



CIRAIG^{MC}

Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services



RAPPORT FINAL

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

28 septembre 2009

Préparé pour :

**Ministère des Transports du Québec
Service de l'environnement**

À l'attention de Monsieur **Ronald Collette**, ing.
Service de l'environnement et des études d'intégration au milieu
– Direction de la recherche et de l'environnement
35, rue de Port-Royal Est, 4e étage
Montréal (Québec), H3L 3T1

Par :

**Karine Kicak, ing. jr
Jean-François Ménard, ing.**

Département de Génie chimique
École Polytechnique de Montréal

Soumise par :

BUREAU DE LA RECHERCHE ET CENTRE DE
DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE (B.R.C.D.T.)
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Campus de l'Université de Montréal
Case Postale 6079, succursale Centre-ville
Montréal (Québec) H3C 3A7

Pr. Réjean Samson, ing., Ph.D
Directeur du projet

CIRAIG

Centre interuniversitaire de recherche
sur le cycle de vie des produits, procédés et services
École Polytechnique de Montréal
Département de génie chimique
2900, Édouard-Montpetit
Montréal (Québec) Canada
C.P. 6079, Succ. Centre-ville
H3C 3A7

www.ciraig.org

ERRATUM

Auteurs : Ministère des transports du Québec et CIRAIG

Date : le 28 juin 2011

Bien que les corrections suivantes ne modifient pas les conclusions du rapport, cet erratum a été ajouté à la version finale du 28 septembre 2009 en vue d'éviter une mauvaise compréhension des données et résultats suite à la publication du rapport.

Section 5.3.7

Page 50

L'analyse de sensibilité a été effectuée en considérant l'opération de **100 %** des véhicules sur le cycle de vie des deux types de chaussées. Aux deuxièmes et troisièmes paragraphes de la section 5.3.7, la valeur de 1 % doit être remplacée par 100 %.

Section 5.3.8

Page 52

Le terme ρ_{ciment} dans l'équation (5-3) représente la masse de ciment Portland par m³ de béton et non la masse volumique du béton. En se basant sur le contenu en ciment Portland des bétons utilisés dans les chaussées au Québec, sa valeur est d'environ **240 kg/m³** plutôt que 2 350 kg/m³, ce qui modifie les résultats par un facteur 10. La quantité de CO₂ absorbé sur le cycle de vie de la chaussée pour le cas-type 16 est donc de l'ordre de **135 tonnes** plutôt que 1 310 tonnes.

Page 53

Deuxième paragraphe : les deux premières phrases devraient être remplacées par l'énoncé suivant :

La quantité de CO₂ absorbé par carbonatation représente une réduction de moins de 2 % du CO₂ équivalent inventorié sur le cycle de vie de la chaussée en béton de ciment pour le cas-type 16.

ÉQUIPE DE TRAVAIL

Réalisé par :

Karine Kicak, ing. jr

Collecte, modélisation et analyse des données

Jean-François Ménard, ing.

Collecte, modélisation et analyse des données

Collaborateurs :

Renée Michaud, ing.

Révision du rapport

Édouard Clément, ing., M.Sc.A.

Coordination technique

Réjean Samson, ing., Ph.D.

Direction scientifique

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Contexte

Dans le cadre de la mise à jour de l'Orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées (ci-après nommée « Orientation ») le Ministère des Transports du Québec (MTQ) souhaite intégrer l'analyse du cycle de vie (ACV) au processus décisionnel menant au choix des types de chaussées. Le processus décisionnel actuel repose sur une analyse des coûts globaux (*LCCA - Life Cycle Cost Assessment*) pour tous les paramètres monétarisables. L'**ACV**, qui a pour objectif de permettre l'intégration de paramètres environnementaux dans le choix des types de chaussées, est un **outil méthodologique permettant d'évaluer**, sur la base de méthodes internationalement reconnues, **les impacts environnementaux potentiels** d'un produit ou d'une activité sur l'ensemble de son cycle de vie. Le MTQ a ainsi sollicité le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) afin qu'il effectue la comparaison environnementale des chaussées en béton de ciment et en enrobé bitumineux.

Ce document constitue la synthèse du rapport final du projet déposé suite au processus de revue critique par un comité de revue indépendant qui a confirmé la validité des méthodes ainsi que des résultats et conclusions.

Méthode utilisée

L'ACV permet d'évaluer les conséquences environnementales d'un produit ou d'une activité sur l'ensemble de son cycle de vie (concept du berceau au tombeau). C'est donc une approche holistique, qui tient compte de l'extraction et du traitement des matières premières, des processus de fabrication, du transport et de la distribution, de l'utilisation et de la réutilisation du produit fini et finalement, du recyclage et de la gestion des déchets en fin de vie. Cette méthode d'analyse a comme principal objectif de permettre la réduction des impacts des produits et des services sur l'environnement, en fournissant des données environnementales permettant d'orienter la prise de décision en évitant des déplacements possibles de problèmes environnementaux.

L'ACV implique l'identification et la quantification des entrants (de matière et d'énergie) et des sortants (émissions à l'air, à l'eau et au sol) reliés au cycle de vie du produit ou de l'activité (c.-à-d. au système de produits), ainsi que l'évaluation des impacts potentiels associés à ces entrants et ces sortants.

Objectifs de l'étude

Plus particulièrement, l'objectif de ce projet est d'évaluer et de comparer les impacts environnementaux potentiels, à l'aide de la méthodologie ACV, d'une nouvelle chaussée en béton de ciment (ci-après nommée « système BC ») de type dalles courtes goujonnées (DCG) à ceux d'une nouvelle chaussée en enrobé bitumineux (ci-après nommée « système BB »), en tenant compte des différentes configurations (ou cas-types) représentatives du réseau autoroutier québécois.

Une revue bibliographique a d'abord montré qu'il existe quelques études comparant les impacts environnementaux des chaussées en béton de ciment et en enrobé bitumineux réalisées au cours des dernières années. La revue du CIRAIG a alors permis de dresser un portrait préliminaire du cycle de vie des chaussées en béton de ciment et en enrobé bitumineux et d'orienter l'établissement du cadre méthodologique sur lequel a été basée l'ACV. Celui-ci a été établi de manière à adapté à la réalité québécoise, en termes de représentativité des données.

Fonction et unité fonctionnelle

L'ACV porte non pas sur un produit, mais sur une ou plusieurs fonctions remplies par ce produit. L'analyse vise donc la quantité de produit requise pour remplir la fonction étudiée, ce qui assure la comparabilité d'options alternatives ayant des performances différentes. L'unité fonctionnelle représente quant à elle la quantification de la fonction étudiée, tandis que les flux de référence permettent de relier la performance d'un système à l'unité fonctionnelle (c.-à-d. qu'ils représentent la quantité de produits requise afin de remplir la fonction exprimée par l'unité fonctionnelle).

La fonction étudiée consiste à *Permettre le déplacement de véhicules routiers sur une distance donnée, pendant une période donnée.*

Une distance de cinq kilomètres et une période de cinquante ans ont été précisées par le MTQ. Les étapes de démolition et de reconstruction n'ayant pas lieu à la même année pour tous les types de chaussées, cette période de cinquante ans est basée sur la durée de vie maximale des deux alternatives étudiées. De plus, comme il s'avère difficile de déterminer dans quelle mesure les prochains cycles de vie d'une chaussée reconstruite seront identiques au premier cycle suivant la construction initiale (p. ex. dans quels contextes et sous quelles conditions la fondation et la sous-fondation devront être remplacées ou modifiées?), l'analyse comparative est réalisée sur la première tranche de cinquante ans du cycle de vie de la chaussée initiale. Plus particulièrement, dans le cadre de cette étude comparative, l'unité fonctionnelle s'exprime de la manière suivante :

« Permettre le déplacement de véhicules routiers sur une distance de cinq kilomètres durant les cinquante premières années de vie d'une chaussée en béton de ciment comparativement à une chaussée en enrobé bitumineux construites au Québec en 2009 ».

Frontières des systèmes étudiés

Les frontières du système comprennent quant à elles : 1) toutes les activités pertinentes à l'atteinte des objectifs de l'étude et donc, nécessaires à la réalisation de la fonction étudiée; et 2) tous les processus et flux contribuant de manière significative à l'impact environnemental potentiel.

Notons aussi que la spécification du nombre de véhicules circulant sur un tronçon du réseau autoroutier, plus particulièrement le nombre de camions, ainsi que le type de trafic (urbain vs rural) permet au MTQ de distinguer seize cas-types de circulation. Les cas-types se différencient par le nombre de voies et le dimensionnement structural de la

chaussée elle-même, et ce, pour chacun des deux types de chaussée ce qui fait 32 cas-types en tout.

La Figure I schématise les frontières des systèmes étudiés. Le cycle de vie de la chaussée débute donc avec l'**étape de construction initiale** d'un nouveau tronçon. Il s'agit plus particulièrement de la construction complète d'une chaussée, en partant de la mise en place des matériaux de fondation jusqu'au marquage de la chaussée.

L'**étape d'exploitation** inclut quant à elle l'épandage des sels fondants durant la période hivernale, tandis que l'**étape d'entretien** de la chaussée regroupe la séquence des interventions durant la période de cinquante ans, ainsi que les rafraîchissements du marquage.

En fin de vie, la dalle de béton de ciment ou la couche d'enrobé bitumineux de la chaussée est complètement remplacée. L'**étape de reconstruction** vise donc la démolition complète des voies de roulement et d'accotement, de même que la mise en place et le marquage d'une nouvelle dalle de béton de ciment (ou d'une nouvelle couche d'enrobé) de même épaisseur.

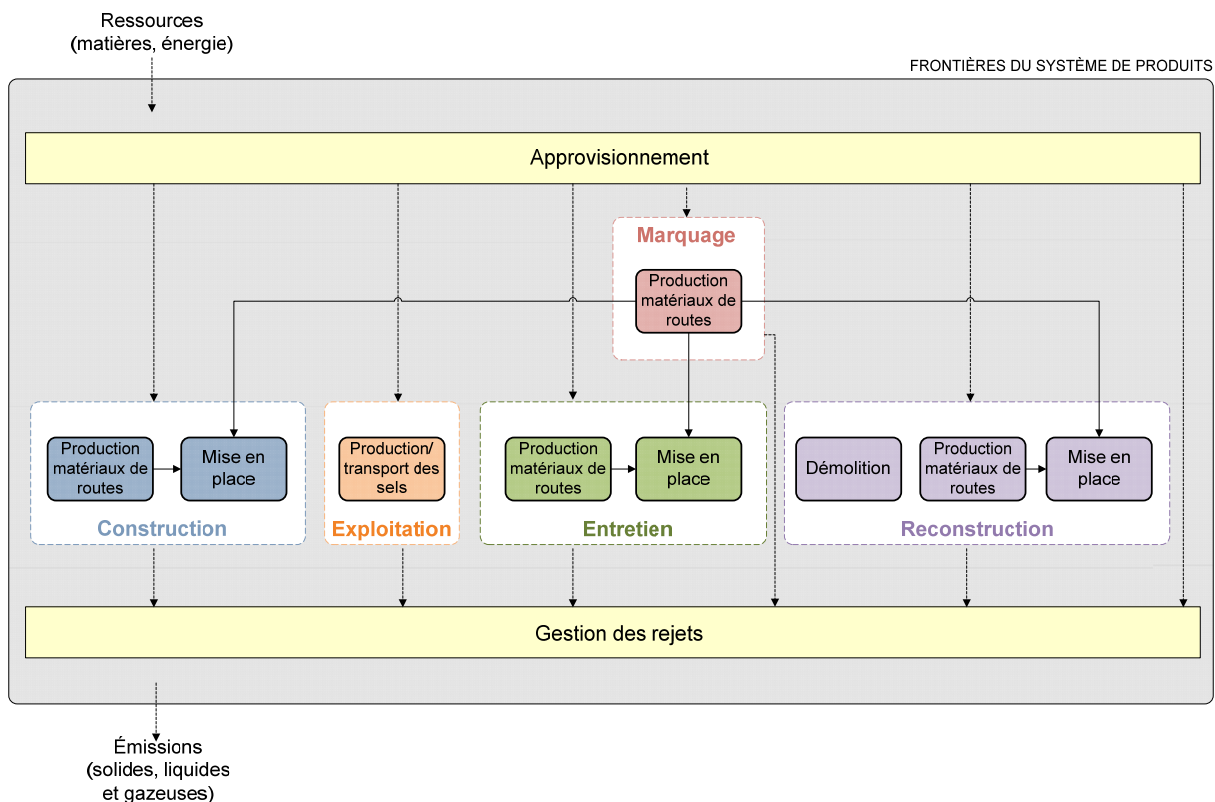


Figure I : Frontières des systèmes.

Hypothèses

- L'ACV comparative doit porter une attention particulière aux processus qui diffèrent entre les systèmes comparés. Ainsi, tous les processus jugés identiques ou ne pouvant être différenciés entre les deux types de chaussées n'ont pas été considérés. Plus précisément, les éléments suivants ne sont pas inclus :

- Le déboisement initial.
 - Les activités de déneigement et de maintien des bordures (fossés, désherbage, etc.) liées à l'exploitation des chaussées.
 - Les processus associés au cycle de vie des clôtures et parapets, des panneaux de signalisation et du système d'éclairage.
 - La circulation routière.
- Les pertes de matériaux lors des interventions (construction initiale, entretien et reconstruction) sont négligées. Les émissions de poussières lors de ces mêmes interventions sont aussi négligées.
 - Les durées de vie des fondations et sous-fondations des deux types de chaussée sont jugées les mêmes.
 - Aucun matériau provenant des chaussées n'est enfoui au Québec. C'est-à-dire que tous les matériaux enlevés des chaussées du réseau autoroutier de la province sont recyclés. Ils peuvent être utilisés sur le même chantier ou sur un autre chantier routier.
 - Faute de données, l'étape de nettoyage suivant la démolition des chaussées, lors de l'étape de reconstruction, est exclue. Également, le nettoyage des camions transportant le béton de ciment et l'enrobé bitumineux n'est pas pris en compte, de même que la gestion des rejets liquides qui en résultent.
 - L'usure des pneus et les émissions de particules en provenance des pneus émises n'ont pas été quantifiées ni introduites dans l'étude.
 - Le processus de carbonatation du béton (phénomène de carbonatation de la chaux contenue dans le béton, suivant la réaction suivante : $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) n'a pas été pris en compte dans l'ACV, mais son influence sur les résultats a été testé à l'aide d'une analyse de sensibilité.
 - Aucune donnée sur les fumées de bitume (contenant notamment des hydrocarbures aromatiques polycycliques(HAP)) émises lors de la fabrication et de la mise en œuvre n'a pu être déterminée, et donc ces dernières n'ont pas été considérées. Une analyse de sensibilité a tout de même été effectuée pour étudier l'influence des ces émissions sur les résultats.
 - Bien que les technologies risquent de varier à l'intérieur des cinquante années considérées, personne n'a actuellement le recul nécessaire pour caractériser avec précision l'évolution des techniques de production et le comportement des routes. Par conséquent, le système technologique à l'étude est considéré statique.
 - Les méthodes d'analyse des impacts du cycle de vie (ACVI) les plus récentes sont claires sur un point : toute ressource énergétique non renouvelable extraite au capital énergétique de la Terre est une ressource potentiellement perdue qui doit être comptabilisée dans l'évaluation des impacts (Goedkoop et Spriensma, 2001b; Bare et al., 2003; Jolliet et al., 2003; Toffoletto et al., 2007). Ainsi, si le pétrole extrait pour produire du bitume n'est pas destiné à être utilisé comme source énergétique mais comme matière première, la conséquence sur les ressources énergétiques n'est pas pour autant différente que si ce même pétrole était destiné à produire un

carburant : la ressource diminue et, avec elle, le potentiel énergétique disponible. Pour cette raison, il est essentiel de considérer l'énergie inhérente au bitume dans l'évaluation des impacts potentiels des revêtements. Cette prise en compte n'apparaît en outre qu'au niveau de l'utilisation d'énergie non renouvelable, et n'a aucune incidence sur les autres catégories d'impacts. Les émissions de CO₂ associées à la combustion éventuelle du bitume ne sont donc pas comptabilisées et ne le seront pas tant que le bitume ne sera pas brûlé.

Données utilisées

- Les données spécifiques ont essentiellement été collectées de manière à privilégier les données récentes, spécifiques aux installations québécoises, ainsi qu'aux règles d'art et pratiques réelles employées au Québec. Ces données ont été obtenues des associations industrielles parties prenantes au projet (BQ, l'ACC et l'ACRGQTQ), de la raffinerie Pétro-Canada de Montréal et du MTQ. Le contexte temporel des données collectées varie essentiellement entre 2005 et 2008.
- Ces données ont été complétées par des modules de données génériques (données moyennes issues de banques de données commerciales) disponibles dans la banque ACV internationalement reconnue *ecoinvent version 2.0* (<http://www.ecoinvent.ch/>). Cette dernière, qui est la plus importante banque de données d'inventaire du cycle de vie disponible sur le marché, contient des modules de données collectées auprès d'un grand nombre de secteurs industriels européens. Ces modules ont été adaptés aux contextes énergétiques québécois et nord-américain, lorsque requis.

Indicateurs d'impacts environnementaux considérés

- Les données collectées ont été évaluées sur la base de la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie internationalement reconnue IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003). Les résultats obtenus ont aussi été comparés à ceux obtenus à partir de la méthode européenne Eco-indicator 99 (Goedkoop et Spriensma, 2001a) et de la méthode canadienne LUCAS (Toffoletto et al., 2007).
- La méthode IMPACT 2002+ possède des facteurs de conversion en dommages des résultats d'impact caractérisés. Bien que la conversion des impacts en dommages introduise une incertitude supplémentaire, l'analyse de quatre catégories de dommage, relativement à plus de dix catégories d'impact, possède l'avantage de simplifier la communication des résultats.

Le Tableau I présente les catégories d'impact considérées par la méthode IMPACT 2002+. Notons que :

- Ces catégories ne couvrent pas tous les impacts environnementaux potentiels possibles associés aux activités humaines. Plusieurs types d'impacts, dont le bruit, les odeurs, le rayonnement et les champs électromagnétiques ne font ainsi pas partie de la présente analyse, les développements méthodologiques à leur sujet demeurant manquants ou insuffisants.

- L'eutrophisation aquatique et l'acidification aquatique ne sont pas considérées par les indicateurs de dommage, puisque que la méthode IMPACT 2002+ ne possède à ce jour aucune méthode permettant de convertir ces deux catégories d'impact en dommage à la qualité des écosystèmes. Il est donc recommandé de considérer les résultats d'indicateur de dommage en conjonction avec les indicateurs d'impact pour ces catégories.

Tableau I : Catégories d'impact et de dommage potentiels de la méthode IMPACT 2002+

IMPACT 2002+	
Catégorie de dommage	Catégorie d'impact
Santé humaine (SH)	Effets cancérigènes
	Effets non-cancérigènes
	Effets respiratoires dus aux substances inorganiques
	Radiations ionisantes
	Détérioration de la couche d'ozone
	Oxydation photochimique
Qualité des écosystèmes (QE)	Écotoxicité aquatique
	Écotoxicité terrestre
	Acidification/eutrophisation terrestre
	Occupation des terres
Changement climatique (CC)	Réchauffement global
Ressources (R)	Énergies non renouvelables
	Extraction minière
Aucun lien avec une catégorie de dommage (lien reconnu mais aucun modèle de conversion disponible)	Acidification aquatique
	Eutrophisation aquatique

Présentation des résultats

Puisque cette ACV est de type comparatif, et que les éléments communs aux deux systèmes ont été exclus de l'étude (en particulier la circulation routière, l'éclairage, le terrassement, etc.), les résultats présentent uniquement l'écart entre les deux types de chaussée. La présentation des résultats individuels correspondants à chaque type de chaussée n'est effectivement pas adéquate dans ce cas, surtout en considérant le fait que seules les quantités différentielles ont été collectées pour les sels fondants.

Les résultats de l'analyse de l'inventaire et des impacts potentiels sont donc présentés en termes d'écart relatif entre la chaussée en béton de ciment (système BC) et celle en enrobé bitumineux (système BB) de la manière suivante :

$$\Delta_{\text{Résultat}} (\%) = \frac{\left(\text{résultat}_{\text{SystèmeBC}} - \text{résultat}_{\text{SystèmeBB}} \right)}{\text{résultat}_{\text{SystèmeBB}}} \quad (1)$$

Sommaire de l'analyse de l'inventaire

À la lumière des résultats obtenus par l'analyse de l'inventaire, **l'utilisation de l'eau et de l'énergie** ainsi que les **émissions à l'environnement** (sauf en ce qui a trait aux émissions à l'eau des cas-types 8, 12 et 16) sont prépondérantes pour le système BC, alors que c'est la chaussée en enrobé qui présente la **consommation en ressources naturelles** la plus élevée. L'analyse a aussi permis d'identifier les principaux contributeurs à l'inventaire, notamment la production du ciment, du béton de ciment, de l'acier, des sels fondants, du bitume et de l'enrobé bitumineux.

Résultats d'indicateurs d'impact et de dommage potentiels

Le Tableau II identifie le système présentant le moins d'impact selon les résultats obtenus avec IMPACT 2002+ pour chacune des quatre catégories de dommage, ainsi que par catégorie d'Impact.

Douze des quinze indicateurs d'impact sont favorables au système BB. Toutefois, les indicateurs de toxicité humaine « cancer », de consommation de ressources non renouvelables et d'eutrophisation aquatique (pour les cas-types 8, 12 et 16 seulement) favorisent le système BC.

Précisons :

- Ce qui distingue les cas-types 8, 12 et 16 des autres est la reconstruction de la chaussée en enrobé bitumineux qui a lieu plus tôt, ce qui implique qu'une quantité plus importante d'enrobé et de bitume soit imputée au système BB et donc, une augmentation des émissions à l'eau (et l'eutrophisation) associées.
- Bien que l'indicateur de toxicité humaine « cancer » soit favorable au système BC, l'indicateur global de dommage à la santé humaine est favorable au système BB.
- L'indicateur relatif à l'eutrophisation aquatique présente une importante incertitude et donc il existe une grande probabilité d'occurrence d'une inversion du système à favoriser pour cet impact.

Tableau II : Système présentant le moins d'impact potentiel pour chaque catégorie d'impact et de dommage

Catégorie de dommage	Catégorie d'impact	Système BC	Système BB
Santé humaine	Toxicité humaine « cancer »	√	
	Toxicité humaine « non-cancer »		√
	Effets respiratoires (inorganiques)		√
	Radiations ionisantes		√
	Appauvrissement de la couche d'ozone		√
	Effets respiratoires (organiques)		√
	Santé humaine		
Qualité des écosystèmes	Écotoxicité aquatique		√
	Écotoxicité terrestre		√
	Acidification terrestre		√
	Utilisation des terres		√
	Qualité des écosystèmes		
--	Acidification aquatique		√
--	Eutrophisation aquatique	√ (cas 8, 12 et 16)	√
Réchauffement climatique	Réchauffement global		√
	Réchauffement climatique		√
Ressources	Extraction des minéraux		√
	Énergie non renouvelable		√
	Énergie inhérente du bitume	√	
	Ressources	√	
	Écart négatif ou diminution de l'indicateur de dommage/impact en remplaçant une chaussée en enrobé bitumineux par une chaussée en béton de ciment. En faveur de la chaussée en béton de ciment.		
	Écart positif ou augmentation de l'indicateur de dommage/impact en remplaçant une chaussée en enrobé bitumineux par une chaussée en béton de ciment. En faveur de la chaussée en enrobé bitumineux.		

Afin d'alléger la présentation des résultats graphiques, une analyse comparative pour ces six indicateurs (4 indicateurs de dommage + 2 indicateurs d'impacts) a été effectuée pour les cas-types 1 et 16 seulement, soit un cas pour lequel l'indicateur de l'eutrophisation aquatique favorisait le système BC et un cas pour lequel cet indicateur favorisait le système BB (bien que les résultats ne soient présentés que pour deux des cas-types, la consistance des tendances a été vérifiée pour tous).

La Figure II présente les indicateurs de dommage comparatifs (*dommage BC – dommage BB*) pour les quatre indicateurs de dommage ainsi que les indicateurs d'impact en comparatif (*impact BC – impact BB*) pour les deux indicateurs d'impact, pour les cas-types 1 et 16.

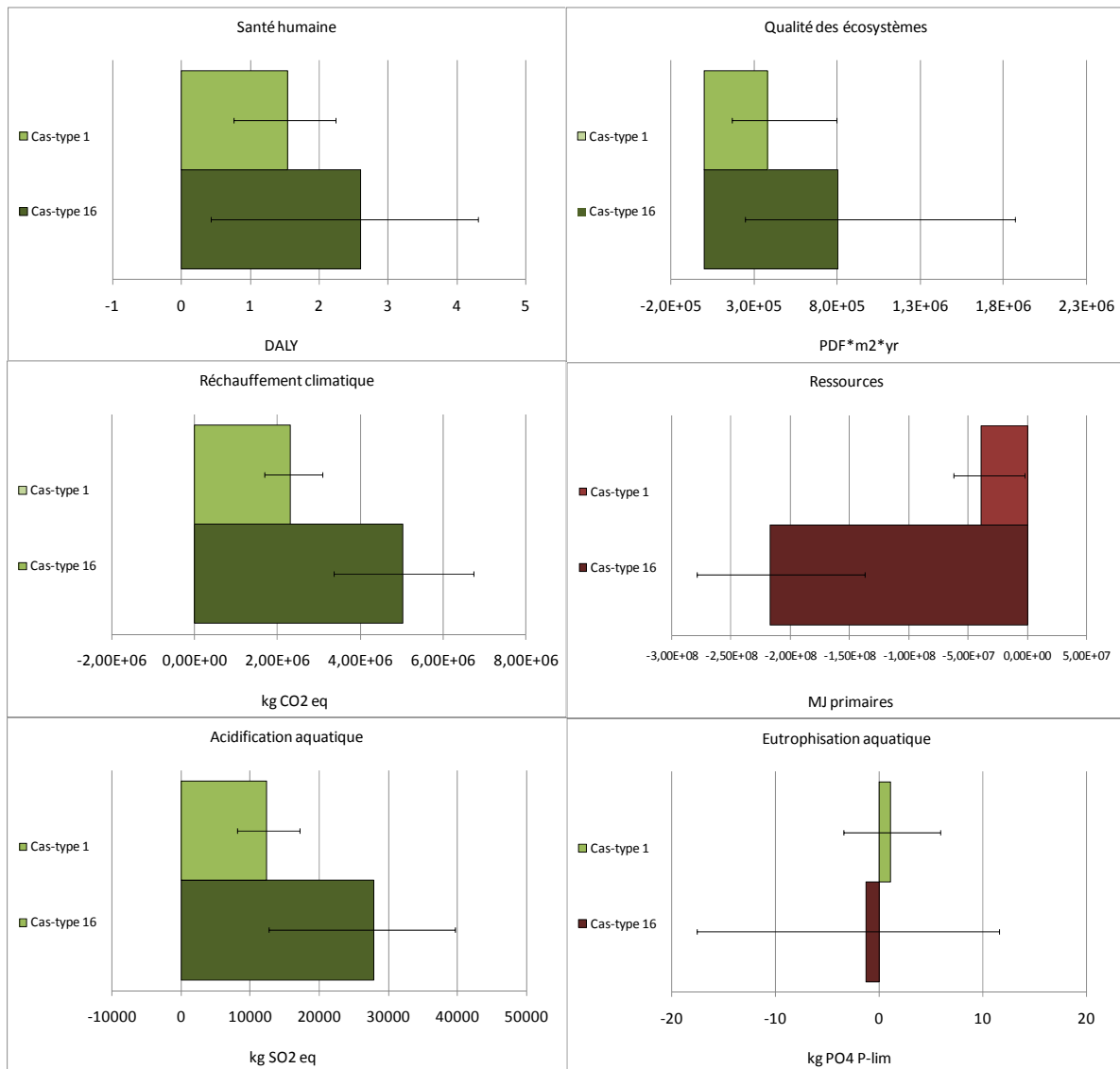


Figure II : Indicateurs de dommage et d'impact potentiels du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour les cas-types 1 et 16.¹

Les valeurs négatives, représentées en rouge, indiquent une contribution plus importante au dommage ou à l'impact pour le système BB, tandis que les valeurs positives, représentées en vert, indiquent que le système BC comporte une valeur de dommage ou d'impact plus importante. Et donc, pour tous les cas-types, les indicateurs de la santé humaine, de la qualité des écosystèmes, du réchauffement climatique et de l'acidification favorisent la chaussée en enrobé bitumineux.

Quant à l'eutrophisation aquatique, les cas-types 8, 12 et 16 favorisent le système BC tandis que les treize autres cas-types favorisent le système BB.

¹ DALY=Disability-adjusted Life-years ; PDF= Potentially Disappeared Fraction

Le graphique présente aussi des intervalles d'incertitudes pour les indicateurs, en indiquant les valeurs minimum et maximum. Ces intervalles permettent alors d'observer qu'aucun chevauchement ne peut avoir lieu entre une valeur positive et une valeur négative pour les indicateurs, à l'exception de l'eutrophisation aquatique pour laquelle il n'y a pas de positionnement clair.

L'indicateur de dommage relatif à la consommation de ressources non renouvelables peut être ventilé en sous-catégories en distinguant la part de cette consommation attribuable à l'énergie inhérente du bitume des chaussées. Il s'agit donc, d'une part, de l'utilisation d'énergie primaire non renouvelable associée au bitume uniquement (énergie inhérente du bitume seulement) et, d'autre part, de l'utilisation de minéraux et d'énergie primaire non renouvelable associée à tout le reste du système (sans l'énergie inhérente du bitume).

La Figure III présente l'indicateur de l'utilisation des ressources en comparatif (*dommage BC – dommage BB*) pour les cas-types 1 et 16.

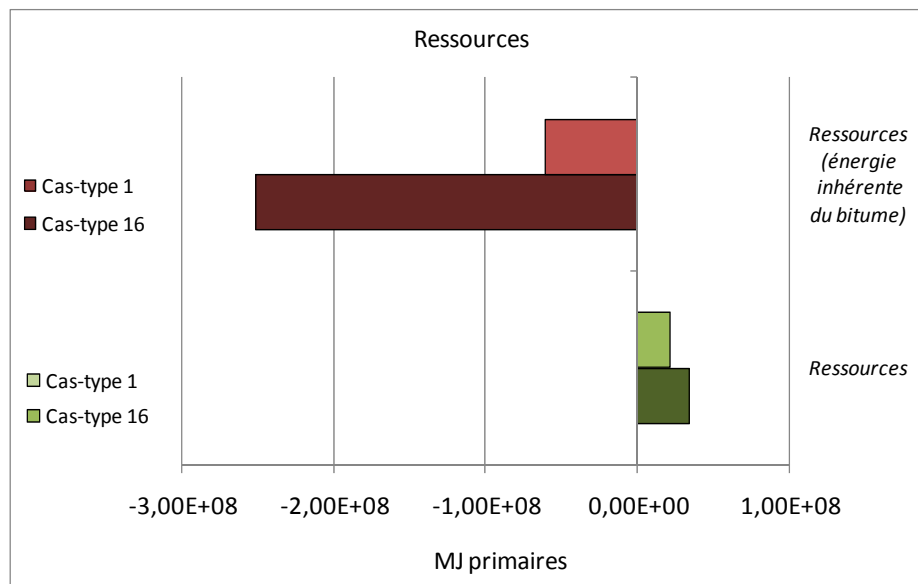


Figure III : Indicateur de l'utilisation des ressources du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour les cas-types 1 et 16 en distinguant l'énergie inhérente du bitume

Cependant, comme la méthode IMPACT 2002+ considère l'énergie primaire totale, lorsque l'énergie inhérente du bitume est incluse dans l'énergie primaire totale associée au système, le système BC est assurément avantageux. En fait, l'énergie inhérente du bitume représente, en moyenne pour les seize cas-types, 76 % de l'énergie primaire totale pour le système BB, alors qu'il ne représente que 30 % pour le système BC, ce qui permet d'expliquer la différence déterminante entre les deux types de chaussée pour cet indicateur.

