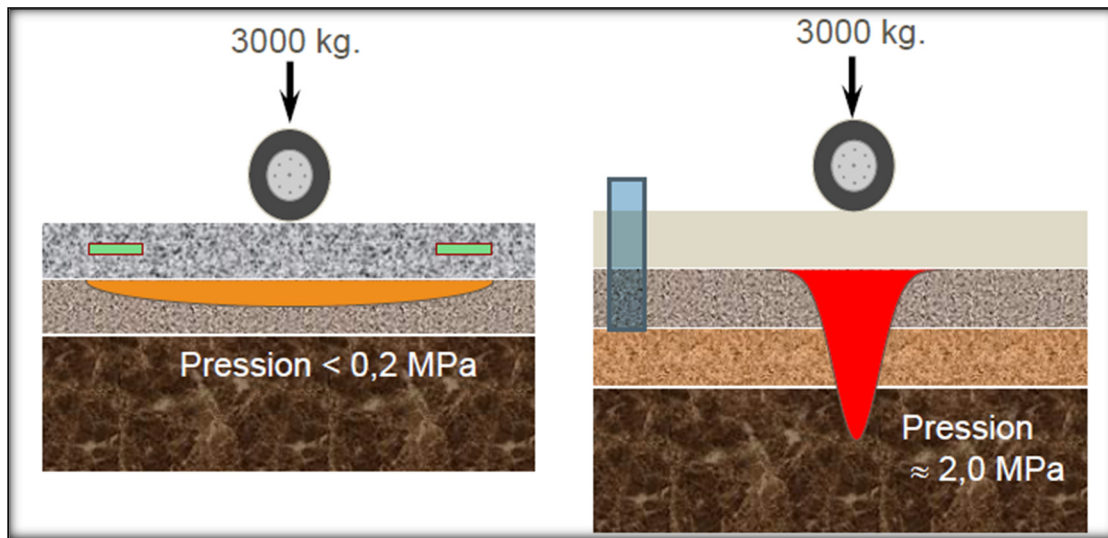


Figure-AII-1 Distribution des charges de trafic dans la chaussée
Tirée de Maillard (2017)

Les sollicitations influencent en profondeur les couches de la chaussée et le sol d'infrastructure pour la chaussée en enrobé bitumineux. Leur influence se fait sentir horizontalement en surface pour la chaussée en béton. Ce fonctionnement nécessite un nombre plus grand de couches pour l'option en enrobé. Ce nombre est à l'inverse réduit pour l'option en béton tel que présenté à la Figure-AII-2. Toutefois le revêtement en béton peut être posé directement sur le sol d'infrastructure. Les couches disposées entre le sol d'infrastructure et le revêtement en béton ne sont pas prévues pour des raisons structurales. Elles sont disposées pour des raisons de drainage de la chaussée. Compte tenu de la distribution des contraintes dues aux charges de trafic sur la chaussée le revêtement en béton a l'avantage d'éviter le phénomène d'orniérage des chaussées (Assaf, 2018).

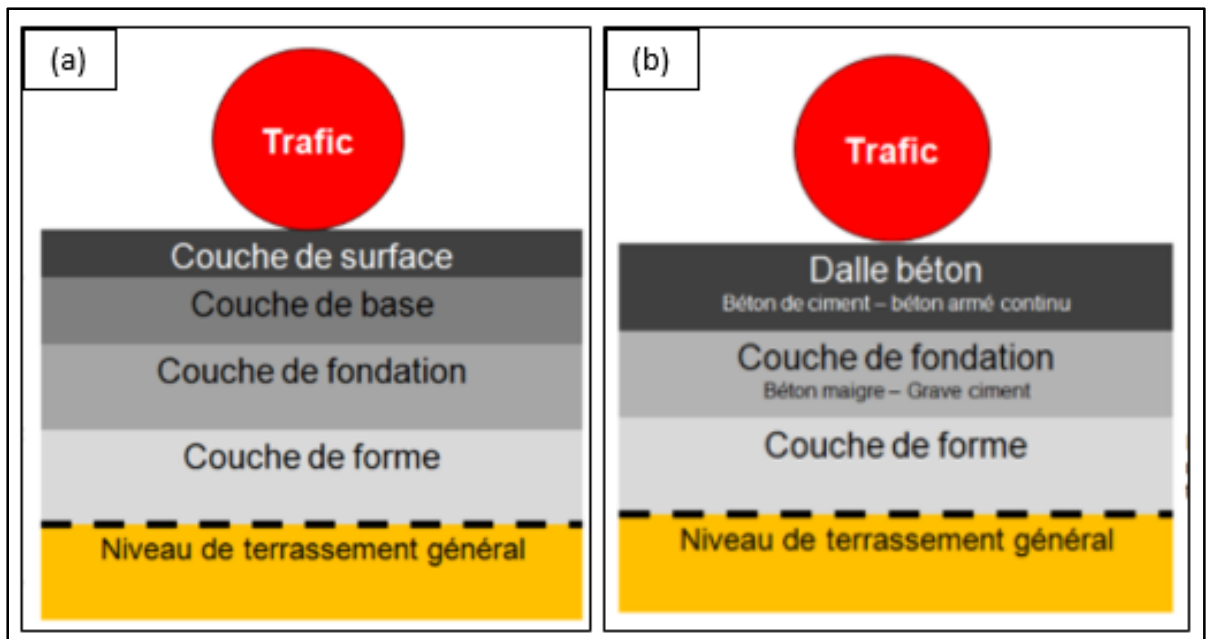


Figure-AII-2 Structure type de chaussée-(a) EB ; (b) BAC
Tirée de WikiTP (2016)

