

**MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES  
CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX**

**Projet R840.1**

Elliot Muller

CIRAIG – Polytechnique Montréal  
3333 Chemin Queen-Mary, suite 310  
Montréal (Québec) Canada  
H3V 1A2

Télécopieur : 514-340-5913

Téléphone : 514-340-4711 #

[elliot.muller@polymtl.ca](mailto:elliot.muller@polymtl.ca)

Réalisé pour le compte du ministère des Transports

Août 2020

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et a été financée par le Ministère.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports.

### **Collaborateurs**

Jean-François Ménard, CIRAIG – Polytechnique Montréal, 514-340-4711 # 4817, jean-francois.menard@polymtl.ca,

Sophie Fallaha, CIRAIG – Polytechnique Montréal, 514-340-4711 # 4987, s.fallaha@polymtl.ca

© CIRAIG, 2020

Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services

Polytechnique Montréal, Département de génie chimique

## TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>3</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>6</b>
<b>GLOSSAIRE</b> .....	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>8</b>
<b>2 MISE À JOUR DU MODÈLE D'ÉTUDE</b> .....	<b>9</b>
2.1 Objectif et champ de l'étude .....	9
2.1.1 But de l'étude, application envisagée et public concerné .....	9
2.1.2 Fonctions, unité fonctionnelle et flux de référence .....	9
2.1.3 Frontières et description des systèmes.....	9
2.1.4 Approche d'imputation .....	12
2.1.5 Données d'inventaire du cycle de vie (ICV) et évaluation des impacts du cycle de vie (ACVI) .....	13
2.2 Modification à la modélisation des systèmes .....	13
2.2.1 Logiciel utilisé .....	13
2.2.2 Hiérarchisation des processus élémentaires.....	13
2.2.3 Paramétrisation du modèle .....	14
2.3 Mise à jour des données du modèle .....	14
2.3.1 Données du MTQ .....	15
2.3.2 Données d'arrière-plan .....	18
2.3.3 Méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV).....	19
<b>3 RÉSULTATS</b> .....	<b>21</b>
3.1 Analyse de l'inventaire du cycle de vie .....	21
3.2 Évaluation des impacts du cycle de vie.....	21
3.2.1 Résultats d'indicateurs de dommages/impacts .....	21
3.2.2 Analyse de contribution .....	24
3.2.3 Analyse d'incertitude .....	25
3.2.4 Analyses de sensibilité .....	26
3.3 Limites de l'étude.....	29
3.3.1 Limites de l'ICV.....	29
3.3.2 Limites de l'ÉICV .....	29
<b>4 CONCLUSIONS</b> .....	<b>31</b>
<b>5 RÉFÉRENCES</b> .....	<b>33</b>

<b>ANNEXE A : MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) ....</b>	<b>34</b>
<b>ANNEXE B : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>36</b>
<b>ANNEXE C : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES SYSTÈMES ÉTUDIÉS.....</b>	<b>38</b>
<b>ANNEXE D : DESCRIPTION DES SYSTÈMES DE PRODUITS ET DES HYPOTHÈSES DU MODÈLE ACV .....</b>	<b>47</b>
<b>ANNEXE E : RÉSULTATS.....</b>	<b>49</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Épaisseur des couches de la chaussée pour les cas-types spécifiés par le MTQ.....	11
Tableau 2 : Séquences d'interventions pour les cas-types spécifiés par le MTQ .....	12
Tableau 3 : Épaisseurs des différentes couches d'enrobé bitumineux pour tous les cas-types spécifiés par le MTQ .....	15
Tableau 4 : Caractéristiques des peintures estimées à partir des données fournies par le MTQ .....	16
Tableau 5 : Composition des différents types de béton de ciment .....	17
Tableau 6 : Composition des différents enrobés bitumineux .....	18
Tableau 7 : Écart relatif entre les résultats d'indicateurs de dommages/impacts pour les types de chaussées, pour les 16 cas-type (système BC - système BB) .....	22
Tableau 8: Proportion des itérations de l'analyse d'incertitude confirmant les résultats déterministes, pour tous les cas types et toutes les catégories de dommages/d'impacts considérées.....	25
Tableau 9: Paramètres utilisés pour la modélisation de l'analyse d'incertitude sur la carbonatation du béton. ....	26
Tableau 10 : Système ayant le résultat d'indicateur de dommage/impact le plus élevé, pour chaque analyse de sensibilité, pour les deux études. ....	27

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Frontières des systèmes.....	10
Figure 2 : Comparaison des contributions des différentes catégories d'impacts pour la catégorie de dommage <i>Santé humaine</i> , pour les systèmes BC et BB, pour le cas-type 16.....	23
Figure 3 : Comparaison des contributions des différentes catégories d'impacts à la catégorie de dommage <i>Qualité des écosystèmes</i> , pour les systèmes BC et BB, pour le cas-type 16.....	23
Figure 4 : Contribution des principales étapes du cycle de vie pour les systèmes BC et BB, pour les catégories de dommages/impacts considérées, pour le cas-type 16.....	24
Figure C.1 : Étape de construction initiale du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC).....	39
Figure C.2 : Étape d'entretien du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC) .....	40
Figure C.3 : Étape de marquage du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC) .....	41
Figure C.4 : Étape d'exploitation du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC) .....	41
Figure C.5 : Étape de reconstruction du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC) .....	42
Figure C.6 : Étape de construction initiale du cycle de vie des chaussées en enrobé bitumineux (système BB).....	43
Figure C.7 : Étape d'entretien du cycle de vie des chaussées en enrobé bitumineux (système BB).....	44
Figure C.8 : Étape de marquage du cycle de vie des chaussées en enrobé bitumineux (système BB).....	45
Figure C.9 : Étape de reconstruction du cycle de vie des chaussées en enrobé bitumineux (système BB).....	46

## GLOSSAIRE

ACC	Association canadienne du ciment
ACRGQTQ	Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec
ACV	Analyse du cycle de vie
BAC	Béton armé continu
BB	Béton bitumineux
BC	Béton de ciment
BQ	Bitume Québec
CIRAIG	Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CO2	Dioxyde de carbone
DALY	<i>Disabled Adjusted Life Years</i>
ÉICV	Évaluation des impacts du cycle de vie
ICV	Inventaire du cycle de vie
ISO	Organisation internationale de normalisation
MJ	Mégajoules d'énergie
MTQ	Ministère des Transports du Québec
PDF*m <sup>2</sup> *an	<i>Potentially Disappeared Fraction of species</i> (fraction des espèces potentiellement disparue) sur une certaine surface et une certaine durée
PRFV	Polymère renforcé de fibres de verre

## 1 INTRODUCTION

L'Orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées (ci-après appelée « Orientation ») adoptée par le ministère des Transports (MTQ), détermine le type de chaussée en béton ou en enrobé qui doit être privilégié lors de la reconstruction d'une route sur le réseau du MTQ. Le type de chaussée le plus adapté pour un tronçon de route donné est déterminé à partir d'une analyse comparative portant sur un nombre important de facteurs et qui permet d'identifier la meilleure option dans chaque cas.