Analyses de sensibilité

Les analyses de sensibilité couvrent l'évaluation de la sensibilité des conclusions quant à une variation :

1. Des différentes distances de transport des matériaux entre leur lieu d'approvisionnement et le chantier routier ;
2. Du profil environnemental de la production du bitume ;
3. Des émissions de fumées de bitume dans la donnée de production de l'enrobé ;
4. Du profil environnemental de la construction de chaussées de béton armé continu (BAC) en remplacement du béton de ciment de type dalle courte goujonné (DCG) (uniquement pour le cas-type 16) ;
5. De la méthode d'évaluation des impacts ;
6. Du profil environnemental de la production du ciment ;
7. Des quantités de carburant consommé par les véhicules selon le type de chaussée (bien que ce paramètre ait été exclu des frontières de cette étude, il apparaît important sur tout le cycle de vie d'une chaussée, en particulier dans un contexte comparatif où il pourrait y avoir une différence notable entre les deux alternatives) ;
8. Du processus de carbonation par le béton ayant lieu tout au long du cycle de vie du béton de ciment, absorbant ainsi une part de CO₂.

Ces analyses de sensibilité réalisées ont par ailleurs permis de démontrer qu'une modification des conclusions obtenues est peu probable, bien que le choix de la méthode d'ACVI puisse au contraire influencer ces conclusions. Plus précisément, selon la perspective individualiste de la méthode européenne *Eco-indicator 99*, les quatre indicateurs de dommage favorisent unanimement le système BB. Il est cependant important de souligner que, selon cette perspective individualiste, seuls les effets prouvés sont considérés et l'utilisation des ressources non renouvelables n'est pas incluse (ce qui constitue un choix de valeur à considérer de manière transparente).

En ce qui a trait à l'analyse effectuée sur les fumées de bitumes émises, un ajout des émissions d'HAP ne modifie pas les conclusions de l'étude. Bien que la différence entre les deux systèmes quant à l'indicateur de santé humaine diminue, le système BB est toujours favorisé pour cette catégorie de dommage (et les autres indicateurs demeurent inchangés).

L'analyse de sensibilité sur la chaussée en BAC révèle que les quatre indicateurs de dommage sont plus élevés pour le système BC BAC que pour le système BC DCG. Ceci est en partie dû à la quantité de ciment et d'acier plus importante et au composite qui n'est pas inclus dans le système BC DCG. Par contre, en comparaison au système BB, les conclusions de l'étude ne sont pas modifiées, c.-à-d. que tous les indicateurs demeurent inférieurs pour le système BB, à l'exception de l'indicateur de la consommation des ressources qui est toujours plus élevé.

Conclusions et recommandations

Au niveau du dommage, les indicateurs de santé humaine, de réchauffement climatique et de qualité des écosystèmes sont tous favorables au système BB, tandis que l'indicateur de consommation des ressources est toujours favorable au système BC et ce, pour chacun des seize cas-types. L'indicateur d'impact de l'acidification favorise la chaussée en enrobé bitumineux, alors que l'indicateur relatif à l'eutrophisation aquatique, présentant une importante incertitude, ne permet pas de trancher quant au système à favoriser pour cet impact.

Comme l'indiquait la revue bibliographique, sur l'ensemble du cycle de vie d'une chaussée, la circulation routière serait responsable de la majeure partie des impacts totaux (toutes catégories confondues). Ainsi, toute économie de carburant, même en quantité marginale, pourrait visiblement favoriser un type de chaussée comparativement à l'autre (en supposant que le type de chaussée influence significativement la consommation de carburant, bien qu'une telle hypothèse demeure à valider).

Ainsi, compte tenu de ces résultats, il n'est pas aisé de privilégier une alternative relativement à l'autre sans pouvoir valider l'influence du type de revêtement sur la consommation de carburant ou sans avoir recours à un choix de valeurs de manière à pondérer les différents indicateurs d'impact.

Selon la norme ISO (2006), en effet, lorsque les résultats obtenus, qui se basent sur les sciences de la nature, ne permettent pas de trancher en ACV, il est possible d'effectuer une décision fondée sur des choix de valeurs. L'utilisation de facteurs de pondération permet d'agrèger plusieurs indicateurs en score unique et donc, de départager les alternatives. Ces choix de valeurs appartiennent au mandataire de l'étude (soit le MTQ) et doivent être présentés de manière transparente. À titre indicatif, une simulation a d'ailleurs permis d'identifier l'alternative favorable selon différentes combinaisons de pondérations possibles pour les quatre indicateurs de dommage. Ces informations seront prises en compte dans le contexte d'une prise de décision.

Il est d'autant plus important de noter que les résultats obtenus dans le cadre de cette étude étaient fonction d'un système technologique statique sur la période de cinquante ans considérée. Nul n'a actuellement le recul nécessaire pour caractériser avec précision l'évolution dans le temps des techniques de production des matériaux de construction, des technologies de conception et de mise en place des chaussées et des réglementations environnementales, bien que la compétitivité du marché risque fort probablement de modifier le système étudié, et conséquemment, les résultats de cette étude. Il en suit que plusieurs nouvelles technologies de revêtement émergent, telles que les enrobages à froid, à recyclage facilité, les bitumes modifiés au polymère augmentant la durée de vie du revêtement, etc. Il serait donc recommandable que le MTQ puisse investiguer sur la pertinence environnementale de développer ces innovations des chaussées.

Enfin, comme mentionné lors de la revue de littérature, plusieurs éléments de construction de routes permettent de diminuer les impacts environnementaux et sociaux de celles-ci : choix des matériaux, du design de route, du site et impacts intrinsèques à la construction. Dans une optique de développement durable, de telles considérations constituent donc des facteurs potentiellement intéressants à intégrer aux politiques du MTQ relatives au transport, indépendamment du type de chaussées.

En somme, puisque toute diminution de la consommation de carburant présente une diminution significative des impacts potentiels sur le cycle de vie de tout type de chaussée, l'intérêt devrait davantage porter sur la réduction de la consommation de carburant en encourageant, notamment, l'utilisation de voitures plus écologiques ou le covoiturage.

Limites

Les résultats présentés en termes d'impacts et de dommages sont issus des calculs réalisés en utilisant essentiellement les modèles de la méthode d'évaluation des impacts IMPACT 2002+. Les dommages (et impacts) évalués ne sont que des dommages (et impacts) potentiels puisqu'ils correspondent à une modélisation, donc à une simplification, de l'environnement réel. Les résultats de l'ACVI sont des expressions relatives qui ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, des marges de sécurité ou les risques. À ce titre, ces résultats ne doivent pas constituer l'unique base d'affirmation comparative destinée à être divulguée au public, dans la mesure où des informations supplémentaires seraient nécessaires pour remédier à certaines des limitations propres à l'ACVI. Ces résultats pourraient éventuellement être affinés soit par l'utilisation d'autres outils, tels que l'analyse de risque, ou soit suite à d'éventuels développements méthodologiques.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
2.1 PORTRAIT DU RÉSEAU ROUTIER QUÉBÉCOIS.....	2
2.2 REVUE DES ÉTUDES ENVIRONNEMENTALES DU CYCLE DE VIE DES CHAUSSÉES	2
2.2.1 <i>Mise en perspective : impacts de la circulation routière.....</i>	<i>3</i>
3. MODÈLE D'ÉTUDE.....	6
3.1 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	6
3.1.1 <i>But de l'étude.....</i>	<i>6</i>
3.1.2 <i>Application envisagée.....</i>	<i>6</i>
3.1.3 <i>Public concerné</i>	<i>6</i>
3.2 CHAMP DE L'ÉTUDE	7
3.2.1 <i>Fonctions, unité fonctionnelle et flux de référence.....</i>	<i>7</i>
3.2.2 <i>Frontières et description des systèmes</i>	<i>8</i>
3.2.3 <i>Approche d'imputation</i>	<i>12</i>
3.2.4 <i>Données d'inventaire du cycle de vie (ICV)</i>	<i>13</i>
3.2.5 <i>Évaluation des impacts du cycle de vie (ACVI).....</i>	<i>15</i>
3.2.6 <i>Méthode de calcul et présentation des résultats selon une approche modulaire.....</i>	<i>17</i>
3.2.7 <i>Revue critique.....</i>	<i>18</i>
3.2.8 <i>Applications et limites de l'ACV.....</i>	<i>19</i>
4. ANALYSE DE L'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE	21
4.1 MÉTHODOLOGIE DE COLLECTE ET SOURCES DES DONNÉES	21
4.2 DESCRIPTION DES SYSTÈMES ET DES HYPOTHÈSES DU MODÈLE ACV	22
4.3 SOMMAIRE DES SOURCES DE DONNÉES UTILISÉES	23
4.4 RÉSULTATS DU CALCUL DE L'INVENTAIRE.....	27
4.4.1 <i>Analyse de contribution.....</i>	<i>28</i>
5. ÉVALUATION DES IMPACTS ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	33
5.1 RÉSULTATS D'INDICATEURS DE DOMMAGE/IMPACT.....	33
5.1.1 <i>Évaluation à partir du pointage unique.....</i>	<i>35</i>
5.1.2 <i>Analyse de contribution</i>	<i>37</i>
5.2 ANALYSE D'INCERTITUDE.....	38
5.3 ANALYSES DE SENSIBILITÉ.....	41
5.3.1 <i>Distance de transport des matériaux.....</i>	<i>42</i>
5.3.2 <i>Production du bitume</i>	<i>42</i>
5.3.3 <i>Fumées de bitume</i>	<i>44</i>
5.3.4 <i>Chaussée en béton armé continu</i>	<i>44</i>
5.3.5 <i>Méthodes ACVI.....</i>	<i>48</i>
5.3.6 <i>Production du ciment.....</i>	<i>49</i>
5.3.7 <i>Impact d'une réduction de la consommation.....</i>	<i>50</i>
5.3.8 <i>Absorption par le béton du CO₂ par processus de carbonation</i>	<i>51</i>
5.4 LIMITES DE L'ÉTUDE.....	53
5.4.1 <i>Limites de l'ICV.....</i>	<i>53</i>
5.4.2 <i>Limites de l'ACVI</i>	<i>56</i>
6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	58
7. RÉFÉRENCES	61
ANNEXE A : MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)	64

ANNEXE B : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	66
ANNEXE C : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES SYSTÈMES ÉTUDIÉS.....	68
ANNEXE D: MÉTHODE D'ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE (ACVI).....	71
ANNEXE E: DESCRIPTION DES SYSTÈMES DE PRODUITS ET DES HYPOTHÈSES DU MODÈLE D'ACV	73
ANNEXE F : RÉSULTATS.....	75
ANNEXE G : RAPPORT DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE ET RÉPONSES DU CIRAIG AU COMITÉ	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Principaux paramètres et conclusions des études répertoriées	4
Tableau 3-1 : Cas-types de chaussée spécifiés par le MTQ	9
Tableau 3-2 : Épaisseurs des couches de la chaussée pour les cas-types spécifiés par le MTQ.....	9
Tableau 3-3 : Séquence d'interventions pour les cas-types spécifiés par le MTQ	11
Tableau 3-4 : Catégories de dommage et catégories d'impact des méthodes IMPACT 2002+ et LUCAS	16
Tableau 4-1 : Sommaire des sources de données utilisées	24
Tableau 4-2 : Sommaire des données adaptées afin d'augmenter la représentativité des processus <i>ecoinvent</i>	26
Tableau 4-3 : Écart relatif entre les flux élémentaires du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC - système BB)	28
Tableau 4-4 : Contribution (%) des substances dominantes pour chaque compartiment de l'écosystème et principaux processus élémentaires associés.....	29
Tableau 5-1 : Écart relatif des indicateurs dommage/impact au cycle de vie comparatif des chaussées (système BC - système BB).....	34
Tableau 5-2 : Système présentant le moins d'impact pour chaque catégorie	35
Tableau 5-3 : Possibilité (%) qu'une combinaison de facteurs de pondération favorise un système par rapport à l'autre	37
Tableau 5-4 : Séquence d'interventions pour le cas-type 16 sur une période de soixante ans, incluant les chaussées de type BAC	46
Tableau 5-5 : Épaisseurs des couches de la chaussée en béton de type BAC pour le cas-type 16	47
Tableau 5-6 : Quantités d'acier et de polymères renforcés de fibres de verre requises pour la chaussée en béton de type BAC pour le cas-type 16	47
Tableau 5-7 : Critères de qualification des données.....	55
Tableau 5-8 : Qualification des données.....	56

LISTE DES FIGURES

Figure 3-1 : Frontières des systèmes.....	8
Figure 5-1 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (BC - BB) pour les cas-types 1 et 16.	39

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

ACC	Association canadienne du ciment
ACRGTO	Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec
ACV	Analyse du cycle de vie, ou <i>Life Cycle Assessment</i> en anglais
ACVI	Évaluation des impacts du cycle de vie
BAC	Béton armé continu
BQ	Bitume Québec
CaCl ₂	Chlorure de sodium
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CaO	Oxyde de calcium
CIRAIG	Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CO ₂	Dioxyde de carbone
COD	Carbone organique dissous
COT	Carbone organique total
COV	Composés organiques volatils
DALY	<i>Disability-adjusted Life-years</i>
DBO ₅	Demande biologique en oxygène (pour 5 jours)
DCG	Dalles courtes goujonnées
DCO	Demande chimique en oxygène
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i>
GENI	<i>Global Energy Network Institute</i>
GES	Gaz à effet de serre (en anglais, <i>Green House Gas</i>)
GIÉC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais, IPCC)
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
ICV	Inventaire du cycle de vie
INRP	Inventaire national des rejets de polluants
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organisation internationale de normalisation)
IVL	Institut de recherche environnementale de Suède
LCCA	<i>Life Cycle Cost Assessment</i> , ou Analyse des coûts du cycle de vie en français
LUCAS	<i>LCIA method Used for a CAmerican Specific context</i>
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NaCl	Chlorure de sodium
NO _x	Oxydes nitreux
PCR	<i>Product Category Rules</i>

PDF	<i>Potentially Disappeared Fraction</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
PaLATE	<i>Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects</i>
SO ₂	Dioxyde de soufre
TRACI	<i>Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts</i>
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la mise à jour de l'*Orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées* (ci-après nommée « Orientation ») le Ministère des Transports du Québec (MTQ) souhaite intégrer l'analyse du cycle de vie (ACV) au processus décisionnel menant au choix des types de chaussées. Le processus décisionnel actuel repose sur une analyse des coûts globaux (*LCCA - Life Cycle Cost Assessment*) pour tous les paramètres monétarisables. L'ACV, qui a pour objectif de permettre l'intégration de paramètres environnementaux dans le choix des types de chaussées, est un outil méthodologique permettant d'évaluer, sur la base de méthode internationalement reconnues, les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'une activité sur l'ensemble de son cycle de vie. Il s'agit donc d'une approche holistique, qui permet d'identifier les « points chauds » d'un système, et d'éviter que des décisions adoptées ne résultent en des déplacements de pollution d'étapes du cycle de vie ou de catégories d'impacts à d'autres.

Une étude de faisabilité réalisée en 2005 pour le compte du MTQ, par le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) (Martineau *et al.*, 2005) a conclu :

« ... une ACV comparative de qualité est réalisable. Les résultats de l'inventaire (quantités de matières et de vecteur d'énergie entrant dans le cycle de vie des deux types de chaussées) et de l'évaluation des impacts (tels que la contribution potentielle relative des deux types de chaussées au réchauffement planétaire, à la destruction de la couche d'ozone, à la formation de smog, à l'acidification, etc.) constituent des paramètres environnementaux clairs et transparents pouvant être intégrés au processus décisionnel du choix des types de chaussées. »

Le CIRAIG a par la suite été mandaté par Monsieur Ronald Collette, ingénieur du Service de l'environnement de la direction du développement durable, de l'environnement et de la recherche du MTQ, pour effectuer la comparaison environnementale des chaussées en béton de ciment et en enrobé bitumineux.

Les objectifs de cette étude et la méthodologie employée sont détaillés au chapitre 3, tandis que les chapitres 4 et 5 exposent les résultats des phases subséquentes de l'ACV, conformément à l'Organisation internationale de normalisation (série ISO 14 040).

La cadre méthodologique présenté au chapitre 3 ayant notamment été établi sur la base d'une revue des informations disponibles se rapportant au sujet à l'étude, cette dernière est par ailleurs résumée au chapitre suivant (chapitre 2).

Enfin, il est à noter que l'Annexe A présente la méthodologie ACV plus en détail, comprenant une section définissant divers termes spécifiques au domaine.

2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Une revue bibliographique permettant de dresser un portrait des travaux effectués à l'échelle internationale en ce qui a trait à l'analyse environnementale du cycle de vie des chaussées routières a d'abord été réalisée. Cette revue avait pour objectif de comparer les différents choix méthodologiques employés et les principaux résultats obtenus, ce qui a facilité l'établissement du modèle d'étude.

Ce chapitre présente ainsi un aperçu des chaussées en béton de ciment et en enrobé bitumineux employées au Québec, suivi d'une revue des études disponibles sur l'impact environnemental des deux types de chaussées.

2.1 Portrait du réseau routier québécois

Le réseau routier du Québec comprend environ 185 000 km de routes, toutes catégories comprises (autoroutes, routes nationales, routes régionales, rues et chemins locaux). La part du réseau routier sous la responsabilité du MTQ est de 29 100 km y compris les autoroutes dont 25 %, soit 1 239 km sont construites en béton de ciment (recouvertes ou non d'enrobé bitumineux) et elles se retrouvent dans 75 % des cas dans la grande région de Montréal. Cette portion du réseau supporte 35 % de la circulation totale des véhicules automobiles au Québec (MTQ, 2001).

2.2 Revue des études environnementales du cycle de vie des chaussées

Plusieurs études comparant les impacts environnementaux des chaussées de béton de ciment et des chaussées en enrobé bitumineux ont été réalisées au cours des dernières années. Cependant, il s'agit, pour beaucoup, de rapports privés ou d'études universitaires difficilement accessibles. Néanmoins, certaines de ces études ou des revues bibliographiques résumant leur contenu ont été obtenues. C'est donc à partir de ces documents, d'articles publiés dans des revues scientifiques et de comptes-rendus de conférences que la présente revue a été élaborée.

Parmi les articles répertoriés, un certain nombre touche indirectement à l'ACV appliquée aux chaussées routières, en s'intéressant, par exemple, à l'étape d'utilisation des routes (Eriksson *et al.*, 1996; Pereira *et al.*, 1998) ou à l'utilisation de sous-produits industriels ou de matériaux recyclés dans la construction de routes (Broers *et al.*, 1994; Eskola *et al.*, 2000; Mroueh *et al.*, 2001; Roth et Eklund, 2003; Ventura *et al.*, 2004). Une autre étude propose une méthode pour inclure aux ACV, le bruit et les effets sur la santé produits par la circulation routière (Muller-Wenk, 2004), alors que Treloar *et al.* (2004) ont travaillé à élaborer une méthode ACV hybride partiellement simplifiée s'appliquant à la construction des routes, mais aussi à la fabrication des véhicules, leur entretien et leur utilisation. Ces références ne sont pas détaillées davantage ici, contrairement à celles visant directement l'ACV comparative des chaussées de béton de ciment et en enrobé bitumineux. Les principaux paramètres et conclusions de ces dernières sont présentés au Tableau 2-1 et en Annexe B.

2.2.1 Mise en perspective : impacts de la circulation routière

Il est important de noter que toutes les études répertoriées par Pereira *et al.* (2001) arrivent à la même conclusion : c'est l'étape de l'utilisation, soit la circulation automobile, qui compte pour 95-99 % des impacts environnementaux associés au cycle de vie d'une chaussée. De même, le rapport publié par le groupe de travail sur l'efficacité de carburants d'Eurobitume et de l'EAPA, conclut que ce n'est pas tant le type de chaussée que son état général qui affecte la consommation d'essence (Beuving *et al.*, 2004).

Ainsi, malgré ces résultats, le MTQ souhaitait obtenir un indicateur environnemental pour l'Orientation, 1) sur la base d'une comparaison de la performance environnementale des deux types de chaussées, et 2) en supposant l'étape de circulation routière semblable pour les alternatives étudiées (et donc, en excluant cette étape des frontières de l'étude).

Tableau 2-1 : Principaux paramètres et conclusions des études répertoriées

Paramètre	Swedish National Road Administration Stripple (1995, 2001)	Athena Sustainable Materials Institute Trusty (1999, 2005)	Transportation Research Board Horvath and Hendrickson (1998)	Eurobitume Blomberg (1999)
Type d'étude	Analyse et comparaison de l'inventaire du cycle de vie des chaussées	ACV comparative des chaussées en termes d'énergie intrinsèque et de GES émis	Analyse de l'inventaire des chaussées extrêmement simplifiée, réalisé uniquement à partir de données publiques disponibles	Inventaire du cycle de vie « partiel » du bitume et « éco-profil » de l'enrobé bitumineux
Matériaux étudiés	Béton de ciment et enrobé bitumineux	Béton de ciment et enrobé bitumineux	Béton de ciment et enrobé bitumineux	Enrobé bitumineux
Fonction	Permettre le déplacement de véhicules routiers	Permettre le déplacement de véhicules routiers	Recouvrir une section de chaussée	Produire de l'enrobé bitumineux pour le recouvrement de chaussées
Unité fonctionnelle	Permettre le déplacement de véhicules routiers sur un segment de route de 1 km de long et de 13 m de large, évalué sur une période 40 ans	Permettre le déplacement de véhicules routiers sur 1 km d'une voie routière de 3,75 m de large sur une période de 40 ans (50 ans dans la mise à jour de 2005)	Recouvrir une section de route de 1 km de long et de 7,2 m de large.	Produire 1 kg d'enrobé bitumineux pour le recouvrement de chaussée
Contexte géographique	Contexte européen	Contexte canadien	Contexte américain	Contexte européen
Contexte temporel	La période considérée est de 40 ans. La plupart des données sont pour la période de 1990 à 1998.	La période considérée est de 40 ans originalement. Lors de la mise à jour de l'étude en 2006, la période a été changée pour 50 ans.	Non spécifié	Non spécifié
Processus et flux inclus	<ul style="list-style-type: none"> Extraction des matières premières Production des matériaux de construction Construction de la chaussée Entretien des chaussées et des bordures (fossés, coupe des herbes, etc.); Opération (systèmes d'éclairage, signalisation, épandage des sels). Gestion en fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> Extraction des matières premières Production des matériaux de construction Construction de la chaussée (incl. couches de fondation et de base) Entretien des chaussées et des bordures 	<ul style="list-style-type: none"> Extraction des matières premières Production des matériaux de construction 	<ul style="list-style-type: none"> Extraction du pétrole brut Transport vers l'Europe Raffinage Stockage du bitume
Processus et flux exclus	<ul style="list-style-type: none"> Circulation des véhicules 	<ul style="list-style-type: none"> Activités jugées communes aux deux types de chaussées : Construction de l'emprise routière, marquage, construction de barrières, restauration de l'emprise routière Déboisement initial Transport de l'enrobé ou du béton au chantier Machinerie de construction initiale et d'entretien Opérations de la chaussée (circulation des véhicules, éclairage, signalisation, sels fondants) 	<ul style="list-style-type: none"> Activités jugées communes aux deux types de chaussées : Fondation et sous-fondation Transports des matériaux Entretien de la chaussée Circulation des véhicules Éclairage et signalisation 	Aucun

Tableau 2-1 : Principaux paramètres et conclusions des études répertoriées

Paramètre	Swedish National Road Administration Stripple (1995-2001)	Athena Sustainable Materials Institute Trusty (1999-2006)	Transportation Research Board Horvath and Hendrickson (1998)	Eurobitume Blomberg (1999)
Hypothèses importantes	<ul style="list-style-type: none"> L'énergie, les ressources et les émissions relatives au trafic ne sont pas incluses, toutefois l'effet mécanique du trafic sur la route est considéré lors des étapes d'entretien. 	<ul style="list-style-type: none"> La chaussée est recyclée à 0 % et 20 % (2 scénarios) Les données sont adaptées aux spécificités régionales (production d'électricité, processus de production) 	<ul style="list-style-type: none"> Seul le revêtement a été pris en compte, tout le reste ayant été considéré identique pour les deux types de chaussées 	<ul style="list-style-type: none"> L'imputation des flux entrants et sortants est effectuée sur une base massique; L'enrobé bitumineux est un matériau de construction 100 % recyclable.
Énergie inhérente du bitume comptabilisée?	Oui	Oui	Non spécifiée	Non
Méthode d'ACVI	Non applicable (analyse de l'inventaire seulement)	Non spécifiée	Non applicable (analyse de l'inventaire seulement)	Non applicable (analyse de l'inventaire seulement)
Principales conclusions	<ul style="list-style-type: none"> L'énergie totale associée à la construction, l'opération et l'entretien de 1 km de route pendant 40 ans serait de 23 TJ pour la chaussée en enrobé et d'environ 27 TJ pour la chaussée en béton L'opération de la route serait le principal contributeur (12 TJ pour l'éclairage les feux de circulation) Les émissions de NO_x, SO₂ et CO₂ sont principalement liées à la construction de la route 	<ul style="list-style-type: none"> La consommation énergétique est nettement supérieure pour les chaussées en enrobé que pour celles en béton (de l'ordre de 200 à 300 % d'augmentation) Si on exclut l'énergie inhérente au bitume, la différence est moins importante (3 à 30 %) Les chaussées en enrobé présentent une diminution des émissions de GES potentiels de 41 à 82 % par rapport à celles du béton Le transport ne représente qu'une faible portion de l'énergie primaire consommée et des émissions de GES 	<ul style="list-style-type: none"> En tenant compte des incertitudes, la quantité de matières premières requise pour la construction des deux types de chaussée est sensiblement la même; Le scénario d'enrobé bitumineux semble générer plus de déchets toxiques que celui en béton de ciment. 	<ul style="list-style-type: none"> L'éco-profil d'1 kg de bitume est présenté : (consommation énergétique, principales émissions atmosphériques, rejets liquides et solides, quantité de matières premières requise) Environ 50 % de l'énergie primaire consommée et du CO₂ émis est causé par l'extraction du pétrole (env. 25 % pour la production du bitume) Environ 60% des NO_x sont causés par les transports Le stockage du bitume contribue à env. 7 % des émissions de CO₂ et de SO₂

3. MODÈLE D'ÉTUDE

Dans les sections qui suivent, la première phase de l'ACV, à savoir la définition des objectifs et du champ de l'étude, est décrite en suivant la norme ISO. Ce chapitre présente ainsi le modèle d'étude définissant le cadre méthodologique auquel doivent se conformer les phases subséquentes de l'ACV.

3.1 Objectifs de l'étude

3.1.1 *But de l'étude*

Cette étude avait pour but de comparer les impacts environnementaux potentiels du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (ci-après nommée « système BC ») de type dalles courtes goujonnées (DCG) à ceux d'une chaussée en enrobé bitumineux (ci-après nommée « système BB »). Dans les deux cas, il s'agit de designs considérés comme standards représentatifs des infrastructures.

3.1.2 *Application envisagée*

L'étude visait à permettre au MTQ d'améliorer sa compréhension des impacts environnementaux relatifs du cycle de vie des deux types de chaussées retrouvées sur le réseau autoroutier québécois. Elle visait ultimement à comparer les impacts environnementaux potentiels liés à la mise en œuvre d'une nouvelle chaussée en béton de ciment à ceux d'une nouvelle chaussée en béton bitumineux afin de fournir un indicateur environnemental à l'Oriente. Cette étude ne couvre pas le renouvellement des chaussées existantes.

3.1.3 *Public concerné*

Bien que l'étude soit destinée à un usage interne par le MTQ, ses résultats pourraient être rendus disponibles aux parties prenantes impliquées dans sa réalisation, soient les trois associations industrielles suivantes :

- Bitume Québec (BQ) ;
- Association canadienne du ciment (ACC) ;
- Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ).

De plus, bien qu'une divulgation publique des résultats ne soit pas prévue, ceux-ci appuieront une affirmation comparative utilisée dans un processus décisionnel du MTQ. Ils feront donc l'objet d'une revue critique par un comité de parties intéressées (voir sous-section 3.2.7).

3.2 Champ de l'étude

3.2.1 Fonctions, unité fonctionnelle et flux de référence

Les paragraphes qui suivent précisent la fonction étudiée, les fonctions secondaires, l'unité fonctionnelle et les flux de référence pour le cas à l'étude.

3.2.1.1 Fonctions

La fonction principale des deux types de chaussées étudiées est la suivante :

« Permettre le déplacement de véhicules routiers sur une distance donnée, pendant une période donnée ».

Il est à noter que, dans certains cas, lors de la réfection de la chaussée, des matériaux peuvent être récupérés et réutilisés ailleurs. Cette production de matériaux secondaires correspond alors à une deuxième fonction du système, qui devient ainsi multifonctionnel.

Pour les systèmes multifonctionnels d'une ACV comparative, il convient d'identifier les processus élémentaires qui confèrent le caractère multifonctionnel aux systèmes. Il s'agit ensuite de déterminer la part des impacts de ces processus qui doit être imputée aux systèmes étudiés et celle qui revient aux autres systèmes qui profitent des fonctions secondaires des processus multifonctionnels (dans ce cas-ci les matériaux récupérés et valorisés ailleurs).

Le traitement des fonctions secondaires est présenté à la sous-section 3.2.3.

3.2.1.2 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle résulte de la quantification de la fonction étudiée, soit le déplacement de véhicules routiers sur une distance donnée, pendant une période donnée.

Une distance de cinq kilomètres et une période de cinquante ans ont été précisées par le MTQ. Les étapes de démolition et de reconstruction n'ayant pas lieu à la même année pour tous les types de chaussées, cette période de cinquante ans est basée sur la durée de vie maximale des deux alternatives étudiées. De plus, comme il s'avère difficile de déterminer dans quelle mesure les prochains cycles de vie d'une chaussée reconstruite seront identiques au premier cycle suivant la construction initiale (p. ex. dans quels contextes et sous quelles conditions la fondation et la sous-fondation devront être remplacées ou modifiées?), l'analyse comparative est réalisée sur la première tranche de cinquante ans du cycle de vie de la chaussée initiale. Plus particulièrement, dans le cadre de cette étude comparative, l'unité fonctionnelle s'exprime de la manière suivante :

« Permettre le déplacement de véhicules routiers sur une distance de cinq kilomètres durant les cinquante premières années de vie d'une chaussée en béton de ciment comparativement à une chaussée en enrobé bitumineux construites au Québec en 2009 ».

3.2.1.3 Flux de référence

Les flux de référence pour cette étude correspondent aux fractions des flux entrants et sortants des systèmes imputables aux cinquante premières années de vie de 5 km de chaussée.

3.2.2 Frontières et description des systèmes

Les paragraphes suivants présentent une description générale des systèmes étudiés et précisent les processus et flux initialement exclus des frontières, de même que les frontières géographiques et temporelles.

3.2.2.1 Description générale des systèmes

La Figure 3-1 schématise les frontières des systèmes étudiés (cette représentation schématique est davantage détaillée à l'Annexe C). Rappelons qu'il s'agit d'une analyse comparative complète de type « *cradle-to-grave* », c.-à-d. comprenant chacune des étapes du cycle de vie des chaussées, de la construction initiale d'un nouveau tronçon, à la reconstruction complète en fin de vie.

