

InnovAct | Étude routière 2020

ÉDITION PUBLIQUE / PUBLIC EDITION

Rapport signé par Hassan Baaj, Pejoochan Tavassoti, Goretty Dias et Giancarlo Lorena. Version française datée septembre 2020 en couverture, 55 pages originales. Souvent désigné comme « étude Waterloo »; l'auteur institutionnel indiqué est InnovAct Consulting.

Report by Hassan Baaj, Pejoochan Tavassoti, Goretty Dias and Giancarlo Lorena. French version dated September 2020 on the cover, 55 original pages. Often called the "Waterloo study"; the report identifies InnovAct Consulting as its institutional author.

Protection du savoir-faire / Know-how protection

Les pages PDF originales 12 et 38, relatives à la formulation et à l'inventaire des composants, sont remplacées par une notice. Le passage de fabrication de la page 10 et les renvois directs au recueil non expurgé sont retirés. Le reste du rapport demeure historique et n'est pas réécrit.

Original PDF pages 12 and 38, covering mix details and constituent inventory, are replaced with a notice. The manufacturing passage on page 10 and direct references to the unredacted compilation are removed. The remaining report is historical and has not been rewritten.

Limites de lecture / Reading limitations

Modélisation de structures routières, et non certification du produit. Les données et hypothèses proviennent principalement de BLC et de bases publiées. Les mentions de brevet décrivent le contexte historique et ne confirment pas un statut juridique actuel.

Pavement-system modelling, not product certification. Data and assumptions come mainly from BLC and published databases. Patent references describe the historical context and do not confirm current legal status.

Avant de réutiliser les chiffres

Le tableau 11 donne, pour le scénario moyen, 861 541 \$ de coût global actualisé pour la référence et 794 691 \$ pour le BLHP, soit environ 7,8 % de moins. Le coût initial BLHP est environ 13,3 % plus élevé. Les frais d'excavation sont exclus. Il s'agit d'hypothèses de 2020, non d'un devis actuel.

Des écarts internes demandent clarification : largeurs de 3,65 / 3,75 m selon les analyses; correspondance de certains paramètres de modèle avec les essais; cohérence des tableaux et commentaires environnementaux. Les pourcentages de réduction carbone ne sont pas repris comme promesse produit.

L'ACV couvre les matériaux, la construction et l'entretien sur 30 ans; circulation des usagers et fin de vie exclues. Les coûts indirects d'un chantier actuel demandent une analyse complémentaire.

Before reusing the figures

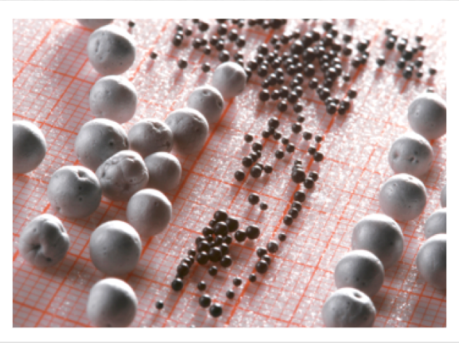
Table 11 gives discounted life-cycle costs of C\$861,541 for the reference and C\$794,691 for lightweight concrete in the medium scenario, approximately 7.8% lower. Lightweight concrete has an approximately 13.3% higher initial cost. Excavation is excluded. These are 2020 assumptions, not a current quote.

Internal discrepancies require clarification: 3.65 / 3.75 m widths across analyses; correspondence of some modelling inputs with tests; consistency of environmental tables and commentary. Carbon-reduction percentages are not adopted as product promises.

The LCA covers materials, construction and maintenance over 30 years, excluding road-user traffic and end of life. Indirect costs for a current project require additional assessment.

Cette note est ajoutée par BLC pour la diffusion publique. Elle ne modifie pas les conclusions au nom des auteurs. / This note is added by BLC for public distribution. It does not amend conclusions on behalf of the authors.

Matériau innovant de béton léger haute-performance (BLHP) pour l'isolation des chaussées flexibles



Hassan Baaj, Ph.D. P.Eng. *Expert en ingénierie des chaussées et matériaux de construction*
Pejoohan Tavassoti, Ph.D. *Spécialiste en ingénierie des chaussées et matériaux de construction*
Goretty Dias, Ph.D. *Experte en développement durable et analyse de cycle de vie (ACV)*
Giancarlo Lorena, Ph.D. *Spécialiste en développement durable et analyse de cycle de vie (ACV)*



Septembre 2020

Cette page a été intentionnellement laissée vide.

Avis de non-responsabilité

Les opinions et conclusions exprimées explicitement ou implicitement dans ce document sont limitées à l'étendue des données disponibles avec des hypothèses spécifiques à l'étude de cas considéré pour l'exécution de cette étude. Les hypothèses sur les propriétés des matériaux et les autres données utilisées dans les analyses ont été principalement fournies par Béton Léger du Canada et/ou obtenues dans les bases des données publiées et disponibles au meilleur des connaissances des auteurs de ce rapport. InnovAct Consulting ne cautionne ni les produits ni les fabricants. Les marques commerciales ou les noms des fabricants apparaissent ici uniquement parce qu'ils sont considérés comme essentiels à l'objet du rapport. Ce rapport ne constitue pas une norme, une spécification ou une réglementation, et InnovAct Consulting n'assume aucune responsabilité quant à son contenu ou à son utilisation.

Cette page a été intentionnellement laissée vide.

Table des matières

1	Résumé.....	7
2	Introduction.....	8
3	ACTIVA 9 – Béton Léger haute-performance (BLHP)	10
4	Scénarios de conception de chaussées pour la protection contre le gel.....	14
4.1	Structure de Revêtement Conventionnel (F1: Section de Reference).....	14
4.2	Section alternative avec panneaux de XPS.....	15
4.3	Section Alternative avec BLHP	16
4.4	Durée de vie en fatigue des structures étudiées	18
5	Plan comparatif d’entretien et de réhabilitation (E&R)	21
6	Analyse de Cycle de Vie des Chaussées Flexibles	29
6.1	Méthodologie	30
6.2	Objectif et portée de l’ACV.....	32
6.3	Unité Fonctionnelle.....	32
6.4	Limites du Système	32
6.5	Description du Système	33
6.5.1	Matériaux.....	33
6.5.2	Construction de la route.....	34
6.5.3	Entretien et Réhabilitation.....	36
6.6	Inventaire du Cycle de Vie	36
6.7	Résultats	38
6.8	Discussion.....	44
7	Sommaire des Conclusions et Recommandations.....	45
8	Références	47
9	Annexes.....	49

Liste des Figures

Figure 1. Action du gel dans les chaussées avec des sols gélifs dans les climats froids [3]....	9
Figure 2. Billes de polystyrène enrobés utilisées pour la production de ACTIVA 9.....	11
Figure 3. Vue du lot BLHP frais (à droite) et de l'échantillon BLHP (à gauche).....	13
Figure 4. Vue des détails de conception Chaussée II de la structure de la chaussée pour la section F1.....	14
Figure 5. Section de chaussée utilisant XPS répondant aux exigences de gel et de structure.	15
Figure 6. Présentation schématique des sections de chaussées.....	18
Figure 7. Effet de l'épaisseur de la couche BLHP sur la réponse à la fatigue des sections de chaussée.....	20
Figure 8. Courbes de détérioration de la chaussée en fonction du temps pour différentes sections.....	24
Figure 9. Coût de construction initiale pour différentes sections de chaussée (le nombre d'ECAS indique la durée de vie en fatigue à l'aide du modèle de l'Asphalt Institute).	28
Figure 10. Résultats CCV pour différentes sections de chaussées (le nombre d'ECAS indique la durée de vie en fatigue à l'aide du modèle de l'Asphalt Institute).....	28
Figure 11. Les Phases de l'analyse de cycle de vie (ACV)	31
Figure 12. Limite du système simplifié de cette étude	32
Figure 13. Comparaison du potentiel d'acidification du cycle de vie entre des chaussées souples.....	39
Figure 14. Comparaison du cycle de vie Potentiel d'eutrophisation entre chaussées souples	40
Figure 15. Comparaison du potentiel d'épuisement du cycle de vie des combustibles fossiles entre les chaussées souples.	40
Figure 16. Comparaison du potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone du cycle de vie entre les chaussées souples.	41
Figure 17. Comparaison des effets respiratoires du cycle de vie entre des chaussées souples.....	41

Figure 18. Comparaison du potentiel oxydant photochimique du cycle de vie entre des chaussées souples.....	42
Figure 19. Comparaison du potentiel de réchauffement planétaire du cycle de vie entre des chaussées souples.....	42
Figure 20. Contribution du procédé aux impacts environnementaux de la chaussée flexibleF2.....	43
Figure 21. Contribution du procédé aux impacts environnementaux de la chaussée flexible F3.....	43
Figure 22. Impacts environnementaux normalisés pour 1 voie-km de différentes sections de chaussée	44

Liste des tableaux

Tableau 1. Exigences techniques pour les matériaux en béton léger.....	12
Tableau 2. Résumé des scénarios de conception de chaussées pour l'application de protection contre le gel.....	17
Tableau 3. Sommaire des valeurs d'isolation thermique normalisées de différents matériaux en référence à XPS.....	18
Tableau 4. Sommaire de l'analyse de fatigue pour différentes sections de chaussée.....	19
Tableau 5. Sommaire des configurations de couches pour différentes sections de chaussée.....	20
Tableau 6. Sommaire des stratégies potentielles de E&R pour les différentes sections de chaussée.....	22
Tableau 7. Sommaire des coûts unitaires des activités de E&R dans le tableau 6.....	24
Tableau 8. Sommaire des valeurs assumées pour le calcul des coûts de construction.....	26
Tableau 9. Densités de matériaux et coûts unitaires pour le calcul des coûts de construction.....	26
Tableau 10. Sommaire des coûts initiaux (CI) et des coûts du cycle de vie (CCV) par km-voie, à l'exclusion des frais d'excavation.....	27
Tableau 11. Sommaire des composants de l'ACCV par km-voie, à l'exclusion des frais d'excavation (coût moyen des matériaux).....	27
Tableau 12. Matériaux utilisés dans les conceptions de chaussées flexibles et densités correspondantes	33
Tableau 13 - Paramètres utilisés pour modéliser le cycle de vie de la chaussée	34
Tableau 14 - Conceptions de chaussées flexibles et dimensions correspondantes utilisées par section	35
Tableau 15. Paramètres et inventaire du cycle de vie utilisés dans la modélisation du béton léger (BLHP).....	37
Tableau 16. Résultats de l'analyse d'impact pour les différentes conceptions de chaussées flexibles.....	39

1 Résumé

Un matériau innovant de béton léger à haute-performance (BLHP), produit commercialement sous le nom ACTIVA 9 par Béton Léger du Canada, a été étudié pour les applications de chaussées isolées et comme alternative aux matériaux de polystyrène extrudé (XPS) conventionnellement utilisés. À cette fin, des études de cas sur la conception de chaussée pour un projet au Québec ont été examinées et quatre sections différentes, à savoir un conventionnel (F1), avec BLHP (F2 & F3) et avec XPS (F4), ont été conçues pour 30 millions d'ÉCAS (équivalent de charge axiale simple) sur une période d'analyse de 30 ans. La section de référence et celle isolée avec XPS ont été conçues à l'aide du logiciel Chaussée II. Les résultats du logiciel KENPAVE et du modèle de fatigue de l'Asphalt Institute indiquent que F1 et F3 produisent les mêmes performances de fatigue, tandis que F4 présente une durée de vie en fatigue 40% plus courte. Bien que les sections XPS et conventionnelle aient été conçues pour le même trafic avec Chaussée II, la durée de vie serait par conséquent différente en raison de la différence dans la réponse en fatigue qui n'est pas directement prise en compte dans Chaussée II. Par conséquent, en comparant les différentes sections, il faut tenir compte du fait que la section F4 seraient sous-dimensionnées par rapport aux autres sections, et donc ne considérer que le coût initial de construction ne serait pas juste pour comparer les scénarios.

L'analyse du coût du cycle de vie (CCV) a été jugée nécessaire afin d'adéquatement comparer les différentes solutions. CCV prend en compte différents éléments, notamment: les coûts de construction initiaux (CI), les coûts d'entretien et de réhabilitation (E&R) et la valeur résiduelle à la fin de la durée de vie. Différentes stratégies de E&R ont été envisagées pour différentes sections, qui ont été ajustées en fonction de leur durée de vie attendue dominée par les fissures de fatigue. La section du BLHP a entraîné les coûts liés au E&R les plus bas au cours de sa durée de vie. Une analyse de sensibilité a été menée pour refléter l'effet des variations des prix des BLHP et XPS sur la CCV des sections de chaussée. Les résultats indiquent que le BLHP peut offrir un coût de cycle de vie plus avantageux par rapport aux autres options.

L'analyse de cycle de vie a également démontré que l'incorporation de béton léger ACTIVA 9 dans la structure de la chaussée améliorerait la performance environnementale globale dans presque toutes les catégories d'impact par rapport au revêtement conventionnel. De plus, la chaussée flexible avec BLHP a montré des avantages environnementaux en nécessitant moins d'activités d'entretien et de réhabilitation, ce qui réduirait indirectement les coûts d'utilisation et l'exposition des travailleurs aux risques pour la santé, ce qui aurait des effets positifs sur la société. Par conséquent, on peut conclure qu'ACTIVA 9 a montré plusieurs avantages potentiels par rapport à la durabilité, qui est mesurée par les implications environnementales, économiques et sociétales. Le béton léger à haute performance (ACTIVA 9) représente donc une alternative innovante et durable comme matériau de revêtement pour les applications de chaussées isolées au Canada.

2 Introduction

Les applications de chaussées isolées sont pratiquées depuis plusieurs décennies pour concevoir et construire des chaussées contre les effets néfastes de l'action du gel. Geofoam, qui est un terme générique pour une famille de produits géosynthétiques en mousse à cellules fermées, a été utilisé de manière conventionnelle à cette fin. Les matériaux en mousse géofusée les plus couramment utilisés sont le polystyrène extrudé (XPS) et le polystyrène expansé (EPS). Depuis leur introduction au début des années 1960 comme isolant routier et matériau de remblai léger, des informations de plusieurs applications réussies et de quelques échecs peuvent être trouvés dans la littérature [1].

La pénétration du gel et le soulèvement de la structure de la chaussée sont connus parmi les causes importantes de détérioration de la chaussée, en particulier dans les pays d'Amérique du Nord. Dans les climats froids et en présence des sols susceptibles au gel (sols gélifs), la conséquence de l'action du gel sur les chaussées est généralement non uniforme, conduisant à des distorsions et des fissures à la surface, ce qui altèrent à la fois la capacité structurelle et fonctionnelle de la chaussée [2]. La Figure 1 est une illustration schématique de l'action du soulèvement dû au gel dans les chaussées souples [3].

Au Québec et dans plusieurs autres provinces canadiennes, le XPS est couramment utilisé comme matériau normalisé pour les applications de chaussées isolées. Cependant, différents matériaux isolants ont été explorés par différents chercheurs au cours des deux dernières décennies et peuvent offrir certains avantages supplémentaires par rapport aux options conventionnellement utilisées [4]. L'examen de la littérature existante sur la protection contre le gel des chaussées dans les climats froids révèle que, même si les produits en polystyrène ont été utilisés avec succès depuis les années 1960, il existe certains inconvénients tels que: 1) leur composition chimique qui peut entraîner une perte partielle ou totale des propriétés d'isolation [4] ; 2) des incendies pendant la construction [1,5, 6, 7]; 3) des ruptures prématurées de la chaussée dues au déplacement des blocs d'EPS [8, 9, 10]; 4) modifications des propriétés thermiques dues à l'absorption d'eau [1]; et 5) givrage différentiel de la surface de la chaussée [1,11,12]. Certains de ces défis pourraient être résolues en utilisant des matériaux isolants alternatifs innovants. Des granulats légers, en mousse de verre recyclé, et des matériaux en béton léger peuvent être cités comme exemples.