Lors de la mise à jour de l'Orientation de 2001, le Comité directeur de l'Orientation a souhaité intégrer au processus de décision les paramètres environnementaux et énergétiques liés à la construction et à la réfection des chaussées. L'analyse du cycle de vie environnementale (ACV) a été identifiée comme la méthode la plus appropriée étant donné son caractère rigoureux, cohérent et vérifiable, ainsi que son niveau de reconnaissance international.

Un projet de recherche a été confié au CIRAIQ en 2006 et complété en 2009 pour réaliser l'ACV comparative des chaussées en béton et en enrobé dans l'objectif d'intégrer des paramètres environnementaux à l'Orientation.

Pendant le processus de mise à jour en 2015, certaines modifications aux cas-types ont été évaluées, mais l'influence de ces ajustements était mineure et ne modifiait pas les conclusions de l'ACV de 2009. L'Orientation a donc été reconduite pour la période 2015-2020.

Le processus de mise à jour de l'Orientation pour 2020 est en cours. De nouvelles données environnementales adaptées au contexte québécois sont maintenant disponibles. Afin de déterminer si ces nouvelles connaissances méthodologiques peuvent influencer les conclusions de l'étude de 2009, une mise à jour de l'ACV est nécessaire.

Ce document présente la mise à jour de l'étude de 2009. À ce titre, il détaillera l'ensemble des modifications apportées à la modélisation de la précédente étude ainsi que les nouveaux résultats en découlant. Il ne s'attardera cependant pas sur les éléments n'ayant pas été modifiés entre ces deux études et se contentera alors de renvoyer le lecteur au rapport de 2009.

## 2 MISE À JOUR DU MODÈLE D'ÉTUDE

L'objectif de cette étude est de mettre à jour l'ACV environnementale des chaussées en béton de ciment et en enrobé bitumineux réalisée en 2009. Une partie du modèle et des données utilisées en 2009 ont donc été modifiées alors que d'autres éléments sont restés inchangés.

Ce chapitre présente l'ensemble des éléments ayant été modifiés et renvoie au rapport de 2009 pour ceux ayant été conservés à l'identique.

### 2.1 Objectif et champ de l'étude

#### 2.1.1 *But de l'étude, application envisagée et public concerné*

Le but de l'analyse et l'application envisagée restent les mêmes que pour l'étude de 2009. Le public concerné est cependant restreint au MTQ, étant donné qu'aucune autre partie prenante n'a été impliquée dans cette mise à jour et qu'aucune revue critique n'a été effectuée, rendant une divulgation publique, en l'état, impossible.

#### 2.1.2 *Fonctions, unité fonctionnelle et flux de référence*

La fonction étudiée reste la même, à savoir :

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

Les fonctions secondaires sont traitées de la même manière que pour la première étude.

L'unité fonctionnelle est également conservée en étant cependant actualisée pour l'année 2020 :

« 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 2020 ».

Les flux de référence suivent donc la même définition que lors de l'étude de 2009.

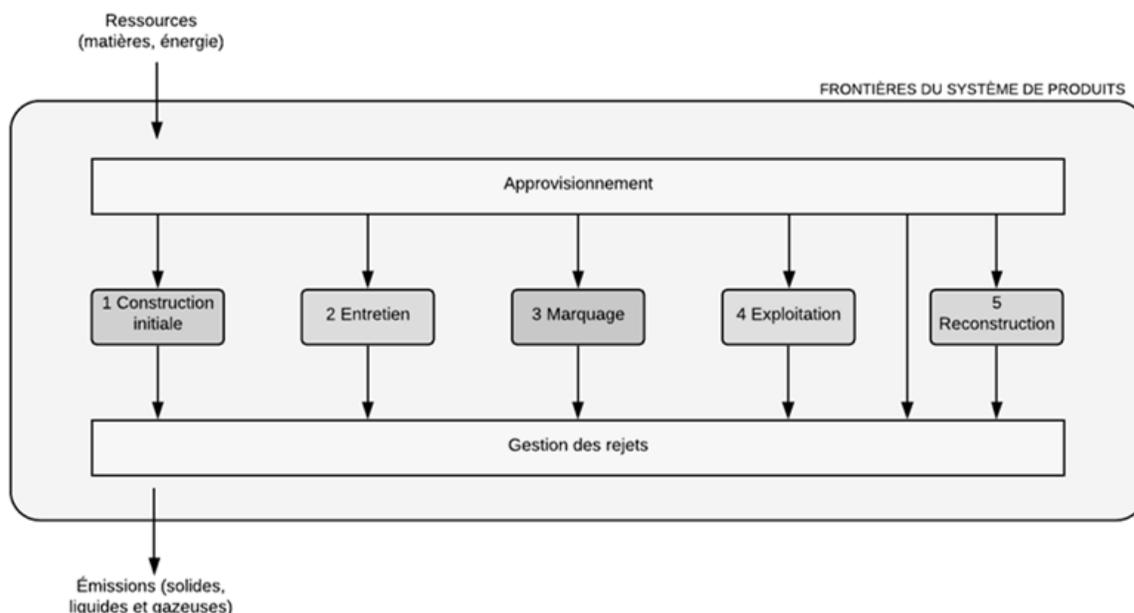
#### 2.1.3 *Frontières et description des systèmes*

Les systèmes étudiés restent quasiment identiques à ceux de la précédente étude. Les frontières des systèmes restent les mêmes, donc les processus exclus également.

Quelques processus ont cependant été ajoutés ou modifiés. Par exemple, la production et la pose de liant d'accrochage pour les chaussées en enrobé bitumineux n'avaient pas été prises en compte en 2009 et le sont maintenant. La modélisation du système a en outre été réorganisée. Ainsi, le rafraîchissement du marquage n'est plus compté comme faisant partie de l'entretien mais du marquage.