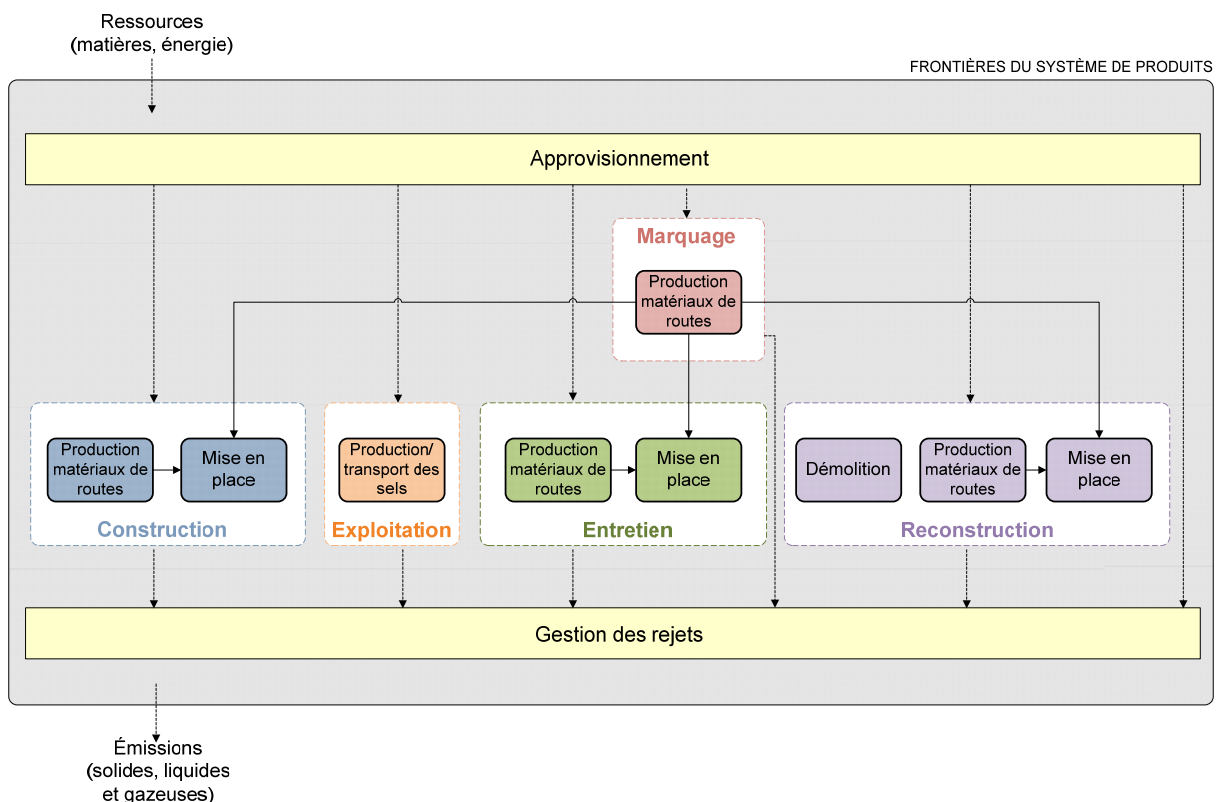


Figure 3-1 : Frontières des systèmes.

Notons aussi que la spécification du nombre de véhicules circulant sur un tronçon du réseau autoroutier, plus particulièrement le nombre de camions, ainsi que le type de trafic (urbain vs rural) permet au MTQ de distinguer seize cas-types de circulation (tels que définis au Tableau 3-1). Les cas-types se différencient par le nombre de voies et le

dimensionnement structural de la chaussée elle-même, et ce, pour chacun des deux types de chaussée ce qui fait 32 cas-types en tout (tels que détaillés au Tableau 3-2).

Tableau 3-1 : Cas-types de chaussée spécifiés par le MTQ

TYPE DE TRAFIC		URBAIN		RURAL	
% DE CAMIONS		5	10	10	25
Nombre de voies	Trafic (000) ¹	Numéro du cas-type			
2	20	# 1	# 2	# 3	# 4
	40	# 5	# 6	# 7	# 8
3	50	# 9	# 10	# 11	# 12
	90	# 13	# 14	# 15	# 16

¹ : Trafic quotidien (en nombre de véhicules)

Tableau 3-2 : Épaisseurs des couches de la chaussée pour les cas-types spécifiés par le MTQ

TYPE DE TRAFIC		URBAIN		RURAL		
% DE CAMIONS		5	10	10	25	
Nb de voies	Trafic (000)	Épaisseur des couches (mm)				
Cas des chaussées en béton de ciment						
2	20	Béton de ciment	162 <u>150</u>	190 <u>150</u>	217 <u>150</u>	275 <u>150</u>
		Fondation MG-20 ¹	150 <u>162</u>	150 <u>190</u>	150 <u>217</u>	150 <u>275</u>
		Sous-fondation MG-112 type A ¹	929 <u>929</u>	885 <u>885</u>	843 <u>843</u>	756 <u>756</u>
2	40	Béton de ciment	186 <u>150</u>	214 <u>150</u>	242 <u>150</u>	304 <u>150</u>
		Fondation MG-20	150 <u>186</u>	150 <u>214</u>	150 <u>242</u>	150 <u>304</u>
		Sous-fondation MG-112 type A	890 <u>890</u>	847 <u>847</u>	805 <u>805</u>	713 <u>713</u>
3	50	Béton de ciment	187 <u>150</u>	214 <u>214</u>	242 <u>242</u>	305 <u>305</u>
		Fondation MG-20	150 <u>187</u>	150 <u>150</u>	150 <u>150</u>	150 <u>150</u>
		Sous-fondation MG-112 type A	889 <u>889</u>	847 <u>847</u>	805 <u>805</u>	712 <u>712</u>
3	90	Béton de ciment	198 <u>198</u>	225 <u>225</u>	254 <u>254</u>	318 <u>318</u>
		Fondation MG-20	150 <u>150</u>	150 <u>150</u>	150 <u>150</u>	150 <u>150</u>
		Sous-fondation MG-112 type A	872 <u>872</u>	830 <u>830</u>	788 <u>788</u>	693 <u>693</u>
Cas des chaussées en enrobé bitumineux						
2	20	Enrobé bitumineux	184 <u>90</u>	209 <u>90</u>	237 <u>105</u>	293 <u>143</u>
		Fondation MG-20 ¹	281 <u>375</u>	293 <u>412</u>	298 <u>430</u>	324 <u>474</u>
		Sous-fondation MG-112 type A ¹	776 <u>776</u>	723 <u>723</u>	675 <u>675</u>	564 <u>564</u>

Tableau 3-2 : Épaisseurs des couches de la chaussée pour les cas-types spécifiés par le MTQ

		TYPE DE TRAFIC	URBAIN		RURAL	
		% DE CAMIONS	5	10	10	25
Nb de voies	Trafic (000)	Épaisseur des couches (mm)				
2	40	Enrobé bitumineux	206 <u>90</u>	233 <u>103</u>	263 <u>120</u>	318 <u>164</u>
		Fondation MG-20	293 <u>409</u>	304 <u>434</u>	305 <u>448</u>	345 <u>499</u>
		Sous-fondation MG-112 type A	727 <u>727</u>	674 <u>674</u>	629 <u>629</u>	504 <u>504</u>
3	50	Enrobé bitumineux	207 <u>90</u>	234 <u>234</u>	263 <u>263</u>	319 <u>319</u>
		Fondation MG-20	291 <u>408</u>	301 <u>301</u>	310 <u>310</u>	343 <u>343</u>
		Sous-fondation MG-112 type A	728 <u>728</u>	676 <u>676</u>	624 <u>624</u>	505 <u>505</u>
3	90	Enrobé bitumineux	217 <u>217</u>	245 <u>245</u>	274 <u>274</u>	330 <u>330</u>
		Fondation MG-20	297 <u>297</u>	306 <u>306</u>	311 <u>311</u>	356 <u>356</u>
		Sous-fondation MG-112 type A	706 <u>706</u>	654 <u>654</u>	607 <u>607</u>	475 <u>475</u>

Pour chaque cas-type, le premier nombre réfère aux voies de roulement, le second (souligné) aux accotements

Largeur des voies de roulement : 3,7 m

Largeur des accotements : 2 voies (1,3 m à gauche, 3 m à droite), 3 voies (3 m de chaque côté)

¹ : Pour les accotements : couches granulaires non-liées

Le cycle de vie de la chaussée débute donc avec l'**étape de construction initiale** d'un nouveau tronçon. Il s'agit plus particulièrement de la construction complète d'une chaussée, en partant de la mise en place des matériaux de fondation jusqu'au marquage de la chaussée.

L'**étape d'exploitation** inclut quant à elle l'épandage des sels fondants durant la période hivernale, tandis que l'**étape d'entretien** de la chaussée regroupe la séquence des interventions présentée au Tableau 3-3 durant la période de cinquante ans, ainsi que les rafraîchissements du marquage.

En fin de vie, la dalle de béton de ciment ou la couche d'enrobé bitumineux de la chaussée est complètement remplacée. L'**étape de reconstruction** vise donc la démolition complète des voies de roulement et d'accotement, de même que la mise en place et le marquage d'une nouvelle dalle de béton de ciment (ou d'une nouvelle couche d'enrobé) de même épaisseur. À noter, la reconstruction n'inclut pas la fondation et la sous-fondation. Comme la reconstruction peut intervenir à différents moments pour les seize cas-types, les impacts environnementaux pour cette dernière ont été imputés aux systèmes de produits au prorata des années incluses dans la période de cinquante ans considérée dans la présente étude sur la durée de vie de la reconstruction. Par exemple, pour le cas-type 16 pour la chaussée en béton de ciment, la reconstruction est multipliée par un facteur 4/46, soit le nombre d'année permettant d'atteindre le cycle de 50 ans considéré divisé par la durée de vie de la dalle de béton.

Enfin, les sous-systèmes d'arrière-plan « **approvisionnement** » et « **gestion des rejets** » concernent respectivement, pour chacun des quatre sous-systèmes d'avant-

plan précédents (construction, exploitation, entretien, reconstruction), toutes les activités reliées :

- À l'approvisionnement en ressources (eau, énergie, produits chimiques, matériaux), comprenant l'extraction, le traitement et la transformation des ressources naturelles, de même que les différents transports requis jusqu'à l'arrivée aux sites d'utilisation des ressources.
- Au transport et au traitement des déchets générés à l'une ou l'autre de ces étapes du cycle de vie, en tenant compte des mises en valeur possibles (réutilisation, recyclage, valorisation énergétique ou autres).

Tableau 3-3 : Séquence d'interventions pour les cas-types spécifiés par le MTQ

Intervention	No	Moment des travaux (année)			
		Cas 1, 2, 3, 5, 6, 9, 10, 13, 14	Cas 4, 7, 11, 15	Cas 8 et 12	Cas 16
Cas des chaussées en béton de ciment (de type DCG)					
Construction en béton de ciment avec DCG (rainurage transversal conforme)*	1	0	0	0	0
Regarnissage de 25 % des joints	2	10	10	10	10
Réparations mineures 0,5 %, regarnissage de tous les joints et meulage 25 %	3	19	19	19	19
Réparations majeures 4%, meulage (25%) et grenailage (75%)	4	29	29	29	29
Correction à l'enrobé (60 kg/m ²) et resurfaçage en enrobé (120 kg/m ²)*	5	39	39	39	39
Reconstruction de la dalle de béton de ciment seulement*	6	50	49	47	46
Cas des chaussées en enrobé bitumineux					
Construction complète en enrobé	1	0	0	0	0
Planage (40 mm) et resurfaçage (100 kg/m ²)	2	14	12	10	9
Planage (50 mm) et resurfaçage (120 kg/m ²)*	3	27	23	19	17
Planage (50 mm) et resurfaçage (120 kg/m ²)*	4	39	33	27	25
Planage (50 mm) et resurfaçage (120 kg/m ²) *	5	---	---	34	32
Enlèvement complet du revêtement et pose d'un nouvel enrobé *	6	49	42	40	38
Planage (40 mm) et resurfaçage (100 kg/m ²) *	7	---	---	---	47

*Accotements inclus dans l'intervention

3.2.2.2 Processus et flux exclus des frontières

Les éléments suivants sont a priori exclus des frontières :

- Les **activités humaines** (p.ex. : déplacements quotidiens des employés) et
- Le **cycle de vie des biens-capitaux impliqués** (p.ex. : la fabrication, l'entretien et la gestion en fin de vie de la machinerie utilisée dans la construction de la chaussée), à l'exception de ceux déjà compris dans les modules de données *ecoinvent* qui seront utilisés dans le modèle ACV (voir paragraphe 3.2.4.1).

De plus, l'ACV comparative doit porter une attention particulière aux processus qui diffèrent entre les systèmes comparés. Ainsi, tous les processus jugés identiques ou ne pouvant être différenciés entre les deux types de chaussées n'ont pas été considérés. Plus précisément, les éléments suivants ne sont pas inclus :

- Le déboisement initial.
- Les activités de déneigement et de maintien des bordures (fossés, désherbage, etc.) liées à l'exploitation des chaussées.
- Les processus associés au cycle de vie des clôtures et parapets, des panneaux de signalisation et du système d'éclairage.
- La circulation routière.

3.2.3 Approche d'imputation

Cette sous-section présente les règles employées pour l'imputation des impacts associés aux fonctions secondaires du système, soient la production de bitume et de diesel (une raffinerie est à l'origine de plusieurs coproduits) et la génération de sous-produits valorisés en dehors des limites de l'étude (matériaux récupérés de la chaussée existante).

Notons qu'il est possible d'éviter l'imputation des impacts associés aux fonctions secondaires en élargissant les frontières du système de manière à inclure les processus affectés par ces fonctions (p. ex., en créditant au système l'impact de la production de matériaux vierges évitée par le recyclage). Cette approche étant normalement réservée aux ACV dites « conséquentielles », élaborées pour évaluer les conséquences du système étudié sur d'autres systèmes ou pour orienter des décisions spécifiques, elle aurait pu être employée ici afin de comparer les résultats obtenus selon divers choix d'imputation.

3.2.3.1 Cas du raffinage

Le raffinage étant un procédé multifonctionnel, il a été subdivisé en sous-processus à fonction unique. Cela fait en sorte que la raffinerie regroupe des ensembles de sous-raffineries traitant individuellement chacune des fractions du pétrole brut. Le sous-processus de production du bitume est alors considéré comme un système monofonctionnel, et la production d'un kilogramme de bitume peut être suivie d'un bout à l'autre (du puits de pétrole jusqu'à sa production finale à la raffinerie). Plus précisément, les données sur la consommation d'énergie et sur les émissions ont pu être fournies pour la production spécifique d'un kilogramme de bitume plutôt que pour la totalité des

activités de la raffinerie, ce qui évite de recourir à une imputation massique sur l'ensemble des produits de la raffinerie.

3.2.3.2 Cas des matériaux valorisés hors des frontières

En ce qui a trait aux matériaux recyclés, les processus d'obtention de ces derniers sont imputés à 100 % à l'utilisateur de ces matières. Et donc, les processus de génération des matériaux recyclés utilisés dans la construction de la sous-fondation et dans les revêtements d'enrobé (concassage, broyage, fraisage etc.) sont considérés dans le système à l'étude, et les processus de génération des matériaux recyclés sortis du chantier ne sont pas considérés dans le système (puisque la responsabilité est alors imputée à un autre utilisateur).

3.2.4 *Données d'inventaire du cycle de vie (ICV)*

Cette sous-section présente un aperçu des sources de données privilégiées, ainsi que les exigences relatives à la qualité des données employées. Ces exigences ont permis d'orienter le processus de collecte et de valider les données utilisées.

3.2.4.1 Sources de données

Cette ACV a pour but de fournir des données environnementales relatives à la comparaison du cycle de vie de deux types de chaussées québécoises. Elle a été réalisée de manière à privilégier les **données primaires** et actuelles disponibles, soit les données récentes, spécifiques aux installations québécoises, ainsi qu'aux règles d'art et pratiques réelles employées au Québec. Ces données ont été obtenues des associations industrielles parties prenantes au projet (BQ, l'ACC et l'ACRGTQ), de la raffinerie Pétro-Canada de Montréal et du MTQ.

Les données manquantes, incomplètes ou non facilement accessibles ont été complétées par des hypothèses et des **données secondaires**. Il s'agit de données génériques ou théoriques issues de la littérature et des banques de données ACV commerciales. Parmi les données secondaires disponibles, quelques banques de données ACV sont reconnues par la communauté scientifique internationale, plus particulièrement la banque d'origine européenne *ecoinvent* version 2.0 (www.ecoinvent.ch). Cette dernière est effectivement la plus complète disponible à ce jour et surpasse de loin les autres tant du point de vue quantitatif (nombre de processus inclus) que qualitatif (qualité des procédés de validation et de la documentation, complétude des données, etc.).

3.2.4.2 Exigences relatives à la qualité des données

La fiabilité des résultats et des conclusions de l'ACV dépend de la qualité des données d'inventaire utilisées. Il est donc important de s'assurer que ces données respectent les exigences spécifiées en accord avec l'objectif de l'étude.

Selon la norme ISO, les exigences relatives à la qualité des données devraient au minimum en assurer la **validité**, ce qui est équivalent ici à leur représentativité quant à l'âge, la provenance géographique et la performance technologique. Ainsi, les données utilisées devaient être représentatives :

- De la période définie par l'unité fonctionnelle, soit de l'année 2009 à 2059 ;
- Du contexte géographique dans lequel s'inscrivent les systèmes à l'étude ;
- Des caractéristiques technologiques des processus élémentaires qu'elles décrivent.

Il est à noter que les banques de données ICV disponibles à ce jour sont plus ou moins représentatives du contexte québécois et canadien dans lequel s'inscrivent les systèmes comparés. Ces banques présentent en effet des moyennes technologiques représentatives du contexte européen pour la plupart. Elles peuvent cependant être adaptées, dans la mesure où les données qu'elles contiennent sont suffisamment désagrégées et que l'information disponible le permet. Par exemple, certaines données européennes relatives à la production de différents matériaux font référence à d'autres données (pour la production de l'énergie requise par exemple). Ces dernières peuvent alors être remplacées par une donnée de production d'énergie plus spécifique au contexte québécois, améliorant ainsi la représentativité géographique des données européennes disponibles pour la production ou la transformation de matériaux.

Ainsi, bien que la majeure partie des modules de données génériques employées dans le cadre de cette étude ait été tirée directement de la banque *ecoinvent*, plusieurs de ces modules ont été adaptés de manière à augmenter leur représentativité des produits et du contexte analysés. Plus particulièrement, pour toutes les activités ayant lieu au Québec (étapes de production de diesel, de ciment et de bitume, de béton de ciment et d'enrobé bitumineux, de construction, d'exploitation et d'entretien des chaussées), les modules *ecoinvent* ont été adaptés en remplaçant les mélanges d'approvisionnement en énergie des réseaux électriques (ou *grid mix*) européens par :

- Le *grid mix* québécois pour les processus d'avant-plan, c.-à-d. les processus directement liés aux systèmes étudiés (par ex. : la consommation d'électricité pendant la production du ciment et du bitume, du ciment de béton, de l'enrobé bitumineux, du diesel, des matières granulaires) ;
- Le *grid mix* nord-américain pour les processus d'arrière-plan, c.-à-d. tous les processus directement et indirectement liés aux processus d'avant-plan (par ex. : toutes les ressources consommées pour la production de l'électricité nécessaire durant la production des matériaux de construction des chaussées). Le *grid mix* nord-américain est ici plus approprié considérant que l'approvisionnement et la gestion des déchets générés aux diverses étapes du cycle de vie ne s'effectuent pas seulement au Québec. Ainsi, tous les processus d'avant-plan ayant lieu au Québec (incluant les divers transports) font appel à des processus d'arrière-plan adaptés au contexte énergétique nord-américain.
- Tel que spécifié par la raffinerie Pétro-Canada de Montréal et tel que décrit à l'Annexe E, le pétrole brut à l'origine du bitume des chaussées en enrobé et du diesel utilisé par tous les équipements mécaniques et lors des transports routiers au Québec a été modélisé comme étant mexicain. L'électricité consommée durant son chargement sur le pétrolier au Mexique a donc été modélisée sur la base du *grid mix* mexicain tel que présenté par la librairie nationale d'énergie du *Global Energy Network Institute* (www.geni.org). L'électricité consommée durant son transport par pipeline de Portland à Montréal a quant à elle été modélisée à 60 % sur la base du *grid mix* de la Nouvelle-Angleterre tel que présenté sur le site du U.S.EPA (www.epa.gov) et à 40 % sur la base du *grid mix* québécois.

Enfin, bien qu'aucune méthode particulière ne soit actuellement prescrite par l'ISO concernant la **complétude** et la **précision** des données, les recommandations suivantes devaient être considérées :

- Les données ont été collectées de manière à ce qu'elles soient les moins agrégées possible (agrégations par types de technologies ou par secteurs à éviter).
- Les données ont été documentées (métadonnées) conformément aux meilleures pratiques disponibles.

L'application de ces recommandations permettra ultérieurement l'évaluation de la complétude et de la précision des données utilisées en ACV.

3.2.5 Évaluation des impacts du cycle de vie (ACVI)

Il était initialement proposé de réaliser l'évaluation des impacts du cycle de vie (ACVI) sur la base de la méthode canadienne LUCAS (Toffoletto *et al.*, 2007). Cependant, il a plutôt été décidé d'établir l'ACVI sur la méthode internationalement reconnue IMPACT 2002+ (Jolliet *et al.*, 2003) et de vérifier si l'utilisation de LUCAS entraînait des variations sur les résultats. Cette dernière est en effet limitée à l'étape de caractérisation, c.-à-d. à la conversion et l'agrégation des résultats d'inventaire selon leur contribution à chacune des catégories d'impacts. Ainsi, contrairement à IMPACT 2002+, LUCAS ne propose aucun facteur de conversion en dommages des résultats caractérisés. Bien que la conversion des impacts en dommages introduise une incertitude supplémentaire, l'analyse de quatre catégories de dommage, relativement à plus de dix catégories d'impact, possède l'avantage de simplifier la communication des résultats.

Le Tableau 3-4 présente les catégories d'impacts considérées par chacune des deux méthodes (lesquelles sont présentées en détail à l'Annexe D). Notons que :

- Ces catégories ne couvrent pas tous les impacts environnementaux possibles associés aux activités humaines. Plusieurs types d'impacts, dont le bruit, les odeurs, le rayonnement et les champs électromagnétiques ne font ainsi pas partie de la présente analyse, les développements méthodologiques à leur sujet demeurant manquants ou insuffisants.
- L'eutrophisation aquatique et l'acidification aquatique ne sont pas considérées par les indicateurs de dommage, puisque que la méthode IMPACT 2002+ ne possède à ce jour aucune méthode permettant de convertir ces deux catégories d'impacts en dommage à la qualité des écosystèmes. Il est donc recommandé de considérer les résultats d'indicateur de dommage en conjonction avec les indicateurs d'impact pour ces catégories.

Enfin, il est aussi à noter qu'IMPACT 2002+ permet de normaliser les indicateurs de dommage en équivalent européen moyen, puis de les agréger en un score unique (en appliquant implicitement un facteur de pondération identique égal à 1). Bien qu'une telle pondération soit proscrite par l'ISO dans le cas d'affirmations comparatives divulguées publiquement (étant donné l'importance des choix de valeurs impliqués), certains résultats pondérés sont ici présentés de manière à en faciliter la communication (en particulier les résultats d'études de sensibilité annexés au rapport).

Tableau 3-4 : Catégories de dommage et catégories d'impact des méthodes IMPACT 2002+ et LUCAS

IMPACT 2002+		LUCAS
Catégorie de dommage	Catégorie d'impact	Catégorie d'impact
Santé humaine (SH)	Effets cancérogènes	Effets cancérogènes
	Effets non-cancérogènes	Effets non-cancérogènes
	Effets respiratoires dus aux substances inorganiques	Aucune
	Radiations ionisantes	
	Détérioration de la couche d'ozone	Appauvrissement de la couche d'ozone
	Effets respiratoires dus aux substances organiques	Smog photochimique
Qualité des écosystèmes (QE)	Écotoxicité aquatique	Écotoxicité aquatique
	Écotoxicité terrestre	Écotoxicité terrestre
	Acidification/eutrophisation terrestre	Eutrophisation terrestre
	Occupation des terres	Aucune
Changement climatique (CC)	Réchauffement global	Réchauffement global
Ressources (R)	Énergies non renouvelables	Combustibles fossiles
	Extraction minière	Extraction minière
Aucun lien avec une catégorie de dommage (lien reconnu mais aucun modèle de conversion disponible)	Acidification aquatique	Acidification aquatique
	Eutrophisation aquatique	Eutrophisation aquatique

3.2.5.1 Notes sur la prise en compte de l'énergie inhérente au bitume

Le choix de considérer ou non l'énergie inhérente au bitume est une question récurrente en ACV. Les méthodes ACVI les plus récentes sont cependant claires sur un point : toute ressource énergétique non renouvelable extraite au capital énergétique de la Terre est une ressource potentiellement perdue qui doit être comptabilisée dans l'évaluation des impacts (Goedkoop et Spriensma, 2001b; Bare *et al.*, 2003; Jolliet *et al.*, 2003; Toffoletto *et al.*, 2007). Ainsi, si le pétrole extrait pour produire du bitume n'est pas destiné à être utilisé comme source énergétique mais comme matière première, la conséquence sur les ressources énergétiques n'est pas pour autant différente que si ce même pétrole était destiné à produire un carburant : la ressource diminue et, avec elle, le potentiel énergétique disponible.

Il importe de noter que ce raisonnement s'applique à l'ensemble des dérivés du pétrole dont la fonction n'est pas énergétique : bitumes, plastiques, extraits aromatiques, parfums, etc. Ainsi, le pouvoir calorifique (ou énergie inhérente) demeure contenu dans ces différents produits tout au long de leur cycle de vie. Si cette énergie semble « perdue », elle est en réalité stockée et pourrait donc éventuellement être valorisée. À ce titre, le fait que le bitume puisse être maintes fois recyclé sous forme matérielle n'influe en rien son pouvoir calorifique qui reste intact.

Par conséquent, il apparaît essentiel de considérer l'énergie inhérente au bitume dans l'évaluation des impacts potentiels des revêtements. Cette prise en compte n'apparaît en outre qu'au niveau de l'utilisation d'énergie non renouvelable, et n'a aucune incidence sur les autres catégories d'impacts. Les émissions de CO₂ associées à la combustion éventuelle du bitume ne sont donc pas comptabilisées et ne le seront pas tant que le bitume ne sera pas brûlé.

De manière à tester la robustesse des résultats obtenus à partir d'IMPACT 2002+, une étude de sensibilité a cependant été réalisée à partir de la méthode *Eco-indicator 99* (Goedkoop et Spriensma, 2001a), laquelle est présentée en détail sur le site de Pré Consultants (http://www.pre.nl/download/EI99_methodology_v3.pdf). En effet, bien qu'elles soient similaires, les deux méthodes modélisent différemment la consommation d'énergie non renouvelable, soit en termes :

- D'énergie primaire totale, calculée en fonction du pouvoir calorifique supérieur de la ressource (IMPACT 2002+).
- D'énergie "surplus", c.-à-d. en comptabilisant l'effort additionnel requis pour extraire une ressource dont la qualité est diminuée (*Eco-indicator 99*). Les facteurs de caractérisation sont donc ici calculés en considérant les effets à long terme de la réduction de la qualité de la ressource.

Il est aussi important de noter qu'*Eco-indicator 99* est également une méthode d'évaluation orientée « dommages » considérant onze catégories d'impact mais pour laquelle :

- L'acidification et l'eutrophisation aquatiques ne sont pas considérées (même en termes d'indicateurs d'impacts).
- L'impact du réchauffement global est caractérisé en dommage potentiel sur la santé humaine. Il en suit donc que trois indicateurs de dommage résultent de cette méthode, plutôt que quatre selon la méthode IMPACT 2002+.

Cette méthode présente par ailleurs l'avantage d'être disponible en trois versions basées sur le concept de Théorie Culturelle. Ce concept est utilisé afin de résoudre les difficultés liées à la subjectivité lors de modélisations et de celui-ci découle de cinq systèmes de valeur basés sur l'influence qu'ont le groupe d'appartenance et la société sur les individus. Dans la méthode *Eco-indicator 99*, les trois perspectives suivantes sont considérées, ce qui permet à l'utilisateur de choisir la méthode la plus adaptée à ces besoins :

- Égalitaire (E) : Perspective à long terme où tous les effets sont considérés
- Hiérarchique (H) : Perspective à moyen terme où un consensus scientifique détermine l'inclusion des effets
- Individualiste (I) : Perspective à court terme où seuls les effets prouvés sont considérés.

3.2.6 Méthode de calcul et présentation des résultats selon une approche modulaire

Une fois l'ensemble des données requises obtenues, les systèmes ont été modélisés à l'aide d'un logiciel commercial d'ACV. Le logiciel SimaPro, développé par PRÉ Consultants (www.pre.nl), a été utilisé pour le calcul de l'inventaire et l'évaluation des impacts environnementaux potentiels associés aux émissions inventoriées.

À la demande du MTQ, une matrice des résultats d'indicateurs d'impacts par processus (ou étape du cycle de vie) a aussi été élaborée. Comme présentée à l'Annexe F (aux Tableaux F-3.1.1 et F-3.2.1) chaque module (ou ligne de la matrice) :

- Permet de spécifier en entrée les paramètres de chaussée essentiels (c.-à-d. les quantités de matériaux consommés et les distances de transport impliquées, de même que l'intensité des procédés de mise en place des chaussées).
- Fournit, pour chacun de ces paramètres, un résultat d'indicateur par catégorie d'impact et de dommage.

Le profil environnemental d'un cas-type est ensuite obtenu, pour chaque type de chaussée, par la somme des indicateurs de l'ensemble des modules qui le compose. Ceci permet d'évaluer rapidement les impacts potentiels correspondants à une variété de configurations et de situations envisageable sur le réseau autoroutier. Il est cependant important de mentionner que, dans ce contexte d'analyse comparative où les éléments communs aux deux systèmes ont été exclus de l'étude, la présentation des profils individuels correspondants à chaque type de chaussée n'est pas adéquate, surtout en considérant le fait que seules les quantités différentielles ont été collectées pour les sels fondants. Ainsi, seuls les profils comparatifs entre deux alternatives devraient être utilisés (tels que présentés à l'Annexe F au Tableau F-4.1, onglet 4).

3.2.7 Revue critique

La revue critique est une procédure utilisée afin de vérifier si l'ACV satisfait aux normes internationales. De manière générale, les revues critiques d'ACV sont facultatives, sauf lors d'affirmations comparatives divulguées au public. Une ACV réalisée dans le but de supporter une comparaison destinée à des fins publiques nécessite effectivement une attention particulière, étant donné les risques associés à une mauvaise interprétation de ses résultats par les diverses parties prenantes. Les revues critiques augmentent de plus la crédibilité de l'analyse.

Puisque cette étude implique différentes parties prenantes et que ses résultats seront utilisés dans le cadre de l'Orientation du MTQ, une revue critique a été réalisée par un comité de revue ayant les compétences pour valider les hypothèses, données et procédures utilisées pour réaliser l'étude. Ce comité de revue est placé sous la responsabilité de Yannick Le Guern, manager de BIO Intelligence Service S.A.S., et diplômé du mastère spécialisé « Eco-conception et management environnemental » de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.

Conformément à ISO 14 040, les objectifs de la revue critique étaient d'assurer que :

- Les méthodes utilisées par Le CIRAIG pour réaliser l'analyse du cycle de vie sont cohérentes avec la norme internationale ISO 14040 ;
- Les méthodes utilisées par Le CIRAIG pour réaliser l'analyse du cycle de vie sont valables d'un point de vue technique et scientifique ;
- Les données utilisées par Le CIRAIG sont appropriées et raisonnables par rapport à l'objectif de l'étude ;
- Les interprétations du CIRAIG reflètent les limitations identifiées et l'objectif de l'étude ;
- Le rapport détaillé est transparent et cohérent.