Dans ce rapport, la faisabilité technique et environnementale de l'utilisation d'un matériau de béton léger innovant a été étudiée. Le nom commercial de ce matériau est ACTIVA 9 et il est produit et distribué au Canada par la société Béton Léger du Canada inc. Le matériau

mécaniques et de durabilité en font un excellent produit à valeur ajoutée (VAP) pour plusieurs applications, y compris l'utilisation dans des structures de chaussées flexibles. Le béton léger haute-performance (BLHP), ACTIVA 9, a été testé et approuvé par le MTQ (ministère des Transports du Québec) en mars 2015.

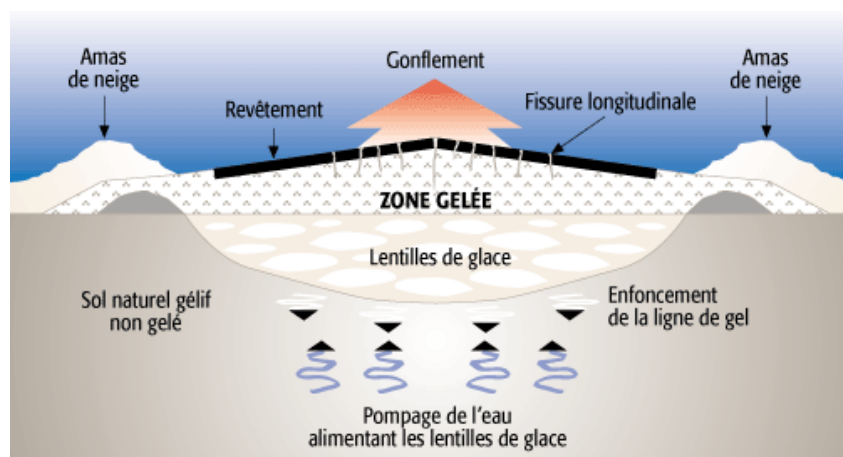


Figure 1. Action du gel dans les chaussées avec des sols gélifs dans les climats froids [3].

Dans la première phase de cette étude, la conception de plusieurs sections de chaussée à l'aide des logiciels Chaussée II et de KENPAVE a été menée. Le logiciel Chaussée II, qui est l'outil de conception technique standard pour les chaussées souples au Québec, a été utilisé pour concevoir la section de chaussée de référence ainsi que la section alternative avec XPS. Le matériau BLHP n'a pas pu être défini à Chaussée et, par conséquent, des sections de chaussée équivalentes ont été conçues à l'aide du logiciel KENPAVE. L'analyse des coûts du cycle de vie (CCV) a été réalisée pour comparer les différents scénarios en ce qui concerne leur performance globale et leur coût sur leur durée de vie. La deuxième phase de l'étude comprenait une analyse environnementale complète du cycle de vie (ACV) pour évaluer les impacts environnementaux de l'utilisation de sections de chaussées conventionnelles, isolées XPS et isolantes BLHP.

3 ACTIVA 9 – Béton Léger haute-performance (BLHP)

Pour atténuer les dommages potentiels causés par le gel dans les structures de chaussée, l'état de la pratique consiste soit à utiliser une structure de chaussée plus épaisse, soit à concevoir un système de chaussée incorporant des matériaux isolants. Le premier nécessite que la structure de chaussée soit plus épaisse que la profondeur de pénétration du gel afin de protéger le sol d'infrastructure. Une section de chaussée plus épaisse peut poser des problèmes en ce qui concerne le maintien des alignements verticaux et horizontaux requis par rapport à la conception géométrique de la chaussée et peut nécessiter des quantités considérables d'excavation en conséquence. Par conséquent, des matériaux tels que le polystyrène extrudé (XPS), le polystyrène expansé (EPS) et les composites à faible conductance thermique peuvent être utilisés pour éliminer le besoin d'une structure de chaussée excessivement épaisse tout en offrant la protection contre le gel requise du sol infrastructure.

Le béton léger proposé étudié dans ce rapport, ACTIVA 9, offre une très bonne capacité structurelle tout en ayant une densité plus faible par rapport aux matériaux de revêtement conventionnels ainsi que de bonnes propriétés isolantes. Ces trois caractéristiques font de ce matériau un candidat idéal pour les applications de protection contre le gel. De plus, le BLHP est un béton autoplaçant et autocompactant qui peut être coulé en continu à la largeur et à la longueur désirées et ne nécessite aucun compactage. Le BLHP est destiné à être utilisé comme une couche de béton ordinaire sans avoir besoin de coffrage ou de sciage pour la mise en œuvre des joints, contrairement aux dalles de chaussée rigides conventionnelles. L'utilisation d'une couche granulaire au-dessus de la couche de BLHP aidera à dissiper l'énergie de propagation de fissures empêchant les fissures dans le béton de se propager et de remonter vers et les couches d'enrobé bitumineux et donc vers la surface de la chaussée.

EDITION PUBLIQUE / PUBLIC EDITION

Page originale 12 retiree : renseignements de formulation et de fabrication.

Original page 12 withheld: mix-design and manufacturing information.

La pagination originale est preservee. / Original pagination retained.

Le Tableau 1 présente un résumé des exigences pour le béton léger au Québec¹. Le matériau isolant haute-performance étudié dans cette étude répond non seulement aux exigences techniques du Tableau 1, mais offrent également des avantages uniques par rapport aux autres matériaux de béton homologues. La Figure 3 montre une vue de l'échantillon BLHP préparé à des fins de caractérisation du transfert de chaleur ainsi que du lot de béton frais utilisé pour sa préparation. La capacité d'isolation des matériaux BLHP est d'environ 1/6 du XPS correspondant. En d'autres termes, pour obtenir la même isolation thermique de 1 cm de XPS, 6 cm de BLHP doivent être utilisés. Cependant, le BLHP aura une contribution structurelle à la structure de la chaussée tandis que la contribution structurelle du XPS est considérée comme étant négligeable, ce qui peut être constaté en comparant les modules élastiques et la résistance de ces deux matériaux.

Tableau 1. Exigences techniques pour les matériaux en béton léger (d'après la note technique de M. St-Laurent du 5 février, 2015, MTQ²).

		Minimum	Maximum	Normes
Béton frais	Affaissement (mm)			
	Ave épandage manuel	50	180	CSA A23.2 – 5C
	Ave épandage au finisseur	20	60	
	Température (°C)	10	30	CSA A23.2 – 17C
	Temps de prise initiale (heures)	--	6	ASTM C 403
	Densité volumique humide (kg/m ³)	300	600	CSA A23.2 – 6C
Béton durci	Résistance à la compression (MPa)			
	At 24 heures	0,25	--	CAN/CSA A23.2 – 9C
	At 7 jours	0,45	--	
	At 28 jours	0,6	4,0	
	Absorption volumique	--	15%	ASTM D2842
	Conductivité thermique (W/m°C)	--	0,17	ASTM C 518



Figure 3. Vue du lot BLHP frais (à droite) et de l'échantillon BLHP (à gauche).

ACTIVA 9 a été évalué et testé par deux laboratoires indépendants (Exova et Qualitas) en 2014 en plus de l'évaluation détaillée effectuée par les experts du MTQ. L'évaluation expérimentale a montré que les attentes en termes de résistance à la compression ont été dépassées et cette résistance atteignaient 3,9 MPa à 28 jours. Par conséquent, le module élastique et la résistance à la traction étaient cohérents avec la résistance à la compression élevée (2530 MPa et 1,0 MPa respectivement). Le matériau a également été testé pour la résistance à l'écaillage, l'absorption d'eau, la résistance aux cycles gel-dégel, la résistance et la conductivité thermiques. Les experts du MTQ ont conclu que ce matériau présentait d'excellentes propriétés mécaniques et de durabilité et ont recommandé la réalisation d'un prototype à grande échelle pour évaluer le potentiel de fissuration par retrait du matériau. Les experts du Service des Chaussées du MTQ ont conclu qu'ACTIVA 9 répond aux exigences pour être acceptés pour une utilisation dans la construction des routes et ont recommandé avec confiance son utilisation dans des conditions réelles. Le rapport du MTQ détaille la procédure de conception thermique de la chaussée en utilisant le BLHP pour remplacer les matériaux d'isolation conventionnels tels que XPS et EPS. Le matériau a ensuite été ajouté au registre des produits éprouvés au guichet unique de qualification des produits et des fournisseurs en mars 2015. Le dossier complet contenant les spécifications des informations techniques et les différentes notes rédigées par les experts du MTQ se trouve sur le lien en bas de page³.

4 Scénarios de conception de chaussées pour la protection contre le gel

Trois structures de chaussée différentes utilisant: 1) des matériaux de chaussée conventionnels, 2) des panneaux de XPS comme isolant et 3) du béton léger haute-performance BLHP du type ACTIVA 9, sont conçus pour les mêmes conditions climatiques et le même trafic. Les deux premières sections sont conçues à l'aide du logiciel Chaussée II en utilisant les propriétés par défaut des matériaux de revêtement au Québec. Étant donné que le nouveau béton léger n'existe pas dans la bibliothèque de matériaux de Chaussée II, une section de chaussée équivalente a été conçue en utilisant une approche multicouches élastiques et a été comparée aux deux autres sections.

4.1 Structure de Revêtement Conventionnel (F1: Section de Reference)

Une étude de cas d'un revêtement routier pour une route nationale située à la ville de Québec avec un trafic quotidien annuel moyen (DJMA) supérieur à 20 000 a été considérée dans ce projet. Le logiciel Chaussée II a été utilisé pour concevoir la structure de la chaussée de référence en fonction de 30 millions d'ÉCAS (équivalent de charge axiale simple de 8160 kg) sur 30 ans de la durée de vie de la chaussée. Les critères GEL et GEL 1994 ont été pris en compte lors de la conception des sections. Un sol limoneux avec une faible plasticité et un module résilient de 20 MP a été considéré comme un sol susceptible à l'effet du gel (sol gélif).

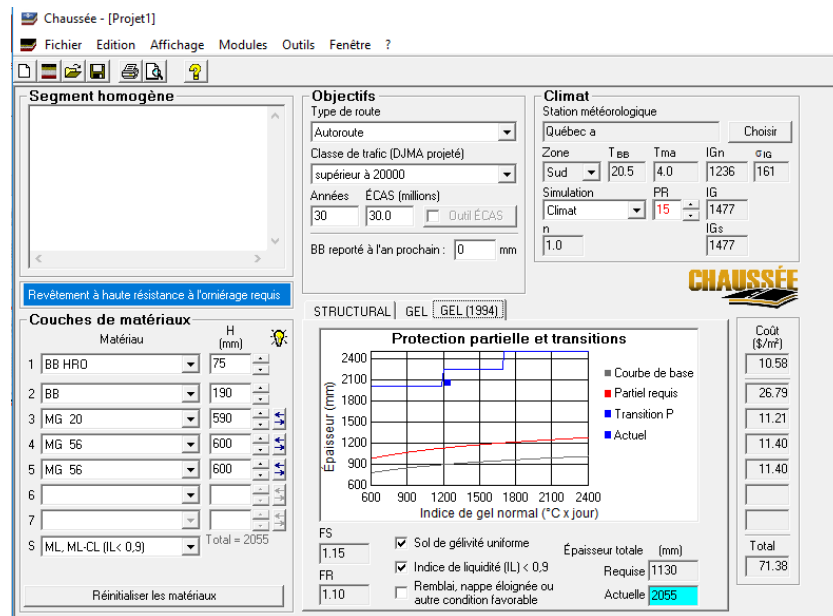


Figure 4. Vue des détails de conception Chaussée II de la structure de la chaussée pour la section F1.

Si l'action du gel n'était pas préoccupante, une structure de chaussée de 915 mm aurait suffi du point de vue structural. Cependant, afin de tenir compte de l'action du gel et de satisfaire aux exigences des modèles GEL et GEL 1994, une section révisée d'une épaisseur totale de 2 055 mm a été conçue comme la structure optimisée. Ce scénario est appelé F1 ci-après dans ce rapport et consiste en deux couches d'enrobé bitumineux, de fondation et de sous-fondation granulaires (Figure 5).

4.2 Section alternative avec panneaux de XPS

Le polystyrène extrudé a une forte capacité isolante et a été utilisé historiquement comme couche isolante pour la protection contre le gel des chaussées. Par conséquent, une structure de chaussée équivalente a été conçue en utilisant une couche de 50 mm de panneau de XPS. Le module résilient de XPS peut varier de 6,5 à 25,0 MPa. Dans cette étude, le matériau XPS sélectionné a été supposé avoir un module élastique de 20,0 MPa. Le même sol d'infrastructure, les conditions climatiques, le niveau de trafic et les propriétés des matériaux ont été pris en compte tout au long du processus de conception de cette section.

The screenshot shows the 'Chaussée - [autoroute_EPS_Gel]' software interface. It includes a menu bar (Fichier, Edition, Affichage, Modules, Outils, Fenêtre, ?) and a toolbar. The main window is divided into several sections:

- Segment homogène:** A large empty box for drawing the road cross-section.
- Objectifs:**
 - Type de route: Autoroute
 - Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000
 - Années: 30, ECAS (millions): 30.0, Outil ECAS: []
 - BB reporté à l'an prochain: 0 mm
- Climat:**
 - Station météorologique: Québec a
 - Zone: Sud, T_{ee}: 20.5, T_{ma}: 4.0, I_{gn}: 1236, c_{ia}: 161
 - Simulation: PR, IG
 - Climat: 15, IG: 1477
 - n: 1.0, IGs: 1477
- Couche de matériaux:**
 - Matériau: BB HRD, H (mm): 75
 - Matériau: BB, H (mm): 190
 - Matériau: MG 20, H (mm): 450
 - Matériau: Polystyrène extrudé, H (mm): 50
 - Matériau: MG 112 (excluant les sable), H (mm): 350
 - Matériau: [], H (mm): []
 - Matériau: [], H (mm): []
 - Matériau: ML, ML-CL (IL < 0.9), H (mm): []
 - Total: 1115
- STRUCTURAL | GEL | GEL (1994):**

F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	W18 (en millions)	Coût (\$/m²)
1.00	3592	0.47	1.0	1.39	42.775	10.58
1.00	3101	0.44	1.0	4.71	30.238	26.79
1.00	111	0.07	0.8	5.72	68.773	8.55
						10.00
1.00	87	0.09	0.8	6.73	30.873	3.33
1.00	36					

→ Équivalences d'été (FAS = 0.7)
Mi = 51 MPa
CBR = 7.3
- Total:** 59.24

Figure 5. Section de chaussée utilisant XPS répondant aux exigences de gel et de structure.

Selon les recommandations du MTQ, une couche de fondation granulaire de 450 mm (MG 20) a été utilisée au-dessus de la couche XPS afin de minimiser le potentiel de formation de givre différentiel à la surface de la chaussée. Dans ce cas, la structure optimale de la chaussée aurait une épaisseur totale de 1 115 mm. Par rapport à la section de référence (F1), l'épaisseur des couches d'enrobé bitumineux reste la même et une couche de MG 112 a été incorporée sous les panneaux de XPS (voir Figure 5). Ce scénario est appelé F4 ci-après dans ce rapport.