La Figure 1 présente Les frontières du système étudié, avec les modifications apportées à l'étape de marquage. Des représentations des processus constituant chacune de ces étapes principales pour les deux types de chaussées sont détaillées à l'Annexe C.

## MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX



**Figure 1 : Frontières des systèmes**

Les 16 cas-types étudiés pour les deux types de chaussées restent définis de la même manière que pour l'analyse précédente, en fonction du nombre de voies de la chaussée, du trafic quotidien et du type de ce trafic. Cependant, le dimensionnement de ces différents cas-types, plus précisément l'épaisseur de chacune des couches constituant les chaussées, ont été modifiées par le MTQ depuis 2009. Les nouveaux dimensionnements ont donc été utilisés pour cette étude et sont indiqués au Tableau 1.

Les étapes d'entretien sur les deux types de chaussées ont également été modifiées par le MTQ depuis la précédente étude. Les nouvelles séquences d'intervention sont présentées au Tableau 2.

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

**Tableau 1 : Épaisseur 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)								
		Voie	Acc.	Voie	Acc.	Voie	Acc.	Voie	Acc.	
<b>Cas des chaussées en béton de ciment</b>										
2	20	Béton de ciment	161	150	188	150	215	150	273	150
		Fondation MG-20	150	161	150	188	150	215	150	273
		Sous-fondation MG-112 type A	922	922	881	881	839	839	750	750
2	40	Béton de ciment	185	150	212	150	240	241	302	150
		Fondation MG-20	150	186	150	214	150	150	150	304
		Sous-fondation MG-112 type A	885	884	844	842	802	800	710	708
3	50	Béton de ciment	185	150	213	213	241	241	303	303
		Fondation MG-20	150	185	150	150	150	150	150	150
		Sous-fondation MG-112 type A	885	885	842	842	800	800	708	708
3	90	Béton de ciment	196	196	223	223	253	253	316	316
		Fondation MG-20	150	150	150	150	150	150	150	150
		Sous-fondation MG-112 type A	868	868	827	827	782	782	690	690
<b>Cas des chaussées en enrobé bitumineux</b>										
2	20	Enrobé surface	103	90	118	90	135	105	186	143
		Enrobé base	80	0	90	0	100	0	105	0
		Fondation MG-20	279	372	290	408	302	433	328	477
		Sous-fondation MG-112 type A	771	771	721	721	667	667	554	554
2	40	Enrobé surface	115	90	127	103	157	120	207	164
		Enrobé base	90	0	105	0	105	0	110	0
		Fondation MG-20	290	405	300	430	301	443	339	493
		Sous-fondation MG-112 type A	725	725	674	674	629	629	506	506
3	50	Enrobé surface	115	90	127	129	157	157	207	207
		Enrobé base	90	0	105	105	105	105	110	110
		Fondation MG-20	292	407	301	301	303	303	342	342
		Sous-fondation MG-112 type A	723	723	672	672	626	626	502	502
3	90	Enrobé surface	125	125	133	135	167	167	213	213
		Enrobé base	90	90	110	110	105	105	115	115
		Fondation MG-20	296	296	305	305	311	311	353	353
		Sous-fondation MG-112 type A	703	703	652	652	602	602	475	475

**Tableau 2 : Séquences d'interventions pour les cas-types spécifiés par le MTQ.**

No	Intervention	Moment des travaux (année)			
		Cas type 1,2,3,5,6,9,10,13,14	Cas type 4,7,11,15	Cas type 8,12	Cas type 16
<b>Cas des chaussées en béton de ciment</b>					
1	Reconstruction complète de la chaussée et marquage	0	0	0	0
2	Colmatage des joints longitudinaux (100% des joints), regarnissage des joints transversaux (5% des joints), grenailage (100%) et marquage	10	10	10	10
3	Réparation en surface en béton (0,25%), réparation en profondeur en béton (0,50%), meulage (100%), regarnissage des joints (25%) et marquage	19	19	19	19
4	Réparation en surface en béton (2%), réparation en profondeur en béton (2%), meulage (25%), grenailage (75%), regarnissage des joints (100%) et marquage	29	29	29	29
5	Correction de l'enrobé (60 kg/m <sup>2</sup> ), resurfaçage en enrobé (120 kg/m <sup>2</sup> ) et marquage	39	39	39	39
6	Reconstruction de la dalle seulement et marquage	50	49	47	46
<b>Cas des chaussées en enrobé bitumineux</b>					
1	Reconstruction complète de la chaussée et marquage	0	0	0	0
2	Planage (40 mm) et resurfaçage (100 kg/m <sup>2</sup> ) (voies seulement), marquage	12	10	9	8
3	Planage (50 mm) et resurfaçage (120 kg/m <sup>2</sup> ) (voies et accotements), marquage	23	19	17	15
4	Planage (50 mm) et resurfaçage (120 kg/m <sup>2</sup> ) (voies seulement), marquage	33	27	24	22
5	Planage (40 mm) et resurfaçage (100 kg/m <sup>2</sup> ) (voies seulement), marquage	41	34	30	28
6	Enlèvement complet du revêtement et pose d'un nouvel enrobé, marquage	48	40	36	33
7	Planage (40 mm) et resurfaçage (100 kg/m <sup>2</sup> ) (voies seulement), marquage			45	41
8	Planage (50 mm) et resurfaçage (120 kg/m <sup>2</sup> ) (voies et accotements), marquage				48
Note : pour le marquage, il y a rafraîchissement annuel avec une peinture à base d'eau					

### 2.1.4 Approche d'imputation

Les règles employées pour l'imputation de l'inventaire associé aux fonctions secondaires des systèmes sont strictement les mêmes que pour l'étude de 2009.

### **2.1.5 Données d'inventaire du cycle de vie (ICV) et évaluation des impacts du cycle de vie (ACVI)**

Les données utilisées pour paramétrer le modèle mis à jour ne sont pas identiques à celles de l'analyse précédente. Les explications détaillées concernant ces modifications sont présentées aux sections 2.3.1 et 2.3.2. De même, la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie n'est plus IMPACT 2002+ mais IMPACT World+. Les raisons et conséquences de ce changement sont données à la section 2.3.3 de ce rapport.