En plus de ces objectifs, la revue critique comprend une vérification approfondie de certains résultats clés et de la modélisation du système de produits effectuée avec le

logiciel ACV SimaPro. Les résultats de la revue (commentaires et questions du comité de revue et réponses du CIRAIG) sont présentés en Annexe G.

3.2.8 Applications et limites de l'ACV

Cette ACV, qui vise à améliorer la compréhension du MTQ des impacts environnementaux relatifs du cycle de vie des deux types de chaussées représentatives du réseau autoroutier québécois, a été réalisée dans un but strictement comparatif. Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent donc être évitées.

Ses résultats peuvent être utilisés pour cibler les forces et les faiblesses relatives des deux types de chaussées selon différents cas-types, de manière à pouvoir identifier les conditions pour lesquelles une alternative semble préférable à l'autre.

Les principales limites pouvant toutefois être soulevées relativement aux conclusions obtenues sont les suivantes :

- L'applicabilité des diverses hypothèses relatives au cycle de vie des chaussées en béton de ciment et en enrobé bitumineux au Québec, entre 2009 et 2059. Il est à noter que bien que les technologies risquent de varier à l'intérieur des cinquante années considérées, personne n'a actuellement le recul nécessaire pour caractériser avec précision l'évolution des techniques de production et le comportement des routes. Par conséquent, le système technologique à l'étude sera considéré statique.
- La complétude et la validité des données d'inventaire. En particulier, l'utilisation de données secondaires provenant de banques de données ACV européennes peut influencer la validité des résultats dans un contexte nord-américain et québécois.
- La complétude et la validité des méthodes d'évaluation des impacts utilisées, notamment parce qu'elles ne couvrent pas toutes les substances inventoriées, ni tous les impacts environnementaux associés aux activités humaines. Également :
 - Les catégories d'impact de santé humaine « cancer » et « non-cancer » et d'écotoxicité ne sont pas une mesure du risque associé aux systèmes évalués. En effet, les différentes émissions sont agrégées dans le temps et l'espace afin de constituer un inventaire dans lequel un seul flux est associé à chacune des substances répertoriées (c.-à-d. la masse totale émise par l'ensemble des processus qui la produisent). Il n'est donc pas possible de connaître le lieu, ni le moment où ont lieu les émissions et donc, d'identifier la quantité à laquelle est exposée une région donnée, l'information sur laquelle repose l'appréciation du risque pour une population donnée.
 - Contrairement à l'analyse de risque environnemental conduite dans un contexte réglementaire et qui utilise une approche conservatrice, l'ACV tente de fournir la meilleure estimation possible (Udo de Haes et al., 2003). En effet, l'ACVI tente de représenter le cas le plus probable, c.-à-d. que les modèles utilisés, soient les modèles de transport et de devenir des contaminants dans l'environnement et d'effet toxique sur les récepteurs biologiques, ne tentent pas de maximiser l'exposition et le dommage

environnemental (approche du pire scénario) mais bien d'en représenter un cas moyen.

- Le fait que certains paramètres possiblement sans influence sur le profil environnemental des deux types de chaussées, mais pouvant constituer des éléments plus importants du point de vue des utilisateurs, n'aient pas été pris en compte dans la présente ACV (p. ex. : bruit induit par la circulation routière, usure des pneus, effet d'îlot de chaleur urbaine et « réflectance » des chaussées).

4. ANALYSE DE L'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE

Ce chapitre présente la deuxième phase de l'ACV : l'analyse de l'inventaire. Il expose la méthodologie de collecte et les sources de données employées, le détail des systèmes étudiés et des hypothèses utilisées, ainsi qu'une analyse des résultats d'inventaire.

4.1 Méthodologie de collecte et sources des données

Comme indiqué à la sous-section 3.2.4, les **données primaires** ont essentiellement été collectées auprès du MTQ, des associations industrielles parties prenantes au projet et de la raffinerie Pétro-Canada de Montréal (ci-après nommés les « partenaires »). Plus particulièrement :

- Les données de consommation et de transport sur la **production de bitume et de diesel** représentatives de l'ensemble des raffineries de Montréal, ont été spécifiées sur la base de la raffinerie Pétro-Canada de Montréal (données fournies par M. René Dufresne). Les émissions associées à la raffinerie ont été tirées du site de l'Inventaire national des rejets de polluant (INRP) d'Environnement Canada pour l'année 2006, les facteurs de mises à l'échelle de celles-ci au kilogramme de bitume ont été fournis par M. Dufresne. Plus précisément, la consommation d'énergie totale annuelle de la raffinerie et la consommation d'énergie pour la production de 1 kg de bitume ont été spécifiées, ce qui a permis de convertir les données annuelles d'émissions et d'obtenir les émissions par kilogramme de bitume produit.
- Les données sur la **production du ciment et du béton de ciment** ont été fournies par l'ACC sur la base de ses trois cimenteries québécoises, et sont tirées des rapports d' *Athena Sustainable Materials Institute* (2005) et de CANMET et Radian Canada Inc. (1993). Les émissions associées aux cimenteries ont aussi été trouvées sur le site de l'INRP pour l'année 2006, les facteurs de mise à l'échelle de celles-ci au kilogramme de ciment ont été fournis par M. George Venta de l'ACC.
- Les données sur la **production d'enrobé bitumineux** et sur les **activités ayant lieu sur les chantiers routiers** ont été fournies par l'ACRGQTQ.
- La description détaillée des cas-types (quantités et types de matériaux utilisés, interventions durant les **étapes de construction initiale, d'exploitation, d'entretien, et de reconstruction**) a été fournie par M. Denis Thébeau, et les données relatives au marquage par M. Michel Tremblay du MTQ.

Le processus de collecte a été assuré par l'entremise de questionnaires (transmis par voie électronique), de discussions téléphoniques et de rencontres individuelles. Les données ont été transmises directement par les partenaires au CIRAIG. Les informations fournies sont présentées en détail à l'Annexe E et à l'Annexe F.

Diverses hypothèses ont par ailleurs été établies, notamment sur la base des indications fournies par le MTQ. Ces hypothèses sont aussi documentées en Annexe E.

Enfin, tous les processus impliqués aux diverses étapes du cycle de vie des chaussées pour lesquels des données primaires n'ont pas été obtenues ont été modélisés sur la

base de **données secondaires** disponibles. Un tableau récapitulatif des données secondaires utilisées est présenté à l'Annexe F de ce rapport.

Puisque la plupart des processus élémentaires figurant dans les systèmes à l'étude se retrouvaient dans la banque de données ICV *ecoinvent*, et afin de maximiser l'uniformité et la cohérence des données utilisées pour les modéliser, cette banque de données a été privilégiée et adaptée lorsque possible (plus particulièrement en ce qui a trait au contexte énergétique nord-américain, tel que discuté au paragraphe 3.2.4.2). Il est cependant important de noter que plusieurs processus sans équivalent exact dans la banque de données *ecoinvent* ont dû être modélisés soit à partir de données substitutives (*proxy*), soit à partir d'autres sources.

En particulier, la machinerie requise aux différentes interventions de construction, d'entretien et de reconstruction a été caractérisée sur la base des informations fournies par l'ACRGQTQ (pour la puissance et le nombre d'heures de travail). Par contre, les données relatives à certains équipements n'ayant pu être obtenues de l'ACRGQTQ, leur modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel de modélisation de chaussées PaLATE (<http://www.ce.berkeley.edu/~horvath/palate.html>) développé par l'université de la Californie à Berkeley. Ce logiciel permet d'identifier les équipements requis pour certaines séquences du cycle de vie d'une chaussée, et de déterminer la puissance et le nombre d'heures requis pour l'équipement selon les paramètres de la route.

Les émissions de combustion de ces équipements ont été calculées au moyen du modèle d'équipements non routiers *NONROAD* (<http://www.epa.gov/otaq/nonrdmdl.htm>) développé par la US EPA. Ce modèle requiert comme paramètres d'entrée la puissance et les heures de travail de chaque équipement modélisé. Les émissions des camions ont quant à elles été modélisées au moyen du processus correspondant de la banque de données *ecoinvent*, adapté afin de respecter la consommation indiquée.

4.2 Description des systèmes et des hypothèses du modèle ACV

Les systèmes, c'est-à-dire la liste des processus élémentaires inclus, ont été établis sur la base des informations fournies par les partenaires, de diverses hypothèses et des données génériques disponibles.

Les Tableaux F.3.1 et F.4.1 de l'Annexe F présentent les processus élémentaires pour la chaussée en béton de ciment et la chaussée en enrobé bitumineux respectivement. L'Annexe E décrit quant à elle ces processus élémentaires ainsi que les hypothèses associées au calcul de l'inventaire, en particulier en ce qui a trait aux distances de transports, au temps d'exploitation de la machinerie, à la quantité de matériaux et de consommables utilisés aux étapes de construction, d'exploitation, d'entretien et de marquage, ainsi qu'aux procédés de fabrication des principaux matériaux de construction, tels que la production de bitume et de ciment.

4.3 Sommaire des sources de données utilisées

Le Tableau 4-1 résume les données requises à l'ICV des deux types de chaussées, de même que les diverses sources de données utilisées. Le Tableau 4-2 fournit également un aperçu des processus tirés de la banque de données *ecoinvent* ayant été modifiés et adaptés afin d'améliorer leur représentativité, puisque certaines données européennes relatives à la production de différents matériaux font référence à d'autres données (pour la production de l'énergie requise par exemple). Ces dernières ont alors été remplacées par une donnée de production d'énergie plus spécifique au contexte à l'étude, augmentant ainsi la représentativité géographique des données européennes disponibles pour la production ou la transformation de matériaux.

L'explication des diverses sources de données est présentée à l'Annexe E.

Tableau 4-1 : Sommaire des sources de données utilisées

Données		Sources de données	
		Ressources consommées	Rejets générés
<i>Production des matériaux et du carburant</i>			
Matériaux de construction – béton de ciment	Béton de ciment	Canada Centre for Mineral & Energy Technology and Radian Canada Inc + Athena Sustainable Materials	
	Ciment	Canada Centre for Mineral & Energy Technology and Radian Canada Inc + Athena Sustainable Materials	Quebec Cement Plants - GHG and NPRI AP Emissions, 2006
	Sable	ecoinvent (Sand, at mine/CH U)	
	Pierres	ecoinvent (Gravel, crushed, at mine/CH U)	
	Eau	ecoinvent (Tap water, at user/RER U)	
	Fumées de silice	Non-considérée (déchet valorisé)	
	Cendres volantes	Non-considérée (déchet valorisé)	
	Laitier	Non-considérée (déchet valorisé)	
	Acier	ecoinvent (Reinforcing steel, at plant/RER U)	
	Prémoulé à joint	ecoinvent (Synthetic rubber, at plant/RER U)	
	Produit de colmatage à chaud	Données de production du bitume de M. Dufresne (Petro-Canada)	Montreal refinery - GHG and NPRI AP Emissions, 2006
Matériaux de construction – enrobé bitumineux	Enrobé bitumineux	Données de M. Bouchard (ACRGTQ) + Ressources Naturelles Canada	Données manquantes
	Bitume	M. Dufresne (Petro-Canada)	Montreal refinery - GHG and NPRI AP Emissions, 2006
	Sable	ecoinvent (Sand, at mine/CH U)	
	Pierres	ecoinvent (Gravel, crushed, at mine/CH U)	
Matériaux de fondation et sous-fondation	Granulats neufs	ecoinvent (Gravel, round, at mine/CH U)	
Sels	NaCl	ecoinvent (Sodium chloride, powder, at plant/RER U)	
	CaCl ₂	ecoinvent (Calcium chloride, CaCl ₂ , at plant/RER U)	
Marquage	Époxy	ecoinvent (Epoxy resin, liquid, at plant/RER U)	
	Granulats noirs	ecoinvent (Carbon black, at plant/GLO U)	
	Microbilles	ecoinvent (Glass fibre, at plant/RER U)	
	Bandes polymères	ecoinvent (Epoxy resin, liquid, at plant/RER U)	
	Alkydes	ecoinvent (Alkyd paint, white, 60% in H ₂ O, at plant/RER U)	

Tableau 4-1 : Sommaire des sources de données utilisées

Données	Sources de données	
	Ressources consommées	Rejets générés
Carburant (diesel pour machinerie et pour transport routier au Québec)	M. Dufresne (Petro-Canada)	Montreal refinery - GHG and NPRI AP Emissions, 2006
<i>Utilisation de la machinerie sur site</i>		
Machinerie diverse pour les interventions	Données de M. Bouchard (ACRGQTQ) et Logiciel de modélisation de chaussées PaLATE	Modèle d'émission d'équipements hors route de l'US EPA (NONROAD)
<i>Transports des matériaux et du carburant</i>		
Transport routier	<i>ecoinvent (Transport, lorry >16t, fleet average/RER U)</i>	
Transport par pipeline, au large des côtes	<i>ecoinvent (Transport, crude oil pipeline, offshore/OCE U)</i>	
Transport par pipeline, côtier	<i>ecoinvent (Transport, crude oil pipeline, onshore/RER U)</i>	
Transport maritime, pétrolier	<i>ecoinvent (Transport, transoceanic tanker /OCE U)</i>	
Transport maritime, barge	<i>ecoinvent (Transport, barge tanker /RER U)</i>	
Transport maritime, navire	<i>ecoinvent (Transport, transoceanic freight ship/OCE U)</i>	
Transport ferroviaire	<i>ecoinvent (Transport, freight, rail, diesel/US U)</i>	

Tableau 4-2 : Sommaire des données adaptées afin d'augmenter la représentativité des processusecoinvent

Données	Processusecoinvent	Processus modifié
Transport	<i>Operation, lorry >16t, fleet average/RER U</i>	Production du diesel
Production de la pierre concassée	<i>Gravel, crushed, at mine/CH U</i>	Production du diesel + électricité <i>grid mix</i> québécois
Production des granulats neufs	<i>Gravel, round, at mine/CH U</i>	Production du diesel + électricité <i>grid mix</i> québécois
Production du sable	<i>Sand, at mine/CH U</i>	Production du diesel + électricité <i>grid mix</i> québécois
Production du ciment	<i>Limestone, at mine - ciment /CH U</i>	Production du diesel
Production du ciment	<i>Clay, at mine/CH U</i>	Production du diesel
Production du ciment	<i>Gypsum, mineral, at mine/CH U</i>	Production du diesel + électricité <i>grid mix</i> nord-américain
Production du ciment	<i>Sand, at mine/CH U</i>	Production du diesel + électricité <i>grid mix</i> québécois
Production du ciment	<i>Iron ore, 46% Fe, at mine/GLO U</i>	Production du diesel + électricité <i>grid mix</i> nord-américain
Production du béton de ciment	<i>Light fuel oil, at regional storage/RER U</i>	Électricité <i>grid mix</i> québécois
Production de l'enrobé bitumineux	<i>Light fuel oil, at regional storage/RER U</i>	Électricité <i>grid mix</i> québécois
Production du ciment	<i>Light fuel oil, at regional storage/RER U</i>	Électricité <i>grid mix</i> québécois
Production du béton de ciment	<i>Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/RER U</i>	Électricité <i>grid mix</i> nord-américain
Production de l'enrobé bitumineux	<i>Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/RER U</i>	Électricité <i>grid mix</i> nord-américain
Transport pipeline	<i>Transport, crude oil pipeline, onshore</i>	Électricité <i>grid mix</i> québécois et électricité <i>grid mix</i> Nouvelle-Angleterre

4.4 Résultats du calcul de l'inventaire

Sur la base des informations présentées aux sections précédentes, les flux d'inventaire (entrants et sortants) correspondants à l'unité fonctionnelle ont été calculés pour chacun des processus compris dans les frontières des systèmes étudiés. Ces flux se présentent à la fois en termes de :

- Flux de produits intermédiaires, représentant les besoins en matériaux et en énergie (en termes de transports ou d'équipements), ainsi que les divers rejets gérés (éliminés ou valorisés) dans le système technologique (technosphère).
- Flux élémentaires, représentant les ressources extraites de l'environnement naturel et les substances rejetées dans cet environnement (écosphère).

Tous ces flux (c.-à-d. les résultats détaillés de l'inventaire) sont présentés à l'Annexe F (Tableau F-5.1, onglet 5).

Il est à noter que, puisque cette ACV est de type comparatif, et que les éléments communs aux deux systèmes ont été exclus de l'étude (en particulier la circulation routière, l'éclairage, le terrassement, etc.), les résultats présentent uniquement l'écart entre les deux types de chaussée. La présentation des résultats individuels correspondants à chaque type de chaussée n'est effectivement pas adéquate dans ce cas, surtout en considérant le fait que seules les quantités différentielles ont été collectées pour les sels fondants.

Les résultats sont donc présentés en termes d'écart relatif entre la chaussée en béton de ciment (système BC) et celle en enrobé bitumineux (système BB) de la manière suivante :

$$\Delta_{inventaire} (\%) = \frac{(inventaire_{SystèmeBC} - inventaire_{SystèmeBB})}{inventaire_{SystèmeBB}} \quad (4-1)$$

Le Tableau 4-3 présente ainsi l'augmentation (en vert) ou la diminution (en rose) de différents flux élémentaires (agrégés par compartiment de l'écosystème), en remplaçant une chaussée en enrobé bitumineux par une chaussée en béton de ciment.

À la lumière de ces résultats, le cycle de vie d'une chaussée en béton de ciment présente une consommation moindre en ressources naturelles ($\Delta_{inventaire\ ressources} < 0$) mais, en revanche, consomme davantage d'eau ($\Delta_{inventaire\ eau} > 0$) et génère davantage d'émissions ($\Delta_{inventaire\ émissions} > 0$) qu'une chaussée en enrobé bitumineux (sauf en ce qui a trait aux émissions à l'eau des cas-types 8, 12 et 16). Ces différences sont expliquées à la sous-section suivante.

Tableau 4-3 : Écart relatif entre les flux élémentaires du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC - système BB)

Cas-type	Écart relatif (%) pour chaque compartiment de l'écosystème					
	Ressources naturelles consommées	Eau utilisée	Énergie consommée	Émissions totales à l'air	Émissions totales à l'eau	Émissions totales au sol
1	-8,4	65,2	66,5	100,9	25,8	86,4
2	-8,6	69,6	70,9	105,8	24,5	89,8
3	-8,8	71,8	73,1	107,0	21,3	92,5
4	-11,9	68,0	69,4	97,4	8,8	88,2
5	-8,6	68,9	70,2	105,0	24,5	89,0
6	-9,0	71,5	72,9	107,1	21,8	92,4
7	-11,2	66,2	67,5	96,9	12,0	86,1
8	-16,9	57,2	58,4	82,7	-3,6	77,7
9	-8,6	69,0	70,4	106,3	27,6	89,3
10	-9,4	71,2	72,6	103,0	16,5	90,9
11	-12,5	67,0	68,4	94,2	5,8	86,2
12	-17,9	65,2	66,5	89,7	-4,4	85,6
13	-9,3	67,9	69,3	100,2	17,6	87,5
14	-9,6	73,0	74,4	104,9	15,8	93,2
15	-12,5	69,3	70,7	96,2	5,3	88,4
16	-19,7	63,2	64,5	86,6	-7,6	83,6
	Écart négatif ou diminution des flux (entrants ou sortants) en remplaçant une chaussée en enrobé bitumineux par une chaussée en béton de ciment. En faveur de la chaussée en béton de ciment.					
	Écart positif ou augmentation des flux (entrants ou sortants) en remplaçant une chaussée en enrobé bitumineux par une chaussée en béton de ciment. En faveur de la chaussée en enrobé bitumineux.					

4.4.1 Analyse de contribution

Le tableau suivant résume, pour chaque catégorie de flux élémentaire :

- Les principales substances (ressources et émissions) présentant une différence de quantité consommée ou générée entre la chaussée de béton de ciment et celle en enrobé bitumineux.
- Les principaux processus responsables de l'utilisation ou de l'émission de ces substances (identifiés sur la base des résultats obtenus pour le cas-type 16).

Afin de faciliter la présentation des résultats, la contribution (en %) des substances dominantes à chaque compartiment de l'écosystème a aussi été calculée sur la base de la valeur moyenne obtenue pour les seize cas-types.

Tableau 4-4 : Contribution (%) des substances dominantes pour chaque compartiment de l'écosystème et principaux processus élémentaires associés

Substances dominantes ¹	Contribution ² (%)	Système contributeur	Principaux processus responsables
Ressources naturelles			
Sable et gravier (dans le sol)	68,6	BB	Production de matières granulaires pour la sous-fondation et la fondation, production de pierres concassées et de sable pour l'enrobé neuf
Calcite (dans le sol)	13,2	BC	Production de ciment (calcaire)
Huile (pétrole brut, dans le sol)	6,4	BB	Production de bitume
Chlorure de sodium (dans le sol)	5,1	BC	Production des sels fondants ⁴
Charbon (dans le sol, non spécifié)	2,4	BC	Production de ciment, production d'acier, production des sels fondants ⁴
Argile (dans le sol, non spécifié)	1,8	BC	Production de ciment (argile)
Émissions à l'air			
Dioxyde de carbone (calcination) ³	98,1	BC	Production de ciment
Émissions à l'eau			
Solides dissous	25,2	BB	Production d'enrobé
Silicone	22,0	BC	Production des sels fondants ⁴ , production d'acier
Solides en suspension, non spécifiés	9,5	BB	Production de bitume
Chlorure	7,2	BC	Production de ciment, production de peinture époxy
Sulfate	6,6	BC	Production de ciment, production des sels fondants ⁴ , production d'acier
Ion calcium	5,3	BC	Production des sels fondants ⁴ , production de ciment, production d'acier
Demande chimique en oxygène (DCO)	4,3	BC	Production ciment, production de béton de ciment, production d'acier, production des sels fondants ⁴
Ion sodium	3,6	BC	Production de ciment, production de peinture époxy
Baryte	3,0	BB	Production de bitume
Demande biochimique en oxygène (DBO5)	2,7	BC	Production de ciment, production de béton de ciment
Carbone organique dissous (COD)	1,6	BC	Production de ciment, production de béton de ciment, production d'acier, production des sels fondants ⁴
Carbone organique total (COT)	1,5	BC	Production de ciment, production d'acier, production des sels fondants ⁴ , production de béton de ciment
Aluminium	1,4	BC	Production des sels fondants ⁴ , production d'acier, production de ciment
Émissions au sol			
Huiles, non spécifiées	72,4	BC	Production de ciment, production de béton de ciment
Fer	10,9	BC	Production des sels fondants ⁴ , production de ciment, production d'acier, transport ferroviaire
Carbone	7,1	BC	Production des sels fondants ⁴ , production de ciment
Calcium	3,7	BC	Production des sels fondants ⁴ , production de ciment
Sodium	1,1	BC	Production de ciment, production de béton de ciment
Silicone	1,0	BC	Production des sels fondants ⁴
	Principaux processus associés au système BB et responsables de l'utilisation ou de l'émission des substances dominantes. En faveur de la chaussée en béton de ciment.		
	Principaux processus associés au système BC et responsables de l'utilisation ou de l'émission des substances dominantes. En faveur de la chaussée en enrobé bitumineux.		

Tableau 4-4 : Contribution (%) des substances dominantes pour chaque compartiment de l'écosystème et principaux processus élémentaires associés

Substances dominantes ¹	Contribution ² (%)	Système contributeur	Principaux processus responsables
------------------------------------	-------------------------------	----------------------	-----------------------------------

¹ Substances contribuant (en moyenne, pour les seize cas-types) à plus de 1 % de l'écart entre les deux types de chaussées (c.-à-d. au Δ inventaire).

² Contribution (en %) de la substance au Δ inventaire.

³ L'inventaire présente une distinction entre les dioxydes de carbone selon qu'il est émis lors de l'étape de la production du ciment (plus précisément lors de l'étape de calcination), ou des autres étapes. Cette distinction a été conservée étant donné l'importance de l'étape de production du ciment.

⁴ Dû à un manque de données, les émissions directes à l'eau (de Na) et au sol (de Cl) liées à l'utilisation des sels fondants par le système BC n'ont pas été comptabilisées dans l'inventaire ci-contre (voir les limites de l'étude à la section 5.4).

4.4.1.1 Ressources naturelles

Comme mentionné plus haut, le système BC présente une consommation totale en ressources naturelles inférieure à celle du système BB. Ceci s'explique, d'une part, par la consommation de sable et de gravier, qui contribue majoritairement (à 68,6 %) à l'écart entre les deux types de chaussées, et qui peut être attribuée à la quantité plus importante de matières granulaires nécessaires pour la construction de la fondation et de la sous-fondation de la chaussée en enrobé, ainsi qu'à la pierre concassée et au sable pour la production d'enrobé neuf. D'autre part, le pétrole brut consommé en tant que bitume dans la production de l'enrobé constitue une seconde ressource attribuable au système BB et contribuant significativement à l'écart entre les deux systèmes (à 6,4 %).

Enfin, les autres ressources dominantes sont plutôt attribuables au système BC. Il s'agit de la calcite (13,2 %) et de l'argile (1,8 %) utilisées comme matières premières pour la production de ciment, du chlorure de sodium utilisé pour la production des sels fondants (5,1 %), ainsi que du charbon (2,4 %) utilisé comme ressource énergétique dans la production du ciment, de l'acier et des sels. Le système BB consomme effectivement moins de sels que le système BC et ne consomme pas de ciment et d'acier.

4.4.1.2 Émissions à l'air

Comme indiqué, les émissions à l'air sont plus importantes pour les chaussées en béton de ciment que pour celles en enrobé bitumineux, ce qui s'explique par le dioxyde de carbone (CO₂) émis à l'étape de calcination lors de la production du ciment.

Vu l'importance relative des émissions de CO₂ associées au processus de production du ciment, l'inventaire présente en effet une distinction entre les CO₂ selon qu'ils sont émis à cette étape (CO₂ calcination), ou lors des autres étapes (CO₂ fossile). Lors de la calcination, les sources d'énergie suivantes sont utilisées : le charbon, le gaz naturel, des huiles, du coke de pétrole et des matières résiduelles dont des pneus. Le CO₂ (calcination) provient d'une part de la combustion de ces sources d'énergie et d'une part de la décomposition thermique du carbonate de calcium (CaCO₃) présent dans le calcaire. Les émissions de CO₂ fossiles étant quant à elles du même ordre de grandeur pour les deux types de chaussées, elles ne contribuent pas de manière significative à l'écart entre les deux systèmes. Cet écart est en effet attribuable à 98,1 % aux émissions de CO₂ provenant de la calcination.

4.4.1.3 Émissions à l'eau

Plusieurs substances contribuent au-delà de 1 % à l'écart des émissions à l'eau entre les deux types de chaussées, et la majorité d'entre elles sont attribuables au système BC, plus précisément aux émissions directes lors de la production du ciment : le chlorure (7,2 %), le sulfate (6,6 %), les ions calcium (5,3 %), la DCO (4,3 %), les ions sodium (3,6 %), la DBO5 (2,7 %), le COD (1,6 %), le COT (1,5 %) et l'aluminium (1,4 %). Une partie du chlorure est aussi émise à l'eau lors de la production d'époxy pour le matériel de marquage des chaussées, et une partie du sulfate est émise à l'eau suite au traitement des égouts lors de la production des sels fondants.

Cependant, la substance qui contribue le plus aux émissions à l'eau du système BC est la silicone (22 %). Cette émission est d'une part attribuable à la gestion du laitier de l'usine de fonte du nickel requis pour la production de l'acier et, d'autre part, à la gestion en fin de vie de l'équipement électronique utilisé lors de l'opération de l'usine de production des sels fondants.

Quant au système BB, il n'emploie pas de ciment, ni d'acier et utilise moins de sels fondants et d'époxy que le système BC. Les substances émises en quantités supérieures par ce système sont les solides dissous (25,2 %) émis lors de l'extraction du gaz naturel qui est utilisé pour la production d'enrobé, ainsi que les solides en suspension (9,5 %) et la baryte (3,0 %) liés au cycle de vie des infrastructures utilisées lors de l'extraction du pétrole brut nécessaire pour produire le bitume.

Rappelons enfin que le cycle de vie d'une chaussée en béton de ciment génère davantage d'émissions à l'eau qu'une chaussée en enrobé bitumineux, sauf en ce qui a trait aux cas-types 8, 12 et 16. En effet, pour ces trois cas, la reconstruction de la chaussée en enrobé bitumineux a lieu plus tôt (à l'année 40 pour les cas 8 et 12 et à l'année 38 pour le cas 16) et donc la quantité d'enrobé pour la reconstruction est plus importante pour ces trois cas (les quantités de matériaux représentant la dernière intervention ont été imputées aux systèmes de produits au prorata des années incluses dans la période de cinquante ans considérée dans la présente étude sur la durée de vie de la chaussée reconstruite). Les émissions à l'eau associées à la production du bitume et de l'enrobé additionnels des systèmes BB pour ces trois cas viennent alors compenser la masse, et même plus, des émissions à l'eau du système BC.

4.4.1.4 Émissions au sol

Encore une fois, les émissions au sol sont plus importantes pour les chaussées en béton de ciment que pour celles en enrobé bitumineux, les principales substances contribuant à l'écart entre les deux types de chaussées étant en effet toutes attribuables au système BC. Il s'agit plus particulièrement des huiles (72,4 %) provenant en grande partie de la production de pétrole brut nécessaire pour produire les carburants consommés dans la production du ciment et du béton de ciment. Ce pétrole présentant des émissions au sol provient majoritairement de la Russie selon la banque de données suisse *ecoinvent*. Il est donc possible que cette donnée ne soit pas représentative du contexte canadien.

Le fer émis contribue quant à lui à 10,9 % à l'écart entre les deux systèmes. Cette émission est due à l'épandage, sur des terres agricoles, des boues issues de la production des sels fondants, ainsi qu'au transport par train du ciment et de l'acier.

Encore une fois, cette dernière donnée utilisée représente les technologies européennes (train fonctionnant à l'électricité et au diesel). Notons aussi que, selon les données spécifiées, aucun transport ferroviaire du bitume et de l'enrobé n'est impliqué, et donc contrairement au système BC, le système BB ne comporte aucun transport d'avant-plan par train.

Enfin, les autres principales émissions au sol sont le carbone (7,1 %), le calcium (3,7 %), le sodium (1,1 %) et la silicone (1,0 %), et ont particulièrement lieu à la suite du traitement des égouts lors de la production des sels fondants et à la suite de l'épandage, sur des terres agricoles, des résidus de perçage des puits pour l'extraction des ressources fossiles requises à la production du ciment et/ou du béton de ciment (notamment pour produire le coke de pétrole et le diesel). Le carbone, le calcium et la silicone sont également émis au sol par l'épandage sur les terres des boues du traitement des eaux usées générées par la production des sels fondants. Le sodium est quant à lui aussi associé à l'épandage des résidus de perçage des puits pour l'extraction des ressources, au traitement des eaux usées générées par la production des sels fondants, à la production du ciment et/ou à la production du béton de ciment.

5. ÉVALUATION DES IMPACTS ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les impacts environnementaux associés au cycle de vie comparatif des deux types de chaussées ont été évalués et interprétés conformément au cadre méthodologique présenté à la sous-section 3.2.5.