ANNEXE III

SECTION BANCO-GESCO

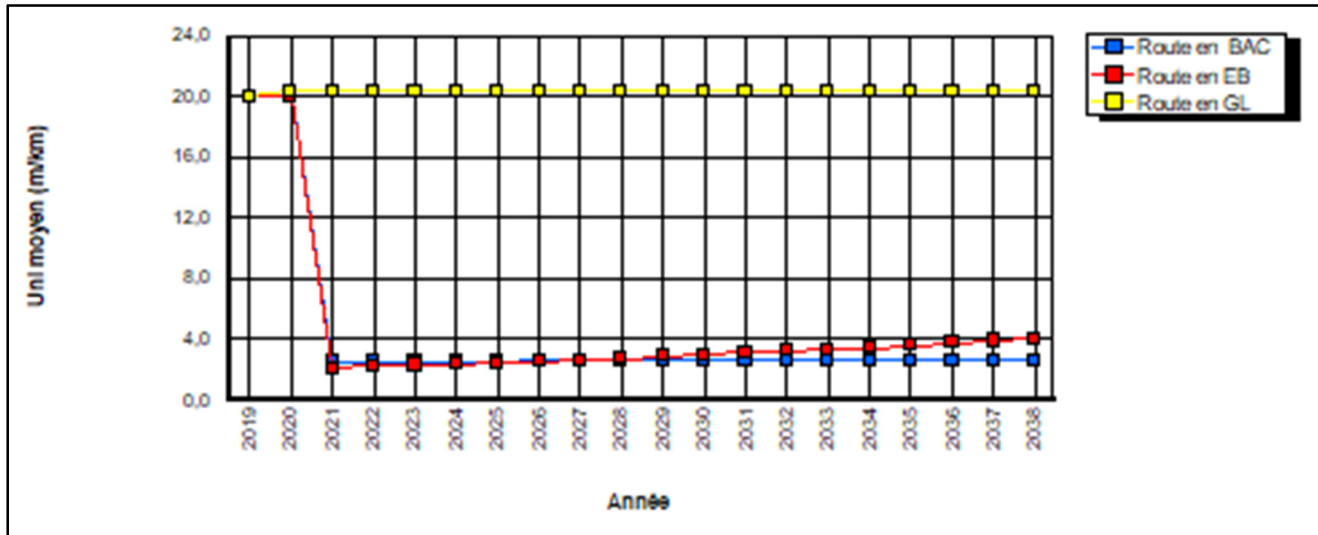
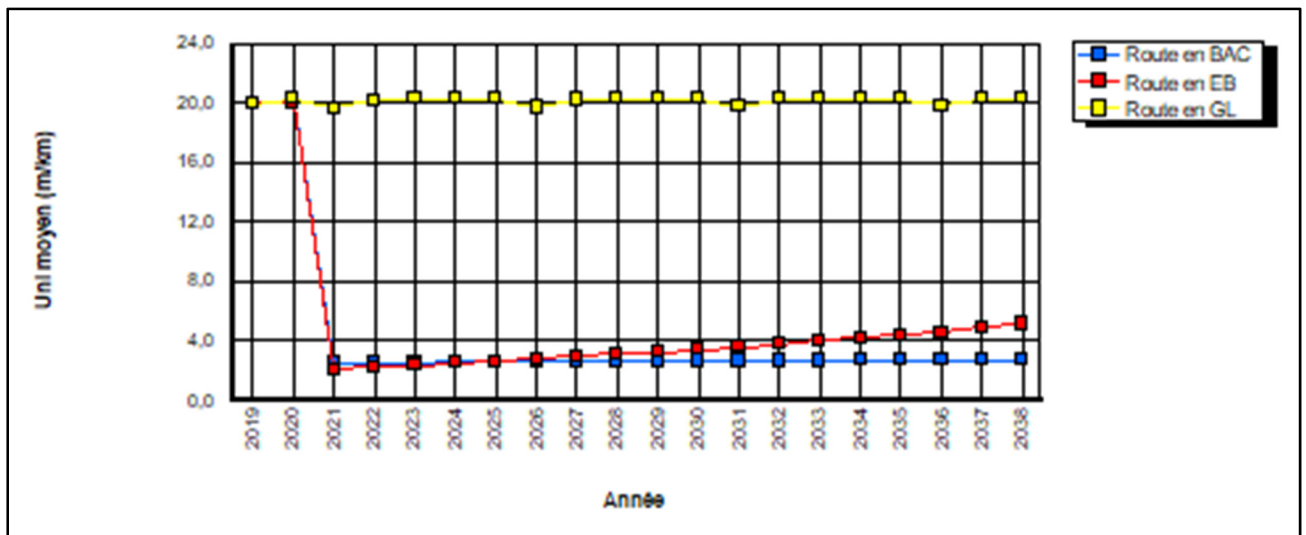
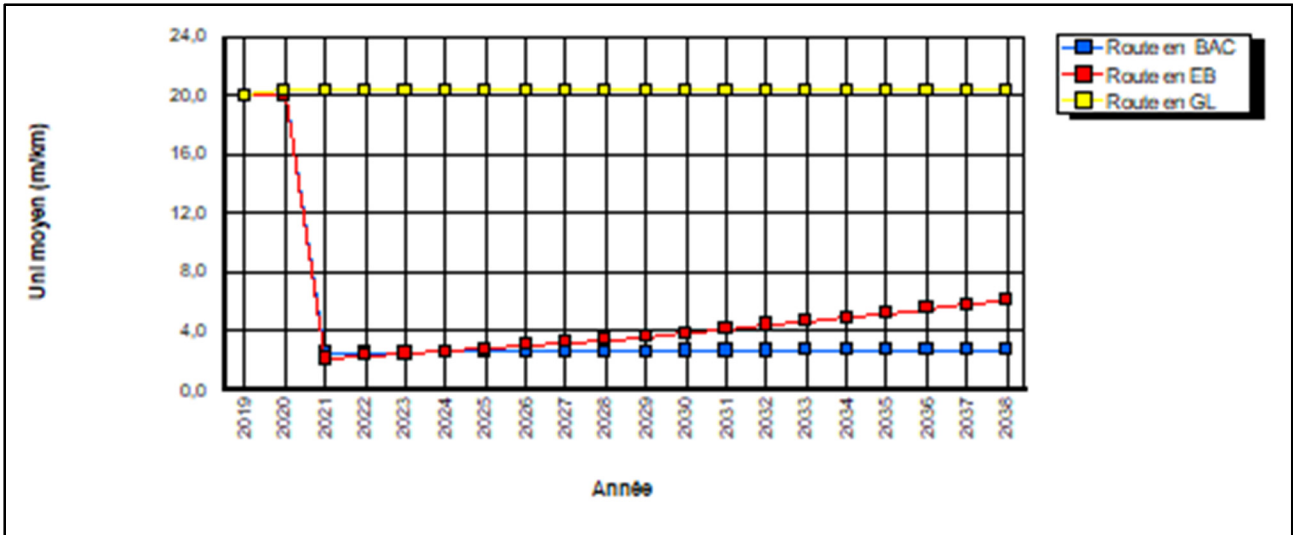


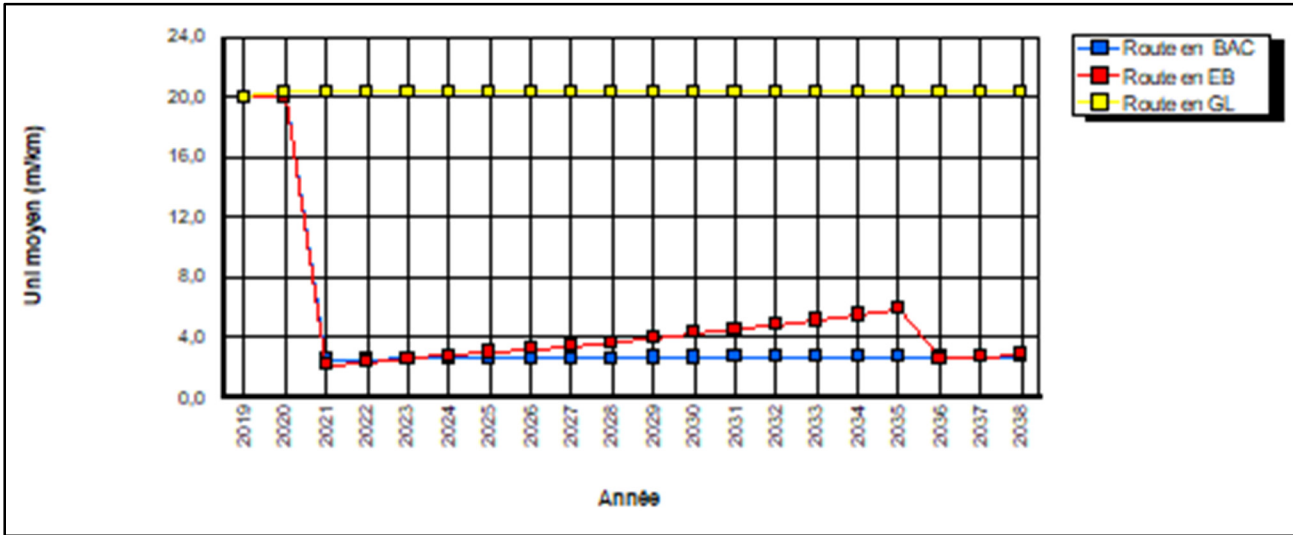
Figure-AIII-1 Uni par section -1 % de croissance des poids lourds