## **2.2 Modification à la modélisation des systèmes**

Même si la quasi-totalité des processus élémentaires pris en compte dans l'étude de 2009 le sont à l'identique dans cette mise à jour, la manière de modéliser les systèmes étudiés n'est plus la même. Ainsi, le logiciel ACV choisi pour l'étude a été modifié, tout comme la façon dont les différents processus élémentaires des systèmes ont été modélisés dans ce logiciel, ainsi que la manière de paramétrer ce modèle. Cette section présente l'ensemble de ces changements.

### **2.2.1 Logiciel utilisé**

Un des livrables attendus pour cette étude est la modélisation ACV dans le logiciel ACV openLCA. C'est la version la plus récente de ce logiciel au début de l'étude, openLCA 1.10.1, qui a été utilisée. L'analyse précédente ayant été réalisée au moyen du logiciel SimaPro, il a donc fallu transférer le modèle d'un logiciel à l'autre.

Au moment de l'implémentation de ce modèle dans openLCA, il a été décidé de lui apporter deux modifications majeures qui sont présentées dans les sous-sections suivantes.

### **2.2.2 Hiérarchisation des processus élémentaires**

Tout d'abord, l'agencement des différents processus, représentant chacune des étapes du cycle de vie, a été implémenté de manière hiérarchique. Ainsi, chaque processus fait appel à d'autres processus correspondant aux étapes précédentes du cycle de vie et ne décrit que les émissions ou les ressources intervenant directement à l'étape qu'il représente.

Cette approche permet une analyse plus facile des résultats directement au sein d'openLCA, notamment grâce à l'onglet « arbre de contribution » (« *Contribution tree* ») lors de la génération des résultats, puisque les impacts potentiels du système sont alors répartis selon chaque étape du cycle de vie. Les scores d'impact de chacune des étapes sont alors égaux à la somme des impacts potentiels directs de cette étape et de tous les processus élémentaires devant avoir eu lieu en amont. Il est dès lors extrêmement simple de voir quelles sont les étapes les plus contributrices, à n'importe quel niveau de l'arbre de processus.

Les schémas de l'Annexe C présentent de manière simplifiée la modélisation de l'arbre de processus tel qu'il est implémenté dans openLCA.

Un code numérique a été adopté pour représenter les différents processus élémentaires modélisés. Par exemple, tous les processus dont le code commence par « 3 » sont des processus de l'étape de marquage. Le deuxième chiffre du code correspond au

processus de cette étape qu'il représente, par exemple les processus « 3\_2 » correspondent au marquage des lignes pointillées. Enfin le troisième chiffre, s'il est présent, décrit la version spécifique de ce processus. Ainsi, le processus 3\_2\_1 représente le processus de marquage des lignes pointillées sur une chaussée en béton de ciment. De même le processus « 8\_20\_2 » est le processus de production de matériaux (« 8 ») décrivant la production du béton de ciment (« 20 ») avec GUL (« 2 »).

### **2.2.3 Paramétrisation du modèle**

Tout d'abord, le nouveau modèle a été intégralement paramétré, en utilisant des paramètres globaux. Ces paramètres sont définis pour l'intégralité de la base de données openLCA<sup>1</sup> contenant le modèle et non pas uniquement pour le processus, ou étape du cycle de vie, dans lequel ils interviennent. Ceci permet à la fois de réutiliser ces paramètres dans plusieurs processus distincts, mais également de les stocker tous au même endroit dans la base de données, afin de pouvoir avoir une vision d'ensemble de tous les paramètres utilisés à un endroit ou un autre du modèle.

Il est souvent préférable d'utiliser des formules afin de renseigner le calcul de la valeur des flux élémentaires associés à chacun des processus élémentaires, plutôt que directement des valeurs numériques. L'utilisation de paramètres rend ces formules plus transparentes.

De plus, un des avantages d'utiliser des paramètres globaux est que leur valeur est facilement modifiable afin de mettre à jour le modèle ou de réaliser une analyse de sensibilité par exemple. Cela permet de modéliser l'ensemble des processus une seule fois, puis de les faire varier, par exemple pour représenter chacun des cas-types de chaussée, en modifiant uniquement la valeur des différents paramètres et non les valeurs inscrites dans chacun des processus.

Un code numérique a été attribué à chacun de ces paramètres afin de l'associer efficacement au processus principal dans lequel il est appelé, ainsi que pour regrouper tous les paramètres ayant des fonctions équivalentes au sein de chaque processus. Par exemple, le paramètre « p8\_20\_1\_1\_2\_MassePierreBeton1 » est utilisé dans le processus « 8\_20\_1 » et décrit une masse, comme l'ensemble des paramètres « p8\_20\_1\_1\_X », ici la masse de pierre concassée nécessaire pour produire un m<sup>3</sup> de béton GU.

## **2.3 Mise à jour des données du modèle**

Une grande partie des données utilisées dans cette étude ont dû être mises à jour. Ceci concerne à la fois les données d'avant-plan, fournies principalement par le MTQ (Thébeau, D., 2020), mais aussi les données d'arrière-plan, provenant de la base de donnéesecoinvent ou d'autres sources externes. Cette section décrit les données ayant ainsi été mises à jour.

---

<sup>1</sup> Cette base de données contient toutes les informations nécessaires au fonctionnement du logiciel, il ne faut pas confondre celle-ci avec une base de données d'inventaire du cycle de vie qui contient les informations sur les entrants et les sortants de processus élémentaires permettant la modélisation d'un système de produits.

### 2.3.1 Données du MTQ

Tout d'abord, une grande partie des données d'avant-plan ont été modifiées afin de correspondre aux différents changements adoptés par le MTQ.

#### 2.3.1.1 Caractéristiques des cas-types

Comme présenté à la section 2.1.3, les épaisseurs des différentes couches des chaussées ainsi que les séquences d'interventions ont été mises à jour. Les épaisseurs des différentes couches d'enrobé bitumineux ont également été mises à jour et sont recensées au Tableau 3.