5.1 Résultats d'indicateurs de dommage/impact

L'Annexe F présente, pour chacun des seize cas-types, les indicateurs d'impact (Tableau F-10.4, onglet 10) et de dommage (Tableau F-11.6, onglet 11) du cycle de vie des chaussées de béton de ciment, comparativement à celui des chaussées en enrobé bitumineux. Encore une fois, ces résultats sont présentés en termes d'écart relatif entre le système BC et le système BB de la manière suivante :

$$\Delta_{\text{impact}} (\%) = \frac{(\text{impact}_{\text{SystèmeBC}} - \text{impact}_{\text{SystèmeBB}})}{\text{impact}_{\text{SystèmeBB}}} \quad (5-1)$$

$$\Delta_{\text{dommage}} (\%) = \frac{(\text{dommage}_{\text{SystèmeBC}} - \text{dommage}_{\text{SystèmeBB}})}{\text{dommage}_{\text{SystèmeBB}}} \quad (5-2)$$

Selon ces résultats, résumés au Tableau 5-1, les indicateurs de santé humaine, de qualité des écosystèmes et de réchauffement climatique présentent tous un écart positif en faveur du système BB (représentés en vert dans le tableau). Les indicateurs relatifs à la consommation des ressources et à l'eutrophisation aquatique (pour les cas-types 8, 12 et 16) présentent cependant des valeurs négatives en faveur du système BC (représentés en rose).

Rappelons que ce qui distingue les cas-types 8, 12 et 16 des autres est la reconstruction de la chaussée en enrobé bitumineux qui a lieu plus tôt (voir paragraphe 4.4.1.3). Pour ces trois cas, une quantité plus importante d'enrobé et de bitume est donc imputée au système BB, ce qui vient augmenter les émissions à l'eau (et l'eutrophisation) associées.

De plus, comme illustré au Tableau 5-2, il est important de souligner que :

- L'indicateur global de dommage à la santé humaine est favorable au système BB, bien que l'indicateur de toxicité humaine « cancer » soit favorable au système BC.
- L'indicateur de dommage relatif aux ressources est favorable au système BC dû à l'énergie inhérente du bitume consommé dans le système BB.

L'indicateur de dommage relatif à la consommation de ressources non renouvelables a en effet été ventilé en sous-catégories en distinguant la part de cette consommation attribuable à l'énergie inhérente du bitume des chaussées. Il s'agit donc, d'une part, de l'utilisation d'énergie primaire non renouvelable associée au bitume uniquement (énergie inhérente du bitume seulement) et, d'autre part, de l'utilisation de minéraux et d'énergie primaire non renouvelable associée à tout le reste du système (sans l'énergie inhérente du bitume).

Cependant, comme la méthode d'ACVI IMPACT 2002+ considère l'énergie primaire totale, lorsque l'énergie inhérente du bitume est incluse dans l'énergie primaire totale associée au système, le système BC est assurément avantageux. En fait, l'énergie inhérente du bitume représente, en moyenne pour les seize cas-types, 76 % de l'énergie primaire totale pour le système BB, alors qu'il ne représente que 30 % pour le système BC (Tableau F.11-2 de l'Annexe F, onglet 11), ce qui permet d'expliquer la différence déterminante entre les deux types de chaussée pour cet indicateur.

Tableau 5-1 : Écart relatif des indicateurs dommage/impact au cycle de vie comparatif des chaussées (système BC - système BB)

Cas-type	Écart relatif (%) pour chaque catégorie de dommage/impact					
	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Réchauffement climatique	Consommation des ressources	Acidification aquatique	Eutrophisation aquatique
1	43	104	101	-33	76	30
2	46	109	106	-35	81	28
3	46	111	107	-38	82	24
4	40	104	97	-47	76	7
5	45	108	105	-34	80	28
6	46	111	107	-37	82	25
7	40	103	97	-44	75	11
8	30	92	82	-55	64	-6
9	46	109	106	-35	81	27
10	44	108	103	-43	80	14
11	38	102	94	-50	74	2
12	33	99	89	-57	71	-8
13	42	105	100	-42	77	15
14	45	110	105	-44	82	13
15	39	104	96	-50	76	2
16	31	96	86	-59	69	-11
	Écart négatif ou diminution de l'indicateur de dommage/impact en remplaçant une chaussée en enrobé bitumineux par une chaussée en béton de ciment. En faveur de la chaussée en béton de ciment.					
	Écart positif ou augmentation de l'indicateur de dommage/impact en remplaçant une chaussée en enrobé bitumineux par une chaussée en béton de ciment. En faveur de la chaussée en enrobé bitumineux.					

Tableau 5-2 : Système présentant le moins d'impact pour chaque catégorie

Catégorie de dommage	Catégorie d'impact	Système BC	Système BB
Santé humaine	Toxicité humaine « cancer »	√	
	Toxicité humaine « non-cancer »		√
	Effets respiratoires (inorganiques)		√
	Radiations ionisantes		√
	Appauvrissement de la couche d'ozone		√
	Effets respiratoires (organiques)		√
	Santé humaine		√
Qualité des écosystèmes	Écotoxicité aquatique		√
	Écotoxicité terrestre		√
	Acidification terrestre		√
	Utilisation des terres		√
	Qualité des écosystèmes		√
--	Acidification aquatique		√
--	Eutrophisation aquatique	√ (cas 8, 12 et 16)	√
Réchauffement climatique	Réchauffement global		√
	Réchauffement climatique		√
Ressources	Extraction des minéraux		√
	Énergie non renouvelable		√
	Énergie inhérente du bitume	√	
	Ressources	√	
	Écart négatif ou diminution de l'indicateur de dommage/impact en remplaçant une chaussée en enrobé bitumineux par une chaussée en béton de ciment. En faveur de la chaussée en béton de ciment.		
	Écart positif ou augmentation de l'indicateur de dommage/impact en remplaçant une chaussée en enrobé bitumineux par une chaussée en béton de ciment. En faveur de la chaussée en enrobé bitumineux.		

5.1.1 Évaluation à partir du pointage unique

Comme mentionné (sous-section 3.2.5), la méthode IMPACT 2002+ permet de normaliser les indicateurs de dommage en équivalent européen moyen, puis de les agréger en un score unique (en appliquant implicitement un facteur de pondération identique égal à 1). Or, une telle pondération impliquant un choix de valeurs fondé sur aucune base scientifique valable à ce jour, elle est explicitement proscrite par l'ISO dans le cas d'affirmations comparatives divulguées publiquement (dans le but d'affirmer la supériorité d'une alternative par rapport à une autre).

De manière à répondre aux besoins du MTQ, toutefois, certains résultats pondérés sont présentés en Annexe F de manière à en faciliter la communication et l'interprétation (un pointage unique permet effectivement de diminuer le nombre de critères à considérer dans l'Orientation). En particulier, la Figure F-11.1 et le Tableau F-11.13 présentent les indicateurs de dommage pondérés du profil comparatif (système BC – système BB) pour les seize cas-types. Selon cette figure, le système BC présente un pointage total des impacts supérieur pour tous les cas-types, à l'exception des cas 8, 11, 12, 15 et 16. Pour ces cinq cas seulement, le système BC s'avère favorable comparativement au système BB, puisqu'il présente un score unique "net" négatif. À noter que la catégorie

de dommage de la consommation des ressources a une fois de plus, dans cette figure, été dissociée en deux sous-catégories en distinguant la part de cette consommation attribuable à l'énergie inhérente du bitume des chaussées.

Il est par contre important de rappeler que ces résultats supposent une pondération identique égale à 1, c.-à-d. accordant la même valeur à chaque catégorie de dommage, et qu'une pondération fondée sur les choix de valeurs et préférences du MTQ (ou autres parties prenantes) fournirait des conclusions potentiellement différentes. **Ces résultats ne sont donc présentés qu'à titre indicatif pour l'usage du MTQ et ce dernier devra demeurer transparent à cet effet s'il souhaite communiquer les résultats sur la base desquels se fonderont ses éventuelles décisions. Toute communication des résultats exprimés par un pointage unique doit par conséquent référer explicitement au choix des facteurs de pondération retenus.** De plus, lorsqu'une pondération est incluse en ACV, la norme ISO (2006) stipule que :

« ... les choix de valeurs et les jugements utilisés dans les méthodes de pondération sont de la seule responsabilité du commanditaire de l'étude (par exemple le gouvernement, la communauté, l'entreprise, etc.). ».

Il en revient donc au MTQ de statuer sur un choix de valeur, que ce soit par le biais d'une pondération, afin de déterminer l'alternative la plus favorable pour chaque cas-type.

À titre indicatif, l'Annexe F présente les différents résultats obtenus par l'application d'un outil de pondération permettant de calculer la somme pondérée de résultats normalisés selon un ensemble de facteurs de pondération. Plus particulièrement, une simulation permet d'analyser différentes combinaisons possibles pour la pondération des quatre indicateurs de dommage et de dénombrer les combinaisons favorisant une option par rapport à une autre.

Les résultats de cette simulation sont présentés au Tableau 5-3, selon lequel il est possible d'observer, pour chacun des seize cas-types, le pourcentage de combinaisons de pondération favorisant le système BB, et vice-versa. Comme montré au tableau, pour une grande majorité des cas-types, le système BB est favorisé. En fait, cinq des seize cas-types présentent des combinaisons de pondérations possibles favorisant le système BB à 70 % et plus. Par contre, pour plusieurs cas, les valeurs pour chacun des deux systèmes sont rapprochées et ne permettent pas de véritablement discerner le système à privilégier pour la plupart des séries de pondération.

Tableau 5-3 : Possibilité (%) qu'une combinaison de facteurs de pondération favorise un système par rapport à l'autre

Cas-type	Système BB favorable	Système BC favorable
1	73,0	27,0
2	72,3	27,7
3	69,6	30,4
4	58,7	41,3
5	72,3	27,7
6	70,0	30,0
7	61,0	39,0
8	47,3	52,7
9	72,3	27,7
10	63,4	36,6
11	55,2	44,8
12	47,4	52,6
13	63,7	36,3
14	62,8	37,2
15	55,3	44,7
16	45,0	55,0

NOTE : Possibilité (%) Sur un total de 1771 jeux de pondération considérés, avec des facteurs de pondération à intervalle de 5 %.

5.1.2 Analyse de contribution

La Figure F-12.1 en Annexe F présente, encore une fois, les indicateurs de dommage pondérés du profil comparatif (système BC - système BB), mais uniquement pour le cas-type 16, et désagrégés par étape (processus) du cycle de vie (contrairement à la Figure F-11.1, qui présente un indicateur agrégé pour chaque cas-type). Le patron général des résultats étant constant pour chacun des seize cas, la présentation des résultats pour un seul cas-type spécifique s'avère cependant suffisante. Il est aussi important de mentionner que seuls les processus du système d'avant-plan (c.-à-d. les processus inclus dans les systèmes présentés à l'Annexe C) sont ici considérés, et que les processus jugés équivalents n'apparaissent pas puisqu'il s'agit d'un profil comparatif.

L'axe horizontal indique le numéro correspondant du processus tel que présenté sur le diagramme des processus de l'Annexe C. Les processus débutant par le chiffre :

- « 1 » désignent les activités de la construction initiale
- « 2 » désignent les activités d'exploitation
- « 3 » désignent les activités d'entretien
- « 4 » désignent les activités de reconstruction
- « 5 » réfèrent au marquage.

Selon ces résultats, les processus identifiés comme les plus grands contributeurs aux impacts du cycle de vie d'une chaussée en béton de ciment comparativement à ceux d'une chaussée en enrobé bitumineux sont : la production du ciment pour la construction initiale (processus 1.5) et pour la reconstruction (processus 4.1), la production du béton de ciment (processus 1.10) et de l'acier (processus 1.13) pour la construction initiale, la production du bitume pour la construction initiale (processus 1.17) et pour l'entretien (processus 3.13), la production d'enrobé bitumineux lors de la construction (processus 1.21) et lors de l'entretien (processus 3.16) et la production des sels (processus 2.1). Notons que les processus associés à l'utilisation de la machinerie et au marquage ne présentent pas de contribution notable, ce qui peut être expliqué par les valeurs, pour ces processus, qui se situent autour d'un même ordre de grandeur pour les deux systèmes.

Ces résultats correspondent bien à ceux obtenus suite à l'analyse des flux d'inventaire (voir sous-section 4.4.1), à l'exception de certains processus responsables de l'utilisation ou de l'émission des substances dominantes, mais qui n'apparaissent pas comme étant de grands contributeurs aux impacts potentiels, soient la production de matières granulaires, de pierres concassées, de sable et de peinture époxy. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'aucun facteur de caractérisation n'est disponible pour convertir ces flux d'inventaire en indicateur d'impact (voir limites présentées à la section 5.4).

Enfin, soulignons encore une fois que ces résultats supposent une pondération identique égale à 1, c.-à-d. accordant la même valeur à chaque catégorie de dommage.

5.2 Analyse d'incertitude

Sur les milliers de flux élémentaires individuels inventoriés dans les processus élémentaires des différents scénarios étudiés, la très grande majorité provient de la banque de données *ecoinvent*. De ces flux, la majorité présente une variabilité qui prend la forme d'une distribution « lognormale » autour de la valeur centrale spécifiée (et utilisée dans les calculs « déterministes ») et caractérisée par son écart-type. Il faut par contre préciser que les variabilités introduites dans les données secondaires par les auteurs de la banque *ecoinvent* ne sont pas des mesures de la variabilité réelle des processus (c.-à-d. déterminée statistiquement sur des mesures concrètes réalisées lors de la collecte des données). Elles sont plutôt estimées par l'application d'un « pedigree » décrivant la qualité d'une donnée selon son origine, son mode de collecte, sa représentativité et déterminé subjectivement par les auteurs de la banque. De la même manière, la variabilité de la plupart des données primaires collectées a été représentée par une distribution « lognormale » également estimée par l'application d'un « pedigree » (les résultats de cette évaluation étant présentés en Annexe F ; Tableau F-20.1.1, Tableau F-20.1.2). Il est donc essentiel de comprendre que l'objectif ici est de souligner le caractère incertain des conclusions et que la variabilité n'est rendue disponible qu'à titre indicateur, à défaut d'avoir une information de meilleure qualité.

Une analyse d'incertitude due à la variabilité des données d'inventaire a donc été réalisée. Le logiciel SimaPro 7 a permis de réaliser une analyse de type Monte-Carlo (c.-à-d. une étude de la propagation de la variabilité des données d'inventaire lors des calculs, qui sont alors « probabilistes »), avec un nombre d'itérations fixé à 1 000. Les résultats sont présentés à la Figure 5-1 pour les cas-types 1 et 16.

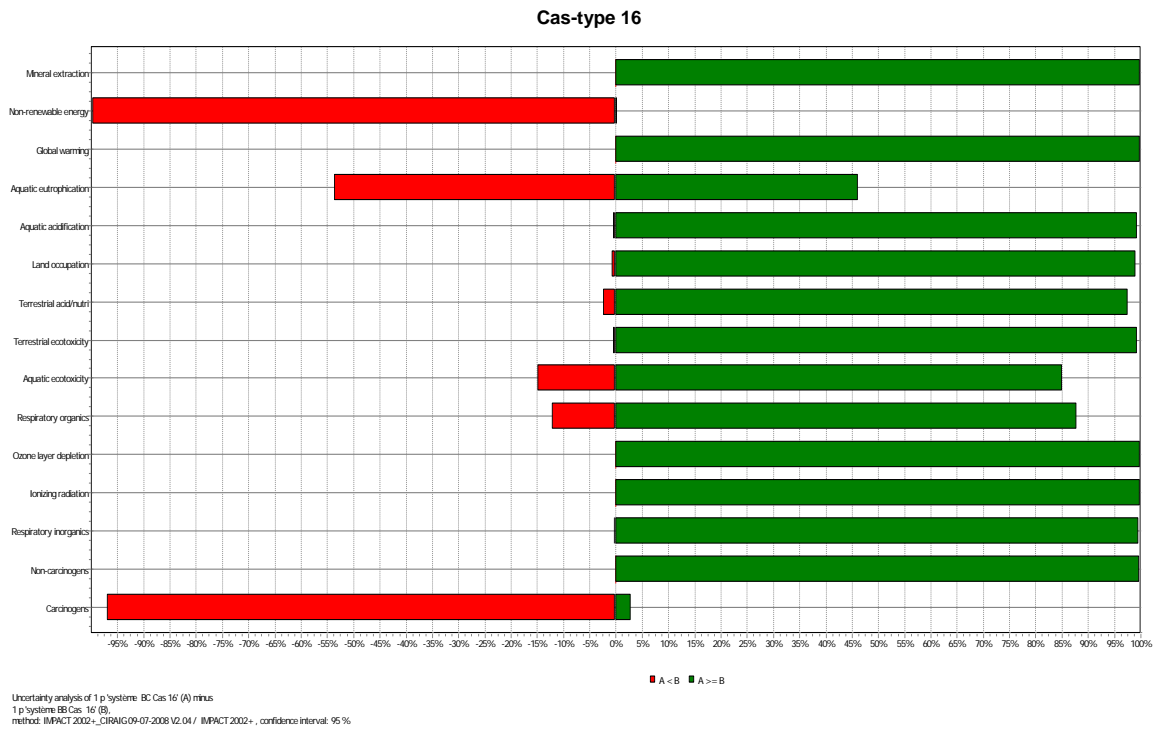
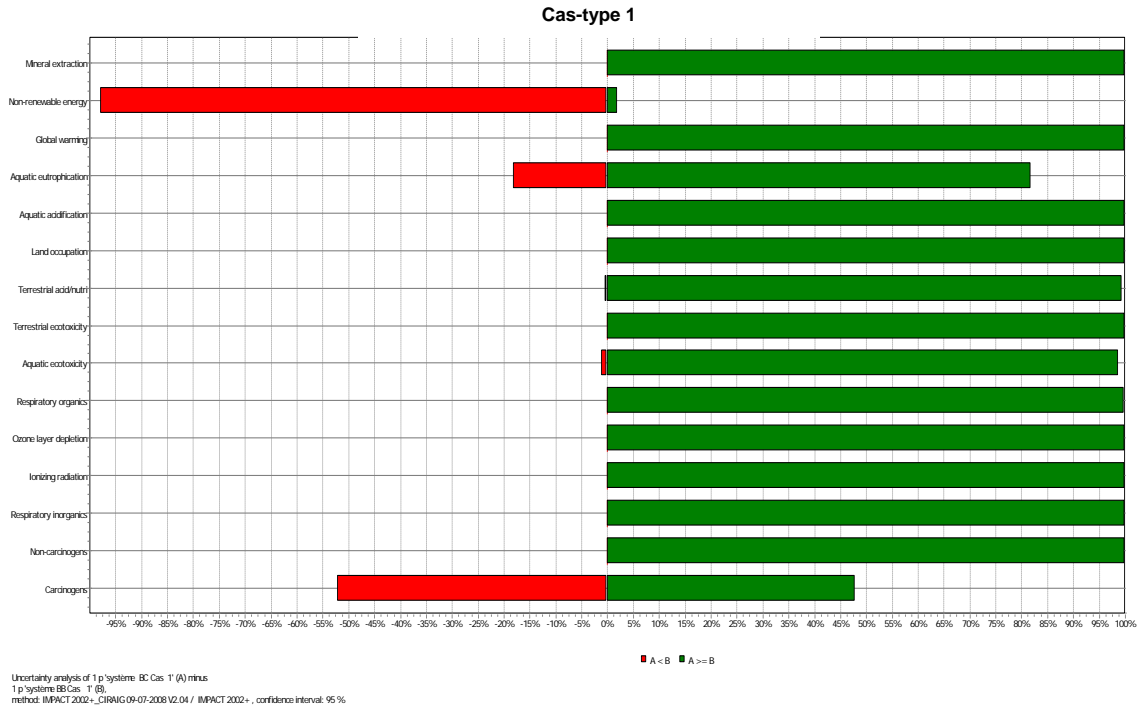


Figure 5-1 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (BC - BB) pour les cas-types 1 et 16.

Cette figure indique les résultats des calculs effectués sur la soustraction du système B (système BB) au système A (système BC). Selon ces calculs, quand l'impact calculé pour le système A (BC) est supérieur à celui calculé pour le système B (BB), le résultat de l'itération est positif (représenté en vert) ; ce résultat est négatif si le système B (BB) montre un impact plus élevé (représenté en rouge). Il est ainsi possible de connaître la probabilité qu'un système montre un impact plus élevé que l'autre.

Rappelons que le système BC, tel qu'illustré au Tableau 5-2, présentait les indicateurs les plus élevés pour la majorité des impacts, à l'exception des catégories relatives à la santé humaine « cancer », à l'eutrophisation aquatique (pour les cas-types 8, 12 et 16) et à l'énergie non renouvelable. C'est aussi ce que confirment les résultats de la simulation Monte-Carlo effectuée sur la soustraction des indicateurs de dommage de chacun des systèmes (A – B), avec de faibles probabilités d'occurrence du résultat $A < B$ (système BC < système BB) pour les catégories suivantes :

- Acidification aquatique (inférieure à 1 % pour le cas 16 seulement) ;
- Occupation des terres (inférieure à 1 % pour le cas 16 seulement) ;
- Santé humaine « non cancer » (inférieure à 1 % pour le cas 16 seulement) ;
- Acidification terrestre (inférieure à 1% pour le cas 1 et à 5 % pour le cas 16) ;
- Écotoxicité terrestre (inférieure à 1 % pour le cas 16 seulement) ;
- Écotoxicité aquatique (inférieure à 2 % pour le cas 1 et à 15 % pour le cas 16) ;
- Effets respiratoires inorganiques (inférieure à 1 % pour le cas 16 seulement) ;
- Effets respiratoires organiques (inférieure à 13 % pour le cas 16 seulement).

De la même manière, les résultats de la simulation Monte-Carlo relatifs à l'énergie non renouvelable présentent une faible probabilité d'occurrence du résultat $A \geq B$ (système BC \geq système BB) de moins de 2 % pour les cas-types 1 et 16.

Par contre, pour l'indicateur de santé humaine « cancer », la probabilité d'occurrence d'une inversion $A \geq B$ (système BC \geq système BB) est d'environ 50 % pour le cas-type 1, ce qui favoriserait davantage le système BB en ce qui a trait au dommage à la santé humaine.

Enfin, pour ce qui est de la catégorie relative à l'eutrophisation aquatique, les résultats de la simulation indiquent une probabilité d'occurrence d'une inversion :

- $A \geq B$ (système BC \geq système BB) d'environ 46 % pour le cas 16 ;
- $A < B$ (système BC < système BB) d'environ 18 % pour le cas 1.

Bien que des inversions notables puissent être observées pour les catégories relatives à la santé humaine « cancer » et à l'eutrophisation aquatique pour certains des cas-types, les conclusions émises quant aux indicateurs de dommage (tels que présentés au Tableau 5-1) n'en seraient toutefois pas affectées. À titre indicatif, la Figure F-20.3.3 (Annexe F, onglet 20.3) présente en effet les résultats de la simulation Monte-Carlo pour le cas 16, mais cette fois-ci selon l'approche « dommage ». Il en résulte effectivement que les indicateurs relatifs à la santé humaine, à la qualité des écosystèmes et au réchauffement climatique sont toujours supérieurs pour le système BC et l'indicateur relatif à la consommation des ressources est toujours supérieur pour le système BB. De plus, bien que les conclusions "par indicateur" peuvent être différentes à l'échelle des

catégories d'impacts, les conclusions globales (quant à la supériorité d'un type de chaussée comparativement à l'autre) demeurent inchangées.

5.3 Analyses de sensibilité

Comme discuté à la section précédente, plusieurs paramètres utilisés lors de la modélisation des systèmes présentent une certaine incertitude, notamment liée au choix des hypothèses, ainsi qu'aux modules de données génériques et modèles d'évaluation des impacts (et dommages) employés. Les résultats obtenus sont liés à ces paramètres et leur incertitude est transférée aux conclusions tirées.

Afin de tester la robustesse de certains paramètres, des analyses de sensibilité ont été réalisées, au cours desquelles les valeurs des paramètres incertains ont été changées pour des valeurs différentes, quoique vraisemblables. L'étendue des variations que prennent alors les résultats indique l'importance des paramètres modifiés ainsi que la plage dans laquelle se situe fort probablement les résultats les plus valides.

Les résultats des analyses de sensibilité sont présentés aux sous-sections suivantes. Ils couvrent plus particulièrement l'évaluation de la sensibilité des conclusions quant à une variation :

1. Des différentes distances de transport des matériaux entre leur lieu d'approvisionnement et le chantier routier ;
2. Du profil environnemental de la production du bitume ;
3. Des émissions de fumées de bitume dans la donnée de production de l'enrobé ;
4. Du profil environnemental de la construction de chaussées de béton armé continu (BAC) en remplacement du béton de ciment de type dalle courte goujonné (DCG) (uniquement pour le cas-type 16) ;
5. De la méthode d'évaluation des impacts ;
6. Du profil environnemental de la production du ciment ;
7. Des quantités de carburant consommé par les véhicules selon le type de chaussée (bien que ce paramètre ait été exclu des frontières de cette étude, il apparaît important sur tout le cycle de vie d'une chaussée, en particulier dans un contexte comparatif où il pourrait y avoir une différence notable entre les deux alternatives) ;
8. Du processus de carbonation par le béton ayant lieu tout au long du cycle de vie du béton de ciment, absorbant ainsi une part de CO₂.

Il est à noter que les résultats présentés à l'Annexe F présentent les indicateurs de dommage du profil comparatif (système BC - système BB)

- Pondérés et, dans certains cas,
- Agrégés pour chaque cas-type (un indicateur unique plutôt que 4 indicateurs désagrégés pour chaque cas-type).

5.3.1 Distance de transport des matériaux

Les distances de transport par camion des matériaux du lieu d'approvisionnement au chantier routier pour la construction, l'entretien et la reconstruction, ainsi que des sels fondants et produits de marquage du lieu d'approvisionnement à la chaussée, ont toutes été posées égales à 20 km, une valeur qui a été jugée comme une bonne estimation de la moyenne des diverses distances de transport. Cependant, afin de bien valider cette hypothèse, une analyse de sensibilité a été effectuée.

La Figure F-14.2.1 en Annexe F présente les résultats de la comparaison des deux types de chaussées lorsque l'on fixe les distances à 100, 250 et 1 000 km.

En augmentant le transport routier, l'écart de pointage entre les deux types de chaussées augmente proportionnellement avec la distance et ce, pour toutes les catégories de dommage à l'exception de l'énergie inhérente du bitume qui demeure inchangée par une augmentation des distances de transport. Pour des distances de 100 et 250 km, les conclusions sont cependant maintenues, c.-à-d. que les indicateurs de santé humaine, de qualité des écosystèmes et de réchauffement climatique sont toujours supérieurs pour le système BC, tandis que l'indicateur de consommation des ressources est toujours supérieur pour le système BB et ce, pour tous les cas-types.

Mais lorsque la distance est augmentée à 1 000 km, les indicateurs de santé humaine, de qualité des écosystèmes et de réchauffement climatique avantagent le système BC pour sept des seize cas-types (soient les cas 4, 7, 8, 11, 12, 15 et 16). Il en découle ainsi un renversement des résultats quant au système à privilégier dans ces cas.

Ce renversement entraîné par l'augmentation de la distance de transport par camion peut être expliquée par la masse totale plus élevée de matériaux à être transportée au chantier pour le système BB, voire jusqu'à 12 % plus élevée que pour le système BC pour certains cas-types. Notamment, les quantités de sables et de pierres concassées acheminées au chantier sont plus importantes pour le système BB (les résultats détaillés des flux économiques sont présentés aux Tableaux F-1.1 et F-2.1 en Annexe F).

Cette analyse de sensibilité permet donc d'affirmer qu'il faudrait considérablement augmenter la distance entre les fournisseurs de matériaux de construction et le chantier pour que les résultats soient renversés. Ainsi, si la chaussée considérée est éloignée des grands centres urbains (p. ex. à la Baie-James), le système à privilégier pourrait varier. En revanche, même pour des chantiers éloignés, il est peu probable que le sable et les pierres soient transportés sur de très longues distances.

5.3.2 Production du bitume

Les données sur la production du bitume ont été fournies par M. René Dufresne de la raffinerie Petro-Canada de Montréal. Bien que ces données soient spécifiques et proviennent d'une source fiable, il importe de s'assurer que ces données sont représentatives et coïncident plus ou moins avec les données publiées si ces dernières sont disponibles. Tel que présenté par la revue bibliographique à l'Annexe B, plusieurs études existent sur le cycle de vie des chaussées en enrobé, et par conséquent, plusieurs études documentent les consommations et les émissions associées à la production du bitume. Il a donc été jugé important de comparer les données fournies par Petro-Canada avec d'autres données disponibles. Une analyse de sensibilité a donc été réalisée en modifiant le processus de production du bitume selon les scénarios qui suivent :

- Scénario 1: Utilisation du rapport d'Eurobitume présentant des données d'inventaire sur la production du bitume (en particulier les données d'émissions à l'air et à l'eau, ainsi que l'énergie totale nécessaire pour la production du bitume, incluant l'extraction, l'entreposage et le raffinage). La modélisation des infrastructures et des transports demeure inchangée.
- Scénario 2: Multiplication par un facteur 10 de l'énergie d'extraction du pétrole brut, la valeur fournie étant plus faible que les différentes valeurs issues d'autres sources. Les données d'émissions, la modélisation des infrastructures, les transports, et l'énergie d'entreposage ne sont pas modifiés.
- Scénario 3: Augmentation de l'énergie de raffinage, en annulant le crédit attribué pour l'énergie récupérée au sein du procédé de la raffinerie. Petro-Canada a fourni une consommation énergétique imputable à la production du bitume seulement (et non à la raffinerie globale). Selon ces données, lors de l'étape de la distillation sous vide, une partie de l'énergie peut-être récupérée au sein du procédé de la raffinerie. Cette récupération d'énergie a été soustraite de l'énergie totale requise pour la production du bitume. Or, comme il n'a pas été possible de vérifier si ce crédit doit effectivement être imputé à 100 % à la production du bitume (et non pas aux autres produits issus du raffinage du pétrole brut), il a été décidé d'établir un scénario qui excluait ce crédit d'énergie de raffinage. Les données sur l'énergie d'extraction, d'entreposage et de transport du bitume, ainsi que sur les émissions à l'eau et au sol ne sont pas modifiées.
- Scénario 4: Utilisation de la donnée de production du bitume disponible dans la banque de donnée *ecoinvent*. L'approche employée pour modéliser cette donnée par les auteurs de la banque est considérablement différente que celle utilisée pour cette ACV. Tel qu'expliqué à la sous-section 3.2.3.1, les données sur la production du bitume ont effectivement été collectées en évitant l'imputation du processus multifonctionnel qu'est le raffinage. À l'inverse, la donnée provenant d'*ecoinvent* impute le processus du raffinage aux différents coproduits issus de la raffinerie sur une base massique. De plus, le type de pétrole modélisé selon cette donnée générique provient de la Grande-Bretagne, et donc la sensibilité associée à la provenance (en partie due aux distances de transport différent) et aux techniques d'extraction sera aussi évaluée.

La Figure F-15.2.1 et le Tableau F-15.2.1 présentent les résultats de la comparaison des différents scénarios de production de bitume pour les deux types de chaussées. Il est à noter que puisque les tendances des résultats sont les mêmes pour chacun des cas-types, seul le cas-type 16 fait l'objet de cette analyse.

Le scénario 2, utilisant une donnée d'extraction plus importante, est le scénario possédant l'indicateur (en comparatif) le plus bas pour la catégorie de la santé humaine, et donc est le scénario présentant le plus de dommage pour cette catégorie pour le système BB en ce qui a trait aux impacts de la production du bitume. Ceci peut évidemment être expliqué par la quantité plus importante de diesel devant être brûlée. Par contre, le scénario 1, utilisant des données d'émissions d'Eurobitume, présente une plus importante incidence sur les catégories du réchauffement climatique et des ressources pour les impacts liés à la production du bitume. Cet effet peut être expliqué par la quantité de CO₂ émise à l'air qui est beaucoup plus élevée selon l'étude d'Eurobitume (0.277 kg CO₂/kg de bitume) que selon les données fournies par la raffinerie Petro-Canada (0.0747 kg CO₂/kg bitume), et par l'énergie totale nécessaire plus grande pour la production globale du bitume.