4.3 Section Alternative avec BLHP

Tel que discuté précédemment, le matériau béton léger proposé n'existe ni dans la bibliothèque de matériaux, ni ne peut être défini dans le logiciel Chaussée II. Par conséquent, des sections de chaussée équivalentes ont été conçues en utilisant une approche multicouches élastiques via le logiciel KENPAVE. Le but était de trouver des sections alternatives lors de l'utilisation de BLHP qui produisent des réponses critiques similaires (c'est-à-dire, déformation, contrainte et déflexion de la surface) par rapport à la structure de référence conventionnelle précédemment conçue en utilisant Chaussée II. Les capacités d'isolation des différentes couches ont également été calculées pour garantir que les nouvelles sections avec BLHP pourraient fournir une protection équivalente contre la pénétration du gel. Deux scénarios ont été envisagés: l'un donnant des réponses critiques similaires à ceux obtenues pour le revêtement conventionnel de référence tout en minimisant l'épaisseur totale de la chaussée; et l'autre dans le but d'obtenir des performances améliorées en fatigue avec une augmentation minimale des coûts en augmentant légèrement l'épaisseur de la couche de fondation granulaire.

Comme données de conception pour le matériau BLHP, des valeurs de 2 530 MPa, 0,3 et 539,9 kg/m³ ont été utilisées pour le module élastique, le coefficient de Poisson et la densité, respectivement. Au total, 19 sections BLHP ont été conçues et évaluées à l'aide de KENPAVE, parmi lesquelles deux sections ont été sélectionnées et présentées dans ce rapport. Le Tableau 2 présente un résumé des sections sélectionnées en fonction des résultats de la conception.

Tableau 2. Résumé des scénarios de conception de chaussées pour l'application de protection contre le gel.

F1 Section Conventionnelle		F2 BLHP - Section 1		F3 BLHP - Section 2		F4 Section XPS	
Matériau	Épaisseur (mm)	Matériau	Épaisseur (mm)	Matériau	Épaisseur (mm)	Matériau	Épaisseur (mm)
BB HRO	75	BB HRO	75	BB HRO	75	BB HRO	75
BB	190	BB	190	BB	190	BB	190
MG 20	590	MG 20	450	MG 20	200	MG 20	450
MG 56	600	BLHP	300	BLHP	300	XPS	50
MG 112	600	MG 112	350	MG 112	300	MG 112	350
Sol Infra.: ML IL<0.9							
Épaisseur Totale							
2055 mm		1365 mm		1065 mm		1115 mm	

Les valeurs d'isolation thermique normalisées pour chaque type de matériau par rapport au XPS sont données en Tableau 3. Étant donné que la même épaisseur d'enrobé bitumineux a été utilisée dans tous les scénarios, ce matériau n'a pas été pris en compte pour les calculs de capacité d'isolation thermique. Les valeurs de ce tableau représentent la capacité d'isolation thermique de 1 cm d'épaisseur de chaque matériau (normalisées par rapport au matériau XPS). Ces valeurs doivent ensuite être multipliées par l'épaisseur de couche du matériau correspondant dans chaque scénario de conception pour garantir que la section peut fournir une protection contre le gel comparable. La conductivité thermique du BLHP est environ six fois supérieure à celle du XPS. En d'autres termes, pour atteindre le même niveau d'isolation, 300 mm BLHP doivent être utilisés pour remplacer 50 mm de XPS. Cependant, il convient de noter que le matériau BLHP fournit non seulement une isolation thermique, mais contribue également à la capacité structurelle des sections de chaussée. La Figure 6 montre les schémas des sections de chaussée.

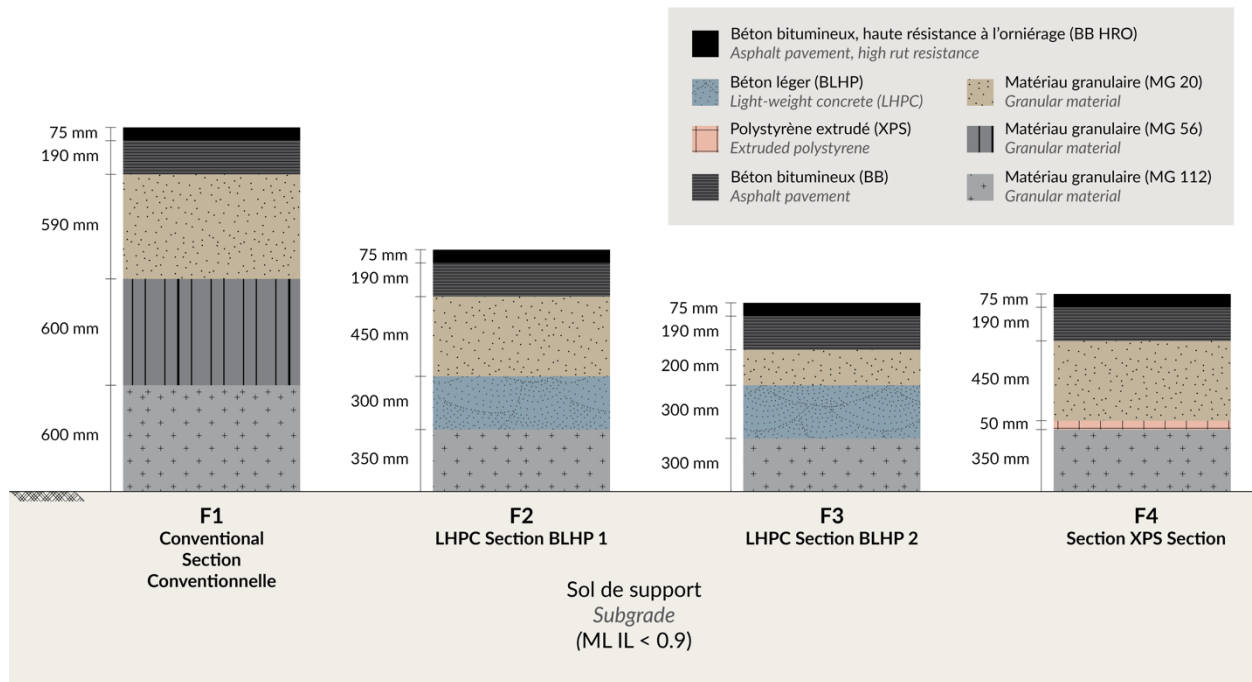


Figure 6. Présentation schématique des sections de chaussées.

Tableau 3. Sommaire des valeurs d'isolation thermique normalisées de différents matériaux en référence à XPS.

Matériau	MG 20	MG 56	XPS	MG 112	BLHP
Valeur R normalisée (par rapport au XPS)	0,044	0,043	1,000	0,011	0,167

4.4 Durée de vie en fatigue des structures étudiées

La méthode de conception mise en œuvre dans Chaussée II est principalement basée sur le guide AASHTO 1993 pour la conception des structures de chaussées. Afin de comparer les performances de fatigue des différentes sections de chaussée, toutes les sections précédemment conçues ont été modélisées dans KENPAVE et leurs réponses mécaniques correspondantes ont été utilisées dans le modèle de l'Asphalt Institute (AI). Le modèle AI pour la fissuration par fatigue est présenté par l'équation 1:

$$N_f = 0,0796 (\varepsilon_t)^{-3,291} |E^*|^{-0,854} \quad (1)$$

Où, N_f est le nombre de répétitions d'une charge standard jusqu'à la rupture par fatigue, ε_t est la contrainte de traction critique au bas de la couche d'enrobé bitumineux, et $|E^*|$ est la grandeur du module complexe de la couche d'enrobé bitumineux. Le Tableau 4 résume l'analyse de la durée de vie en fatigue et les valeurs d'isolation thermique calculées pour les sections de chaussée sélectionnées dans cette étude. Comme le montre le Tableau 5, la section de revêtement conventionnel a une valeur thermique de 65,50 (sans dimension). Par conséquent, une section de chaussée acceptable doit avoir une valeur thermique supérieure ou égale à 65,50. Étant donné que le XPS a une valeur isolante six fois supérieure au BLHP, un XPS de 50 mm substitué par 300 mm de BLHP peut fournir la même isolation thermique tout en augmentant la durée de vie en fatigue de 65% (soit 14 millions ECAS contre 23,1 millions ECAS) selon le modèle AI. Comme le montre le Tableau 5, la section F2 est conforme à la condition de protection contre le givrage différentiel requise par le MTQ. La protection contre le givrage stipule la mise en place d'un recouvrement granulaire d'une épaisseur minimale de 450 mm au-dessus de la couche d'isolation. Cependant, il est prévu que cette exigence de recouvrement granulaire pourrait être allégée en raison des différences inhérentes entre le mécanisme d'isolation des matériaux BLHP et XPS. Dans le premier cas, l'atténuation est le mécanisme dominant de sorte que le givre peut toujours pénétrer dans une certaine mesure, tandis que dans le second, le givre est généralement bloqué, ce qui peut contribuer à la formation du givre sur la surface de la chaussée si la protection n'est pas suffisante. Des études supplémentaires seront nécessaires pour mieux comprendre cet avantage potentiel des matériaux BLHP.

Tableau 4. Sommaire de l'analyse de fatigue pour différentes sections de chaussée.

	F1 Conventionnel	F2 BLHP	F3 BLHP	F4 XPS
Épaisseur (mm)	2055	1365	1065	1115
Valeur Thermique	65,50	73,78	62,22	73,78
ε_t (microdéformation)	91	88,1	92,1	103
Durée de vie en fatigue (millions d'ECAS)	20,8	23,1	20,0	14,0

L'effet de l'épaisseur de la couche BLHP sur la durée de vie en fatigue des structures de chaussée a été étudié plus en détail. Deux scénarios généraux ont été envisagés où l'épaisseur de la couche de la sous-fondation granulaire variait de 300 mm à 600 mm. Pour chacun de ces deux scénarios, quatre épaisseurs différentes de BLHP, à savoir 0, 150, 300

et 600 mm, ont été considérées. Les cas 0 mm et 600 mm sont des scénarios hypothétiques uniquement destinés à comparer les réponses de la chaussée. La Figure 7 illustre les résultats pour les différents scénarios. En comparant les résultats pour 300 mm à ceux pour 600 mm, on peut conclure que l'effet de l'épaisseur de la couche de fondation est négligeable. On peut conclure qu'une couche de béton léger de 300 mm d'épaisseur pourrait augmenter la durée de vie en fatigue de plus de 50%.

Tableau 5. Sommaire des configurations de couches pour différentes sections de chaussée.

	F1 Conventionnel	F2 BLHP	F3 BLHP	F4 XPS
BB HRO	75	75	75	75
BB	190	190	190	190
MG 20	590	450	200	450
MG 56/BLHP/XPS	600	300	300	50
MG 112	600	350	300	350

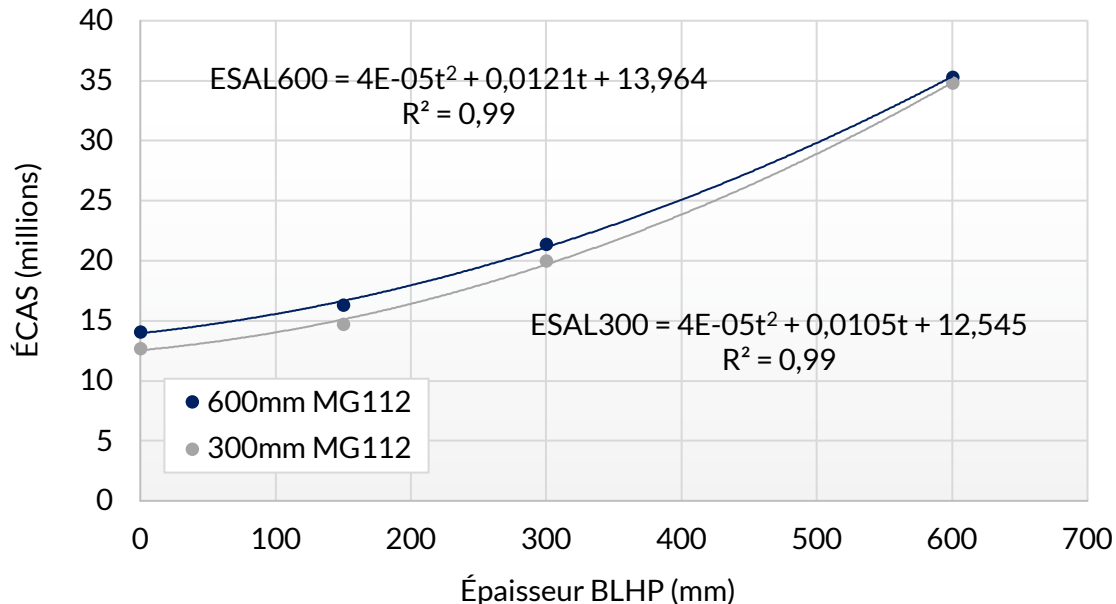


Figure 7. Effet de l'épaisseur de la couche BLHP sur la réponse à la fatigue des sections de chaussée.

5 Plan comparatif d'entretien et de réhabilitation (E&R)

Les réponses critiques de la chaussée ont été utilisées pour comparer les activités d'entretien et de réhabilitation requises et leur calendrier pour différentes sections de chaussée. Parmi les différents scénarios analysés dans cette étude, les trois sections suivantes ont été sélectionnées pour comparer les stratégies de E&R:

- F1: Section de revêtement conventionnel (scenario de référence)
- F2: Section isolée et renforcée avec 300 mm de BLHP
- F4: Section isolée avec 50 mm de XPS

Le scénario F3 a une réaction de fatigue très similaire au scénario de base et n'a donc pas été présenté dans cette section. Le Tableau 6 fournit des détails sur les différentes activités d'entretien et de réhabilitation et leurs calendriers pour les sections de chaussées flexibles discutées ci-dessus. Une valeur limite de 30 ans a été utilisée à des fins de comparaison afin que l'impact de chaque structure de chaussée puisse être évalué de manière équivalente. Le Tableau 7 résume le coût unitaire des activités de M&R utilisées dans cette étude. Il est nécessaire de calculer le coût de chaque activité et de convertir les coûts futurs en leur valeur nette actuelle équivalente (VNA). À cette fin, un taux d'actualisation de 4% a été considéré et la valeur actuelle (VA) a été calculée à l'aide de l'équation 2.

$$VA = C \times \left[\frac{1}{1+i_{actu}} \right]^n \quad (2)$$

Où, VA est la valeur présente, C'est le coût futur, i_{actu} est le taux d'actualisation, et n est le nombre de périodes en années entre le temps présent et l'année où la dépense est imputée.

Tableau 6. Sommaire des stratégies potentielles de E&R pour les différentes sections de chaussée.