**Tableau 3 : Épaisseurs des différentes couches d'enrobé bitumineux pour tous les cas-types spécifiées par le MTQ.**

	Total voies	Total accotement	ESG-10 (mm)	ESG-14 (mm)	GB-20 (1) (mm)	GB-20 (2) (mm)
Cas 1	183		43	60	80	
		90	43	47		
Cas 2	208		48	70	90	
		90	48	42		
Cas 3	235		55	75	105	
		104	55	49		
Cas 4	291		51	70	75	95
		142	51	91		
Cas 5	205		45	70	90	
		90	45	45		
Cas 6	232		52	75	105	
		102	52	50		
Cas 7	262		42	60	60	100
		120	42	78		
Cas 8	317		52	75	90	100
		163	52	111		
Cas 9	205		45	70	90	
		90	45	45		
Cas 10	232		52	75	105	
		232	52	180		
Cas 11	262		42	60	60	100
		262	42	220		
Cas 12	317		52	75	90	100
		317	52	265		
Cas 13	215		50	75	90	
		215	50	165		
Cas 14	243		50	70	110	
		243	50	193		
Cas 15	272		42	60	70	100
		272	42	230		
Cas 16	328		58	80	90	100
		328	58	270		

### 2.3.1.2 Étape de marquage

Les processus liés à l'étape de marquage ont également dû être fortement modifiés afin de correspondre aux nouvelles données reçues du MTQ. Ainsi, le marquage des différentes chaussées neuves se fait toujours avec de la peinture époxydique, au taux de 66 L/km de ligne, aux dates indiquées au Tableau 2, tandis que le rafraîchissement de ces lignes se fait toutes les autres années avec de la peinture à base d'eau et non plus de la peinture alkyde, à un taux d'environ 48 L/km de ligne. Des distinctions ont de plus été intégrées entre les peintures jaune, blanche, noire et le catalyseur pour les résines époxydique, ainsi que pour les peintures jaune et blanche pour les peintures à l'eau, puisqu'elles possèdent toutes des caractéristiques distinctes. Les masses volumiques de chacune de ces peintures sont indiquées au Tableau 4.

L'augmentation très importante de la quantité de peinture utilisée pour les rafraîchissements, qui sont maintenant annuels, a demandé de modéliser un nouveau processus pour la production de la peinture à base d'eau utilisée. En effet, le seul proxy disponible dans ecoinvent était celui, déjà utilisé en 2009, décrivant la production de peinture alkyde, qui faisait largement augmenter la contribution de l'étape de marquage. Les diverses informations fournies par le MTQ concernant cette peinture ont permis de paramétrer ce processus avec des données approximatives, renseignées au Tableau 4. La peinture époxydique continue d'être modélisée à l'aide du processus de la base de données ecoinvent.

**Tableau 4 : Caractéristiques des peintures estimées à partir des données fournies par le MTQ.**

Peinture	Époxydique				Peinture à l'eau	
	Résine époxydique blanche	Résine époxydique jaune	Résine époxydique noire	Catalyseur	Peinture à l'eau blanche	Peinture à l'eau jaune
Masse volumique (kg/L)	1,40	1,28	1,25	1,02	1,70	1,63
Taux massique de dioxyde de titane (%)	-	-	-	-	8,81	2,44
Taux massique d'alumine (%)	-	-	-	-	0,8	0,6
Taux massique de carbonate de calcium (%)	-	-	-	-	50	55
Taux massique d'eau (%)	-	-	-	-	16,5	18,7
Taux massique de méthanol (%)	-	-	-	-	4	4
Taux massique de pigments (%)	-	-	-	-	9,15	8,83
Taux massique de	-	-	-	-	9,14	8,83

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

liant acrylique (%)						
Taux massique de quartz (%)	-	-	-	-	1,6	1,6

Plusieurs autres modifications ont également été apportées à la modélisation des processus liés au marquage. Ainsi, la peinture époxydique est maintenant modélisée comme un mélange volumique de 2/3 de résine époxydique et d'1/3 de catalyseur époxydique. Dans la précédente étude, par manque de données, toutes les variétés de peinture époxydique (catalyseur et résine inclus) étaient modélisées avec le même processus ecoinvent mais également avec une densité volumique identique de 1,6 kg/L. Ces deux substances sont toujours modélisées avec le même processus mais ont une masse volumique différente. Le taux d'application des microbilles dans la peinture blanche est désormais de 0.6 kg/L de peinture à base d'eau et de 2.0 kg/L de peinture époxydique. Les microbilles ne sont plus modélisées comme de la fibre de verre mais comme du verre recyclé micronisé. Enfin, la bande polymère qui était posée sous la ligne en pointillés pour des chaussées en enrobé bitumineux portant plus de 50 000 véhicules par jour n'est plus utilisée et a donc été supprimée de la modélisation.

### 2.3.1.3 Composition du béton de ciment et de l'enrobé bitumineux

Les données concernant la composition des différents types de béton de ciment pouvant être utilisés sur les différentes chaussées du Québec, ainsi que celle des différents enrobés bitumineux constitutifs de ce type de chaussée ont également été mises à jour à l'aide des nouvelles informations fournies par le MTQ. Ces données sont respectivement fournies aux Tableau 5 et Tableau 6.

**Tableau 5 : Composition des différents types de béton de ciment.**

Type IIIA	Avec GU	Avec GUL	Ternaire FS et CV	Ternaire FS et laitier
Sable 0 – 5 mm (kg/m3)	667	667	865	865
Pierre 5 – 10 mm (kg/m3)	1 238	1 238	1 005	1 005
Eau (kg/m3)	145	145	145	145
Ciment (Total) (kg/m3)	340	340	340	340
GU dans ciment (%)	100%	90%	75%	73%
GU dans ciment (kg/m3)	340	306	255	248,2
Calcaire dans ciment (%)	0%	10%	0%	0%
Calcaire dans ciment (kg/m3)	0	34	0	0
Fumée de silice dans ciment (%)	0	0%	5%	5%
Fumée de silice dans ciment (kg/m3)	0	0	17	17
Cendres volantes dans ciment (%)	0	0%	20%	0%
Cendres volantes dans ciment (kg/m3)	0	0	68	0

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

Laitier dans ciment (%)	0	0%	0%	22%
Laitier dans ciment (kg/m3)	0	0	0	74,8
Masse volumique (kg/m3)	2 388	2388	2355	2355
Proportion d'utilisation	25%	25%	25%	25%

**Tableau 6 : Composition des différents enrobés bitumineux.**

Type d'enrobé		ESG 10	ESG 14	GB 20
Bitume (%)		5,25	4,88	4,36
Hors bitume	10-20 mm (%)			33
	10-14 mm (%)		20	
	5-10 mm (%)	40	25	15
	0-5 mm (%)	50	35	32
	Résidus recyclés (%)	10	20	20

Faute d'informations supplémentaires, il a toujours été supposé que les quatre types de béton de ciment avaient la même probabilité d'être utilisés dans une chaussée en béton de ciment.