Le plus important constat est que les indicateurs de santé humaine, de qualité des écosystèmes et de réchauffement climatique sont toujours supérieurs pour le système BC. En ce qui concerne les ressources, la quantité d'énergie inhérente¹ utilisée ne varie pas en fonction des scénarios, ce qui est normal compte tenu du fait que la même quantité de pétrole brut doit être extraite pour chacun des scénarios étudiés. L'indicateur de la consommation des ressources est donc toujours supérieur pour le système BB, peu importe la donnée de production du bitume employée.

Cette analyse de sensibilité démontre donc que, peu importe la donnée de production de bitume employée pour la comparaison, aucun renversement des résultats n'en résulte.

5.3.3 Fumées de bitume

Les fumées de bitume émises lors de la fabrication et de la mise en œuvre d'enrobé contiennent normalement des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et peuvent avoir un effet sur la santé des travailleurs qui y sont exposés. Dans le cadre de cette étude, aucune donnée sur les émissions pouvant avoir lieu dans les usines d'enrobage ou sur un chantier de travail n'a pu être déterminée.

Comme les HAP peuvent avoir des impacts importants sur la santé humaine, il est important d'étudier leur comportement sur le pointage total, et d'ainsi analyser la sensibilité des résultats en fonction de ce paramètre.

Suite à une revue succincte des informations disponibles sur les fumées de bitume, il a été trouvé que le benzo(a)pyrene est l'HAP le plus cancérigène pour l'homme et peut être présent dans le bitume à une concentration allant jusqu'à 5,53 µg/g (Huynh *et al.*). Il a donc été décidé d'ajouter cette quantité de benzo(a)pyrene aux émissions à l'air associées à la production d'enrobé (selon la quantité de bitume contenue dans l'enrobé).

Selon la Figure F-16.2.1 en Annexe F, un ajout des émissions d'HAP ne modifie cependant pas les conclusions de l'étude. Bien que la différence entre les deux systèmes quant à l'indicateur de santé humaine diminue, le système BB est toujours favorisé pour cette catégorie de dommage (et les autres indicateurs demeurent inchangés).

5.3.4 Chaussée en béton armé continu

Lors de la définition du champ de cette étude, l'Orientation reposait sur le choix des types de chaussée en béton de ciment de type DCG et en enrobé bitumineux. Or, par la suite, le type de chaussée en béton armé continu (BAC) a été intégré aux calculs de l'analyse des coûts globaux (*LCCA - Life Cycle Cost Assessment*) par le MTQ. Dans le but de fournir des indications supplémentaires au MTQ, une analyse de sensibilité a été réalisée sur le cas-type 16 seulement en ajoutant la modélisation d'une chaussée en BAC.

¹ Il faut préciser qu'aucune désagrégation de l'énergie inhérente du bitume au niveau de l'inventaire n'a été faite pour la donnée d'*ecoinvent* par les auteurs de la banque, et pour cette raison seule la consommation totale est indiquée.

Les principales différences entre la chaussée BAC (ci-après nommée système BC BAC) et la chaussée DCG (ci-après nommée système BC DCG) sont liées à la durée de vie de la chaussée (plus élevée pour le BAC) et aux quantités de matériaux de construction requis (entre autres, la quantité d'acier plus importante et l'armature en composite pour le BAC). La période considérée pour la chaussée de type BAC est de soixante ans afin d'inclure la reconstruction de la chaussée qui a lieu plus tard vu la durabilité plus élevée de ce type de chaussée.

Spécifiquement pour cette analyse de sensibilité et afin d'assurer la comparaison des trois types de chaussée pour cette analyse, le cycle des chaussées en béton de ciment de type DCG et en enrobé bitumineux a été allongé de 10 ans.

Vu la durabilité plus élevée de ce type de chaussée et afin d'assurer la comparaison des trois types de chaussée, l'unité fonctionnelle a été modifiée spécifiquement pour cette analyse de sensibilité : le cycle des chaussées en béton de ciment de type DCG et en enrobé bitumineux a été allongé de 10 ans. L'unité fonctionnelle modifiée s'exprime de la manière suivante :

*« Permettre le déplacement de véhicules routiers sur une distance de cinq kilomètres durant les **soixante** premières années de vie d'une chaussée en béton de ciment comparativement à une chaussée en enrobé bitumineux et à une chaussée en béton armé continu, construites au Québec en 2009 ».*

La séquence des interventions pour ces trois types de chaussées est présentée au Tableau 5-4 pour le cas-type 16.

Tableau 5-4 : Séquence d'interventions pour le cas-type 16 sur une période de soixante ans, incluant les chaussées de type BAC

Intervention	No	Année
		Cas 16
Cas des chaussées en béton de ciment (de type DCG)		
Construction en béton de ciment avec DCG (rainurage transversal conforme)*	1	0
Regarnissage de 25 % des joints	2	10
Réparations mineures 0,5 %, regarnissage de tous les joints et meulage 25 %	3	19
Réparations majeures 4%, meulage (25%) et grenailage (75%)	4	29
Correction à l'enrobé (60 kg/m ²) et resurfaçage en enrobé (120 kg/m ²)*	5	39
Reconstruction de la dalle de béton de ciment seulement*	6	46
Regarnissage de 25 % des joints	7	56
Cas des chaussées en béton de ciment (de type BAC)		
Reconstruction complète de la chaussée* en BAC	1	0
Réparations mineures BC (0,5%), meulage (5%), regarnissage des joints longitudinaux (100%) et marquage	2	19
Réparations BC (2%), meulage (10%) et grenailage (75%)	3	29
Réparations BC (4%), meulage (25%)	4	39
Correction* (60 kg/m ²) et resurfaçage en enrobé*	5	49
Reconstruction du BAC seulement	6	56
Cas des chaussées en enrobé bitumineux		
Construction complète en enrobé	1	0
Planage (40 mm) et resurfaçage (100 kg/m ²)	2	9
Planage (50 mm) et resurfaçage (120 kg/m ²)*	3	17
Planage (50 mm) et resurfaçage (120 kg/m ²)*	4	25
Planage (50 mm) et resurfaçage (120 kg/m ²) *	5	32
Enlèvement complet du revêtement et pose d'un nouvel enrobé *	6	38
Planage (40 mm) et resurfaçage (100 kg/m ²) *	7	47
Planage (50 mm) et resurfaçage (120 kg/m ²) *	8	55

*Accotements inclus dans l'intervention

Les quantités de matériaux requises pour les interventions additionnelles pour les chaussées en béton DCG et en enrobé ont été calculées et ajustées au prorata des années avant la fin de la période de soixante ans sur la durée de vie de l'intervention. La machinerie additionnelle a aussi été ajoutée.

En ce qui a trait au BAC, les quantités de matériaux pour la construction initiale ont été calculées en fonction des épaisseurs de couches spécifiées par le MTQ, tel que présenté au Tableau 5-5.

Tableau 5-5 : Épaisseurs des couches de la chaussée en béton de type BAC pour le cas-type 16

Couche	Épaisseur de couche (mm)
Béton de ciment	272 <u>272</u>
Fondation drainante	100 <u>100</u>
Fondation MG-20	150 <u>150</u>
Sous-fondation MG-112 type A	557 <u>557</u>

La fondation drainante est constituée de pierres concassées et de ciment, les quantités précises ayant été fournies par le MTQ. La durée de vie de la fondation MG-20 et de la sous fondation est supposée équivalente à celle des chaussées en enrobé et en béton DCG.

Les quantités d'acier et d'armature en composite (polymères renforcés de fibres de verre) requises ont aussi été fournies par le MTQ, et sont présentées au Tableau 5-6.

Tableau 5-6 : Quantités d'acier et de polymères renforcés de fibres de verre requises pour la chaussée en béton de type BAC pour le cas-type 16

Matériaux	Quantité (tonnes)		
	Construction initiale	Entretien	Reconstruction
Acier	1 529,8	99,4	109,3
Polymères renforcés de fibres de verre	550,8	35,8	39,3

Afin de simplifier les calculs pour cette analyse et pour contrer à un manque d'information, les hypothèses simplificatrices suivantes ont été posées :

- La machinerie nécessaire pour les séquences d'intervention pour la chaussée en béton BAC a été modélisée de la même façon que pour la chaussée en béton DCG ;
- Le marquage pour la chaussée en BAC pour les années 1 à 50 est considéré le même que pour la chaussée en DCG. Le marquage pour les trois types de chaussée n'est pas pris en compte pour les années 51 à 60 ;
- Seules les quantités de fibres de verre contenues dans les voies de roulement ont été comptabilisées, et non celles dans les accotements.

À la lumière des résultats présentés à la Figure F-17.2.1 en Annexe F, les quatre indicateurs de dommage sont plus élevés pour le système BC BAC que pour le système BC DCG. Ceci est en partie dû à la quantité de ciment et d'acier plus importante et au composite qui n'est pas inclus dans le système BC DCG.

Par contre, en comparaison au système BB, les conclusions de l'étude ne sont pas modifiées, c.-à-d. que tous les indicateurs demeurent inférieurs pour le système BB, à l'exception de l'indicateur de la consommation des ressources qui est toujours plus élevé.

Bien que la chaussée en béton BAC présente l'avantage d'offrir une durée de vie supérieure, l'analyse de sensibilité effectuée à cet égard ne permet pas de démontrer que ce choix de chaussée présente un gain environnemental.

5.3.5 Méthodes ACVI

Afin de tester la robustesse des résultats obtenus avec la méthode IMPACT 2002+, deux autres méthodes d'ACVI ont été utilisées : la méthode européenne Eco-indicator 99 (Goedkoop et Spriensma) et la méthode canadienne LUCAS (Toffoletto et al., 2007).

5.3.5.1 Eco-indicator 99

Malgré les différences de modélisation entre ces deux méthodes (voir la sous-section 3.2.5.1), une comparaison des deux types de chaussée pour les seize cas-types avec la méthode Eco-indicator 99 permet de montrer si les résultats suivent les mêmes tendances qu'avec la méthode IMPACT 2002+.

La Figure F-18.2 présente les indicateurs de dommage du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC - système BB) pour le cas-type 16 en employant les méthodes IMPACT 2002+, Eco-Indicateur Égalitaire (E), Eco-indicateur Hiérarchique (H) et Eco-indicateur Individualiste (I).

Compte tenu de ces résultats, les indicateurs comparatifs de santé humaine et de qualité des écosystèmes sont toujours positifs, et donc, favorable au système BB, peu importe la méthode ou la perspective utilisée.

Pour la catégorie de dommage des ressources, le système à favoriser varie cependant selon la perspective employée. Pour les perspectives Égalitaire (E) et Hiérarchique (H), tout comme pour la méthode IMPACT 2002+, l'indicateur comparatif est toujours négatif et donc, indique encore le système BB comme étant le plus dommageable. Cependant, selon une perspective Individualiste (I), seuls les effets prouvés sont considérés et donc l'utilisation des ressources non renouvelables n'est pas incluse dans la catégorie de l'utilisation des ressources (seule la consommation de minerai est incluse). Le système BB est donc fortement avantagé puisque la consommation du pétrole brut requis pour la production du bitume, qui représente une partie importante de l'inventaire en termes massiques, et qui est le matériau de construction principal de la chaussée d'enrobé, n'est même pas traduite en impact, alors que le ciment représente une consommation importante de minerai pour le système BC.

Comme un renversement de la tendance est induit pour la catégorie ressource selon la perspective Individualiste (I), il devient donc clair selon cette approche que le système BB est à privilégier. En revanche, tout comme les résultats obtenus avec IMPACTS 2002+, si la perspective Égalitaire (E) ou Hiérarchique (H) est employée comme méthode d'ACVI, les indicateurs ne pointent pas tous vers les mêmes conclusions. Pour ces cas particuliers, nous sommes alors en absence d'approche scientifique, et seules des décisions basées sur des choix de valeurs peuvent en découler.

5.3.5.2 LUCAS

La méthode canadienne LUCAS devait initialement être utilisée pour réaliser l'ACVI. Une vérification a donc été effectuée afin de déterminer si l'utilisation de LUCAS entraînait des variations sur les résultats de la comparaison des deux types de chaussée pour les seize cas-types.

Le Tableau F-18.14 présente les indicateurs d'impact du cycle de vie comparatif des chaussées pour les seize cas-type selon la méthode LUCAS et le Tableau F-18.15 présente les écarts relatifs du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour les seize cas-types selon les méthodes IMPACT 2002+ et LUCAS.

Pour l'ensemble des cas-types, les indicateurs des catégories de l'eutrophisation aquatique et de la consommation des ressources non renouvelables présentent des valeurs négatives favorisant le système BC, tandis que les dix autres indicateurs présentent des valeurs positives favorisant le système BB. Outre la catégorie de la santé humaine « cancer », les résultats obtenus au niveau « problème » sont donc très semblables à ceux de la méthode IMPACT 2002+, qui rappelle, favorisait le système BC pour les catégories de la santé humaine « cancer », de l'eutrophication aquatique (cas 8, 12 et 16 seulement) et de la consommation des ressources.

La différence de tendance pour la catégorie de la santé humaine « cancer » peut en partie être expliquée par les substances non caractérisées pour cet impact variant entre les deux méthodes. Par exemple, les émissions à l'air d'hydrocarbures aromatiques est la substance la plus contribuant à l'impact sur la santé humaine « cancer » selon la méthode IMPACT 2002+, mais n'est même pas caractérisée selon la méthode LUCAS. Or il s'avère que cette émission est beaucoup plus élevée pour le système BB que pour le système BC (soit 185 % plus élevée, pour le cas-type 16). À l'inverse, certaines substances sont caractérisées en impacts sur la santé humaine « cancer » par la méthode LUCAS, mais non avec IMPACT 2002, ce qui peut avoir une influence sur le système à favoriser pour cet indicateur d'Impact.

5.3.6 Production du ciment

Comme l'étude de cohérence sur la donnée de production du bitume, il importe de tester les données spécifiques de la production du ciment en analyse de sensibilité. Rappelons que les données ont directement été fournies par l'ACC sur la base de ses trois cimenteries québécoises. Bien qu'aucun éco-profil du ciment (autre que celui d'*Athena Sustainable Materials Institute* (2005) et de CANMET et Radian Canada Inc. (1993)) n'ait été répertorié lors de la revue bibliographique (présentée à l'Annexe B), deux données sur la production du ciment issues de la banque de données *ecoinvent* ont été étudiées. Plus particulièrement, ces données concernent le ciment Portland dont la classe de résistance est soit Z 42,5 ou Z 52,5 MPa¹.

La Figure F-19.2.1 et le Tableau F-19.2.1 présentent les résultats de la comparaison des différents types de ciment pour les deux types de chaussées. Il est encore une fois à

¹ Notons que la classe de résistance influence principalement la recette du ciment, plus précisément sa teneur en calcaire, gypse, sable, etc.

noter que puisque les tendances des résultats sont les mêmes pour chacun des cas-types, seul le cas-type 16 fait l'objet de cette analyse.

Une inversion peut être observée en ce qui a trait à la santé humaine : en utilisant les données de production du ciment d'*ecoinvent*, l'indicateur en comparatif pour cette catégorie de dommage est de valeur négative et donc, en faveur du système BC. Cette inversion est majoritairement due à la catégorie d'impact des effets respiratoires (inorganiques) et peut être expliquée par des émissions plus importantes de SO₂, de NOx et de particules pour la donnée spécifique. Manifestement, l'écart relatif entre la donnée spécifique et les deux données génériques est d'environ 10 % et 61 % respectivement pour l'émission directe à l'air du SO₂ et du NOx. En outre, contrairement aux données d'*ecoinvent*, des émissions de particules sont comptabilisées lors de l'extraction des matières premières (calcaire, gypse, argile, etc.) pour la donnée provenant de l'ACC.

L'indicateur négatif pour la santé humaine peut aussi être influencé par l'impact sur la santé humaine « non cancer ». Des émissions directes à l'air d'hexachlorobenzène et de dichlorométhane n'ont pas été incluses par les auteurs d'*ecoinvent* pour les deux données de production du ciment, malgré que ces valeurs aient été inventoriées et introduites dans la donnée spécifique.

La catégorie relative à la qualité des écosystèmes présente aussi des indicateurs comparatifs plus bas lorsque les données d'*ecoinvent* sont employées, mais présente toujours des valeurs positives ce qui indique que le système BC est toujours défavorisé pour cet indicateur.

Quant aux catégories du changement climatique et de la consommation des ressources, les conclusions ne sont pas modifiées.

Malgré des incidences sur les catégories de la santé humaine et de la qualité des écosystèmes, il n'en demeure pas moins que ces diminutions ne permettent pas de discriminer quel système est favorable globalement.

5.3.7 Impact d'une réduction de la consommation

Bien que la revue bibliographique (Chapitre 2) indique que la circulation pourrait contribuer à 90 % des impacts totaux sur l'ensemble du cycle de vie d'une chaussée, cette dernière ne fait pas partie de la présente ACV tel que spécifié à la sous-section 3.2.2.2 Certaines études ont par ailleurs tenté de démontrer que le type revêtement pourrait présenter une incidence sur la consommation des véhicules.

Par conséquent, une analyse de sensibilité a été effectuée afin d'étudier si la prise en compte de la circulation routière (camions et voitures) affecterait les conclusions. Pour ce faire, la consommation de carburant et les émissions directes associées à l'opération de 1 % des véhicules (sur le tronçon de 5 km sur 50 ans) ont donc été ajoutées aux deux types de chaussées et comparées aux scénarios de base, pour lesquels aucune circulation routière n'est considérée.

La Figure F-22.2.1 présente les résultats des indicateurs de dommage du cycle de vie des chaussées pour le cas-type 16 en considérant 1 % d'utilisation d'essence sur le cycle de vie sur les deux types de chaussées, tout en indiquant les scénarios de base.

Afin de bien observer l'influence de la circulation routière sur le cycle de vie total, ces résultats ne sont pas présentés en différentiel.

Les résultats obtenus indiquent bel et bien que la prise en compte de la circulation, même en quantité marginale de 1 %, renversent complètement les conclusions de l'étude. L'écart relatif entre le scénario considérant la circulation routière et le scénario de base est de l'ordre des 10 000 % pour les deux types de chaussées, ce qui indique que toutes les étapes de construction, d'entretien et de reconstruction contribuent très peu aux impacts en comparaison à la circulation routière. C'est donc la circulation routière et non la chaussée même qui génère les impacts sur le cycle de vie d'une chaussée.

5.3.8 Absorption par le béton du CO₂ par processus de carbonation

Pour cette ACV, les émissions de CO₂ tout au long du cycle de vie de la chaussée sont considérées. Plus particulièrement pour la chaussée en béton de ciment, l'analyse de l'inventaire (sous-section 4.4.1) indiquait que les émissions de CO₂ étaient en majeure partie (à 98,1 %) dues au processus de calcination du calcaire lors de la production du ciment. Par contre, une fois que le ciment est employé pour produire du béton, un processus de carbonation est initié, ce qui entraîne l'absorption de CO₂ par le béton même.

Ce phénomène de séquestration de CO₂ par la chaussée de béton de ciment avait été omis lors de la réalisation de l'inventaire de cette étude. Afin de vérifier l'influence de la prise en compte de ce processus sur les résultats, cette présente analyse de sensibilité comptabilisera la quantité totale de CO₂ pouvant être absorbé par la chaussée en béton de ciment du cas-type 16 durant la période de cinquante ans considérée.

Pour se faire, quelques hypothèses simplificatrices ont été posées :

- Le béton recyclé (c.-à-d. de seconde génération) peut aussi absorber du CO₂ lorsqu'il est employé dans la sous-fondation des deux types de chaussées. Bien que les couches de sous-fondation soient plus épaisses pour les chaussées en béton, le taux de CO₂ absorbé est calculé à partir de la surface de béton de ciment, et donc n'est pas une fonction de l'épaisseur. Puisque les longueurs et largeurs des chaussées sont les mêmes pour les deux types de chaussée, le taux d'absorption sera considéré équivalent. Ainsi, seule l'absorption par le béton employé dans le revêtement de béton de ciment du système BC sera considérée pour cette analyse.
- Les lignes directrices du document intitulé « *Guidelines – Uptake of Carbon Dioxide in the Life Cycle Inventory of Concrete* » (Pommer et Pade, 2005) ont été employées pour estimer la quantité de CO₂ absorbé par le cycle de vie du revêtement de béton de ciment.

Les auteurs Pommer et Pade (2005) indiquent dans leurs lignes directrices que, selon certaines études, le taux d'oxyde de calcium (CaO), dans la partie cimentaire du béton, qui se transformant en CaCO₃ est minimalement de 75 %. Le degré de carbonation du béton dans la chaussée dépend de plusieurs paramètres dont : le temps de service de la chaussée, la résistance du ciment, le pourcentage de clinker dans le ciment, la composition du béton et la surface de béton.

Afin de calculer la quantité totale de CO₂ absorbée, la formule suivante est employée :

$$CO_2(kg) = 0.383 \cdot S \cdot \rho_{ciment} \cdot X_{clinker} \cdot K \cdot \sqrt{t} \quad (5-3)$$

Où :

S représente la surface pouvant être carbonisée est représentée par l'équation suivante :

$$S(m^2) = \frac{volume \cdot 2}{\acute{e}paisseur} = largeur \cdot longueur \cdot 2 = 5000m \cdot 17,1m \cdot 2 = 171\,000m^2 \quad (5-4)$$

ρ_{ciment} est la masse volumique du béton de ciment, soit 2 350 kg/m³

$X_{clinker}$ est le pourcentage de clinker dans le ciment, soit 92,5 %

t est le temps de service de la chaussée, soit 50 ans

K est une constante fonction de trois facteurs, k₁, k₂ et k₃ selon l'équation suivante :

$$K = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (5-5)$$

Où :

k₁ est un facteur qui dépend de l'exposition et de la résistance du béton. Pour 43 années du cycle de vie considéré, le revêtement est du béton de ciment et donc est considéré comme exposé. Le facteur k₁ est alors 1 mm·√an. Par contre, entre les années 39 et 46 du cycle de vie du système BC pour le cas-type 16, une couche d'enrobé est appliquée sur la surface du béton de ciment. Pour ces 7 années, le béton de ciment est considéré enseveli, et donc possède un facteur k₁ de 0,75 mm·an^{-1/2}.

k₂ est un facteur de correction qui dépend du type de structure de béton. Pour une chaussée, la valeur de k₂ est donc de 1,0.

k₃ est aussi un facteur de correction, et dépend de la composition du béton de ciment. Comme le béton de ciment employé possède 5 % de silice, 25 % de cendres volantes et 22 % de laitier, le facteur k₃ est estimé à 1,08.

Le CO₂ absorbé peut alors être déterminé à l'aide de l'équation (5-3) :

$$CO_2(kg) = \left[0.383 \cdot 171000m^2 \cdot 2350 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,925 \cdot 1 \cdot 10^{-3} m \cdot an^{-1/2} \cdot 1,0 \cdot 1,08 \cdot (43ans)^{1/2} \right] + \left[0.383 \cdot 171000m^2 \cdot 2350 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,925 \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} m \cdot an^{-1/2} \cdot 1,0 \cdot 1,08 \cdot (7ans)^{1/2} \right]$$

La quantité totale de CO₂ absorbée sur le cycle de vie de la chaussée pour le cas-type 16 est de **1 310 tonnes**.

La Figure F-23.2.1 présente les résultats des indicateurs de dommage du cycle de vie comparatif des chaussées pour le cas-type 16 avec et sans la prise en compte du CO₂ absorbé par le système BC.

La quantité totale de CO₂ qui avait été inventoriée sur le cycle de vie total de la chaussée en béton de ciment pour le cas-type 16 était de **6 060 tonnes**. Il y a donc une diminution de 22 % de la quantité nette de CO₂ émise lors du cycle de vie de la chaussée en béton de ciment pour ce cas-type, ce qui se traduit par une diminution de 26 % de la quantité totale de CO₂ équivalent. Les résultats sont en accord avec cette diminution de CO₂ équivalent puisque l'indicateur de dommage pour le réchauffement climatique indique une diminution du dommage de la même proportion lorsque l'on considère le processus de carbonation. En revanche, bien qu'il y ait une diminution de l'impact, l'indicateur demeure plus élevé pour le système BC que le système BB. Les autres indicateurs de dommage ne sont pas modifiés.

Afin d'obtenir un portrait représentatif de la réalité et dans une perspective de cycle de vie, la considération du processus de carbonation du béton de ciment est importante. Par contre, pour cette ACV comparative, la prise en compte de la quantité de CO₂ absorbée par la chaussée tout au long de son cycle de vie n'est pas un paramètre sensible. Les conclusions de cette étude ne sont donc pas modifiées par la prise en compte du processus de carbonation par le béton de ciment.

5.4 Limites de l'étude

5.4.1 Limites de l'ICV

Les limites de l'analyse de l'inventaire sont essentiellement liées au caractère incomplet et plus ou moins valide de l'inventaire lui-même. En effet, plusieurs processus initialement inclus dans les frontières ont dû être exclus ou estimés durant la collecte des données, principalement par manque d'informations les concernant. Ces limites peuvent provenir de différentes sources, notamment :

- **Les distances de transport par camion des matériaux au chantier** : Ce paramètre est évalué dans le cadre d'une analyse de sensibilité selon laquelle les conclusions ne sont pas modifiées au moins jusqu'à une distance de 250 km ; voir paragraphe 5.3.1.
- **Les émissions organiques lors de la production, le transport et la mise en œuvre de l'enrobé bitumineux** : Ce paramètre est évalué dans le cadre d'une analyse de sensibilité selon laquelle un ajout d'émissions d'HAP ne modifie pas les conclusions de l'étude ; voir paragraphe 5.3.3.
- **La production du bitume** : Cet inventaire est évalué dans le cadre d'une analyse de sensibilité selon laquelle l'utilisation des données de production d'autres sources ne modifie pas les conclusions obtenues ; voir paragraphe 5.3.2.
- **La production du ciment** : Cet inventaire est évalué dans le cadre d'une analyse de sensibilité selon laquelle l'utilisation des données de production d'autres sources modifie les conclusions obtenues quant à certains indicateurs de dommage (santé

humaine et qualité des écosystèmes), sans toutefois permettre d'identifier un système qui soit favorable globalement ; voir paragraphe 5.3.6.

- **Le cycle de vie des usines de béton de ciment et d'enrobé bitumineux**, étant donné qu'aucune donnée générique n'est disponible concernant les infrastructures d'une usine d'enrobé bitumineux, contrairement à celles d'une usine de béton de ciment : Ces inventaires sont exclus.
- **La production des sels et des produits de marquage** : Ces inventaires sont comblés par l'utilisation de données substitutives.
- **Les émissions de poussières lors des interventions** : Ce paramètre est supposé être équivalent pour les deux systèmes et donc, sans influence sur les conclusions obtenues.
- **Les émissions directes à l'eau (de Na) et au sol (de Cl)¹ liées à l'utilisation de sels fondants** : Ce paramètre ne modifie cependant pas les conclusions obtenues, l'utilisation des sels fondants étant plus importante dans le cas du système BC (ce qui le défavoriserait davantage en ce qui a trait à la qualité des écosystèmes).

Ainsi, l'inclusion et/ou l'augmentation de la représentativité de ces processus dans l'inventaire modifierait assurément les résultats de l'analyse, mais fort probablement pas au point d'en inverser les conclusions. À titre indicatif, le Tableau 5-8 présente des indicateurs de la qualité des données du cycle de vie comparatif des chaussées permettant de juger de la fiabilité des données en liaison avec leur influence potentielle sur les conclusions obtenues. Les critères employés pour la qualification des données sont précisés au Tableau 5-7.

En ce qui concerne la qualification des données « quantités » et « processus », les données provenant d'experts ou de rapports publiés ont été évaluées comme données fiables et représentatives du contexte étudié. Il en suit donc que les données sur la production des différents matériaux de construction des routes présentent des notes de « 1 » ou « 2 ».

Par contre, certaines données manquantes ont dû être comblées par des hypothèses ou des approximations grossières. Ces dernières présentent donc de moins bonnes notes, soit « 4 » ou « 5 ».

Certaines données spécifiques convoitées n'ont pu être intégrées à l'inventaire, telles que les données sur les pertes, les poussières et les nettoyages lors des interventions, les émissions de fumées de bitume lors de la production de l'enrobé à chaud et de sa mise en œuvre, ainsi que les diverses distances de transport. Par exemple, aucune distance de transport spécifique n'a pu être spécifiée ou déterminée lors de la collecte de données, et donc la note « 4 » a été attribuée pour la donnée « quantité ». Par contre, il s'avère que ces différents transports ne présentent pas de forte contribution à l'impact.

¹ Ces substances n'étant pas caractérisées, leur exclusion de l'inventaire ne modifiera pas les résultats de l'évaluation des impacts.

Par ailleurs, quelques données génériques étaient manquantes et donc certaines données ont dûes être modélisées de façon semi quantitative en utilisant des données substitutives (proxy). Tel était le cas pour les processus de production des produits de marquage et du prémoulé. Pour cette raison, la note attribuée pour la donnée « processus » est moins bonne, bien que la contribution à l'impact se révèle comme étant faible (notes de « 1 »).

Tableau 5-7 : Critères de qualification des données

Pointage	Critères de qualification des données « quantités »
1	Données spécifiques plutôt fiables ou informations peu variables entre les sources (experts/rapports, mais non vérifiées par une tierce partie).
2	Données spécifiques plutôt incertaines ou informations variables entre les sources (experts/rapports, mais non vérifiées par une tierce partie).
3	Données estimées à partir d'autres sources (génériques).
4	Données estimées de manière grossière.
5	Données manquantes.
Pointage	Critères de qualification des données « processus »
1	Donnée spécifique (experts/rapports, mais non vérifiées par une tierce partie), ou donnée générique ayant une bonne représentativité géographique et technologique du processus sélectionné.
2	Donnée générique en partie adaptée au contexte énergétique et/ou technologique.
3	Donnée incomplète (le processus n'est représenté que partiellement) ou ayant une représentativité géographique et technologique inconnue.
4	Donnée ayant une représentativité géographique ou technologique inadéquate. La donnée n'est pas facilement accessible, utilisation d'un autre processus comme approximation (proxy).
5	Données manquantes.
Pointage	Critères de qualification de la contribution potentielle à l'impact
1	Contribution potentiellement faible ou négligeable (c.-à-d. sans influence sur les résultats).
3	Contribution potentiellement influente.
5	Forte contribution potentielle.

Tableau 5-8 : Qualification des données

Étape du cycle de vie	Contribution potentielle de la différence des systèmes	Qualité des données	
		Quantité (impliquée par processus d'avant plan)	Processus (d'arrière-plan)
1-Construction initiale (CI), 2- Entretien (E) et 3- Reconstruction (R)			
MG pour sous-fondation et fondation	1	1	2
Transport matériaux sous-fondation et fondation	1	4	3
Bitume pour enrobé neuf	5	1	2
Sable et pierre concassée pour enrobé neuf	1	1	2
Transport pré-enrobé	1	4	3
Production enrobé neuf	3	3	3
Transport enrobé neuf vers chantier routier	1	4	3
Ciment pour béton neuf	5	1	2
Sable et pierre concassée pour béton neuf	1	1	2
Eau pour béton neuf		1	2
Transport pré-béton	1	4	2
Transport supplémentaire pour le béton	1	1	2
Production béton neuf	1	1	1
Transport béton neuf vers chantier routier	1	4	3
Acier des goudjons	3	1	2
Produit prémoulé	1	1	4
Produit à chaud	1	1	3
Transport éléments aux. vers chantier routier	1	4	3
Machinerie	1	3	3
2-Exploitation (E)			
Sels fondants durant période en béton	3	1	3
5- Marquage (M)			
Production des produits de marquage	1	1	4
Transport des produits de marquage	1	4	3

Note : La qualité des données « quantités » fait référence à la fiabilité des quantités de matière et d'énergie inventoriées, de même que des distances de transport et des quantités de rejets selon leur devenir (flux primaires, définition disponible à l'Annexe A). La qualité des données « processus » fait plutôt référence à la validité géographique et technologique des modules de données génériques sélectionnés (flux secondaires, définition disponible à l'Annexe A). Enfin, la contribution potentielle à l'impact réfère à l'influence potentielle de différence des valeurs des deux systèmes sur les résultats (à la lumière des résultats d'analyses de contribution et de sensibilité).