Année prévue			Description de l'activité	Quantité (1 km-voie de route)
Conventionnel	XPS	BLHP		
8	5	9	Scellement de fissures	200 m
8	5	9	Réparation localisée, planage 40 mm/ rapiéçage 40 mm	5 %
13	9	15	Scellement de fissures	1000 m
13	9	15	Réparation localisée, planage 40 mm/ rapiéçage 40 mm	15 %
18	12	20	Planage et couche d'usure	50 mm
18	12	20	Réparation profonde, planage localisé et remplacement des couches d'enrobé	10 %
18	12	20	Resurfaçage avec ESG-10 (ou équivalent)	50 mm
23	15	26	Scellement de fissures	500 m
28	19	-	Scellement de fissures	1500 m
28	19	-	Réparation localisée, planage 40 mm/ rapiéçage 40 mm	10 %
-	22	-	Planage de la couche d'usure	90 mm
-	22	-	Resurfaçage avec ESG-14 (ou équivalent)	50 mm
-	22	-	Resurfaçage avec ESG-10 (ou équivalent)	40 mm
-	25	-	Scellement de fissures	1500 m
-	27	-	Réparation localisée, planage 40 mm/ rapiéçage 40 mm	10 %
-	30	-	Planage de la couche d'usure	50 mm
-	30	-	Réparation profonde, planage localisé et remplacement de toutes les couches d'enrobé	10 %
-	30	-	Resurfaçage avec ESG-10 (ou équivalent)	50 mm

Comme le montre le Tableau 6, en raison de l'amélioration des performances obtenues grâce à l'utilisation de la couche BLHP, une partie considérable des activités de maintenance et de réhabilitation sont reportées à un stade ultérieur de la durée de vie de la section de la chaussée, ce qui peut finalement conduire à des économies sur les coûts de E&R de la chaussée. La valeur actuelle a été estimée à 162 872 \$, 291 694 \$ et 54 231 \$ pour chacune des sections du revêtement conventionnel, XPS et BLHP, respectivement. Une section d'une voie d'un kilomètre a été prise en compte dans les calculs, où la largeur de voie était supposée être de 3,65 m. On peut conclure que l'option BLHP pourrait aider à réduire les coûts d'entretien et de réhabilitation sur une durée de vie donnée d'environ 30 ans.

Compte tenu du coût de construction initiale, y compris le coût des matériaux, la livraison et les coûts opérationnels des véhicules (COV), un coût total de 941 226 \$ peut être calculé pour la structure de chaussée conventionnelle. En utilisant une valeur moyenne pour les granulats, le coût de construction peut varier de 825 833 \$ à 938 333 \$ selon le prix du BLHP (250 \$/m³ et 350 \$/m³). Pour la section XPS, ce coût peut varier de 568 631 \$ à 643 631 \$ selon le prix unitaire des matériaux XPS (10 \$/m² à 30 \$/m² pour un panneau de 50 mm d'épaisseur). Le coût initial de la construction peut être ajouté à la VA des activités d'entretien et de réhabilitation comme première étape pour calculer le coût du cycle de vie de différents scénarios. Par conséquent, les VNA ont été calculées pour chacun des scénarios. On peut conclure qu'en utilisant des valeurs moyennes typiques de 300 \$/m³ pour le BLHP et de 20 \$/m² pour un panneau XPS de 50 mm d'épaisseur, le coût du cycle de vie des deux sections serait presque le même et inférieur à celui du revêtement conventionnel. En ce qui concerne la valeur résiduelle de différentes options, il est prévu que les matériaux de béton légers peuvent offrir un avantage de recyclabilité par rapport à de nombreux autres matériaux isolants. Outre la recyclabilité, la section BLHP devrait présenter un meilleur état de la chaussée par rapport aux autres scénarios à la fin de 30 ans. La Figure 8 montre une vue des courbes de détérioration en termes d'indice de condition de la chaussée en fonction du nombre d'années de service et pour les stratégies de E&R expliquées précédemment.

Afin de calculer la valeur terminale des sections de chaussée à la fin de leur durée de vie, les directives de la Federal Highway Administration (FHWA) pour l'analyse du coût du cycle de vie des chaussées et les meilleures pratiques du National Center for Asphalt Technology (NCAT) pour déterminer la valeur de récupération des chaussées ont été suivies dans cette étude [14]. La valeur terminale se compose de la durée de vie résiduelle (RSL : Residual Service Life) de la couche de surface, de la valeur résiduelle de la chaussée et de la RSL des couches sous-jacentes.

Tableau 7. Sommaire des coûts unitaires des activités de E&R dans le tableau 6.

Description de la technique d'entretien ou de réhabilitation	Coût unitaire
Scellement de fissures (m)	\$5
Réparation localisée, planage et rapiéçage (m ²)	\$35
Réparation profonde (m ²)	\$45
Planage (t)	\$15
Resurfaçage avec un ESG-10 (t)	\$120
Resurfaçage avec un ESG-14 (t)	\$96

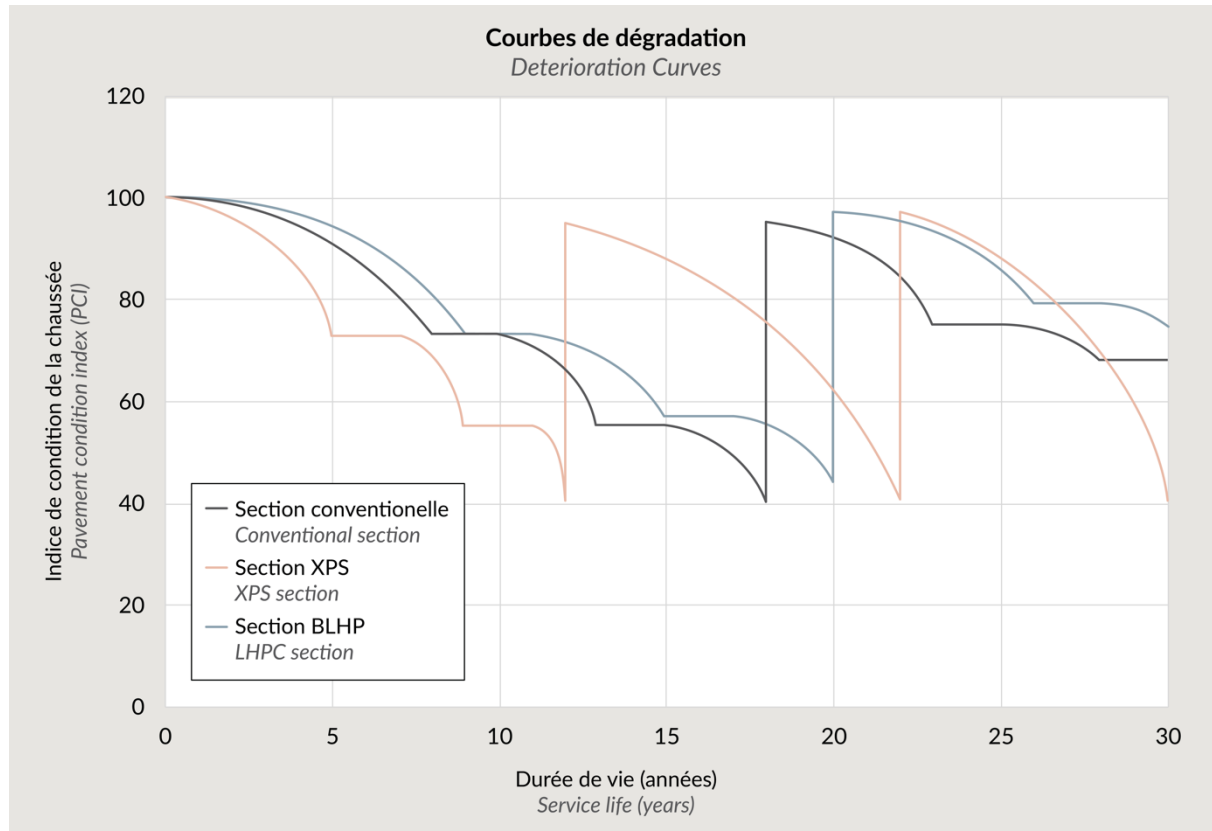


Figure 8. Courbes de détérioration de la chaussée en fonction du temps pour différentes sections.

Le coût de construction a été calculé par kilomètre de voie pour chacune des sections de chaussée conçues dans le cadre de ce projet. Les Tableau 8 and Tableau 9 présentent un

résumé des paramètres considérés tels que les densités et les coûts unitaires des matériaux, les distances de livraison et les coûts opérationnels des véhicules (COV). En utilisant les épaisseurs résultant de chaque scénario de conception et les coûts unitaires calculés dans cette section, le coût total de construction a été calculé pour chaque scénario de chaussée. Le Tableau 10 présente les résultats pour trois scénarios différents des matériaux isolants (c.-à-d. Les prix des matériaux les plus bas, moyens et les plus élevés). Il convient de noter que ces coûts n'incluent pas les coûts associés aux excavations requises. Le coût de la section conventionnelle (également appelée référence), cependant, ne sera pas affecté et reste respectivement de 861540,79 \$ et 778354,50 \$ pour l'analyse coût du cycle de vie (CCV) et le coût de construction initial (CCI), respectivement. Les Figure 9 et Figure 10 illustrent les résultats des CCI et CCV, respectivement, pour différentes sections dans différentes conditions de prix des matériaux. La différence inhérente entre les réponses en fatigue de chaque scénario doit être considérée pour comparer correctement les sections de chaussée. Comme discuté précédemment, bien que les sections F1 et F4 soient conçus en utilisant Chaussée II, leur réponse mécanistique diffère en ce qui concerne la durée de vie en fatigue. En d'autres termes, alors que toutes ces sections serviront pendant 30 ans, leurs périodes de performance seraient différentes selon leur réponse mécanique aux charges appliquées. Par conséquent, la durée de vie en fatigue attendue pour les sections conventionnelles, BLHP et XPS doit être considérée comme différente et respectivement 20 millions, 23 millions et 14 millions d'ECAS. Le Tableau 11 présente les détails des différents composants utilisés pour le LCCA pour différentes sections de chaussée. Ces composants comprennent le coût initial de construction, les coûts d'entretien et de réhabilitation, et la valeur terminale qui se compose de la valeur restante de la surface et des couches sous-jacentes ainsi que la valeur de récupération de chaque chaussée à la fin de sa durée de vie. Le coût moyen des matériaux est utilisé pour les calculs présentés dans ce tableau.

Tableau 8. Sommaire des valeurs assumées pour le calcul des coûts de construction.

Aire de la Chaussée = 3,75m (W) x 1,000m (L)		3 750	m ²
Capacité de chargement des camions (Poids)		20	tonnes
Dimension de la capacité de charge du camion		5m x 2.5m x 3.5m	LxWxH
Distance de livraison		120	km
Temps de livraison		2	heures
Coût unitaire de livraison		150	\$/hr
# de camions de livraison		5	camions
# de voyages journaliers par camion		3	Voyage/camion/jour
Coût opérationnel des véhicules (COV)	Voiture/jour	\$0.21	8000
	Pickup/SUV/Van par jour	\$0.24	2000
	Camion par jour	\$0.66	100

Tableau 9. Densités de matériaux et coûts unitaires pour le calcul des coûts de construction.

Code	Matériau	Coût unitaire (\$/t)	Coût unitaire (\$/m ³)	Densité (kg/m ³)
BB HRO	Enrobé bitumineux à haute résistance à l'orniérage	118	334	2830
BB	Enrobé bitumineux semi-grenu pour couche de liaison/base	97	228	2350
MG 20	Matériau granulaire pour couche de fondation supérieure	26	47	1800
MG 56	Matériau granulaire pour couche de fondation inférieure	21	33	1550
MG 112	Matériau granulaire pour couche de sous-fondation	12	19	1602
BLHP	Béton léger haute-performance	-	300-350	540
XPS	Polystyrène extrudé	-	10-30	48

Tableau 10. Sommaire des coûts initiaux (CI) et des coûts du cycle de vie (CCV) par km-voie, à l'exclusion des frais d'excavation.

Type du coût	Coût Initial de la Construction (CCI)		Coût de Cycle de Vie (CCV)	
Type d'isolation	BLHP	XPS	BLHP	XPS
Bas	\$825,832.50	\$568,630.50	\$738,440.59	\$817,476.08
Moyen	\$882,082.50	\$606,130.50	\$794,690.59	\$854,976.08
Haut	\$938,332.50	\$643,630.50	\$850,940.59	\$892,476.08

Tableau 11. Sommaire des composants de la CCV par km-voie, à l'exclusion des frais d'excavation (coût moyen des matériaux).

	Conventionnel	BLHP	XPS
Construction	\$778 354	\$882 083	\$606 131
E&R (VNA)	\$162 872	\$54 232	\$291 694
Valeur de Récupération	\$79 685	\$141 623	\$42 848
Total VNA	\$861 541	\$794 691	\$854 976

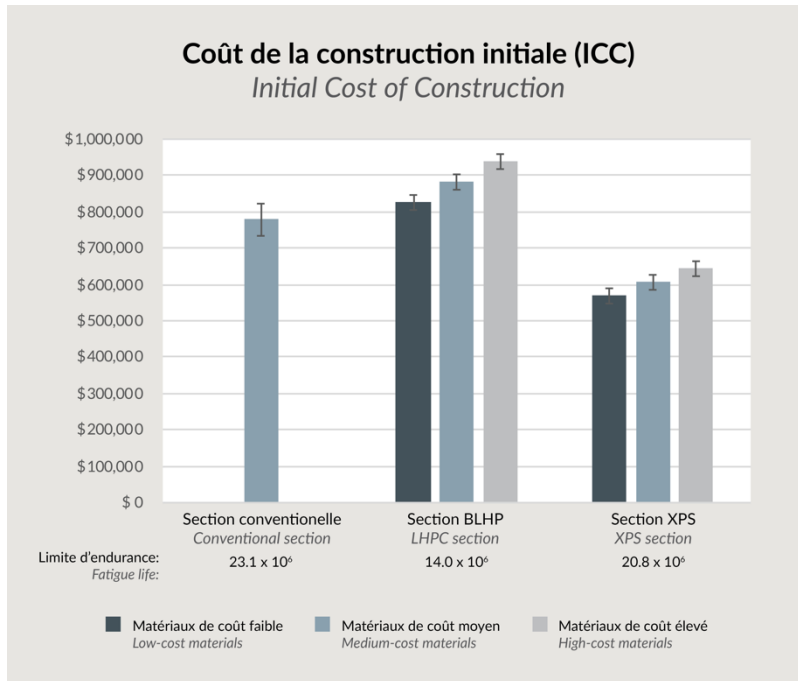


Figure 9. Coût de construction initiale pour différentes sections de chaussée (le nombre d'ECAS indique la durée de vie en fatigue à l'aide du modèle de l'Asphalt Institute).

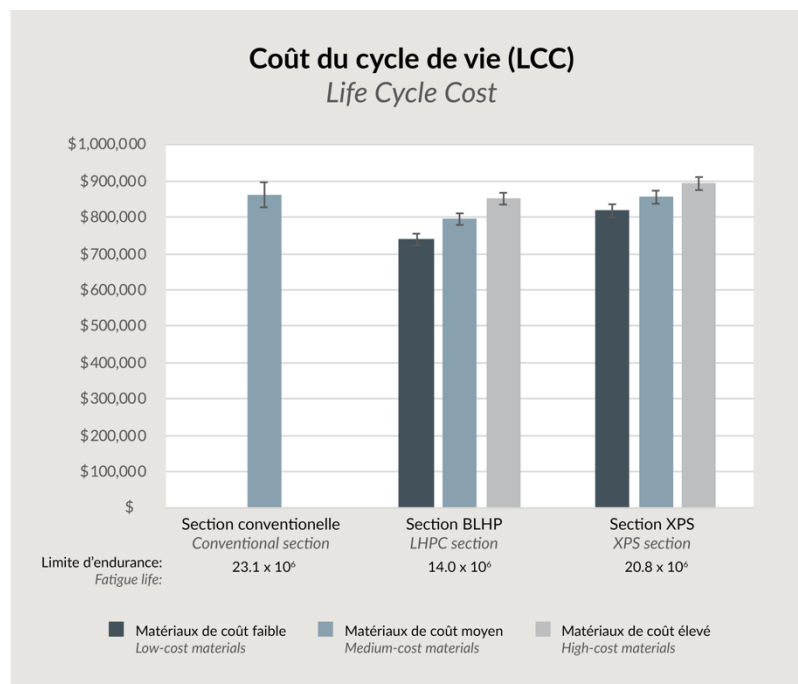


Figure 10. Résultats CCV pour différentes sections de chaussées (le nombre d'ECAS indique la durée de vie en fatigue à l'aide du modèle de l'Asphalt Institute).