Fissure-AIII-2 Uni par section -5 % de croissance des poids lourds



Fissure-AIII-3 Uni par section -9 % de croissance des poids lourds



Fissure-AIII-4 Uni par section -13 % de croissance des poids lourds

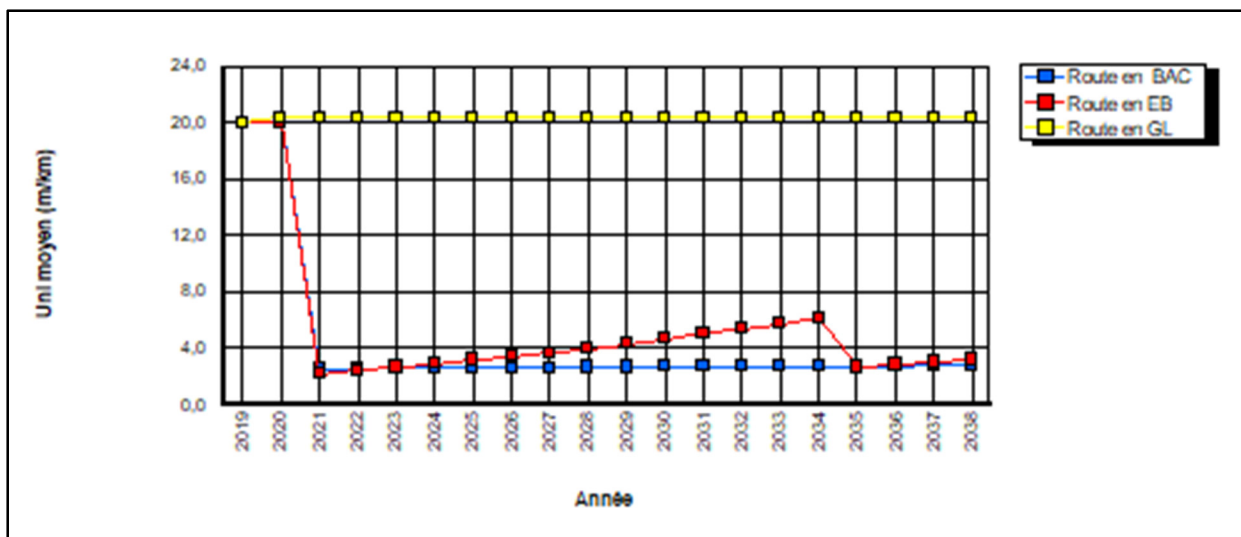


Figure-AIII-5 Uni par section -17 % de croissance des poids lourds

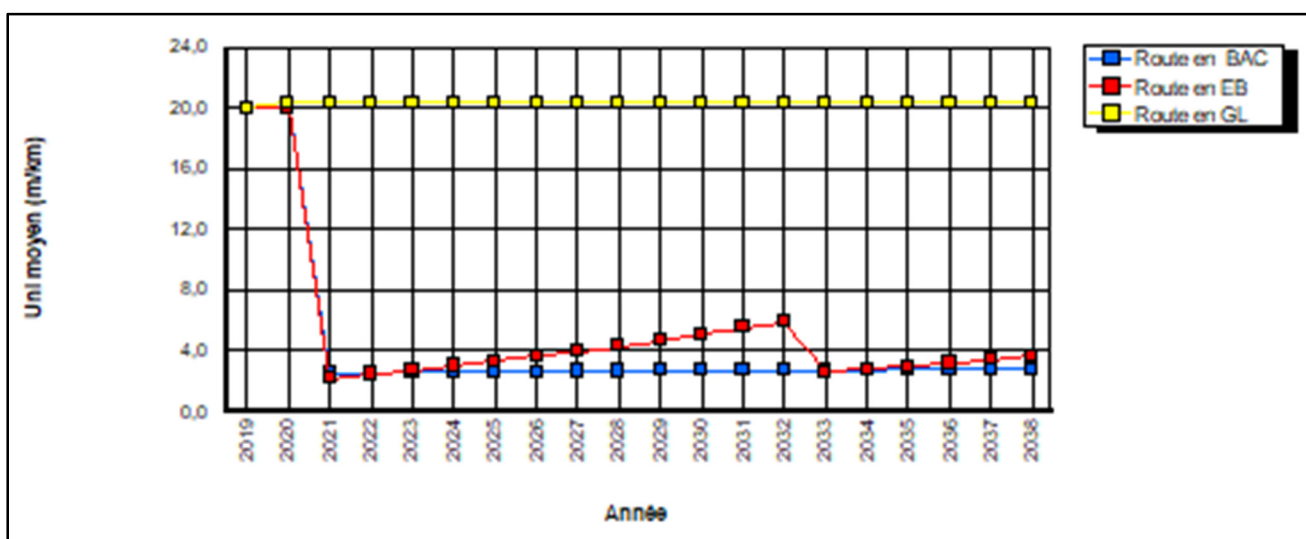


Figure-AIII-6 Uni par section -21 % de croissance des poids lourds

ANNEXE IV

SECTION GESCO-ATTINGUIÉ

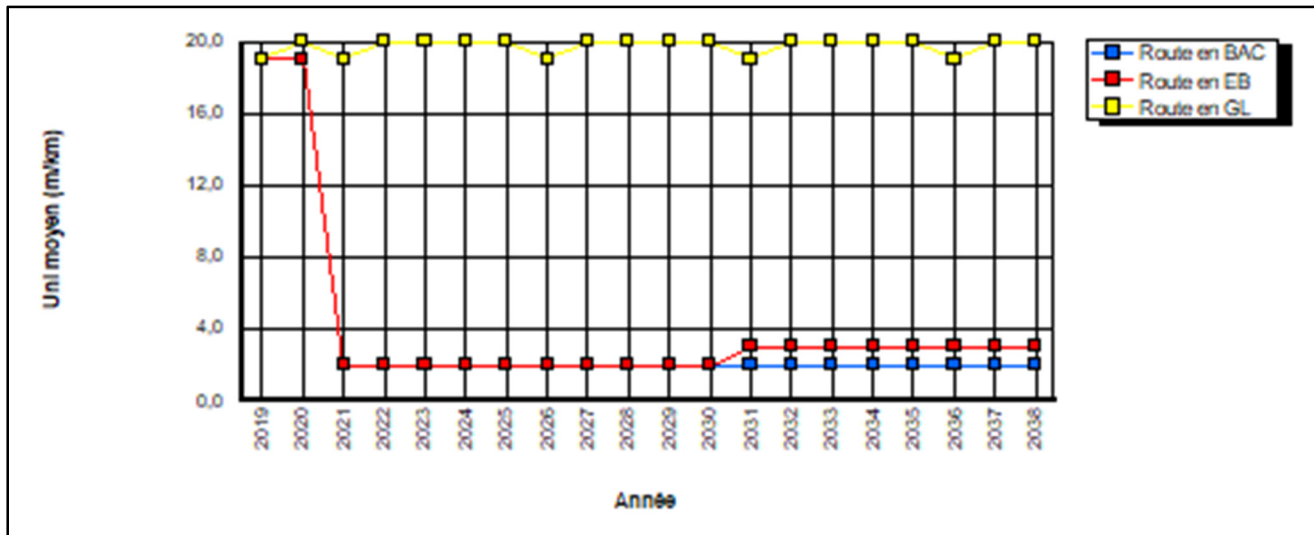


Figure-AIV-1 Uni par section -1 % de croissance des poids lourds

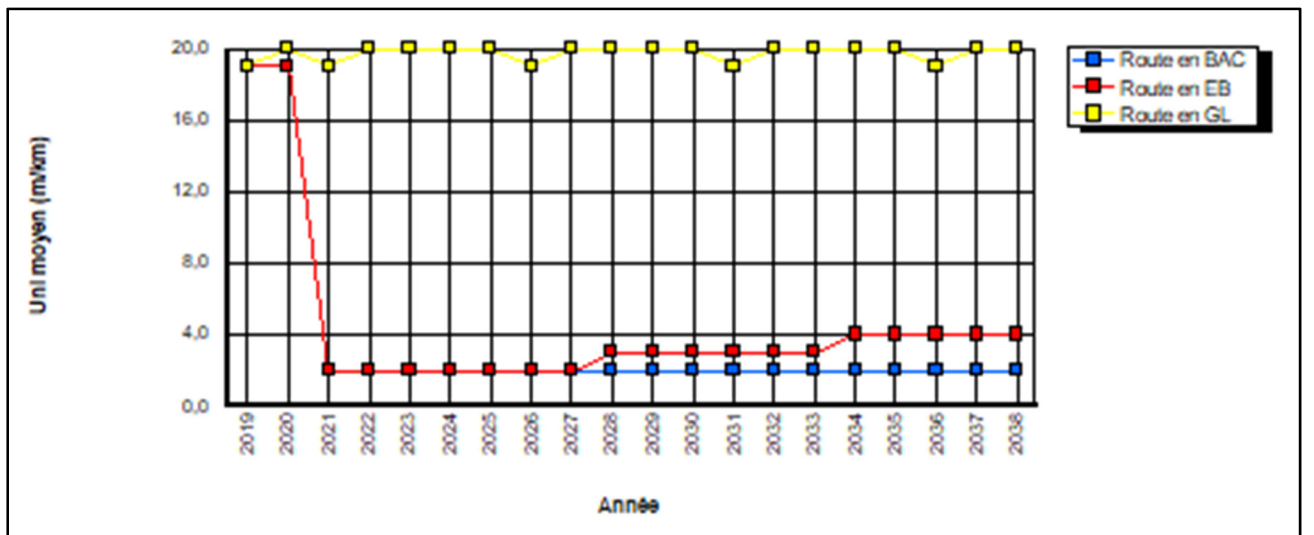


Figure-AIV-2 Uni par section -5 % de croissance des poids lourds

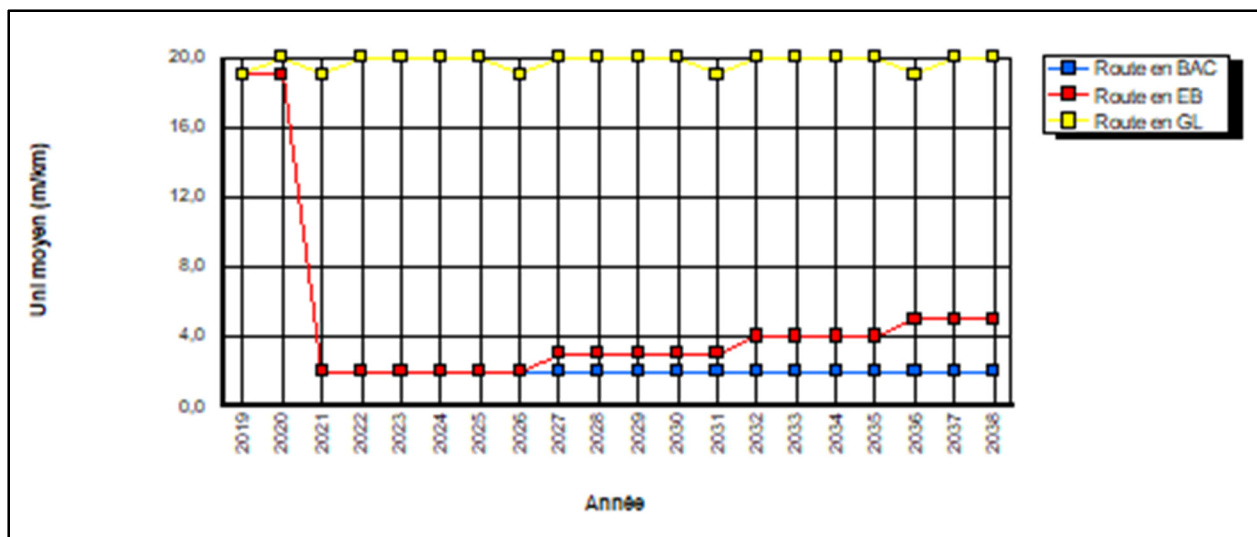


Figure-AIV-3 Uni par section -9 % de croissance des poids lourds

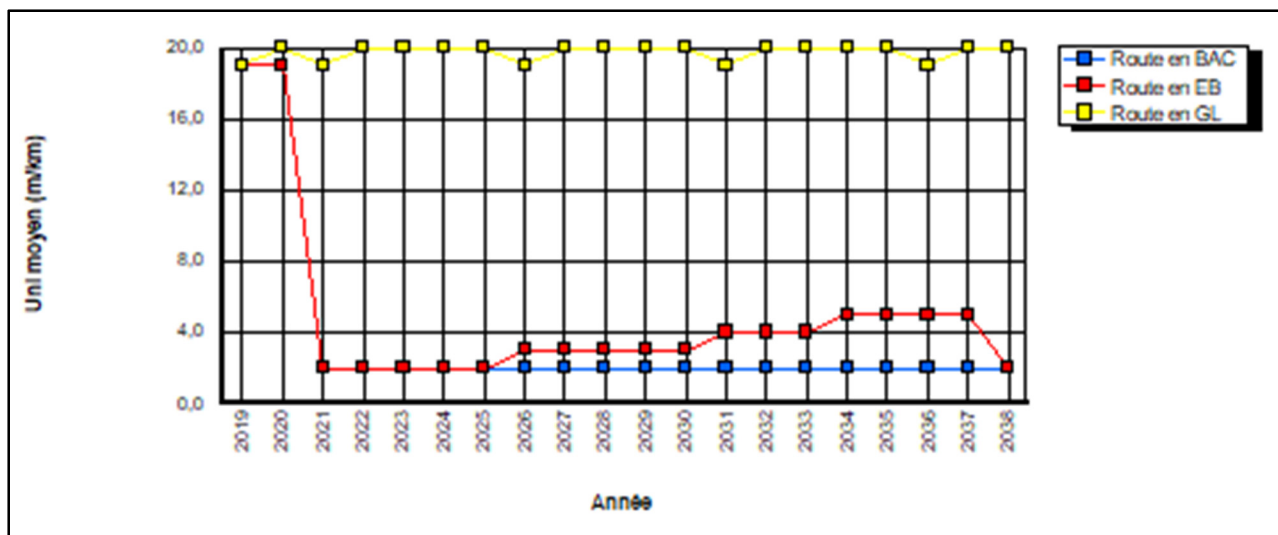


Figure-AIV-4 Uni par section -13 % de croissance des poids lourds