5.4.2 Limites de l'ACVI

Les résultats présentés aux sections précédentes (5.1 à 5.3) sont par ailleurs issus des calculs réalisés en utilisant essentiellement les modèles de la méthode d'évaluation des impacts IMPACT 2002+. Les dommages (et impacts) évalués ne sont que des dommages (et impacts) potentiels puisqu'ils correspondent à une modélisation, donc à une simplification, de l'environnement réel. Les résultats de l'ACVI sont des expressions relatives qui ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, des marges de sécurité ou les risques. À ce titre, ces résultats ne doivent pas constituer l'unique base d'affirmation comparative destinée à être divulguée au public, dans la mesure où des informations supplémentaires seraient nécessaires pour remédier à certaines des limitations propres à l'ACVI. Ces résultats pourraient éventuellement être affinés soit par l'utilisation d'autres outils, tels que l'analyse de risque, ou soit suite à d'éventuels développements méthodologiques.

Plus important encore est le fait que l'interprétation des résultats de la caractérisation ne peut se baser que sur les résultats obtenus, c'est-à-dire sur les substances pour lesquelles il existe, dans la banque de données des méthodes, des facteurs de caractérisation qui convertissent les flux élémentaires inventoriés en indicateurs d'impacts et de dommage. Or plusieurs flux élémentaires (448) n'ont pu être convertis en résultats d'indicateur de catégorie puisqu'aucun facteur de caractérisation n'était disponible, notamment pour l'utilisation du sable et gravier pour la production de matières granulaires, de pierres concassées et de sable et pour l'émission à l'eau de chlore et de sodium due à la production de la peinture d'époxy. Ces derniers n'ont donc pas été considérés lors de l'évaluation des impacts et des dommages. Il faut aussi mentionner que ces flux élémentaires non caractérisés sont les mêmes pour les deux types de chaussées. Par contre, en moyenne, les écarts relatifs de ces flux non convertis sont pour la plupart positifs, ce qui désavantage le système BC. Plus précisément, les écarts relatifs favorisent le système BB pour 340 flux alors qu'ils favorisent le système BC pour 108 flux. Les impacts qui leur sont associés et qui seraient évalués si des facteurs de caractérisation étaient disponibles seraient probablement en défaveur du système BC, ce qui viendrait appuyer les conclusions obtenues.

6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce projet visait la comparaison des impacts environnementaux potentiels du cycle de vie des chaussées en béton de ciment de type dalles courtes goujonnées à ceux d'une chaussée en enrobé bitumineux.

L'analyse de l'inventaire a permis d'observer que **l'utilisation de l'eau et de l'énergie** ainsi que **les émissions à l'environnement** (sauf en ce qui a trait aux émissions à l'eau des cas-types 8, 12 et 16) sont prépondérantes pour la chaussée en béton de ciment (système BC), alors que c'est la chaussée en enrobé qui présente la **consommation en ressources naturelles** la plus élevée. L'analyse a aussi permis d'identifier les principaux contributeurs à l'inventaire, notamment la production du ciment, du béton de ciment, de l'acier, des sels fondants, du bitume et de l'enrobé bitumineux.

Selon les résultats de l'évaluation réalisée avec la méthode IMPACT 2002+, douze des quinze indicateurs d'impact sont aussi favorables au système BB. Toutefois, les indicateurs de toxicité humaine « cancer », de consommation de ressources non renouvelables et d'eutrophisation aquatique (pour les cas-types 8, 12 et 16 seulement) favorisent le système BC.

Rappelons que :

- Ce qui distingue les cas-types 8, 12 et 16 des autres est la reconstruction de la chaussée en enrobé bitumineux qui a lieu plus tôt, ce qui implique qu'une quantité plus importante d'enrobé et de bitume soit imputée au système BB et donc, une augmentation des émissions à l'eau (et l'eutrophisation) associées.
- Bien que l'indicateur de toxicité humaine « cancer » soit favorable au système BC, l'indicateur global de dommage à la santé humaine est favorable au système BB.
- L'indicateur de dommage relatif aux ressources est favorable au système BC dû à l'énergie inhérente du bitume consommé dans le système BB.
- L'indicateur relatif à l'eutrophisation aquatique présente une importante incertitude et donc il existe une grande probabilité d'occurrence d'une inversion du système à favoriser pour cet impact.

Au niveau du dommage, en effet, les indicateurs de **santé humaine**, de **réchauffement climatique** et de **qualité des écosystèmes** sont tous favorables au système BB, tandis que l'indicateur de **consommation des ressources** est toujours favorable au système BC et ce, pour chacun des seize cas-types.

Les analyses d'incertitude et de sensibilité réalisées ont par ailleurs permis de démontrer qu'une modification des conclusions obtenues est peu probable, bien que le choix de la méthode d'ACVI puisse au contraire influencer certaines de ces conclusions. Plus précisément, selon la perspective individualiste de la méthode européenne *Eco-indicator 99*, les quatre indicateurs de dommage favorisent unanimement le système BB. Il est cependant important de souligner que, selon cette perspective individualiste, seuls les effets prouvés sont considérés et l'utilisation des ressources non renouvelables n'est pas incluse (ce qui constitue un choix de valeur à considérer de manière transparente).

De plus, comme l'indiquait la revue bibliographique (présentée au chapitre 2), sur l'ensemble du cycle de vie d'une chaussée, la circulation routière serait responsable de la majeure partie des impacts totaux (toutes catégories confondues). Ainsi, toute économie de carburant, même en quantité marginale, pourrait visiblement favoriser un type de chaussée comparativement à l'autre (en supposant que le type de chaussée influence significativement la consommation de carburant, bien qu'une telle hypothèse demeure à valider).

Ainsi, compte tenu de ces résultats, il n'est pas aisé de privilégier une alternative relativement à l'autre sans pouvoir valider l'influence du type de revêtement sur la consommation de carburant ou sans avoir recours à un choix de valeurs de manière à pondérer les différents indicateurs d'impacts.

Selon la norme ISO (2006), en effet, lorsque les résultats obtenus, qui se basent sur les sciences de la nature, ne permettent pas de trancher en ACV, il est possible d'effectuer une décision fondée sur des choix de valeurs. L'utilisation de facteurs de pondération permet d'agrèger plusieurs indicateurs en score unique et donc, de départager les alternatives. Ces choix de valeurs appartiennent au mandataire de l'étude (soit le MTQ) et doivent être présentés de manière transparente. À titre indicatif, une simulation a d'ailleurs permis d'identifier l'alternative favorable selon différentes combinaisons de pondérations possibles pour les quatre indicateurs de dommage. Ces informations seront prises en compte dans le contexte de l'Orientation.

Encore une fois, cependant, puisque toute diminution de la consommation de carburant présente une diminution significative des impacts sur le cycle de vie de tout type de chaussée, l'intérêt devrait davantage porter sur la réduction de la consommation de carburant en encourageant, notamment, l'utilisation de voitures plus écologiques ou le covoiturage.

Il est d'autant plus important de noter que les résultats obtenus dans le cadre de cette étude étaient fonction d'un système technologique statique sur la période de cinquante ans considérée. Nul n'a actuellement le recul nécessaire pour caractériser avec précision l'évolution dans le temps des techniques de production des matériaux de construction, des technologies de conception et de mise en place des chaussées et des réglementations environnementales, bien que la compétitivité du marché risque fort probablement de modifier le système étudié, et conséquemment, les résultats de cette étude. Il en suit que plusieurs nouvelles technologies de revêtement émergent, telles que les enrobages à froid, à recyclage facilité, les bitumes modifiés au polymère augmentant la durée de vie du revêtement, etc. Il serait donc recommandable que le MTQ puisse investiguer sur la pertinence environnementale de développer ces innovations des chaussées.

Enfin, comme le mentionne Pears (2004), plusieurs éléments de construction de routes permettent de diminuer les impacts environnementaux et sociaux de celles-ci : choix des matériaux, du design de route, du site et impacts intrinsèques à la construction. De plus, le développement de PCR (*Product Category Rules*) visant à l'établissement de déclarations environnementales de produit (EPD) sur les matériaux entrant dans la composition des types de chaussées s'avère nécessaire afin de faciliter l'actualisation de cette étude. Dans une optique de développement durable, de telles considérations constituent donc des facteurs potentiellement intéressants à intégrer aux politiques du

MTQ relatives au transport (sans que ce dernier ait nécessairement à privilégier un type de chaussée plutôt qu'un autre).

7. RÉFÉRENCES

- ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE (2005). CEMENT AND STRUCTURAL CONCRETE PRODUCTS: LIFE CYCLE INVENTORY UPDATE #2, Athena Sustainable Materials Institute, 32 p.
- BARE, J., NORRIS, G.A., PENNINGTON, D.W. et MCKONE, T. (2003). TRACI - The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts. Journal of Industrial Ecology 6(3-4) p.49-78.
- BEUVING, E., DE JONGHE, T., GOOS, D., LINDAHL, T. et STAWIARSKI, A. (2004). Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements, EAPA/Eurobitume, 22 p. [en ligne]. Disponible: www.eurobitume.org/Html/Fuel/Fuel%20Efficiency-Industry%20Report.pdf
- BROERS, J.W., HOEFNAGELS, F.E.T. et ROSKAMP, H.I. (1994). Life cycle assessment of a road embankment in phosphogypsum. Preliminary results. Proceedings of the International Conference on Environmental Implications of Construction Materials and Technology Developments, Jun 1-3 1994, Maastricht, Neth, Elsevier Science B.V.
- CANMET ET RADIAN CANADA INC. (1993). Raw Material Balances, Energy Profiles, and Environmental Unit Factor Estimates: Cement and Structural Concrete Products. Ottawa.
- ERIKSSON, E., BLINGE, M. et LOVGREN, G. (1996). Life cycle assessment of the road transport sector. Science of The Total Environment 189-190 p.69-76.
- ESKOLA, P., MROUEH, U.M. et LAINE-YLIJOKI, J. (2000). Life cycle inventory analysis program for road construction. International Conference on Practical Applications in Environmental Geotechnology Ecogeo 2000. 204: p. 19-26.
- GOEDKOOP, M. et SPRIENSMA, R. (2001a). The Eco-indicator 99, A Damage Oriented Method for LCA. Amersfoort, PRé Consultants, 144 p.
- GOEDKOOP, M. et SPRIENSMA, R. (2001b). The Eco-indicator 99, a damage oriented method for Life Cycle Assessment - Methodology Report. Amersfoort, PRé Consultants, 132 p.
- HUYNH, C.K., VU DUC, T., LE COUTALLER, P., F. SURMONT, F. et DEYGOUT, F. Exposition professionnelle aux hap dans le bitume et dans la fumee de bitume - analyse des HAP par gc-ion-trap ms et hplc-fluorescence. Lausanne, Institut universitaire romand de la Santé au Travail.
- ISO 14040 (2006). Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre, 24 p.
- ISO 14044 (2006). Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices, 56 p.
- JOLLIET, O., MARGNI, M., CHARLES, R., HUMBERT, S., PAYET, J., REBITZER, G. et ROSENBAUM, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. International Journal of Life Cycle Assessment 8(6) p.324-330.
- MARTINEAU, G., MÉNARD, J.-F. et SAMSON, R. (2005). Faisabilité de l'application d'une analyse du cycle de vie (ACV) visant l'intégration des considérations énergétiques et environnementales au processus décisionnel de l'Orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées, CIRAIG, École Polytechnique de Montréal, Département de Génie chimique, 58 p.
- MROUEH, U.-M., ESKOLA, P. et LAINE-YLIJOKI, J. (2001). Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. Waste Management 21(3) p.271-277.

- MTQ (2001). Orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées Montréal, Direction générale des infrastructures et des technologies, 26 p. [en ligne]. Disponible: http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/Publications/fr/reseau_routier/zone_fournisseurs/chaussees/orientation.pdf
- MULLER-WENK, R. (2004). A method to include in LCA road traffic noise and its health effects. International Journal of Life Cycle Assessment 9(2) p.78-85.
- PEARS, A. (2004). Sustainability and Roads: Capturing the ESD Opportunity. 10th Australasian Flexible Pavements Industry Conference on Health, Safety and Environment, Melbourne.
- PEREIRA, A., BLANC, I. et COSTE, J.-F. (1998). Contribution of life cycle assessment: Global atmospheric emissions for motorway infrastructures. International Journal of Vehicle Design 20(1-4) p.201-209.
- PEREIRA, A., BLANC, I. et COSTE, J.-F. (2001). Évaluation des impacts globaux des infrastructures routières : une application de l'analyse du cycle de vie. Routes - journal de l'Association mondiale de la Route (AIPCR) (301) p.31-40.
- POMMER, K. et PADE, C. (2005). Guidelines – Uptake of Carbon Dioxide in the Life Cycle Inventory of Concrete, Danish Technological Institute, 82 p.
- ROTH, L. et EKLUND, M. (2003). Environmental evaluation of reuse of by-products as road construction materials in Sweden. Waste Management 23(2) p.107-116.
- STRIPPLE, H. (2001). Life Cycle Assessment of Road. A Pilot Study for Inventory Analysis. Second revised Edition. Gothenburg, Sweden, IVL Swedish Environmental Research Institute, 182 p.
- TOFFOLETTO, L., BULLE, C., GODIN, J., REID, C. et DESCHÊNES, L. (2007). LUCAS - A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context. International Journal of Life Cycle Assessment 12(2) p.93-102.
- TRELOAR, G.J., LOVE, P.E.D. et CRAWFORD, R.H. (2004). Hybrid life-cycle inventory for road construction and use. Journal of Construction Engineering and Management-Asce 130(1) p.43-49.
- TRUSTY, W.B. (1999). Life Cycle Embodied Energy and Global Warming Emissions for Concrete and Asphalt Roadways, The Athena Sustainable Materials Institute, 104 p.
- UDO DE HAES, H., FINNVEDEN, G., GOEDKOOP, M., HAUSCHILD, M., HERTWICH, E., HOFSTETTER, P., JOLLIET, O., KLÖPFFER, W., KREWITT, W., LINDEIJER, E., MÜLLER-WENK, R., OLSEN, S.I., PENNINGTON, D.W., POTTING, J. et STEEN, B. (2003). Life Cycle Impact Assessment: Striving Towards Best Practices. Brussels Pensacola, Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), 149-176 p.
- VENTURA, A., MAZRI, C., MONERON, P., JULLIEN, A., GUIDOUX, Y. et SCHEMID, M. (2004). Comparaison environnementale de couches de liaison de chaussées recyclées à différents taux par la méthode d'analyse de cycle de vie. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées (250-251) p.93-113.

Appels téléphoniques et échanges par courrier électronique

BOUCHARD, O. (2008). Discussion téléphonique avec Olivier Bouchard, Service technique, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec.

DUFRESNE, R. (2008). Fichier Excel reçu par courrier électronique de René Dufresne, Directeur, Ventes et R&D Bitumes, Petro-Canada.

MAILLARD, P-L. (2008). Données reçues par courrier électronique de Pierre-Louis Maillard, Directeur, Technologies et développement des affaires, Association canadienne du ciment.

THÉBEAU, D. (2008). Fichier Excel reçu par courrier électronique de Denis Thébeau, Direction du Laboratoire des chaussées, Service des chaussées, Secteur Expertise en conception des chaussées, Transports Québec.

TREMBLAY, M. (2008). Discussion téléphonique avec Michel Tremblay, Service des matériaux d'infrastructures, Ministère des Transports du Québec.

VENTA, G. (2008). Fichier Excel reçu par courrier électronique de George Venta, Directeur, émissions dans l'air et environnement, Association canadienne du ciment.

ANNEXE A : MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

Le contenu de cette annexe est compris dans le fichier suivant :
« Pi08_Rpt_final_Annexe_A »

ANNEXE B : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Le contenu de cette annexe est compris dans le fichier suivant :
« Pi08_Rpt_final_Annexe_B »

ANNEXE C : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES SYSTÈMES ÉTUDIÉS

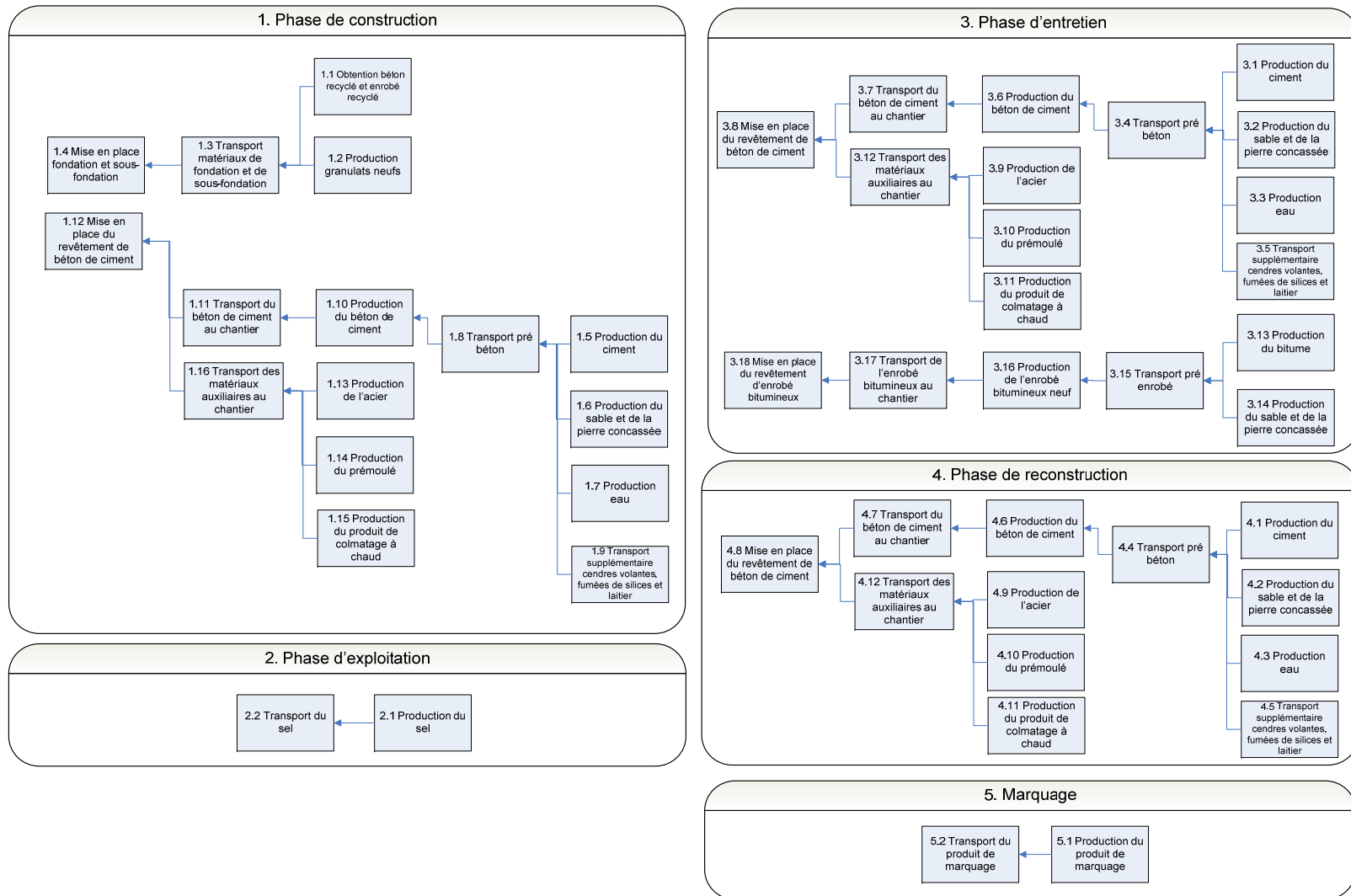


Figure C-1 : Système de produit pour le cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC).

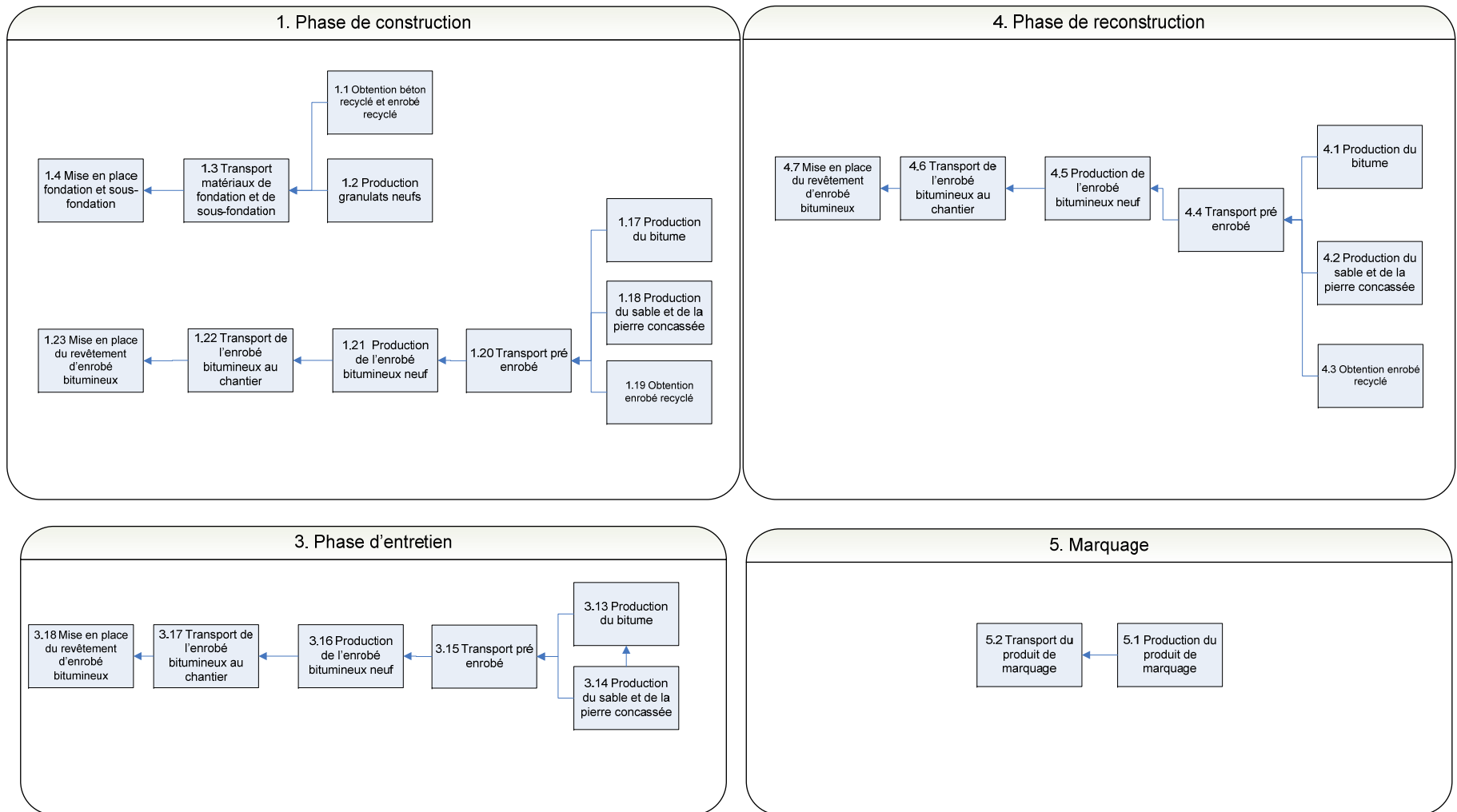


Figure C-2 : Système de produit pour le cycle de vie des chaussées en enrobé bitumineux (système BB).

**ANNEXE D: MÉTHODE D'ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE
(ACVI)**

Le contenu de cette annexe est compris dans les fichiers suivants :
« Pi08_Rpt_final_Annexe_D » et
« Pi08_Rpt_final_Annexe_D-2 »

**ANNEXE E: DESCRIPTION DES SYSTÈMES DE PRODUITS ET DES
HYPOTHÈSES DU MODÈLE D'ACV**

Le contenu de cette annexe a été retranché en raison du caractère confidentiel de l'information d'origine industrielle qu'elle contient. Il est compris dans le fichier suivant (non publiquement disponible) :
« Pi08_Rpt_final_Annexe_E »

ANNEXE F : RÉSULTATS

Le contenu de cette annexe a partiellement été retranché en raison du caractère confidentiel de l'information d'origine industrielle qu'elle contient. Il est compris dans le fichier suivant (non publiquement disponible) :
« Pi08_Rpt_final_Annexe_F »

Il est à noter que les résultats comparatifs sont présentés et expliqués au Sommaire ainsi qu'au chapitre 5.

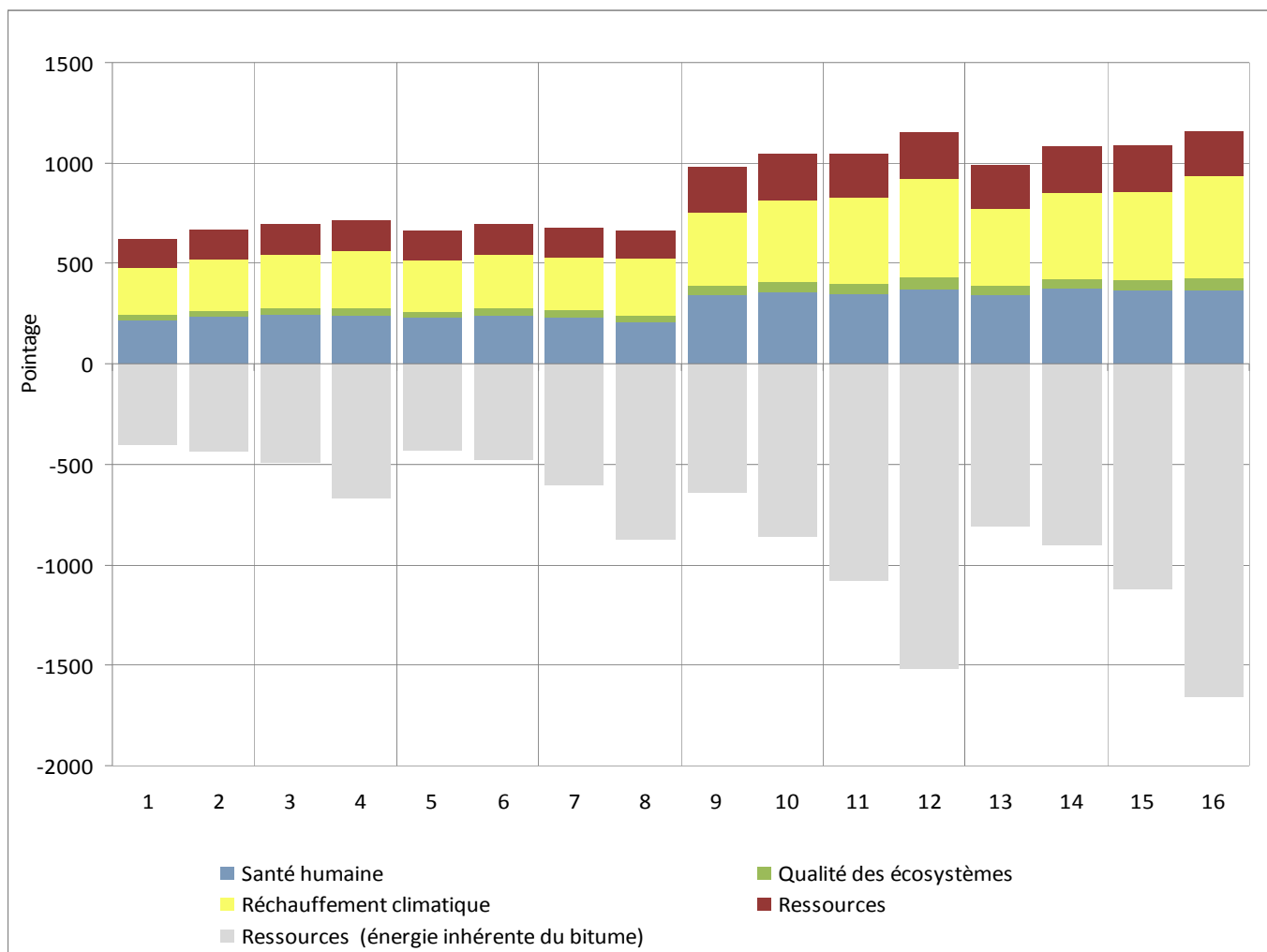


Figure 11.1: Pointage des catégories de dommage du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour les seize cas-types.

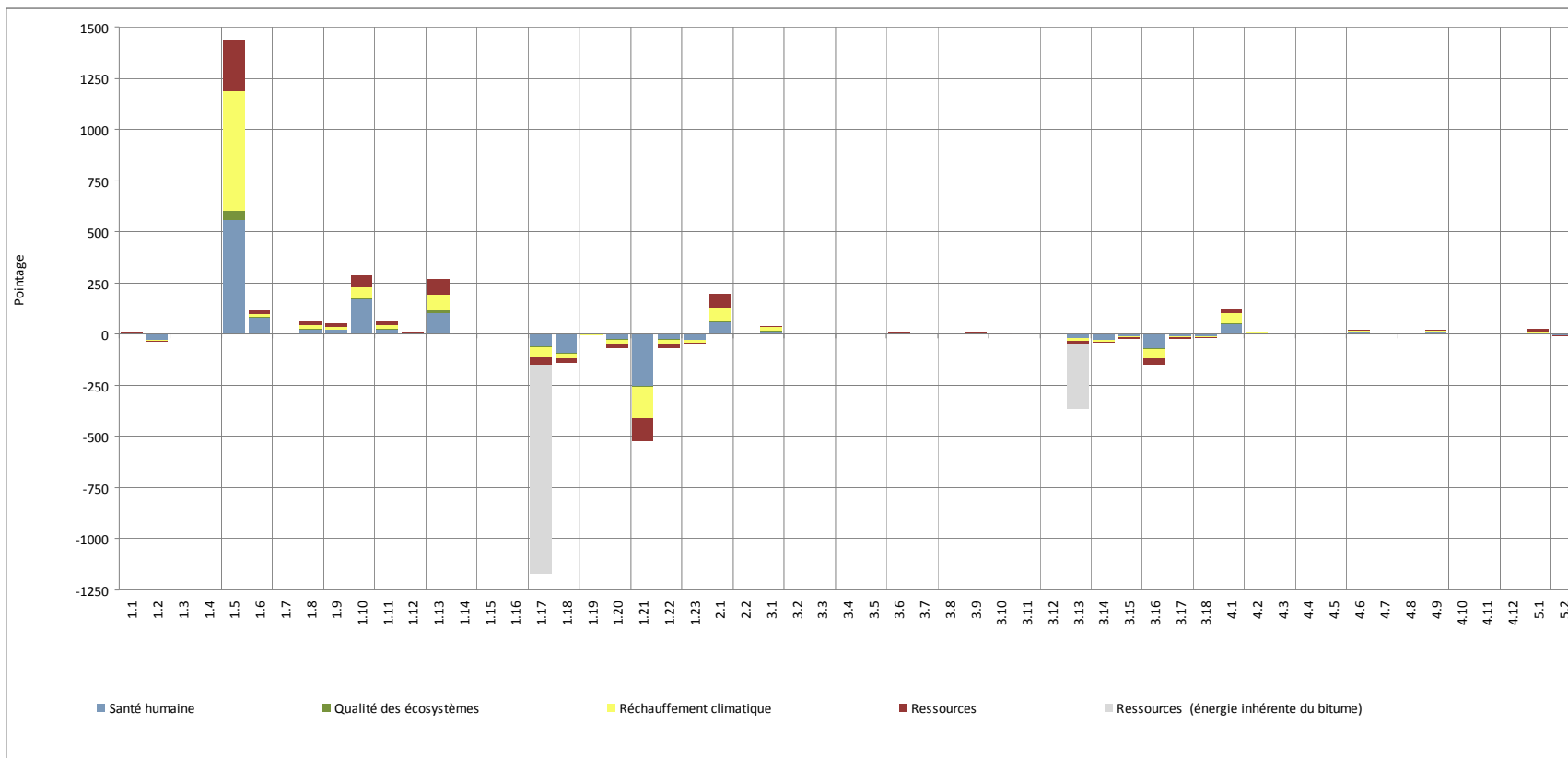


Figure 12.1: Analyse de contribution du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour le cas-type 16 par l'approche « dommage ».