#### 2.3.1.4 Autres modifications

Quelques autres éléments ont été modifiés suite aux nouvelles informations fournies par le MTQ. Ainsi, les joints longitudinaux ne sont plus colmatés au moment de la construction mais seulement au cours de la première intervention. À chaque intervention, les joints devant être remplacés, le sont avec du produit à chaud, le produit prémoulé n'étant utilisé que pour les joints transversaux lors de la construction initiale.

Un liant d'accrochage, déposé en même temps que l'enrobé bitumineux lors des étapes de construction, de reconstruction et des interventions de resurfacement, a été modélisé comme un mélange d'eau (40 %) et de bitume (60 %). Par manque d'informations supplémentaires, les autres composants du liant (surfactants et acide) ainsi que l'énergie nécessaire à sa fabrication ainsi qu'à son entreposage ont été négligés.

Enfin, l'eau utilisée lors de l'opération de meulage est dorénavant prise en compte, même si la machinerie utilisée lors de cette intervention est toujours négligée par manque de données et parce que sa contribution est jugée négligeable.

### 2.3.2 Données d'arrière-plan

#### 2.3.2.1 Données ecoinvent

La grande majorité des données d'arrière-plan utilisées proviennent de la base de données d'inventaire du cycle de vie ecoinvent<sup>2</sup>, tout comme pour l'étude précédente.

<sup>2</sup><https://www.ecoinvent.org>

Elles ont simplement été mises à jour avec la version la plus récente de cette base de données, ecoinvent v3.6 (2019). Les données représentatives du contexte québécois ont été choisies dans la mesure du possible ou modifiées pour s'en approcher au mieux, le cas échéant, principalement en remplaçant l'énergie consommée par l'énergie produite/consommée au Québec.

### 2.3.2.2 *Autres données d'arrière-plan*

Lors de l'étude de 2009, un certain nombre de données avaient été fournies par différents acteurs industriels québécois (BQ, l'ACC, l'ACRGTQ ou la raffinerie Pétro-Canada) afin de modéliser différents processus comme la production de diesel, de bitume et d'enrobé bitumineux, de ciment et de béton de ciment et les différentes machines utilisées lors de la construction et des différentes interventions. La plupart de ces processus sont maintenant modélisés avec des processus de la base de données ecoinvent qui sont plus récents et pourront être mis à jour automatiquement lors du passage à une nouvelle version d'ecoinvent. Les données utilisées en 2009 sont cependant utilisées dans les analyses de sensibilité présentées à la section 3.2.4.

Seules les quantités d'énergie liées à la production de matières premières (sable, gravier, pierre concassée) ou des matières transformées (béton de ciment et enrobé bitumineux) ainsi que les éventuelles émissions de particules associées à ces activités, et les distances de transport des différents matériaux composants le ciment ont été conservés. Les indications sur le nombre d'heures d'utilisation des machines ou sur la consommation de carburant des véhicules ont également été réutilisées, et celles décrivant leur puissance ont été prises comme référence afin de trouver le proxy équivalent parmi les processus de machines proposés dans ecoinvent.

### 2.3.3 *Méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV)*

La méthode choisie pour évaluer les impacts du cycle de vie dans cette étude est la méthode IMPACT World+ (Bulle et al., 2019) et non plus IMPACT 2002+. Cette nouvelle méthode est plus récente et plus complète. En effet elle intègre, en plus de ce qui était déjà pris en compte par IMPACT 2002+, les contributions du Changement climatique à la catégorie de dommage *Santé humaine*. Pour la catégorie de dommage *Qualité des écosystèmes*, elle ajoute aux catégories d'impacts déjà incluses dans IMPACT 2002+ les effets du changement climatique ainsi que l'acidification et l'eutrophisation de l'eau douce qui étaient comptabilisées à part dans la précédente méthode. Elle inclut également les contributions des radiations ionisantes, de la transformation des terres (à distinguer de l'occupation des terres), de l'acidification et de l'eutrophisation marine et enfin de la pollution thermique de l'eau.

IMPACT World+ intègre également les contributions de la rareté de l'eau aux deux catégories de dommages précitées, mais la façon avec laquelle elle caractérise les flux d'eau inventoriés n'étant pas compatible avec la manière dont openLCA tient compte de ces mêmes flux a poussé à écarter ces contributions de l'analyse. La contribution de l'écotoxicité aquatique (eau douce) à long terme a également été écartée de l'analyse car cette catégorie est dominée par les impacts potentiels liés au rejet à long terme dans l'eau de métaux provenant du traitement de déchets, qui sont très élevés tout en étant très incertains et risquaient de fausser les conclusions.

En ce qui concerne les catégories liées à l'utilisation des ressources, IMPACT World+ présente deux catégories d'impacts : *Utilisation de ressources minérales*, dont

l'indicateur est quantifié en kg dépourvus, et *Utilisation des ressources nucléaires et fossiles*, quantifié en MJ dépourvus, incluant l'énergie inhérente de matériaux comme le bitume. Ces deux catégories ne sont pas agrégées en une unique catégorie de dommage sur la disparition des ressources non renouvelables et seront donc considérées séparément lors de l'analyse des résultats. La catégorie d'impact *Changement climatique à court terme*, quantifiée en kg d'équivalent CO<sub>2</sub>, sera également considérée en tant que telle, même si elle est déjà incluse dans les deux catégories dommages précitées, car elle donne l'empreinte carbone des systèmes étudiés.

IMPACT World+ est particulièrement intéressante car elle permet une évaluation régionalisée des impacts du cycle de vie, c'est-à-dire qu'elle peut distinguer l'émission d'une même substance selon sa région géographique. Ceci permet d'améliorer la précision des résultats d'ÉICV. Cependant, cette fonction n'a pas été implémentée à l'heure actuelle dans le logiciel ACV openLCA, elle n'a donc pas pu être utilisée.

Enfin, IMPACT World+ ne fournit pas de facteurs de normalisation et de pondération afin d'obtenir un score unique. Les deux catégories de dommages, *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*, ainsi que les trois catégories d'impact, *Utilisation des ressources minérales*, *Utilisation des ressources nucléaires et fossiles* et *Changement climatique à court terme*, seront donc analysées séparément.