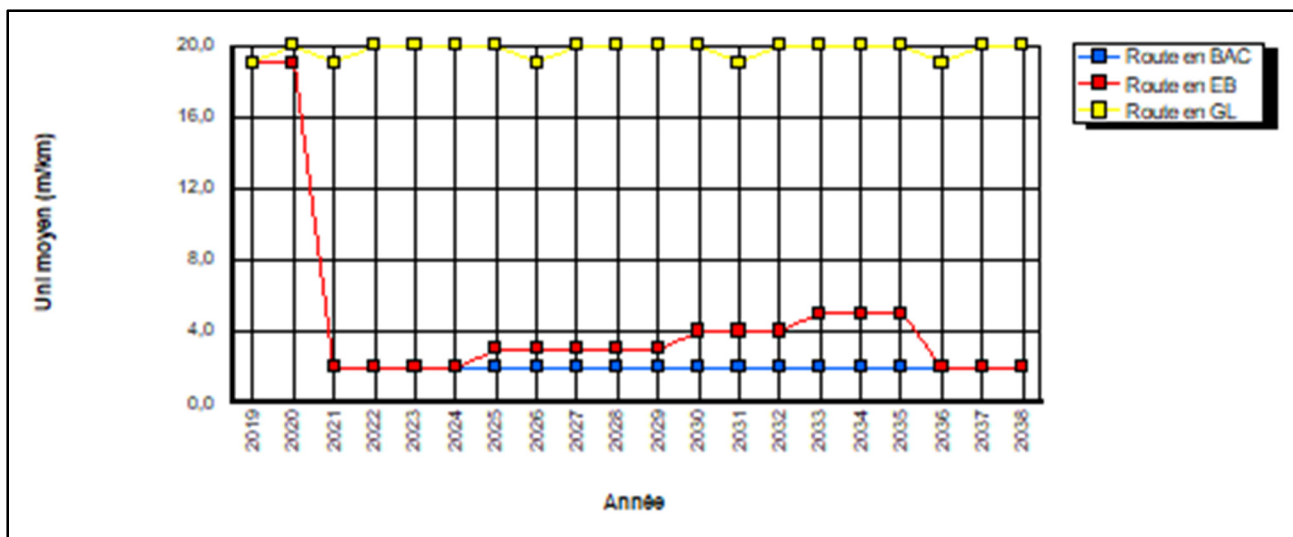


Figure-AIV-5 Uni par section -17 % de croissance des poids lourds

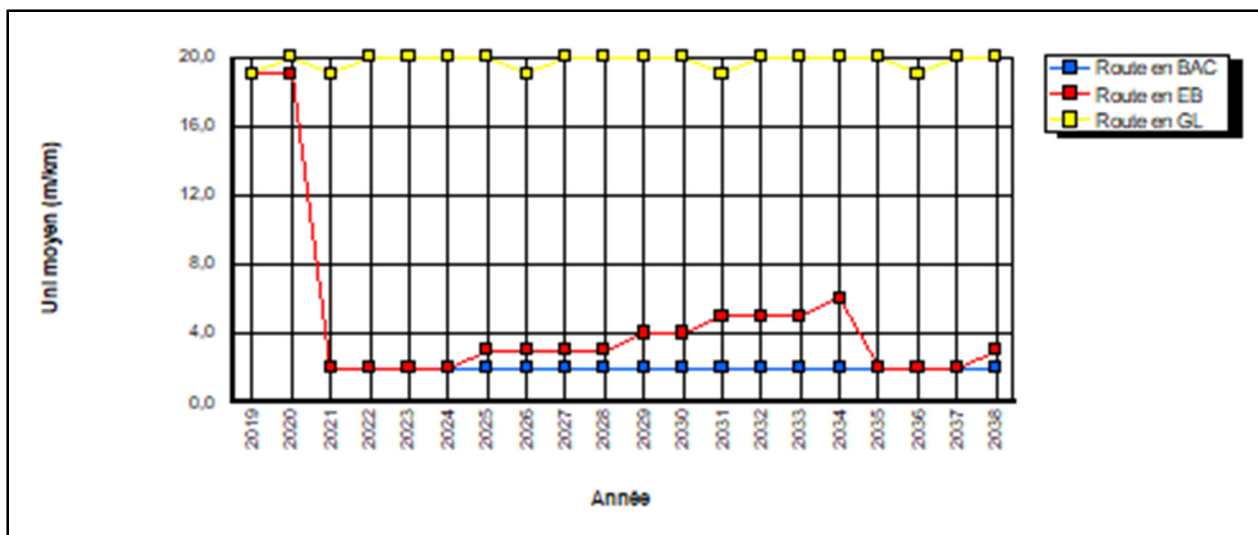


Figure-AIV-6 Uni par section -21 % de croissance des poids lourds

ANNEXE V

SECTION ATTINGUIÉ-PK50

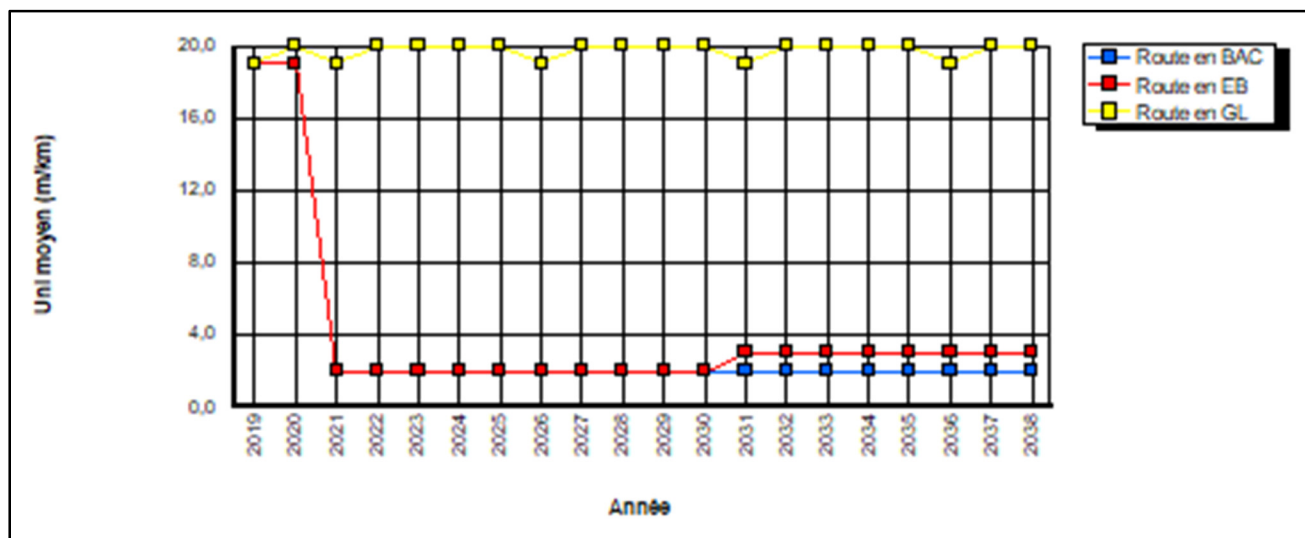


Figure-AV-1 Uni par section -1 % de croissance des poids lourds

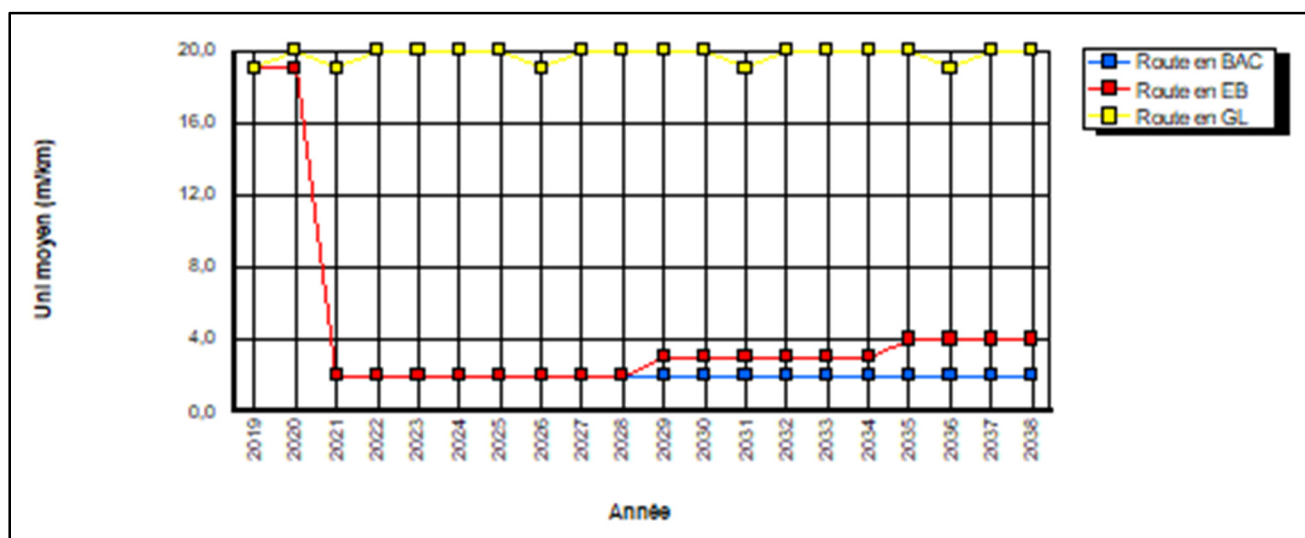


Figure-AV-2 Uni par section -5 % de croissance des poids lourds

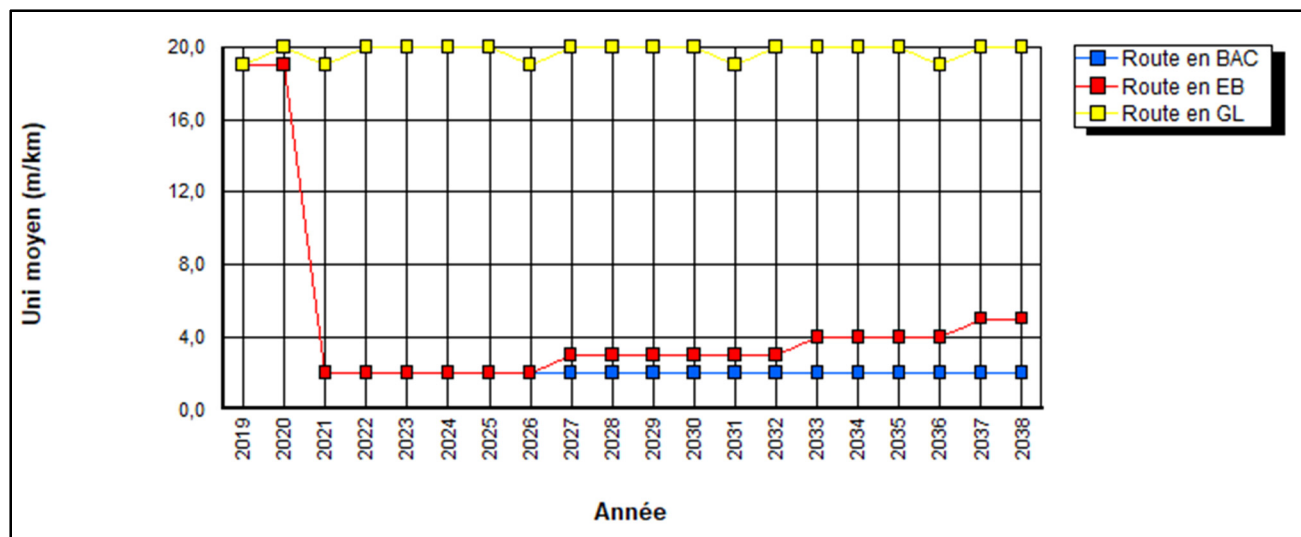


Figure-AV-3 Uni par section -9 % de croissance des poids lourds

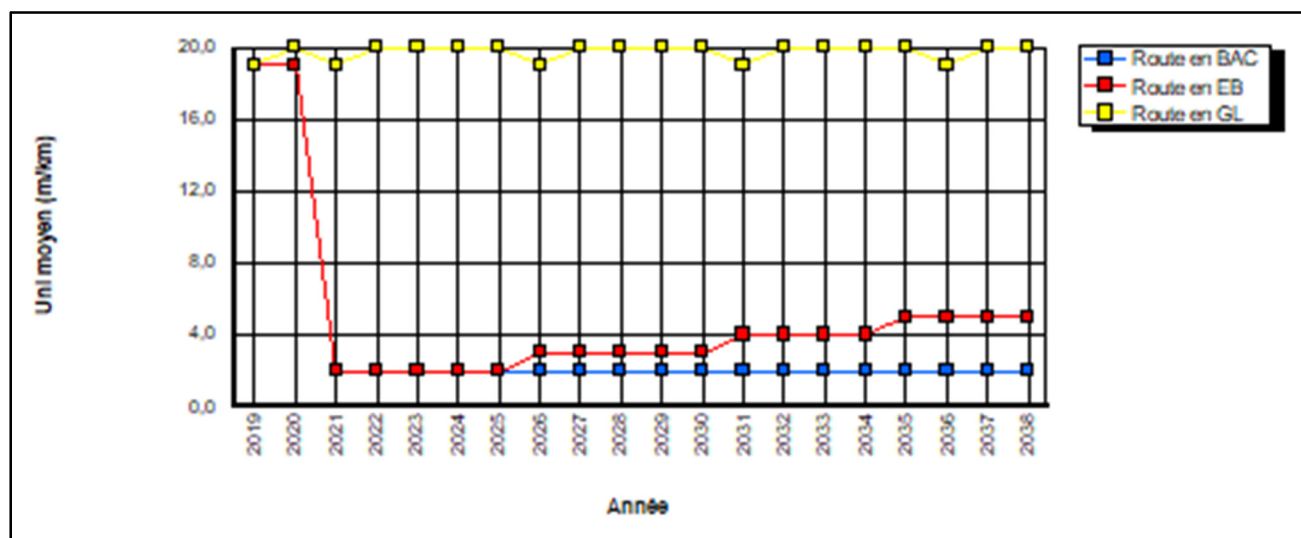


Figure-AV-4 Uni par section -13 % de croissance des poids lourds

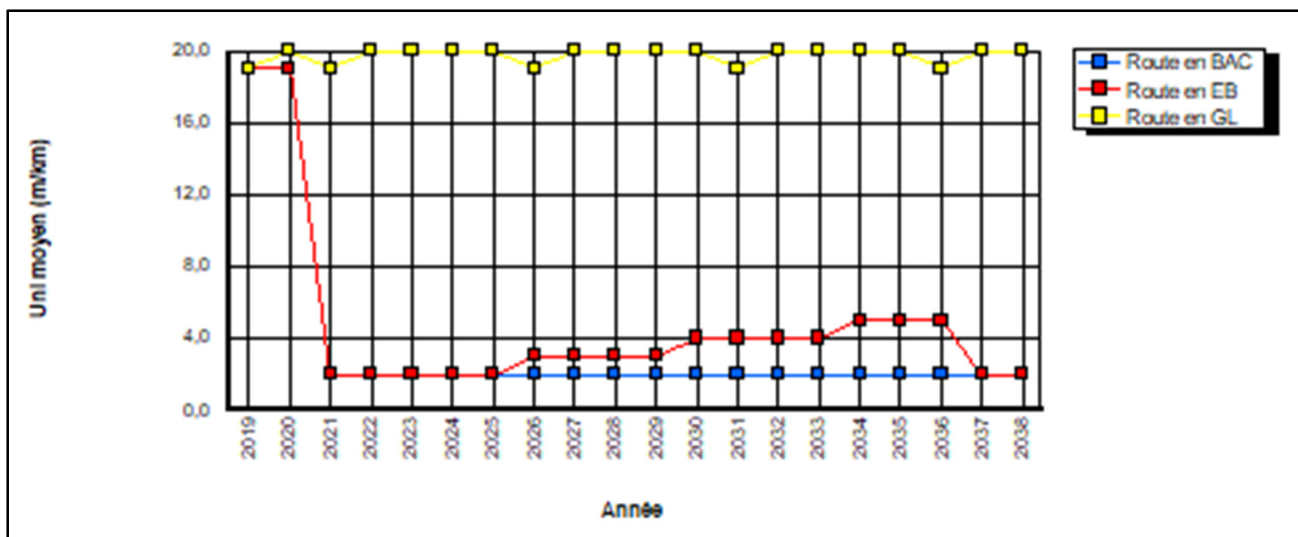


Figure-AV-5 Uni par section -17 % de croissance des poids lourds

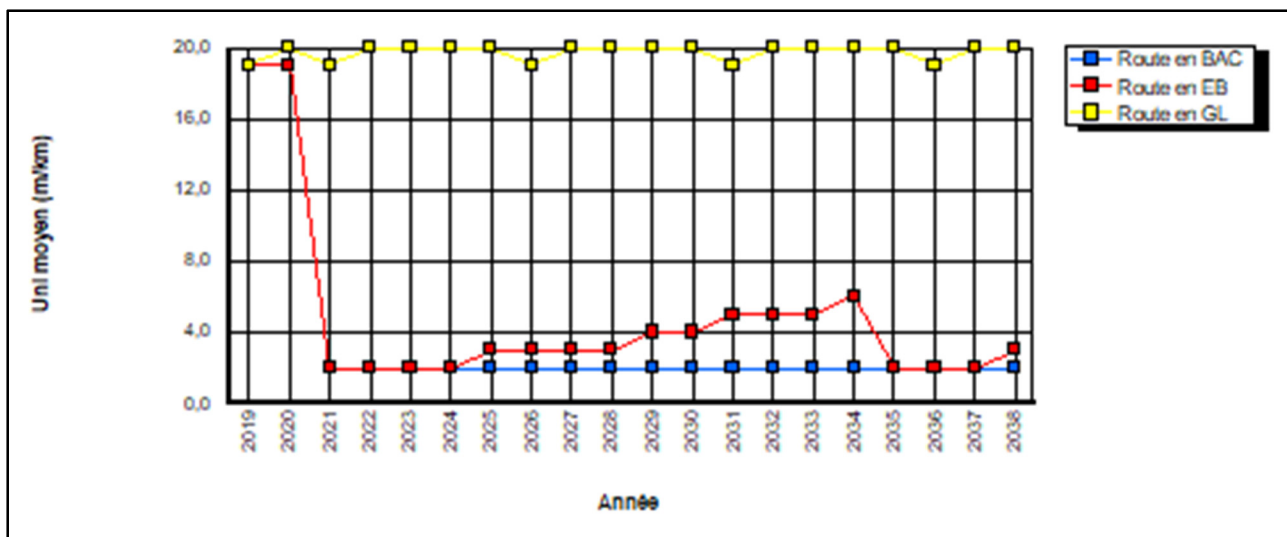