6 Analyse de Cycle de Vie des Chaussées Flexibles

Cette section de l'étude présente des estimations des impacts environnementaux dans sept catégories: potentiel de réchauffement planétaire (PRP), potentiel d'acidification (ADP), potentiel d'eutrophisation (EUT), appauvrissement des combustibles fossiles (FFD), appauvrissement de la couche d'ozone (ODP), effets respiratoires (RESP) et oxydation photochimique (SMOG). L'étude tient compte de la production de matériaux, de la construction et de l'entretien des chaussées et de la réhabilitation des chaussées flexibles en asphalte. Le rapport compare les configurations de chaussées flexibles en utilisant un matériau en béton léger breveté (BLHP) et le compare à une chaussée flexible équivalente qui utilise du polystyrène extrudé (XPS) ainsi que des chaussées en asphalte conventionnelles comme référence.

L'objectif est de comparer les impacts environnementaux de différentes conceptions de chaussées flexibles. L'étude était basée sur une longueur de chaussée d'un kilomètre avec une largeur de 3,65 mètres comme unité fonctionnelle pour toutes les configurations de chaussée. Cette étude assume que la durée de vie de la chaussée est de 30 ans et n'inclut pas la fin de vie des chaussées dans l'analyse. Les activités communes à tous les modèles ont été exclues et l'utilisation de la route est supposée égale pour tous les cas. L'étude reflète les effets de la production et du transport des matériaux et des composants. Des estimations régionales spécifiques ont été utilisées pour les émissions associées à la production et au transport de chacun des matériaux identifiés comme potentiellement importants lors de la conception de la chaussée. Les estimations incluent les émissions en amont nécessaires pour extraire, traiter ou fabriquer et transporter les matériaux jusqu'à leur point d'utilisation. Dans le cas de la production d'électricité, l'étude tient également compte de l'efficacité de la production régionale par type de combustible et des pertes des lignes de transmission pour estimer l'énergie nette associée à la livraison d'une unité d'électricité.

Ces conceptions devraient fonctionner sur des périodes de temps prolongées dans un ensemble de conditions de circulation, géologiques, environnementales et ou climatiques [15]. Ainsi, des conceptions contenant des mélanges spécialisés et/ou des configurations de chaussées ont été développées pour répondre à des exigences particulières. Une utilisation inappropriée des matériaux peut entraîner non seulement des coûts inutiles mais également une augmentation de la charge environnementale [16]. Par conséquent, il est important d'examiner non seulement le côté technique et économique de toute construction majeure, mais également les implications environnementales, en particulier lors de l'introduction d'un nouveau matériau dans la conception de la chaussée. Du point de

vue du développement durable, il est extrêmement important d'évaluer les impacts environnementaux de toute construction majeure du point de vue du cycle de vie, c'est-à-dire d'examiner les impacts de l'extraction, de la production et de la fin de vie de tout produit ou système de produit.

Un outil de durabilité environnementale qui peut être utilisé est l'analyse du cycle de vie (ACV) qui examine les impacts environnementaux du cycle de vie « du berceau au tombeau ». Les charges environnementales (émissions dans l'air, le sol et l'eau) de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie d'un produit ou d'un système de produits sont prises en compte en fonction des impacts environnementaux potentiels. L'ACV, et en particulier sa composante la plus développée; l'analyse de l'inventaire du cycle de vie (ICV), est un outil qui fournit des analyses quantitatives et scientifiques des impacts environnementaux des produits et des systèmes [17]. En fournissant une analyse impartiale de systèmes industriels entiers, l'ACV a montré que la réalité derrière les croyances largement répandues concernant les questions environnementales est souvent plus complexe que prévu. Cependant, pour que l'ACV soit une approche efficace et acceptée, des directives standard ont été élaborées et ont évolué au fil du temps. Les normes les plus récentes ont été élaborées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO).

Dans cette étude, nous avons examiné les implications environnementales de l'utilisation d'une nouvelle conception de chaussée. L'objectif principal de cette étude est de comparer les performances environnementales d'une chaussée flexible utilisant un matériau en béton léger haute-performance par rapport à une chaussée conventionnelle. À l'aide de l'ACV, ce rapport a été élaboré grâce à des informations obtenues à partir d'une recherche intensive de la littérature scientifique, des publications du gouvernement sur les pratiques et les spécifications des routes canadiennes et, plus important encore, à travers une consultation d'experts.

6.1 Méthodologie

Dans cette étude, la méthodologie d'évaluation du cycle de vie est utilisée pour comparer la performance environnementale des conceptions de chaussées flexibles. Une solide analyse du cycle de vie respecterait les normes internationales sur l'ACV, en particulier ISO 14040: 2006 et ISO 14044: 2006 [17-19]. Ces deux normes sous-tendent toutes les bonnes études sur l'ACV. Selon les normes ISO, il y a quatre étapes principales d'une ACV qui sont représentées dans la Figure 11 ci-dessous:

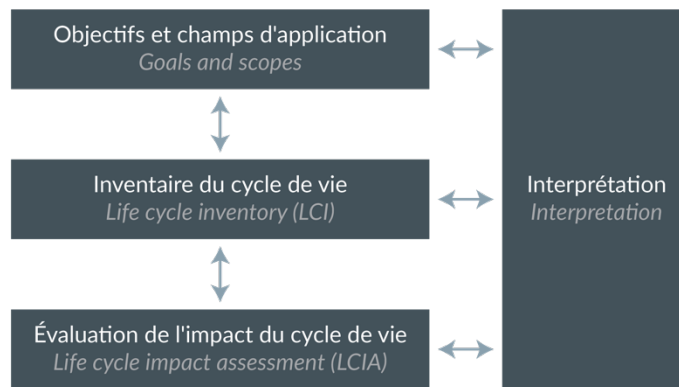


Figure 11. Les Phases de l'analyse de cycle de vie (ACV)

1. **Définition de l'objectif et du champ d'application:** Définir clairement les objectifs et le champ d'étude qui seront utilisés pour sélectionner une méthode de calcul robuste.
2. **Analyse de l'inventaire:** collecte de données primaires de la chaîne d'approvisionnement et compréhension de la consommation de tous les matériaux et de l'énergie et création de déchets associés au système de produits. Cela sera utilisé pour construire un modèle ACV sophistiqué.
3. **Évaluation de l'impact du cycle de vie:** Avec les données collectées et avec le modèle ACV construit, les résultats sont générés et regroupés selon les catégories d'impact ACV, y compris l'énergie, le carbone, l'eau, la toxicité, l'eutrophisation, l'acidification, l'épuisement des métaux et plus encore.
4. **Interprétation (conclusions et recommandations):** La phase d'interprétation est une étape itérative et peut se produire entre les phases. Jusqu'à la fin, les résultats peuvent être analysés en détail pour déterminer les « points chauds » d'impact et les principales catégories d'impact environnemental. Utilisé pour faire des recommandations d'amélioration.

6.2 Objectif et portée de l'ACV

Le but de cette étude est de comparer la performance environnementale d'un revêtement flexible conventionnel et une chaussée thermiquement isolée en utilisant des panneaux de XPS, par rapport à une construction de chaussée flexible hypothétique qui utilise un matériau de béton léger haute performance. Il est assumé que les chaussées sont dans des conditions de sols d'infrastructure sensibles au gel.

6.3 Unité Fonctionnelle

Pour comparer les impacts environnementaux de la chaussée flexible avec BLHP par rapport au revêtement conventionnel et flexible avec XPS, nous avons défini la construction d'une chaussée flexible à 1 km-voie d'une largeur de 3,65 mètres avec une durée de vie anticipée de 30 ans comme unité fonctionnelle.

6.4 Limites du Système

La limite du système a été modélisée à partir de la production de matériaux, de la construction de routes ou de chaussées jusqu'à l'entretien et la réhabilitation des chaussées (Figure 12). Étant donné que les routes sont généralement considérées comme perpétuelles, la fin de vie a donc été considérée comme dépassant le cadre de cette étude. De plus, étant donné que les impacts environnementaux pour la construction d'une chaussée à 1 voie avec la même fonction de chaussée étaient au centre de la comparaison, toutes les utilisations des véhicules de transport sur la route ont été supposées similaires dans tous les cas et ont également été exclues de la modélisation.



Figure 12. Limite du système simplifié de cette étude

6.5 Description du Système

6.5.1 Matériaux

Quatre cas correspondant à quatre conceptions de chaussées libellées F1, F2, F3 et F4 ont été évaluées. Le revêtement conventionnel (F1) a été utilisée comme référence. Deux chaussées flexibles avec le matériau BLHP breveté (F2 et F3) ont été modélisées. Comme mesure de comparaison supplémentaire, une chaussée flexible avec XPS (F4) a également été incluse. Ces conceptions étaient basées sur un type d'autoroute artérielle typique au Québec. Les Tableau 12 et Tableau 13 montrent les matériaux utilisés pour toutes les chaussées ainsi que les paramètres utilisés dans la modélisation des impacts du cycle de vie des matériaux respectivement. Dans tous les cas, les analyses ont été effectuées à l'aide d'informations régionales spécifiques, en ajustant les réseaux électriques, les technologies de fabrication régionales et la consommation de carburant. Une combinaison d'Ecoinvent 3.3 [20] et de la base de données de chaussées Athena [21] a été utilisée pour modéliser les matériaux de chaussées flexibles nécessaires. Le site de construction de la chaussée supposé sera situé au Québec, au Canada.

Tableau 12. Matériaux utilisés dans les conceptions de chaussées flexibles et densités correspondantes

Matériau	Définition du matériau	Matériau utilisé dans la modélisation ACV
BBHRO	Enrobé bitumineux à haute résistance à l'orniérage	ESG-10 (PG 64-34)
BB	Enrobé bitumineux semi-grenu pour couche de liaison/base	ESG-14 (PG58-34)
MG20	Matériau granulaire pour couche de fondation supérieure	QC MG20
MG56	Matériau granulaire pour couche de fondation inférieure	Granular B type II (OSSP)
MG112	Matériau granulaire pour couche de sous-fondation	QC MG112
BLHP	Béton léger haute-performance	Béton léger haute-performance (ACTIVA 9)
XPS	Polystyrène extrudé	Polystyrène extrudé

Tableau 13 - Paramètres utilisés pour modéliser le cycle de vie de la chaussée

Paramètre	Valeur	Unité
Durée de vie	30	année
Distance jusqu'au site de l'usine	50	km
Distance du site à l'entrepôt	50	km
Distance entre le dépôt d'équipement et le site	50	km
Longueur de la route	1	km
Largeur de la route	3.65	m
Type de la route	Route nationale (DJMA > 20 000)	

6.5.2 Construction de la route

Les conceptions de chaussées flexibles hypothétiquement construites dans cette étude ainsi que les matériaux et épaisseurs correspondants utilisés pour chaque section sont présentés dans le Tableau 14. On assume que l'enrobé bitumineux provient d'usines situées à moins de 50 kilomètres du site choisi pour la construction de la route. Les matières premières, les granulats gros et fins et l'asphalte sont livrés par camion à l'usine, le bitume étant généralement livré chaud à l'état liquide et utilisé lorsqu'il est encore chaud. Les agrégats sont séchés et chauffés avant d'être mélangés. Une fois les matériaux chauds mélangés, ils peuvent être stockés dans un silo isolé ou chargés directement dans des camions pour être livrés sur le site. Cette étude assume qu'ils sont chargés et livrés directement sur site. Les camions de livraison déchargent le mélange chaud dans un finisseur utilisé pour épandre le matériau sur la route. Le mélange chaud est compacté et lissé par un rouleau compacteur en acier et un rouleau compacteur pneumatique. Le nombre et la taille des rouleaux dépendent des conditions météorologiques, des quantités de matériaux et du type de mélange à chaud, mais dans cette étude, nous avons assumé l'utilisation d'un rouleau de chaque type (acier et pneumatique). Lorsqu'une couche d'accrochage est utilisée, l'émulsion est souvent livrée sur le site dans un camion équipé d'une barre de pulvérisation pour répandre le matériau. De plus, les matériaux granulaires de fondation et de sous-fondation sont produits dans des carrières et transportés à l'aide de camions. Des épandeurs spéciaux sont disponibles mais n'ont pas été considérés dans cette

étude. Tous les matériaux étaient supposés être étalés et nivelés à l'aide de bulldozers et de niveleuses, puis compactés par des rouleaux vibrants, à l'exception du béton léger qui ne nécessitait pas de compactage. Après compactage, la surface est finement nivelée par des niveleuses ou par un équipement de préparation spécialisé. Tous les processus en amont sont modélisés à l'aide de la base de données ACV d'Athena Pavement [20] et de la base de données Ecoinvent 3.3 [21].

Tableau 14 - Conceptions de chaussées flexibles et dimensions correspondantes utilisées par section

Configuration de la Chaussée	Épaisseur (mm)	Volume (m ³)	Poids (kg)
F1 Chaussée Conventiionnelle			
BB HRO	75	274	6.58E+05
BB	190	694	1.67E+06
MG20	590	2154	4.85E+06
MG56	600	2190	4.93E+06
MG112	600	2190	4.93E+06
F2 Béton Léger (BLHP Option 1)			
BBHRO	75	274	6.58E+05
BB	190	694	1.67E+06
MG20	450	1643	3.70E+06
BLHP	300	1095	6.19E+05
MG112	350	1278	2.87E+06
F3 Béton Léger (BLHP Option 2)			
BBHRO	75	274	6.58E+05
BB	190	694	1.67E+06
MG20	200	730	1.64E+06
BLHP	300	1095	6.19E+05
MG112	300	1095	2.46E+06
F4 Polystyrène Extrudé (Option XPS)			
BBHRO	75	274	6.58E+05
BB	190	694	1.67E+06
MG 20	450	1643	3.70E+06
Polystyrène Extrudé (XPS)	50	183	8.76E+03
MG112	350	1278	2.87E+06

6.5.3 Entretien et Réhabilitation

Tel que discuté à la section 4 du présent rapport, une partie de la phase du cycle de vie de la chaussée flexible est son entretien et sa réhabilitation. Le calendrier et les activités requises pour l'entretien et la réhabilitation dépendent de la structure et de la conception de la chaussée et sont donc différents pour chacun des cas F1, F2, F3 et F4. L'entretien mineur ou de routine des routes comprend des activités telles que le colmatage des fissures et les réparations de patchs. Cependant, la chaussée peut également nécessiter une réparation en profondeur ou un resurfaçage tout au long de sa durée de vie. Les valeurs utilisées pour modéliser les activités liées à chaque activité de E&R sont présentées dans le Tableau A1 de la section Annexe.