Figure 20.3.3: Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (BC - BB) pour le cas-type 16 par l'approche « dommage ».

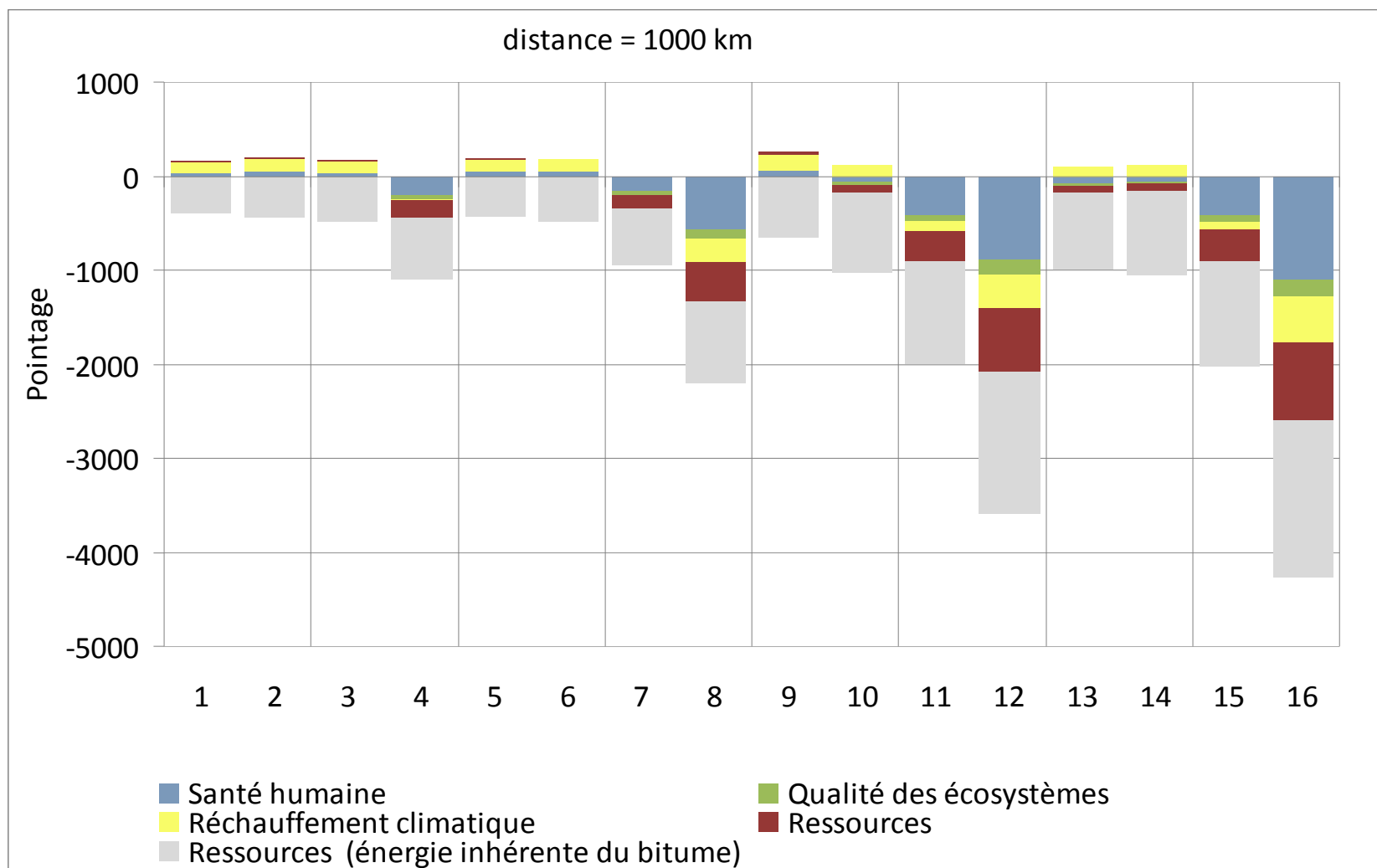


Figure 14.2.1: Pointage des catégories de dommage du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour les seize cas-types pour différentes distances de transport au chantier.

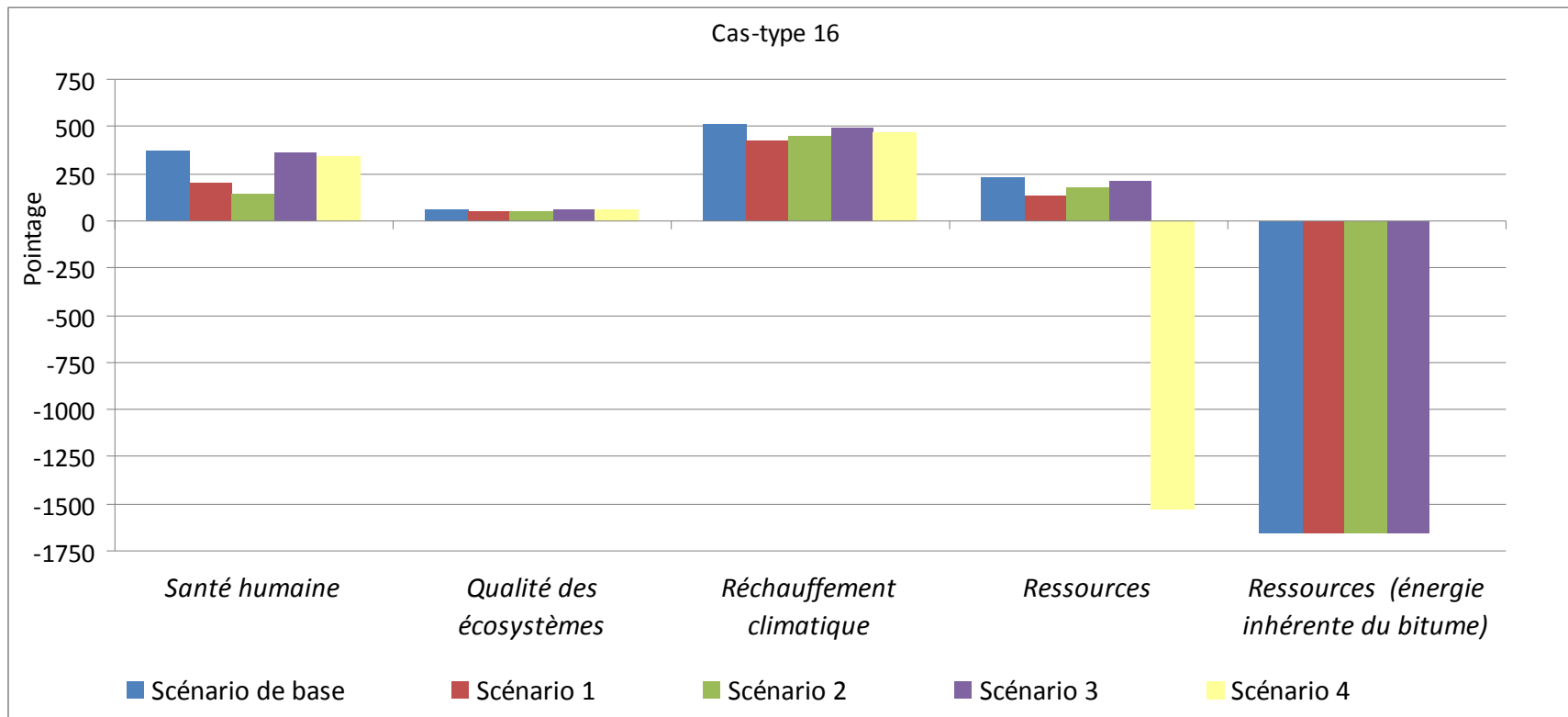


Figure 15.2.1: Pointage des catégories de dommage du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour le cas-type 16 selon différentes données de production de bitume.

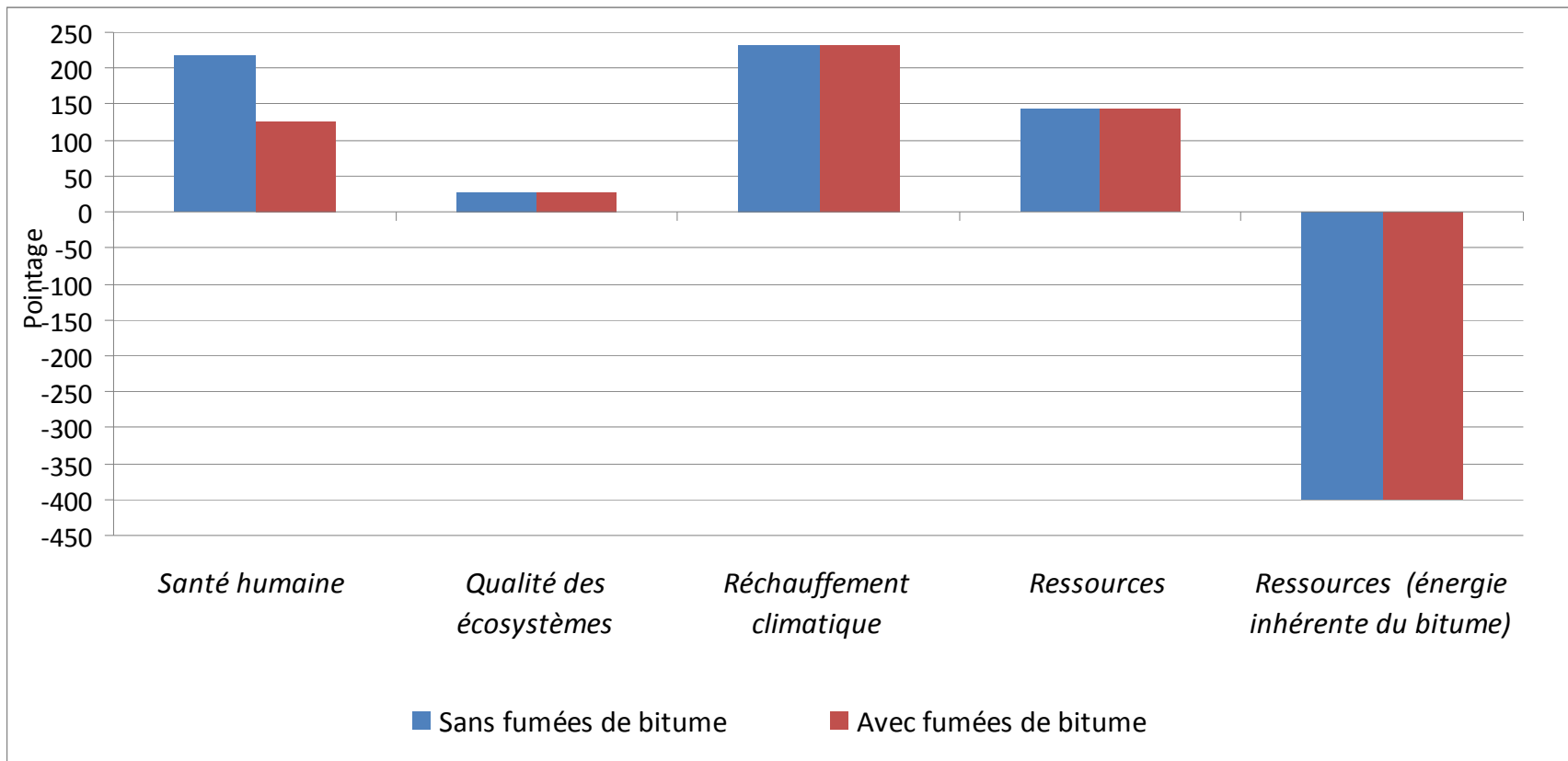


Figure 16.2.1: Pointage des catégories de dommage du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour le cas-type 1 selon différents scénarios de fumées de bitume.

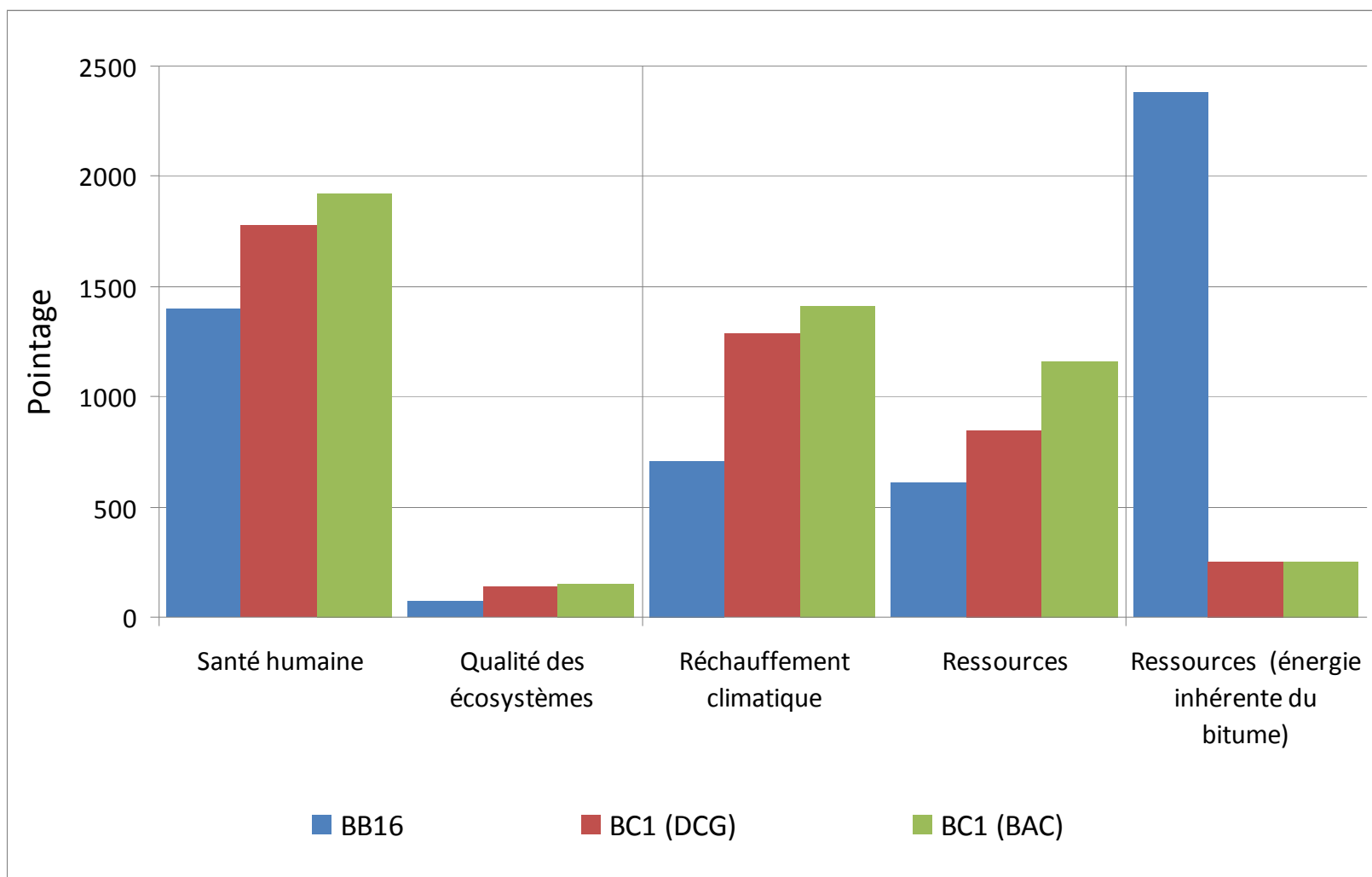


Figure 17.2.1: Pointage des catégories de dommage des systèmes BC (DCG), BC (BAC) et BB pour le cas-type 16

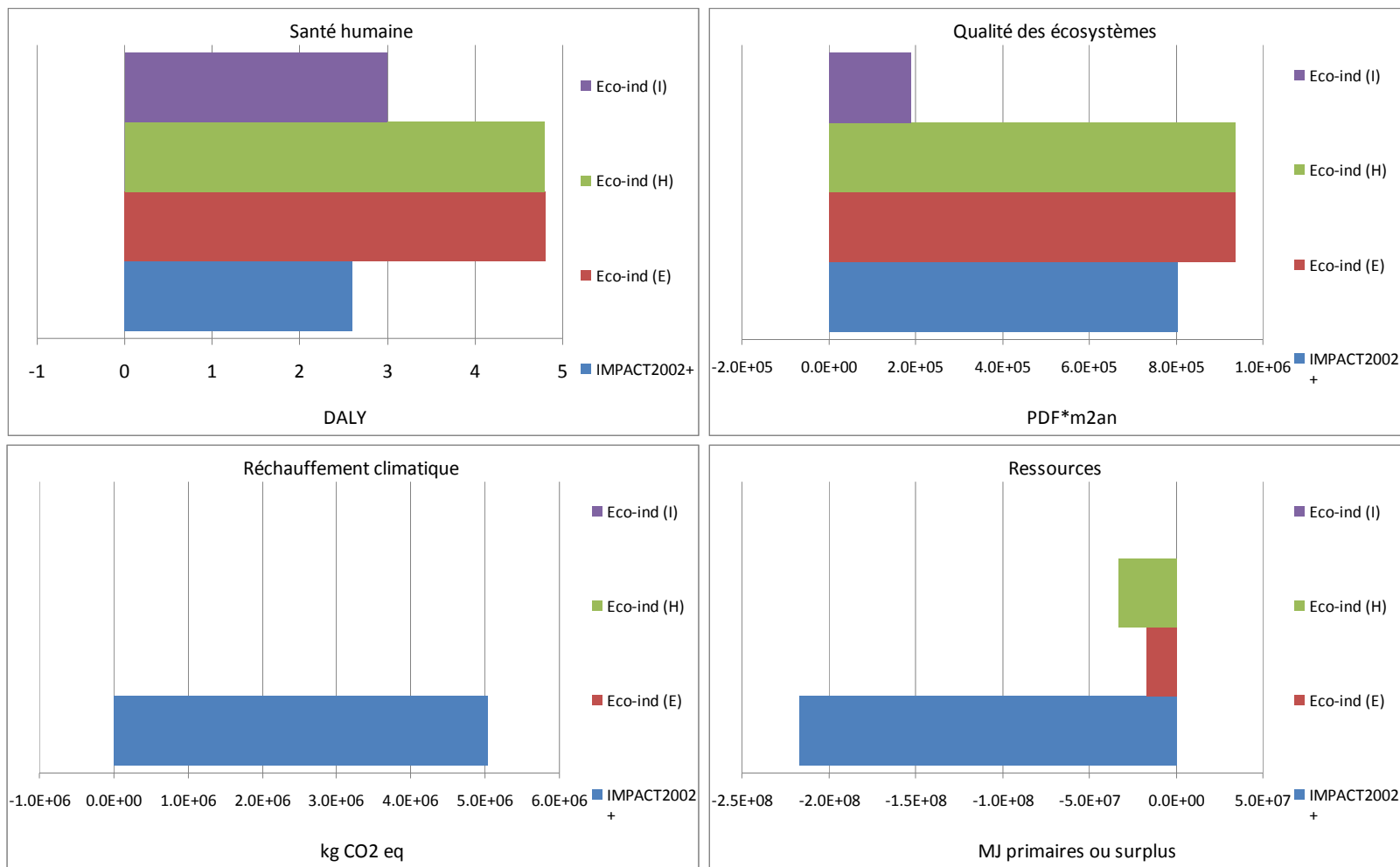


Figure 18.2: Indicateurs de dommage du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour le cas-type 16.

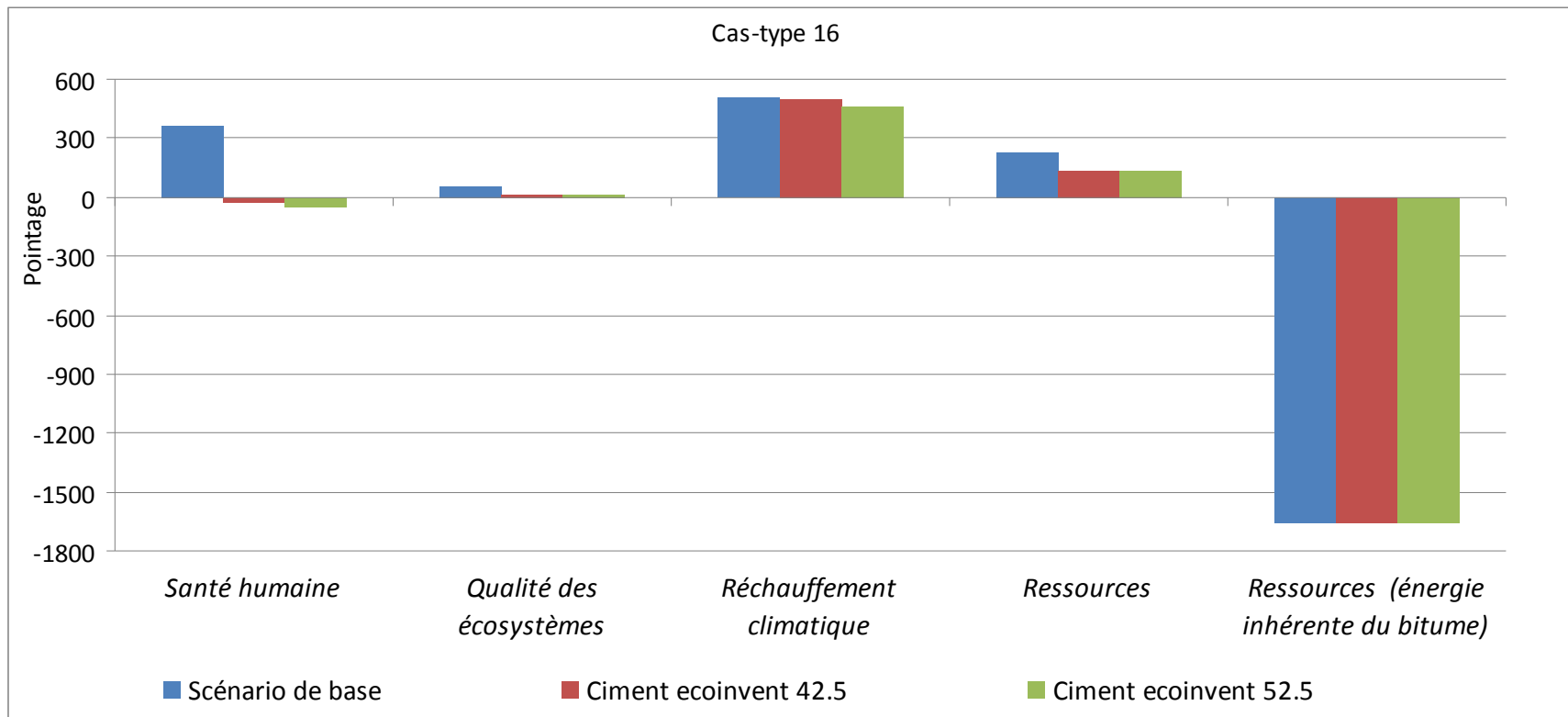


Figure 19.2.1: Pointage des catégories de dommage du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour le cas-type 16 selon différentes données de production de ciment

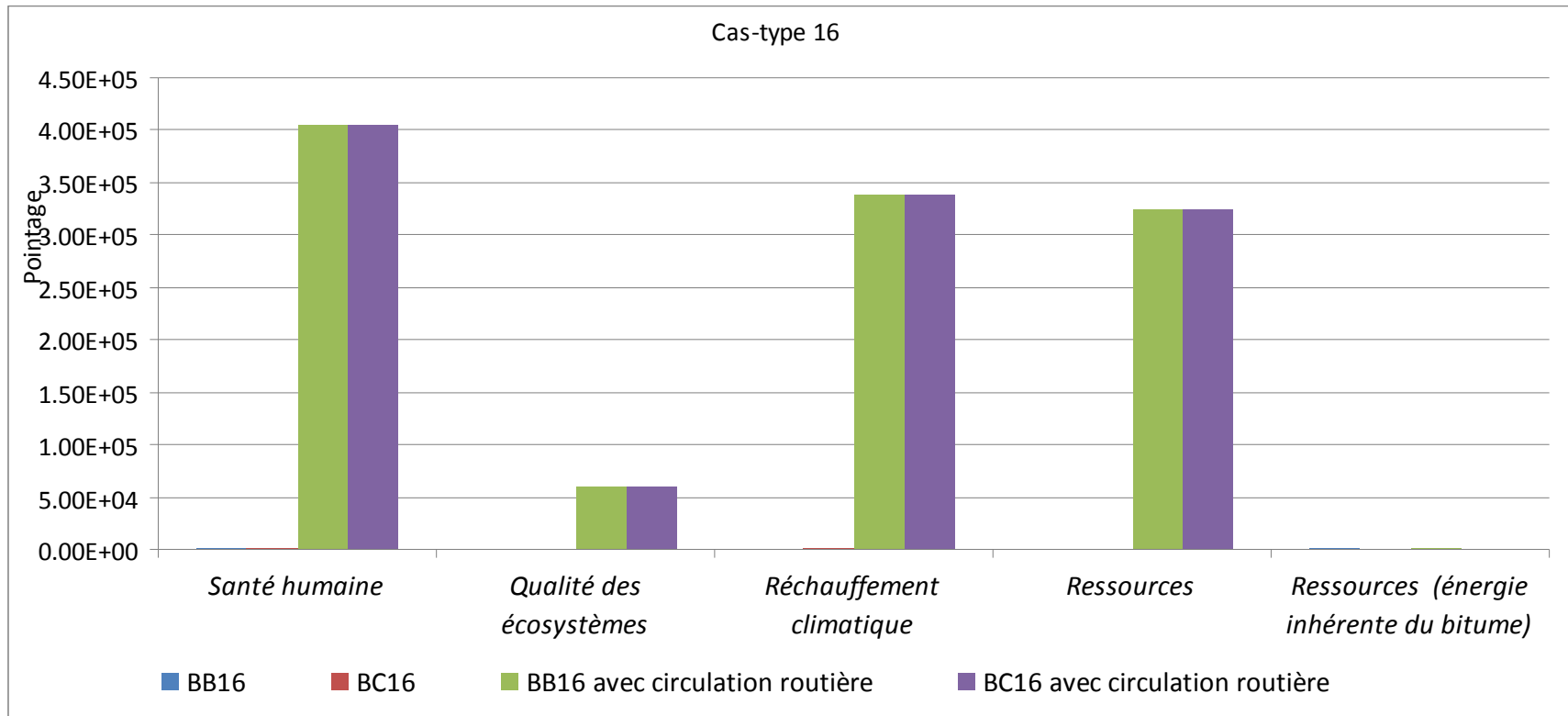


Figure 22.2.1: Pointage des catégories de dommage du cycle de vie des chaussées (système BC et système BB) pour le cas-type 16 en considérant 100% de la circulation routière sur le cycle de vie.

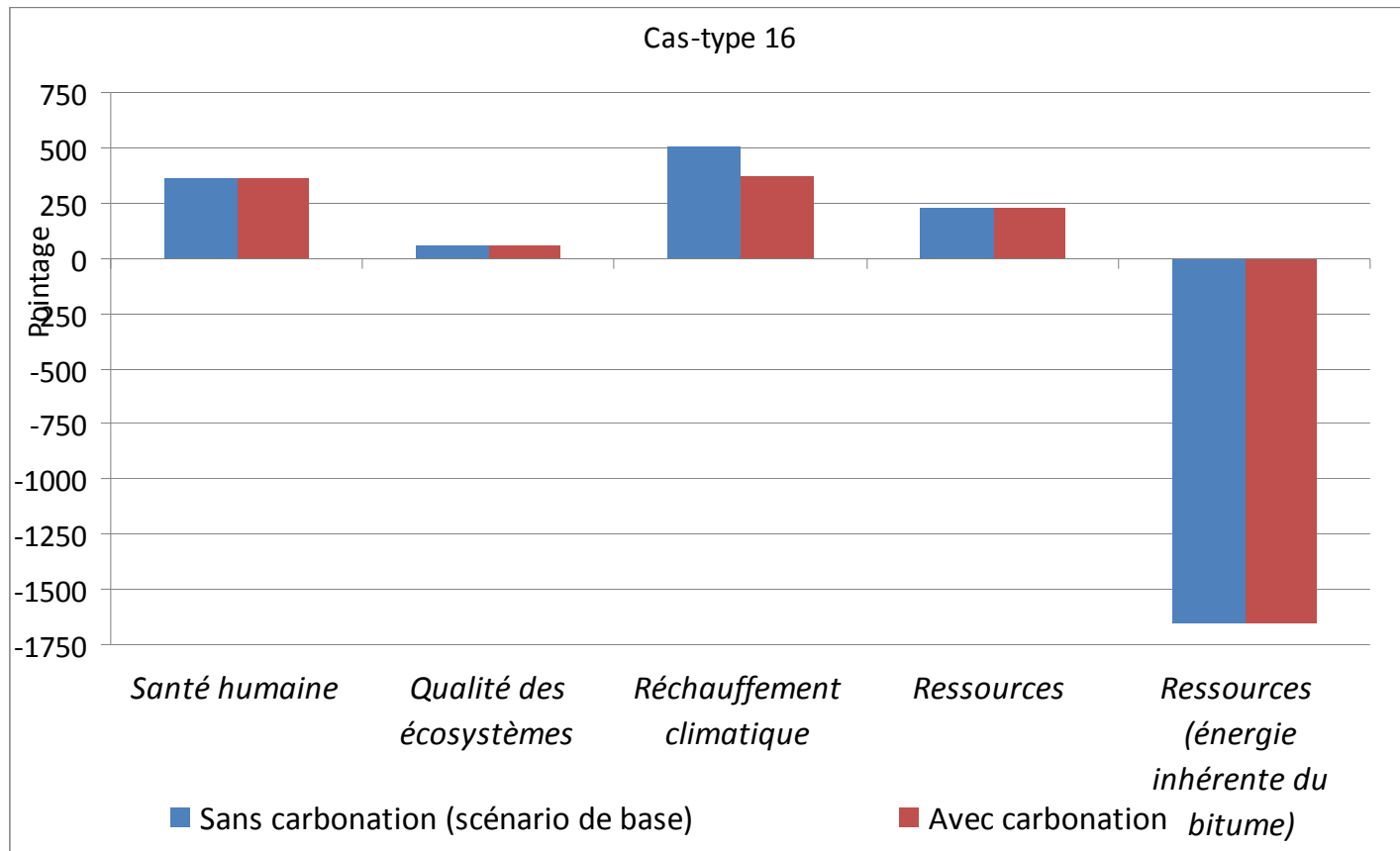


Figure 23.2.1: Pointage des catégories de dommage du cycle de vie comparatif des chaussées (système BC-système BB) pour le cas-type 16 avec et sans carbonation du béton de ciment

**ANNEXE G : RAPPORT DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE ET RÉPONSES DU
CIRAIG AU COMITÉ**

Le contenu de cette annexe est compris dans les fichiers suivants :
« Pi08_Rpt_final_Annexe_G » et
« Pi08_Rpt_final_Annexe_G-2 »