Figure-AV-6 Uni par section -21 % de croissance des poids lourds

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Standards. Washington DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- Abdelaziz, M.-Y., & Ouellet-Plamondon, C. (2019). *Analyse du cycle de vie des chaussées*, ÉTS.
- Assaf, G. J. (2018). *MGC 840 : Conception et réhabilitation des chaussées (notes de cours)*. Montréal, QC: École de technologie supérieure.
- Asta Guciute, S. (2011). *Life Cycle Cost Analysis of Asphalt and Concrete Pavements*, (Reykjavík University, Iceland).
- atoo.ci (Cartographe). (2017). carte-côte -d-ivoire. Repéré à <http://www.atoo.ci/2017/11/05/principales-mines-dor-cote-divoire/carte-cote-d-ivoire/>
- Babilotte, C., & Soulie, C. (1994). *Guide technique de conception et de dimensionnement des chaussées communautaires-Fasciule 2-Dimensionnement des structures de chaussées neuves et élargissement des voies*. Lyon, France: CETE DE LYON.
- Bank, W. (2011). Curbing fraud, corruption, and collusion in the roads sector. Integrity Vice Presidency.
- Bejar, Y. (2019). *Les mathématiques financières*. Paris, France.
- Campbell, A. (2009). Federal road management for sub-Saharan African nations: A Nigerian case study.
- CH2M HILL, & Company, G. (2009). *Transportation and Sustainability Best Practices Background*. USA: Sustainability Peer Exchange – Center for Environmental Excellence by AASHTO.
- Chan, A., Keoleian, G., & Gabler, E. (2008). Evaluation of life-cycle cost analysis practices used by the Michigan Department of Transportation. *Journal of Transportation Engineering*, 134(6), 236-245.
- Chappat, M., & Bilal, J. (2003). *Sustainable development_The environmental road of the future, life cycle analysis*. Paris, France: COLAS Group.