6.6 Inventaire du Cycle de Vie

Les résultats de l'ACV dépendent fortement de la qualité et de la pertinence des données dans l'inventaire du cycle de vie. Un inventaire de tous les matériaux et entrées et sorties d'énergie pour chaque phase ou processus à l'intérieur des limites du système a été utilisé pour déterminer les impacts environnementaux de chaque conception de chaussée. La base de données Athena LCI comprend des données AVC de processus unitaires conformes à la norme ISO 14040/14044 (par exemple, résultats ACV de fabrication de béton par m³ de béton) concernant les matériaux de base, les produits et composants de construction, la consommation de carburant et le transport [22]. La base de données est sensible aux régions, prenant en compte les différences de technologie de fabrication, de transport et de réseau électrique ainsi que les différences de contenu recyclé pour les produits fabriqués dans diverses régions. Les bases de données Athena sont généralement construites à partir de zéro en utilisant la moyenne réelle de l'industrie, le niveau des installations ou des modèles de processus techniques [23]. L'Institut Athena a développé des données non seulement pour les matériaux et produits de construction mais aussi pour la consommation d'énergie, le transport et les équipements de construction [24]. Les matières premières et l'énergie nécessaires à la production de matériaux et d'énergie ont été modélisées partiellement à l'aide d'Athena et le reste a été complété par des données d'Ecoinvent 3.3. Cela est particulièrement vrai pour les données sur les matériaux en béton légers qui n'ont pas pu être entièrement modélisés à Athena. Les besoins en matériaux et en énergie pour la production de matériaux pour F2 et F3 (voir Tableau 15) ainsi que la partie de la construction de la route ont été modélisés à l'aide d'OpenLCA avec Ecoinvent version 3.3 et ajoutés aux résultats obtenus avec Athena. Pour les activités d'entretien et de réhabilitation, seule Athena a été utilisée pour obtenir les impacts pour tous les revêtements souples en suivant le calendrier des activités requises décrits dans le Tableau

EDITION PUBLIQUE / PUBLIC EDITION

Page originale 38 retiree : renseignements de formulation et de fabrication.

Original page 38 withheld: mix-design and manufacturing information.

La pagination originale est preservee. / Original pagination retained.

6.7 Résultats

Les résultats de l'inventaire comprennent une longue liste de flux hautement différenciés de et vers la nature sous forme de flux d'énergie et de matières premières ainsi que d'émissions dans l'air, l'eau et le sol. Les progiciels OpenLCA et Athena Pavement LCA prennent tous deux en charge les mesures suivantes d'évaluation du cycle de vie à mi-parcours (LCIA) : Potentiel de réchauffement climatique (kg de masse d'équivalent CO₂), Potentiel d'acidification - air (kg de masse d'équivalent SO₂), Effets respiratoires (kg de masse équivalente de 2,5 PM), Potentiel d'eutrophisation - air et eau (Masse équivalente en kg N), Potentiel de smog - air (Masse équivalente en kg O₃), Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone - air (kg d'équivalent CFC 11), et Appauvrissement des combustibles fossiles (MJ basé sur l'outil US EPA TRACI⁴) et conformément à la norme ISO 21930/31. Les résultats du Tableau 16 et des Figure 14 à Figure 20 illustrent que les impacts environnementaux du revêtement conventionnel de référence (F1) l'emportent largement sur impacts des chaussées flexibles en béton léger (F2 et F3) et des chaussées flexibles en polystyrène extrudé (F4) dans presque toutes les catégories d'impact, à l'exception du potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP). Cela signifie que les chaussées flexibles contenant du BLHP ont de meilleurs impacts environnementaux que F1 dans presque toutes les catégories d'impact, sauf ODP. En comparant les deux conceptions qui utilisent du béton léger, F3 a légèrement mieux performé que F2 dans toutes les catégories d'impact. D'autre part, F4 a également montré de meilleures performances environnementales par rapport à F2 et F3. En fait, en comparant toutes les configurations de routes, F4 a montré les impacts environnementaux les plus faibles dans toutes les catégories sauf ODP où il avait l'impact le plus élevé.

Bien que F2 et F3 surpassent actuellement le système conventionnel, on peut se rendre compte qu'il y a encore des possibilités d'amélioration. L'analyse du pourcentage de contribution des impacts peut montrer un ou des processus qui contribuent à la majorité des impacts (également appelés : points chauds environnementaux) pendant le cycle de vie de la chaussée. F2 et F3 ont montré que le point chaud environnemental était le processus de production de matériaux. Ainsi, les améliorations potentielles du côté de la production des matériaux pour F2 et F3 peuvent encore conduire à des impacts environnementaux plus faibles à l'avenir. Les Figure 20 et Figure 21 montrent le pourcentage de contribution pour chaque processus pour les configurations F2 et F3. De là, on peut voir que la production de matériaux, et dans une faible mesure l'entretien et la réhabilitation des

⁴ Tool for Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts2 (TRACI)

chaussées, contribuent à la majorité des impacts environnementaux. Cela semble être le cas dans toutes les catégories d'impact pour les configurations de chaussée F2 et F3.

Tableau 16. Résultats de l'analyse d'impact pour les différentes conceptions de chaussées flexibles

Catégorie d'impact	Unité	F1 Conventionnel	F2 BLHP	F3 BLHP	F4 XPS
Potentiel de réchauffement climatique (GWP)	kg CO ₂ eq.	2,71E+07	7,31E+05	6,96E+05	4,50E+05
Acidification (ADP)	kg SO ₂ eq.	2,79E+05	5,17E+03	4,85E+03	4,26E+03
Eutrophication (EUT)	kg N eq.	1,33E+04	6,31E+02	6,11E+02	2,36E+02
Appauvrissement des combustibles fossiles (FFD)	MJ	2,05E+09	1,60E+07	1,55E+07	2,44E+07
Appauvrissement d'ozone (ODP)	kg CFC-11 eq.	4,31E-03	8,80E-03	8,78E-03	8,27E-04
Effets respiratoires (RESP)	kg PM 2,5 eq.	1,70E+04	3,14E+02	2,97E+02	2,57E+02
Oxydation photochimique (Smog)	kg O ₃ eq.	3,78E+06	8,52E+04	7,55E+04	7,64E+04

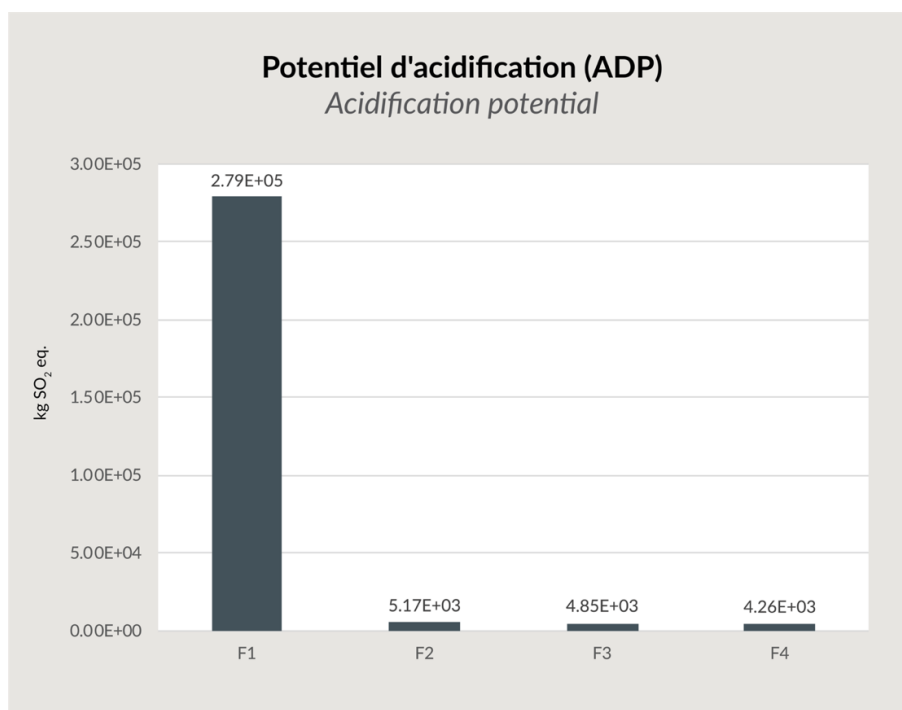


Figure 13. Comparaison du potentiel d'acidification du cycle de vie entre des chaussées souples

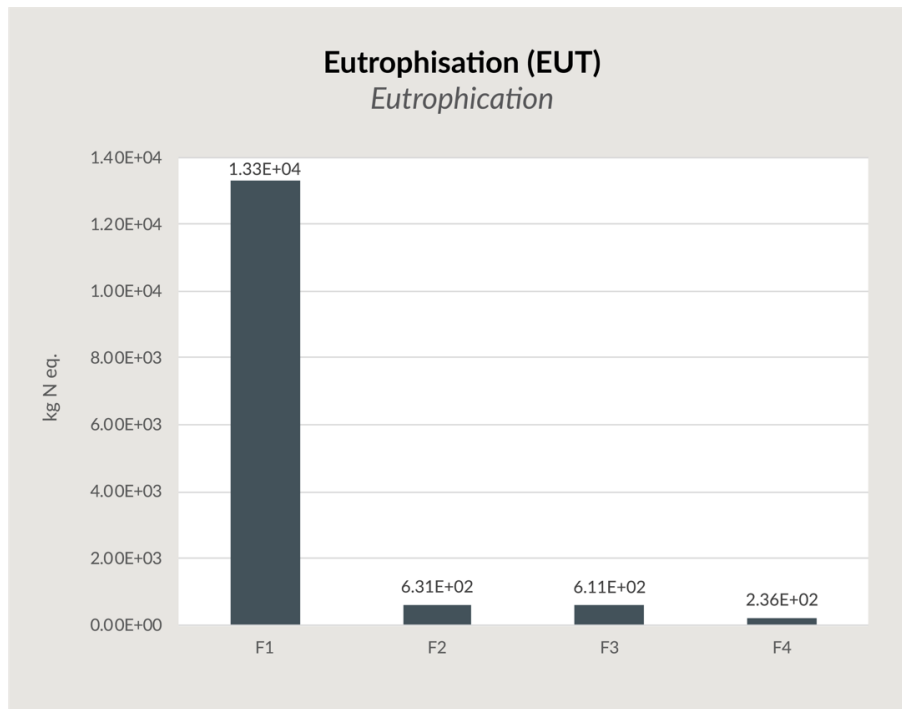


Figure 14. Comparaison du cycle de vie Potentiel d'eutrophisation entre chaussées souples

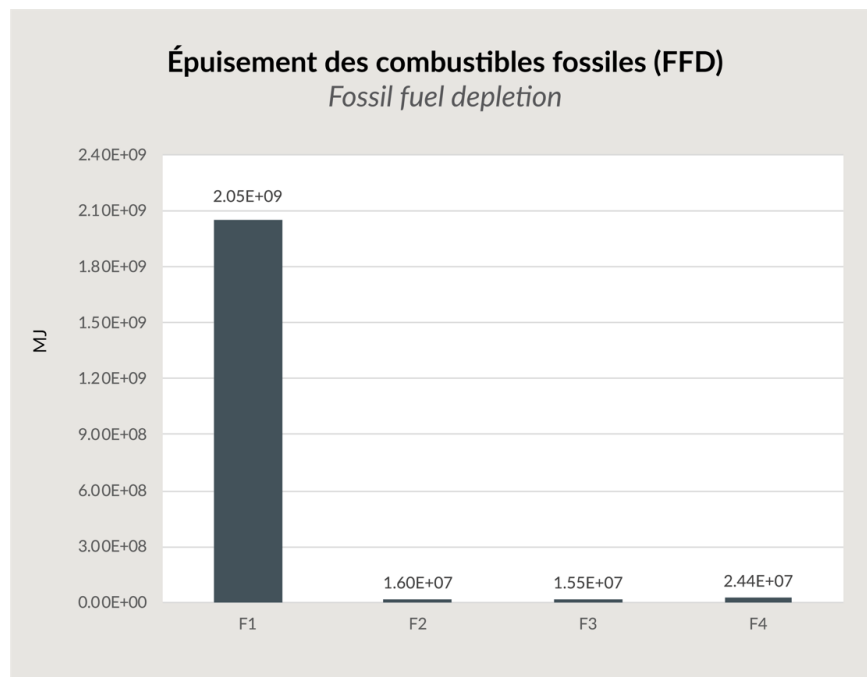


Figure 15. Comparaison du potentiel d'épuisement du cycle de vie des combustibles fossiles entre les chaussées souples.

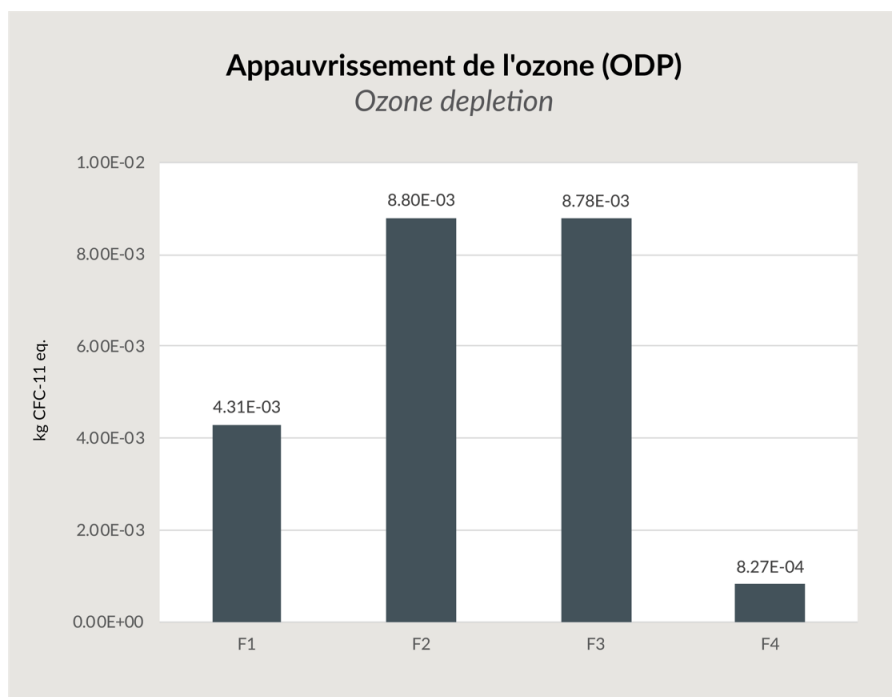


Figure 16. Comparaison du potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone du cycle de vie entre les chaussées souples.

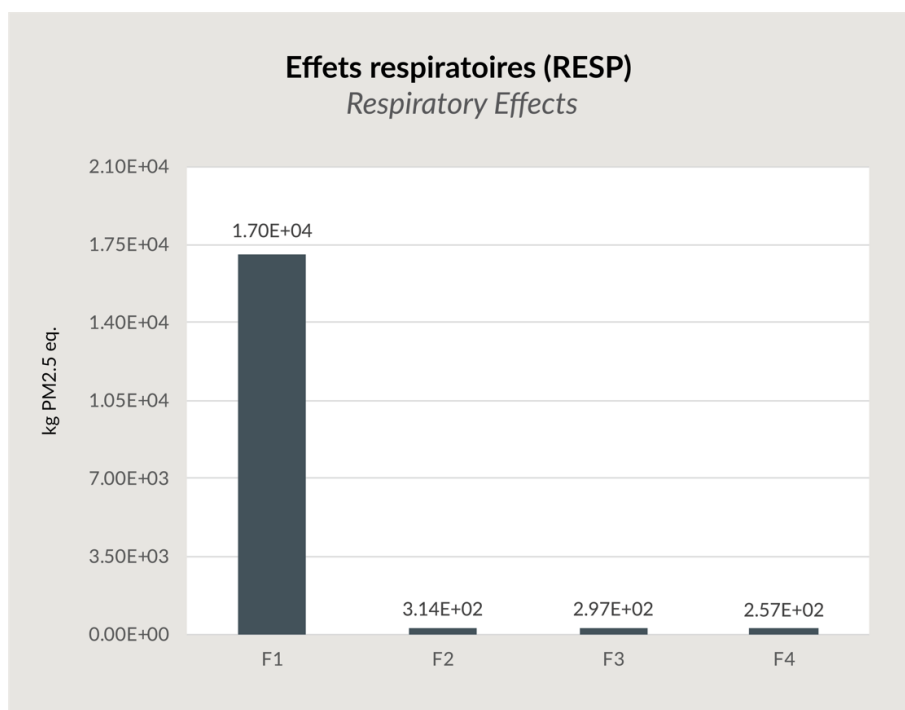


Figure 17. Comparaison des effets respiratoires du cycle de vie entre des chaussées souples.