### 3 RÉSULTATS

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats mis à jour en insistant sur les changements s'étant produits entre l'étude de 2009 et celle de 2020. Tous les résultats évoqués ici sont disponibles à l'Annexe E.

#### 3.1 Analyse de l'inventaire du cycle de vie

Contrairement à l'étude de 2009, aucune analyse détaillée de l'inventaire du cycle de vie n'a été réalisée. Une telle analyse ne correspond plus à la méthodologie actuellement adoptée par le CIRAIG puisqu'elle n'est pas utile à la compréhension des impacts potentiels d'un système de produits. En particulier, la sommation des masses de différentes émissions ou ressources n'apporte pas d'information sur l'impact potentiel de chaque cas-type ou de chaque type de chaussée puisque chaque flux élémentaire inventorié peut avoir un facteur de caractérisation extrêmement différent des autres, ce n'est donc que le résultat de la caractérisation, i.e. évaluation des impacts du cycle de vie, qui renseigne sur l'impact potentiel du système pour une catégorie d'impact donnée.

L'analyse de contribution au niveau des flux économiques pour chacune des catégories de dommages/impacts, donc au niveau des différentes étapes du cycle de vie, est en revanche intéressante et est présentée dans la section 3.2.2.

#### 3.2 Évaluation des impacts du cycle de vie

##### 3.2.1 Résultats d'indicateurs de dommages/impacts

Le Tableau 7 présente un résumé des écarts relatifs entre les systèmes BC et BB<sup>3</sup> pour chacune des catégories de dommages et d'impacts considérées. La formule utilisée pour les calculer est la suivante :

$$\Delta(\%) = \frac{(\text{résultat d'indicateur}_{\text{SystèmeBC}} - \text{résultat d'indicateur}_{\text{SystèmeBB}})}{\text{résultat d'indicateur}_{\text{SystèmeBB}}}$$

Un écart relatif positif indique que le système BB présente une meilleure performance environnementale, un écart relatif négatif indique que le système BC est favorisé.

---

<sup>3</sup>La désignation des systèmes utilisée pour l'étude de 2009 est reprise : système BC pour les chaussées en béton de ciment et système BB pour les chaussées en béton bitumineux (enrobé).

**Tableau 7: Écart relatif entre les résultats d'indicateurs de dommages/impacts pour les types de chaussées, pour les 16 cas-type (système BC - système BB).**

Cas-type	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Utilisation de ressources nucléaires et fossiles	Utilisation de ressources minérales	Changement climatique à court terme
1	83%	53%	-35%	1367%	75%
2	88%	58%	-37%	1477%	82%
3	93%	61%	-39%	1575%	87%
4	88%	56%	-48%	1629%	83%
5	88%	57%	-36%	1464%	81%
6	92%	61%	-39%	1565%	86%
7	98%	65%	-44%	1770%	94%
8	81%	49%	-54%	1639%	76%
9	88%	57%	-37%	1467%	81%
10	86%	54%	-45%	1520%	79%
11	88%	56%	-51%	1689%	84%
12	91%	58%	-57%	1895%	89%
13	90%	58%	-43%	1583%	84%
14	100%	66%	-43%	1760%	95%
15	92%	59%	-51%	1749%	88%
16	80%	48%	-61%	1834%	77%

Les résultats sont équivalents pour tous les cas-types. Toutes les catégories sont favorables au système BB, mise à part *Utilisation des ressources nucléaires et fossiles*. Ceci est dû à la contribution dominante de l'énergie inhérente du bitume de la chaussée en enrobé bitumineux. Par exemple, pour le cas-type 16, celle-ci représente 78 % du résultat d'indicateur pour le système BB alors qu'elle ne représente que 26 % pour le système BC. Ces résultats sont similaires à ceux de l'étude de 2009.

Les résultats pour les indicateurs de dommages diffèrent légèrement de ceux de l'étude de 2009 puisque de nouvelles catégories d'impacts sont prise en compte au sein des deux catégories de dommages considérées, notamment les effets du Changement climatique. Cette dernière catégorie d'impact est d'ailleurs la plus importante contributrice aux résultats d'indicateurs pour les deux catégories de dommages comme le montrent les Figure 2 et Figure 3 pour le cas-type 16 (les autres cas-types montrent des résultats similaires (voir Annexe E). La catégorie *Transformation des terres* a également une forte contribution à la catégorie *Qualité des écosystèmes* et est défavorable au système BB pour l'ensemble des cas-types, ce qui explique en partie la diminution de l'avantage du système BB sur le système BC pour cette catégorie de dommage

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

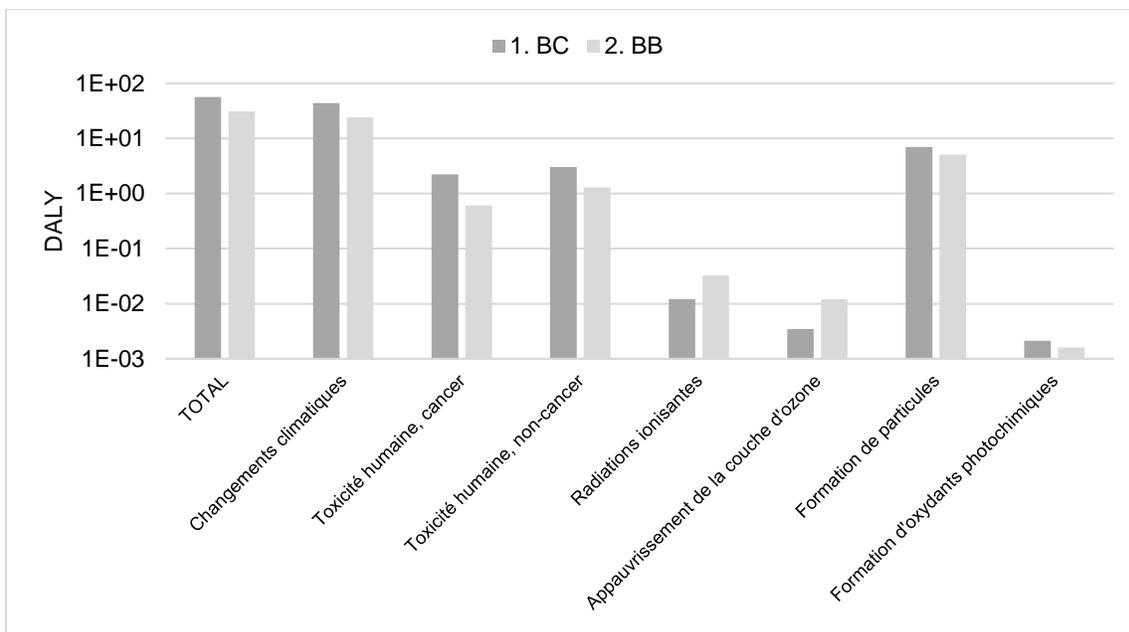


Figure 2 : Comparaison des contributions des différentes catégories d'impacts pour la catégorie de dommage *Santé humaine*, pour les systèmes BC et BB, pour le cas-type 16