- Chrissos, J., & Gillet, R. (2016). Principaux critères de selection des projets. Dans *Gestion appliquée-décision d'investissement* (4 ème édicion éd.). Repéré à www.gestionappliquee.com
- CIMbéton. (2001, Mars 2001). Les chaussées en béton: contribution au choix des techniques. *Routes*, 75, 8.
- Claude, J. F., El-Nemr, E., Tighiouart, B., Ahmed, E., & Benmokrane, B. (2013). *Conception d'une dalle de chaussée en Béton Armé Continu (BAC) avec des armatures en PRFV sur l'autoroute 40 Est (Montréal)*. Sherbrooke, Québec: Université de Sherbrooke. Repéré à <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1153189.pdf>
- Collier, P., Kirchberger, M., & Söderbom, M. (2013). The cost of road infrastructure in developing countries. *Centre for the Study of African Economies, mimeo*.
- Collin, J.-P., & Labrecque, A.-C. (2011). *Les études urbaines dans le monde-Recueil des capsules (2007-2011)*. Repéré à <http://espace.inrs.ca/6513/1/Capsules-MONDE-DOCUMENT.pdf>
- Conseil canadien du béton. (2013). *Redécouvrir le béton*. Canada: Conseil canadien du béton.
- Conseil canadien du béton. (2014). *Redécouvrir le béton, Solutions indispensables pour la construction d'infrastructures de transport durables*.
- Cornes, R., & Sandler, T. (1996). *The Theory of Externalities, Public Goods, and Club Goods*. USA: Cambridge University Press.
- Corporate Finance Institute (CFI). (2019). What is internal rate of return (IRR) ? Repéré le 07 juillet 2019 à <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/finance/internal-rate-return-irr/>
- Cross, S. A., & Parsons, R. I. (2002). Evaluation of Expenditures on Rural Interstate Pavements in Kansas. (University of Kansas. Kansas University Transportation. Center. Lawrence, Kansas.).
- CTL/Thompson, I. (2002). *Asphalt Vs. Concrete: A Pavement Cost Comparison Study of Reconstructing Major Highway Corridors in Colorado. Report Prepared for the Colorado Asphalt Pavement Association*. Centennial, Colorado, USA.
- Dauvergne, M., Agnès, Proust, C., Tamagny, P., & Ventura, A. (2013). *Manuel utilisateur ECORCE 2.0*. Champs -sur-Marne, FRANCE: IFSTTAR.

- Dauvergne, M., Jullen, A., Ventura, A., Boussafir, Y., Tamagny, P., Muresan Paslaru, B., . . . Goyer, S. (2013). *Manuel de référence ECORCE 2.0*. Champs-sur-Marne: IFSTTAR.
- Doré, G., & Grellet, D. (2015). *Logiciel mécaniste-empirique de conception des chaussées souples i3C - Guide de l'utilisateur*. Québec, QC: Université de Laval.
- École de management Sorbonne. (2015). Choix d'investissement (VAN, TRI). Dans E. d. m. Sorbonne (Éd.), *Cours de gestion financière (M1)*. Paris, France. Repéré à 12/05/2019
- EPA. (1996). *EPA, Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants*; (Vol. EPA/600/P-93/004aF). Washington, USA: US EPA.
- EPA. (2000). *Framework for Responsible Environmental Decision-Making (FRED): Using Life Cycle Assessment to Evaluate Preferability of Products* EPA.
- Faucheux, S. (2007). *Economie de l'environnement: de la théorie des externalités aux droits de propriété : les fondements de l'économie de l'environnement* (Edition DVD éd.). France: In Encyclopaedia Universalis 2007.
- FEBELCEM. (2019). *La route en béton : Une solution économique et de qualité !* Repéré à https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/autres-publications/fr/Route_en_beton_-_resume.pdf
- Federal Highway Administration. (1995). "Highway Statistics 1994", Report No. FHWA-PL-95-042, FHWA, Washington, D. C., October 1995.
- Feng, L., Shi-lin, W., Jian, X., Xiao-pei, S., Ting-gang, L., & Wei, Z. (N.D.). INVESTIGATION AND ANALYSIS ON THE TWO-YEAR ENERGY CONSUMPTION ON ASPHALT PAVEMENT IN LU'AN CITY IN CHINA.
- FHWA, F. H. A. (1995). *Highway Statistics 1994* (n° Rep. No. FHWA-PL-95-042). Washington, USA: World Bank.
- Fontaine, L., & Anger, R. (2009). Bâtir en terre. *Belin*, 224p, 9,14.
- Gaudry, M. (2000). Government transport policy accountability under the Canadian Transportation Act of 1996 and the Kyoto protocol of 1997: Déposition Projet-ITEM à L'Examen de la Loi sur les transports au Canada, le.
- Ghibaudo, M. (2018). *Optimisation du choix des investissements sur un réseau routier existant* (Maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal).
- Gibboney, W. B. (1995). *Flexible and Rigid Pavement Costs on the Ohio Interstate Highway System, Final Report, Flexible Pavements of Ohio*. Columbus, Ohio, USA.

- Gilchrist, A., & Allouche, E. N. (2005). Quantification of social costs associated with construction projects: state-of-the-art review. *Tunnelling and underground space technology*, 20(1), 89-104.
- Greg, M., Mike, R., & Tyrone, T. (2005). *Guide des applications de HDM-4* (Vol. 2). Paris, France: AIPCR.
- Haas, R. (2001). Reinventing the (pavement management) wheel. Dans *5th Annual Conference on Managing Pavements*.
- Haas, R., Hudson R., & Zaniewski, J. (1994). Modern Pavement Management. *Krieger Publishing Company. Malabar, FL, United States*.
- Haas, R., & Hudson, W. R. (1978). Pavement Management Systems. *McGraw Hill, New York*.
- Haas, R. C. G., & Hutchinson, B. G. (1970). A Management System for Highway Pavements. *Proc., Australian Road Res. Board*.
- Haseeb, J. (2017). Types of Pavements - Flexible Pavement / Rigid Pavement. Repéré le 02/03/2018 à <https://www.aboutcivil.org/types-of-pavements.html>
- Hook, W. (2006). Appraising the social costs and benefits of road projects. Repéré à URL: <http://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/Social-Benefits.pdf>
- Horvath, A. (2004). Construction materials and the environment. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 29, 181-204.
- Horvath, A., & Hendrickson, C. (1998). Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced Concrete Pavements. *Transportation Research Record*.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. New Jersey, USA: PEARSON Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, USA.
- Hudson, W. R., Finn, F. N., McCullough, B. F., Nair, K., & Vallerger, B. A. (1968). Systems Approach to Pavement Design, Systems Formulation, Performance Definition and Materials Characterization. *Materials Research and Development Inc., March*, (Final Report, NCHRP, Proj. 110).
- Hutchinson, B. G., & Haas, R. C. G. (1968). A Systems Analysis of the Highway Pavement Design Process. (HRB Res. Record 239.).