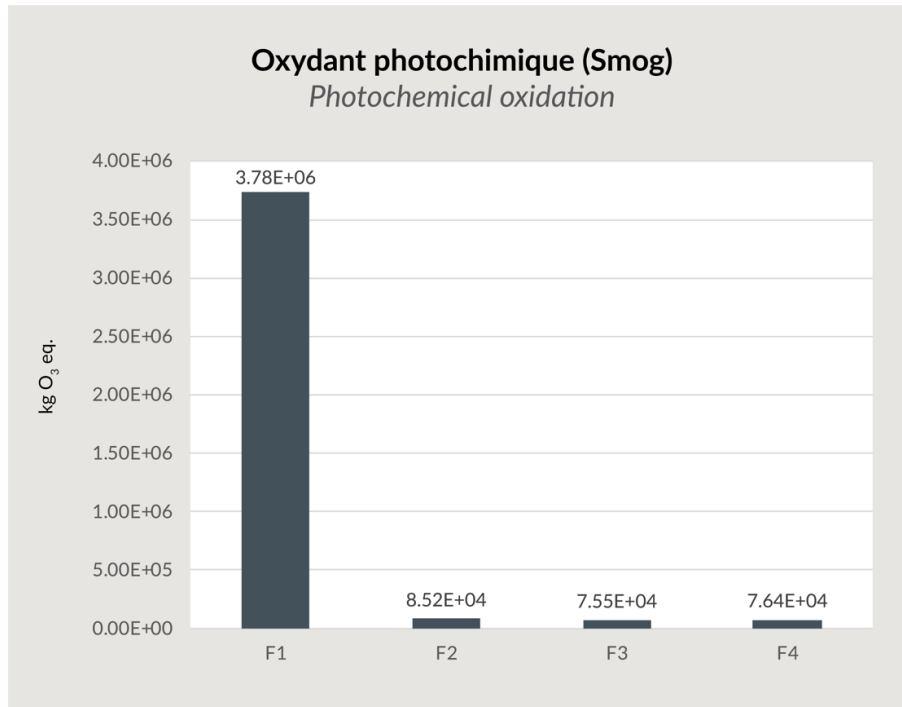


Figure 18. Comparaison du potentiel oxydant photochimique du cycle de vie entre des chaussées souples.

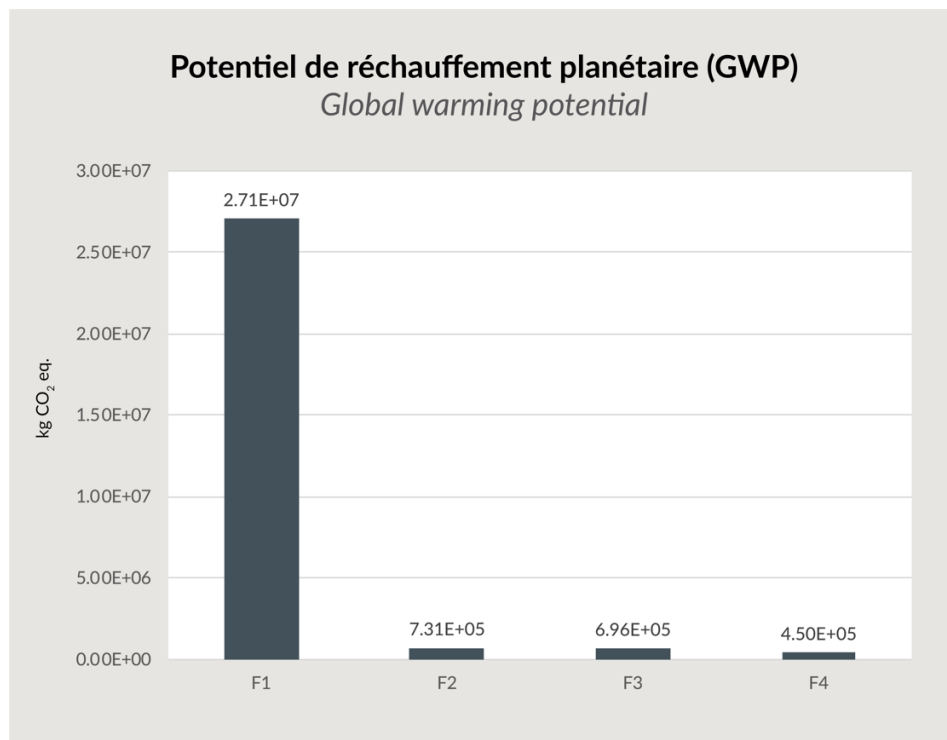


Figure 19. Comparaison du potentiel de réchauffement planétaire du cycle de vie entre des chaussées souples.

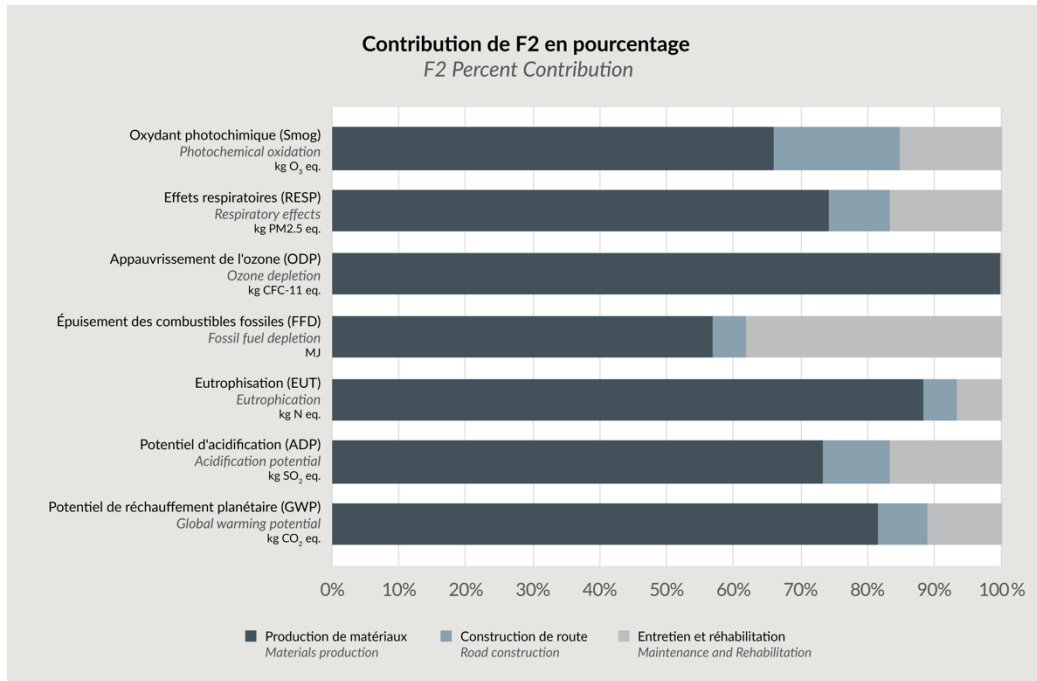


Figure 20. Contribution du procédé aux impacts environnementaux de la chaussée flexible F2.

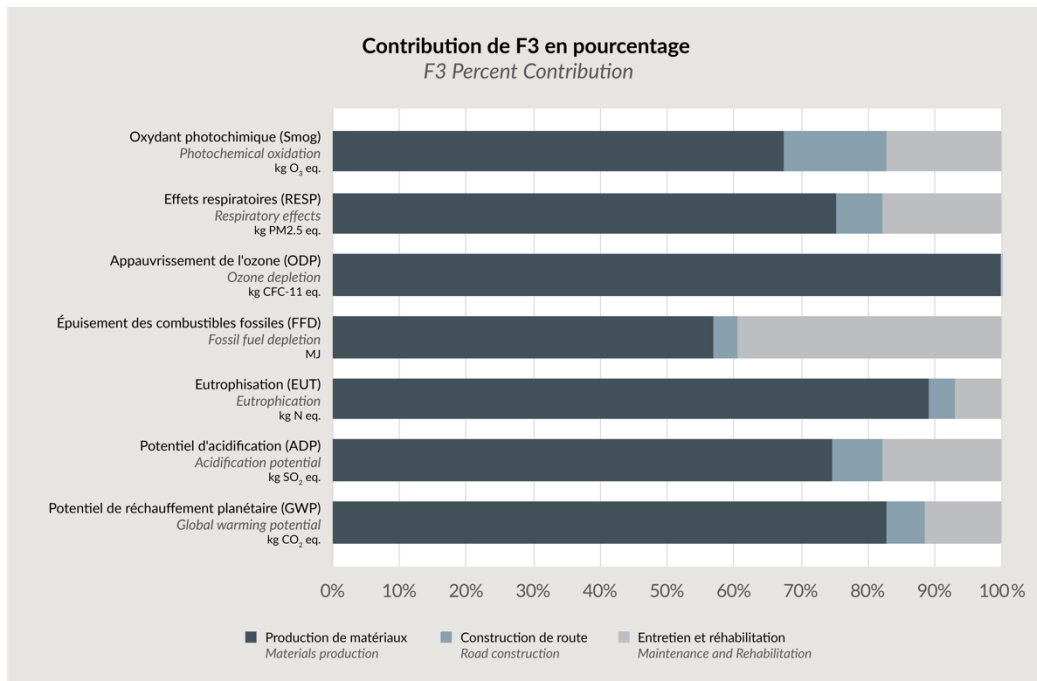


Figure 21. Contribution du procédé aux impacts environnementaux de la chaussée flexible F3

6.8 Discussion

La Figure 22 illustre la contribution normalisée à l'environnement pour différents scénarios de revêtement en ce qui concerne les différentes catégories d'impact prises en compte dans l'ACV.

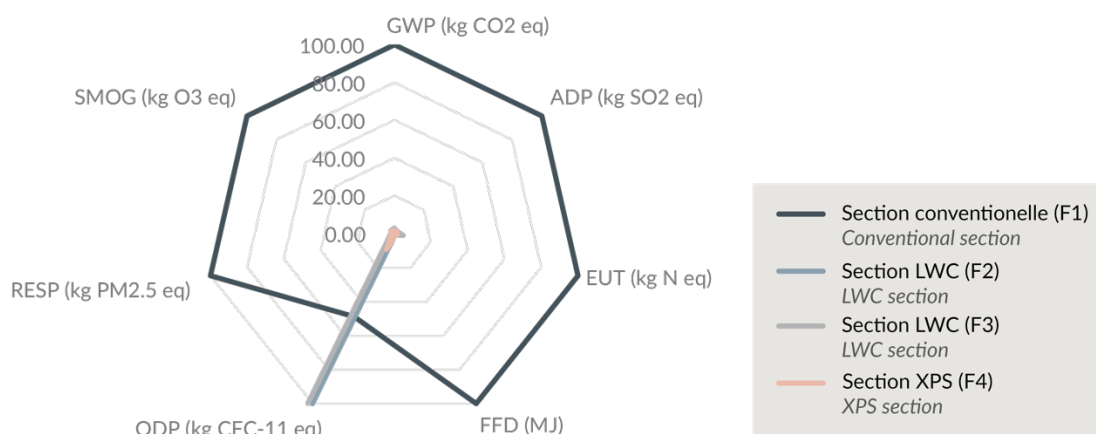


Figure 22. Impacts environnementaux normalisés pour 1 voie-km de différentes sections de chaussée

Il est clair que les impacts de la production de matériaux ainsi que de l'entretien et de la réhabilitation tout au long de la durée de vie de la route pèsent lourdement sur l'environnement par rapport à la construction de la route. Plus il faut de matériaux et d'énergie pour la production de matériaux, ainsi que pour l'entretien et la réhabilitation pendant la durée de vie de la chaussée, plus les impacts globaux de cette chaussée sont importants. Cela signifie qu'il peut y avoir des possibilités d'améliorer encore la performance environnementale si la production de matériaux, ainsi que l'entretien et la réhabilitation de la chaussée, peuvent être optimisés. Peut-être avec l'utilisation de meilleurs matériaux avec de bien meilleures propriétés et des améliorations simultanées dans la chaîne d'approvisionnement pour le côté de la production de matériaux faites pour d'autres couches de la chaussée, en particulier la couche de surface où la plupart de l'usure se produit. De plus, les chaussées flexibles avec XPS ont montré les impacts les plus élevés sur le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone par rapport aux autres configurations de chaussées dans cette étude. Les impacts de F3 sont légèrement inférieurs à F2 en raison de son utilisation de quantités plus faibles de sable et de matériaux de fondation granulaire. Dans l'ensemble, les sections BLHP et XPS ont présenté un impact environnemental beaucoup plus faible dans presque toutes les catégories, à l'exception de l'appauvrissement de la couche d'ozone, par rapport à la structure de chaussée conventionnelle.

7 Sommaire des Conclusions et Recommandations

Un matériau innovant de béton léger à haute-performance (BLHP), produit commercialement sous le nom ACTIVA9 par Béton Léger du Canada, a été étudié pour les applications de chaussées isolées et comme alternative aux solutions conventionnelles comme l'utilisation de couches granulaires épaisses ou des panneaux de polystyrène extrudé. À cette fin, des études de cas sur la conception de la chaussée pour un projet au Québec ont été examinées et quatre sections différentes, à savoir une conventionnelle (F1), BLHP-Option 1 (F2), BLHP-Option 2 (F3) et XPS (F4), ont été conçues pour une période d'analyse de 30 ans. La section de référence et celle isolée avec XPS ont été conçues à l'aide du logiciel Chaussée II. Étant donné que les matériaux BLHP sont nouveaux et n'existent pas dans la bibliothèque de matériaux de Chaussée II, une section équivalente a été conçue à l'aide du logiciel KENPAVE (F3) dans le but de minimiser l'épaisseur totale de la structure de la chaussée. Une section supplémentaire (F2) a également été conçue à l'aide de KENPAVE de manière à obtenir des performances améliorées avec des modifications minimales des couches granulaires. Les quatre sections ont finalement été modélisées dans le progiciel élastique multicouche pour évaluer leurs performances de fissuration par fatigue. Les résultats indiquent que F1 et F3 produisent les mêmes performances de fatigue, tandis que F4 présente une durée de vie en fatigue 40% plus courte. Bien que les sections XPS et conventionnelles aient été conçues pour le même trafic sur Chaussée II, la période de performance serait en conséquence différente en raison de la différence dans la réponse en fatigue qui n'est pas directement prise en compte dans Chaussée II. Par conséquent, en comparant les différentes sections, il est important de tenir compte du fait que la section F4 serait sous-dimensionnée par rapport aux sections F1, F2 et F3. En conséquence, ne considérer que le coût initial de construction lors de la comparaison des scénarios serait insuffisant pour atteindre des conclusions solides.