- ISOHDM. (2005). Highway development & management (HDM-4 Version 2)-Progiciel pour l'évaluation des choix d'investissements routiers (Version HDM-4 V2.10). Paris, France: AIPCR-Word Bank.
- Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, & G, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology *Internation Journal of Life Cycle*, (Assessment 2003), 8:324-330.
- Joubert, P. (2016). *HDM-4 Preliminary runs in Côte d'Ivoire-Workshop held on Tuesday 12 December 2016*. Abidjan, Côte d'Ivoire.
- Kamal, M. A., Hafeez, I., & Khan, K. M. (N.D.). Feasibility of perpetual pavements in developing countries. Repéré à <https://www.ohio.edu/icpp/upload/Feasibility%20of%20Perpetual%20Pavements-Kamal.pdf>
- Ken, G., Foster, V., Archondo-Callao, R., Briceno-Garmendia, C., Nogales, A., & Sethi, K. (2008). *Les routes en Afrique Subsaharienne*. Washington DC, USA: Banque Mondiale et SSATP. Repéré à <http://www.eu-africa-infrastructure-tf.net/attachments/library/aicd-background-paper-14-roads-sect-summary-fr.pdf>
- Kerali, G. R. H., Odoki, J. B., & Stannard, E. E. (2005). *Vue d'ensemble du HDM-4* (Vol. Volume 1). Paris-France: AIPCR.
- Khalifa, K. (2000). *Méthode d'évaluation des impacts, Techniques de l'Ingénieur, traité Environnement* (Vol. G5 615, 2000).
- Kicak, K., & Ménard, J.-F. (2009). *Analyse du cycle de vie comparative des chaussées en béton de ciment et en béton bitumineux à des fins d'intégration de paramètres énergétiques et environnementaux au choix des types de chaussées. Rapport final réalisé pour le Ministère des transports du Québec par le CIRAIG Québec*: CIRAIG.
- Kostas, B. (2011). Sustainability and externalities: Is the internalization of externalities a sufficient condition for sustainability? *Ecol. Econ.* 2011, 70(10): 1703-1706.
- Krey, B., Widmer, P., & Zweifel, P. (2011). Efficient Provision of Electricity for the United States and Switzerland. Working paper. University of Western Australia, Business School, Economics; 2011.
- Kunhee, C., Hyun Woo, L., Zhuting, M., Lavy, S., & Boong Yeol, R. (2016). Environmental, economic, and social implications of highway concrete rehabilitation alternatives. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(2), 04015079 (04015011 pp.). doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001063. Repéré à [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001063](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001063)
- L.C.P.C. (1998). *Catalogue des dégradations de surfaces des chaussées*. Paris, France.

- Langlois, R. (1982). *Recyclage des revêtements bitumineux*. Québec, Québec: Ministère des transports du Québec. Repéré à <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1154236.pdf>
- Laratte, B., Nguyen, T. L. T., Guillaume, B., & Hua, A. (2016). Etude bibliographique sur les méthodes d'évaluation économique des externalités : Mise en application sur des modèles énergétiques.
- Le conseil des ministres de l'UEMOA. (2005). *Règlement N°14/2005/CM/UEMOA*. Bamako, Mali: Union Économique et Monétaire Ouest-Africaine (UEMOA).
- Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein, P., . . . Arneeth, A. (2015). Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*, 7(1), 47-85.
- Levoyageducalao. (2018). Le voyage du calao. *Newsletter du calao*. Repéré à <https://levoyageducalao.com/cote-divoire/preparer-un-voyage-en-cote-divoire/>
- Liu, R., Smartz, B. W., & Descheneaux, B. (2015). LCCA and environmental LCA for highway pavement selection in Colorado. *International Journal of Sustainable Engineering*, 8(2), 102-110.
- Maillard, P.-L. (2010). *Les chaussées de béton au Québec*. Québec: Association canadienne du ciment (ACI).
- Maillard, P.-L. (2017). Les chaussées de béton au Québec. Dans. Association Canadienne de ciment (ACI). Repéré à <https://www.yumpu.com/fr/document/read/52083091/les-chaussees-de-beton-au-quebec>
- Margorínová, M., & Trojanová, M. (2019). Social costs of the road project in the operation phase
Martina Margorínová*, Mária Trojanová. *ELSEVIER, (Transportation Research Procedia* 40 (2019) 1103–1110).
- McKim, R. A. (1997). Bidding strategies for conventional and trenchless technologies considering social costs. *Canadian journal of civil engineering*, 24(5), 819-827.
- Nations Unies. (2015). *Convention-Cadre sur les changements climatiques*. Nations Unies. Repéré à <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109.pdf>

- NDLI. (1995). *Modelling Road User Effects in HDM-4 - Final Report Asian Development Bank Project RETA 5549. International Study of Highway Development and Management Tools*. Vancouver, Canada: N.D. Lea International, Vancouver.
- Okae Adow, M. A.-A., Allotey, S. E., & Sasraku-Neequaye, B. K. (2015). Comparative Cost Analysis between Asphalt Pavement and Concrete Pavement in Road Construction: A Case study using Concrete grade 35, . *Civil and Environmental Research,, Vol.7, No.10, 2015*.
- Pienaar, W. (2018). Principles of social cost-benefit analysis of public road projects followed in South Africa. *South African Journal of Industrial Engineering*, 29(4), 129-140.
- Pradham Mantri Gram Sarak Yojana (PMGSY). (2006). *Cement concrete roads Vs Bituminous roads_A cost analysis*,. India.
- Ronfard, I. (2020). L'Afrique est divisée en 5 parties. Repéré à <https://slideplayer.fr/slide/2579740/>
- RTAC. (1977). Roads and Transportation Association of Canada. *Pavement Management Guide, Ottawa, Canada*.
- Rust, F., Mahoney, J., & Sorenson, J. B. (1998). An international view of pavement engineering.
- SAMBE, A. M., Philippe DOYON, P., & BEAULIEU, J. (2016). *Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport routier*. Québec, QC: ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports Repéré à www.transports.gouv.qc.ca.
- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011a). Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9-10), 810-818.
- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011b). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9-10), 801-809.
- Scrivener, F. H., Moore, W. M., McFarland, W. F., & Carey, G. R. T. T. I., Res. Report, 32-11. (1968). *A Systems approach to the Flexible Pavement Design Problem*. Texas Transportation Institute.
- Sétra-Lcpc. (1998). *Catalogue des structures types de chaussées neuves*,. Paris, France: Ministère de l'Équipement, des Transports et du logement,.

- SETRA. (2001). *SETRA, METL, CERTU, ADEME, Annexe technique à la note méthodologique sur les études d'environnement dans les projets routiers "volet air", juin 2001.*
- Smith, T. (2006). Helping Build A Sustainable Future By Constructing Roadways with Portland Cement Concrete Pavement. Dans *Annual Conference & Exhibition of the Transportation Association of Canada, 2006. Congrès et exposition annuels de l'Association des transport du Canada, 2006. Transportation Association of Canada (TAC).*
- Smith, T., & Jolly, R. (2005). *Concrete pavement a sustainable choice* présentée à Proceedings - 8th International Conference on Concrete Pavements: Innovations for Concrete Pavement: Technology Transfer for the Next Generation, v 2, p 585-606, 2005, Proceedings - 8th International Conference on Concrete Pavements: Innovations for Concrete Pavement: Technology Transfer for the Next Generation; .
- Steinberger, J. K., Krausmann, F., & Eisenmenger, N. (2010). Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis. *Ecological Economics*, 69(5), 1148-1158.
- Surahyo, M., & El-Diraby, T. E. (2009). Schema for interoperable representation of environmental and social costs in highway construction. *Journal of construction engineering and management*, 135(4), 254-266.
- Techno-Bitume. (2011). *Analyses environnementales du cycle de vie des chaussées routières à fort trafic (n° 04).* Québec, Canada: Bitume Québec.
- Thébeau, D. (2004, 19 au 22 septembre 2004). *La dalle en béton armé continu à Transports Québec*, présentée à Congrès annuel 2004 de l'Association des transports du Canada, Québec (Québec). Repéré à <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2004/docs/s3/thebeau-f.pdf>
- Tsunokawa, K., & Ul-Islam, R. (2003). Optimal pavement design and maintenance strategy for developing countries: An analysis using HDM-4. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(4), 193-208.
- Ukar, S., Akakin, T., & Engin, Y. (2007). Cost Comparison of Rigid and Flexible Pavements: Applications in Turkey. Dans *ERMCO, Seville Congress.*
- UNEP PRI FI. (2011). Universal Ownership – Why environmental externalities matter to institutional investors. PRI Association and UNEP Finance Initiative; 2011.

- Uzarowski, L., & Moore, G. (2008). *Sustainable Pavements – Making the Case for Longer Design Lives for Flexible Pavements* présentée à The 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada
Toronto, Ontario, Canada.
- Wang, S., Ling, J.-m., & Qian, J.-s. (2012). Social cost analysis of urban underground expressway in construction. Dans *CICTP 2012: Multimodal Transportation Systems—Convenient, Safe, Cost-Effective, Efficient* (pp. 3043-3052).
- WikiTP. (2016). Les différents types de chaussées. Repéré le 29/11/2020 à <https://www.wikitp.fr/structure-de-chausseeacutes/les-differents-types-de-chaussees>
- Wohl, E., & Tversky, A. (1967). *Decision making*. Baltimore, USA: Penguin book.
- Zapata, P., & Gambatese, J. A. (2005). Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. *Journal of infrastructure systems*, 11(1), 9-20.