De plus, l'analyse du coût du cycle de vie (CCV) a été jugée nécessaire pour comparer correctement les différentes sections. CCV prend en compte différents éléments, notamment: les coûts initiaux de construction, les coûts d'entretien et de réhabilitation (E&R) et la valeur terminale du revêtement à la fin de sa durée de vie. Différentes stratégies de E&R ont été envisagées pour différentes sections, qui ont été ajustées en fonction de leur durée de vie attendue dominée par les fissures de fatigue. La section BLHP a entraîné les plus bas coûts liés aux E&R sur sa durée de vie. Les directives de la Federal Highway Administration (FHWA) et du National Center for Asphalt Technology (NCAT) ont été suivies pour calculer la valeur terminale des sections de chaussée. La valeur terminale consistait en la valeur de durée de vie résiduelle (RSL) pour la couche de surface, la valeur

de récupération (VR) et la valeur de durée de vie résiduel des matériaux des couches sous-jacentes. Une analyse de sensibilité a été réalisée pour refléter l'effet des variations des prix BLHP et XPS sur le CCV des sections de chaussée. Les résultats indiquent que BLHP peut offrir un CCV plus avantageux par rapport aux autres options.

Il est clair que l'incorporation de béton léger ACTIVA 9 dans la structure de la chaussée peut améliorer la performance environnementale globale dans presque toutes les catégories d'impact par rapport au revêtement conventionnel. De plus, la chaussée flexible avec BLHP a montré des avantages environnementaux en nécessitant moins d'activités d'entretien et de réhabilitation. Également, il est important de noter que même si F4 a montré de meilleures performances que F2 et F3 dans presque toutes les catégories d'impact, la fin de vie n'a pas été incluse dans l'évaluation, les résultats peuvent encore être complètement différents, en particulier depuis le polystyrène extrudé (XPS) n'est actuellement pas recyclé et peut donc produire de lourdes charges environnementales en fin de vie de la chaussée. Il est également important de noter que dans cette étude, l'entretien et la réhabilitation des activités pour F4 peuvent être sous-estimés car le matériau XPS peut devoir être remplacé plusieurs fois au cours de la durée de vie de la chaussée, ce qui était difficile à prévoir et donc non inclus dans la modélisation de la maintenance et de la réhabilitation.

En conclusion, la durabilité est mesurée par les implications environnementales, économiques et sociétales. Les sections du BLHP nécessiteraient moins d'entretien et de réhabilitations au cours de leur durées de vie, ce qui réduirait indirectement les coûts pour les utilisateurs et l'exposition des travailleurs aux risques pour la santé, et aurait ainsi des impacts sociaux positifs. Compte tenu de ces deux aspects, combinés aux coûts de cycle de vie inférieurs, on peut conclure que le béton léger haute-performance ACTIVA 9 représente un matériau de revêtement alternatif durable et innovant pour les applications de chaussées isolées au Canada.

8 Références

- [1] J. S. Horvath, "Lessons learned from failures involving geofoam in roads and embankments," *Res. Rep. No. CE/GE-99*, vol. 1, 1999.
- [2] G. Doré, J.-M. Konrad, and M. Roy, "Deterioration model for pavements in frost conditions," *Transp. Res. Rec.*, vol. 1655, no. 1, pp. 110–117, 1999.
- [3] MTQ, "Dossier Dégel: La Protection du Réseau Routier: une Priorité" 2020 (Available online).
- [4] N. Ghafari, P. Segui, J. P. BILODEAU, J. Côté, and G. Doré, "Assessment of mechanical and thermal properties of foam glass aggregates for use in pavements," in *Transportation Association of Canada and ITS Canada 2019 Joint Conference and Exhibition*, 2019.
- [5] T. E. Frydenlund and R. Aaboe, "Expanded polystyrene-the light solution," in *Proceedings of international symposium on EPS (expanded poly-styrol) construction method (EPS Tokyo'96)*, 1996.
- [6] G. Miki, "Ten year history of EPS method in Japan and its future challenges," in *Bengt B Broms Symposium On Geotechnical Engineering*, 1995, p. 293.
- [7] I. Hashimoto, "Study on density of flammable gas in EPS embankment," Tokyo, 1994.
- [8] M. Duskov, "EPS as a light weight sub-base material in pavement structures," *Publ. DELFT Univ. Technol. Fac. Civ. Eng.*, no. 7-94-211-6, 1994.
- [9] M. Duškov, "Measurements on a flexible pavement structure with an EPS sub-base," Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1997.
- [10] M. Duškov, "Measurements on a flexible pavement structure with an EPS geofoam sub-base," *Geotext. Geomembranes*, vol. 15, no. 1-3, pp. 5-27, 1997.
- [11] J. S. Horvath, "Non-earth subgrade materials and their thermal effects on pavements: an overview," in *Transportation Research Board 74th Annual Meeting*, 1995, p. 8.
- [12] G. Refsdal, "Frost protection of road pavements: FrostActioninSoils-No.26," Oslo, Norway, 1987.
- [13] A. Lauzon, "Method for Coating Expandable Polystyrene Beads," 2018.
- [14] F. Gu and N. Tran, "Best Practices for Determining Life Cycle Costs of Asphalt

Pavements,” 2019.

- [15] “Manual of Procedures for Flexible Pavement Construction,” Ohio, 1996.
- [16] T. Wang, F. Xiao, X. Zhu, B. Huang, J. Wang, and S. Amirkhanian, “Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement,” *Journal of Cleaner Production*. 2018.
- [17] R. H. Crawford, *Life cycle assessment in the built environment*. 2011.
- [18] “ISO 14044 -Environmental Management; Life Cycle Assessment Requirements and Guidelines,” *ISO 14044*. The International Standards Organisation, 2006.
- [19] “ISO 14040:2006 Technical Committee ISO/TC 207,” *ISO 14040*. The International Standards Organisation, 2006.
- [20] R. Frischknecht, “Ecoinvent Database,” in *Information Systems for Sustainable Development*, 2011.
- [21] “User Manual and Transparency Document,” 2014.
- [22] Athena Sustainable Materials Institute, “User Manual and Transparency Document - Pavement LCA v3.1-Web Application,” no. September, pp. 1–51, 2018.
- [23] A. M. Ahammed, S. Sullivan, G. Finlayson, C. Goemans, and J. Meil, “Life Cycle Environmental Assessment Using Athena Pavement LCA Tool: A Manitoba Case Study,” *2016 Conf. Transp. Assoc. Canada*, no. 613, 2016.
- [24] F. Osmani, M. Hettiwatte, S. Kshirsagar, S. Senadheera, and H. C. Zhang, “Development of an environmental life-cycle assessment (LCA) protocol for flexible pavements that integrates life-cycle components to a proprietary software,” in *Pavement Life-Cycle Assessment - Proceedings of the Pavement Life-cycle Assessment Symposium, 2017*, 2017.

9 Annexes

Tableau A1. Activités d'entretien et de réhabilitation pour chaque configuration de route

Maintenance and rehabilitation activity	Units	Parameters used for each roadway configuration			
		F1	F2	F3	F4
GROUT AND SEAL					
Year After initial Construction	yr	8	9	9	5
Expected Lifespan	yr	10	10	10	10
Percentage Length	%	20	20	20	20
Asphalt Sealant Material Installation					
Rubberized Asphalt Sealant	mm	15	15	15	15
Crack Cutting					
NQC ESG 10-64-34	mm	15	15	15	15
SPOT REPAIRS					
Year After initial Construction	yr	8	9	9	5
Expected Lifespan	yr	10	10	10	10
Percentage Surface Area	%	5	5	5	5
Mill Asphalt Pavement					
NQC ESG 10-64-34	mm	40	40	40	40
Asphalt Paving HMA					
NQC ESG 10-64-34	mm	40	40	40	40
Tack Coat Application					
Emulsified Asphalt Coat	mm	1	1	1	1
GROUT AND SEAL					
Year After initial Construction	yr	13	15	15	9
Expected Lifespan	yr	10	10	10	10
Percentage Length	%	100	100	100	100
Asphalt Sealant Material Installation					
Rubberized Asphalt Sealant	mm	15	15	15	15
Crack Cutting					
NQC ESG 10-64-34	mm	15	15	15	15
SPOT REPAIRS					
Year After initial Construction	yr	13	15	15	9
Expected Lifespan	yr	10	10	10	10

Maintenance and rehabilitation activity	Units	Parameters used for each roadway configuration			
Percentage Surface Area	%	15	15	15	15
Mill Asphalt Pavement					
NQC ESG 10-64-34	mm	40	40	40	40
Asphalt Paving HMA					
NQC ESG 10-64-34	mm	40	40	40	40
Tack Coat Application					
Emulsified Asphalt Coat	mm	1	1	1	1
MILL HMA					
Year After initial Construction	yr	18	20	20	12
Expected Lifespan	yr	0	0	0	0
Percentage Surface Area	%	100	100	100	100
Mill Asphalt Pavement					
NQC ESG 10-64-34	mm	50	50	50	50
FULL DEPTH ASPHALT BASE REPAIR					
Year After initial Construction	yr	18	20	20	12
Expected Lifespan	yr	10	10	10	10
Percentage Surface Area	%	10	10	10	10
Mill Asphalt Pavement					
NQC ESG 10-64-34	mm	75	75	75	75
NQC ESG 14-58-34	mm	190	190	190	190
Asphalt Paving HMA					
NQC ESG 10-64-34	mm	75	75	75	75
NQC ESG 14-58-34	mm	190	190	190	190
Tack Coat Application					
Emulsified Tack Coat	mm	1	1	1	1
RESURFACE WITH ESG-10					
Year After initial Construction	yr	18	20	20	12
Expected Lifespan	yr	10	10	10	10
Percentage Surface Area	%	100	100	100	100
Tack Coat Application					
Emulsified Asphalt Tack Coat	mm	1	1	1	1
Asphalt Paving HMA					
NQC ESG 10-64-34	mm	50	50	50	50
GROUT AND SEAL					
Year After initial Construction	yr	23	26	26	15

Maintenance and rehabilitation activity	Units	Parameters used for each roadway configuration			
Expected Lifespan	yr	10	10	10	10
Percentage Length	%	50	50	50	50
Asphalt Sealant Material Installation					
Rubberized Asphalt Sealant	mm	15	15	15	15
Crack Cutting					
NQC ESG 10-64-34	mm	15	15	15	15
GROUT AND SEAL					
Year After initial Construction	yr	28	32	32	19
Expected Lifespan	yr	10	10	10	10
Percentage Length	%	150	150	150	150
Asphalt Sealant Material Installation					
Rubberized Asphalt Sealant	mm	15	15	15	15
Crack Cutting					
NQC ESG 10-64-34	mm	15	15	15	15
SPOT REPAIRS					
Year After initial Construction	yr	28	32	32	19
Expected Lifespan	yr	10	10	10	10
Percentage Surface Area	%	10	10	10	10
Mill Asphalt Pavement					
NQC ESG 10-64-34	mm	40	40	40	40
Asphalt Paving HMA					
NQC ESG 10-64-34	mm	40	40	40	40
Tack Coat Application					
Emulsified Asphalt Coat	mm	1	1	1	1
MILL HMA					
Year After initial Construction	yr				22
Expected Lifespan	yr				0
Percentage Surface Area	%				100
Mill Asphalt Pavement					
NQC ESG 10-64-34	mm				90
RESURFACE WITH ESG-14					
Year After initial Construction	yr				22
Expected Lifespan	yr				10
Percentage Surface Area	%				100
Tack Coat Application					

Maintenance and rehabilitation activity	Units	Parameters used for each roadway configuration
Emulsified Asphalt Tack Coat	mm	1
Asphalt Paving HMA		
NQC ESG 14-58-34	mm	50
RESURFACE WITH ESG-10		
Year After initial Construction	yr	22
Expected Lifespan	yr	10
Percentage Surface Area	%	100
Tack Coat Application		
Emulsified Asphalt Tack Coat	mm	1
Asphalt Paving HMA		
NQC ESG 10-64-34	mm	40
GROUT AND SEAL		
Year After initial Construction	yr	25
Expected Lifespan	yr	10
Percentage Length	%	150
Asphalt Sealant Material Installation		
Rubberized Asphalt Sealant	mm	15
Crack Cutting		
NQC ESG 10-64-34	mm	15
SPOT REPAIRS		
Year After initial Construction	yr	27
Expected Lifespan	yr	10
Percentage Surface Area	%	10
Mill Asphalt Pavement		
NQC ESG 10-64-34	mm	40
Asphalt Paving HMA		
NQC ESG 10-64-34	mm	40
Tack Coat Application		
Emulsified Asphalt Coat	mm	1
NQC ESG 10-64-34	mm	15

Table B1. Détails des calculs du coût de construction.

Barnes and Langworthy estimates of VOC in 2003 dollars (cents per vehicle mile)						
Cost Component	Automobile		Pickup/SUV/Van		Trucks	
	Highway	City	Highway	City	Highway	City
Fuel @ \$1.50 / Gallon	5	7	7.8	10.1	21.4	28
Maintenance	2.1	2.5	2.4	2.8	10.5	12.1
Repair	1.1	1.3	1.3	1.5	10.5	12.1
Tires	0.9	0.9	1	1	3.5	3.5
Depreciation	6.2	7.4	7	8.1	8	9.2
VOC Estimate - Convert to SI Units - (Cents per Vehicle Kilometre)						
Cost Component	Automobile		Pickup/SUV/Van		Trucks	
	Highway	City	Highway	City	Highway	City
Fuel @ \$1.20 / Litre	1.06	1.48	1.65	2.13	4.52	5.92
Maintenance	1.30	1.55	1.49	1.74	6.52	7.52
Repair	0.68	0.81	0.81	0.93	6.52	7.52
Tires	0.56	0.56	0.62	0.62	2.17	2.17
Depreciation	3.85	4.60	4.35	5.03	4.97	5.72
VOC Estimate - 2003 to 2019 Adjusted Factor - (Cents per Vehicle Kilometre)						
Cost Component	Automobile		Pickup/SUV/Van		Trucks	
	Highway	City	Highway	City	Highway	City
Fuel @ \$1.20 / Litre	1.80	2.51	2.80	3.63	7.69	10.06
Maintenance	2.22	2.64	2.54	2.96	11.09	12.78
Repair	1.16	1.37	1.37	1.58	11.09	12.78
Tires	0.95	0.95	1.06	1.06	3.70	3.70
Depreciation	6.55	7.82	7.39	8.56	8.45	9.72
VOC Estimate - Canadian Dollars (Cents per Vehicle Kilometre)						
Cost Component	Automobile		Pickup/SUV/Van		Trucks	
	Highway	City	Highway	City	Highway	City
Fuel @ \$1.20 / Litre	\$2.43	\$3.40	\$3.78	\$4.90	\$10.38	\$13.58
Maintenance	\$2.99	\$3.57	\$3.42	\$3.99	\$14.97	\$17.26
Repair	\$1.57	\$1.85	\$1.85	\$2.14	\$14.97	\$17.26
Tires	\$1.28	\$1.28	\$1.43	\$1.43	\$4.99	\$4.99
Depreciation	\$8.84	\$10.55	\$9.98	\$11.55	\$11.41	\$13.12
Total (Cents)	\$17.11	\$20.65	\$20.47	\$24.01	\$56.73	\$66.20
Total (Dollar)	\$0.17	\$0.21	\$0.20	\$0.24	\$0.57	\$0.66

InnovAct Consulting inc.
Hassan Baaj, Ph.D., P.Eng., Président

442 Deer Ridge Drive, Kitchener, ON
www.linkedin.com/in/hassan-baaj

Mai 2020