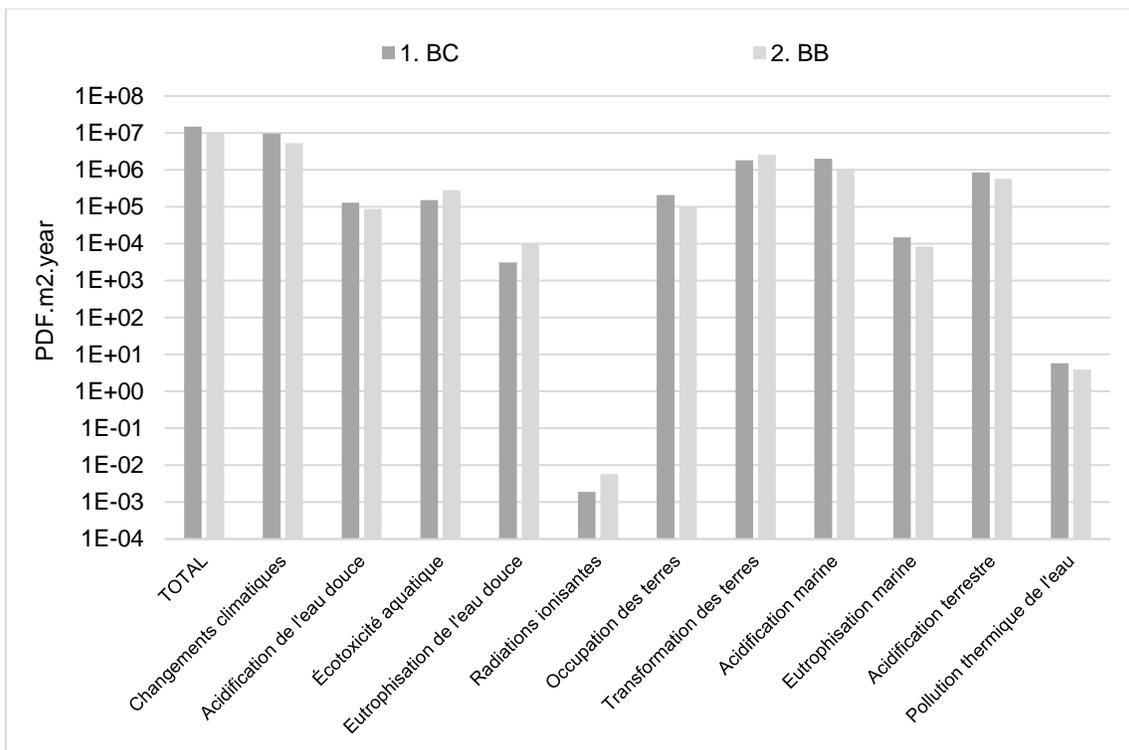


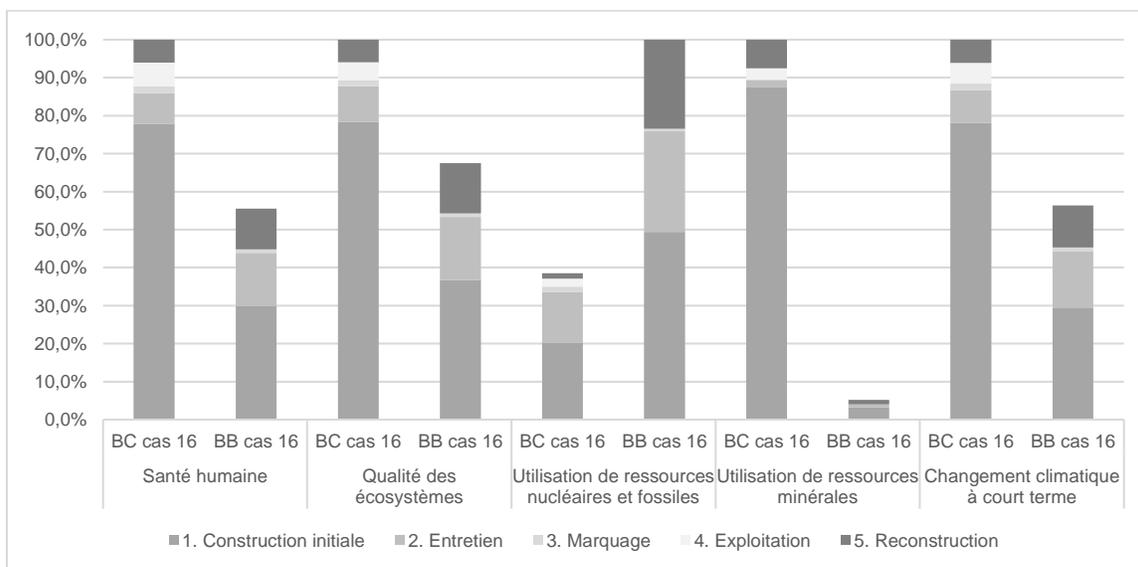
Figure 3 : Comparaison des contributions des différentes catégories d'impacts à la catégorie de dommage *Qualité des écosystèmes*, pour les systèmes BC et BB, pour le cas-type 16

### 3.2.2 Analyse de contribution

Une analyse de contribution permet de repérer les étapes du cycle de vie et les processus contribuant le plus au résultat d'indicateur total pour le système étudié, pour chaque catégorie d'impact et de dommage. La Figure 4 présente cette analyse pour les cinq catégories considérées, pour le cas-type 16 et pour les deux types de chaussées.

Ainsi pour le système BC, pour quasiment toutes les catégories, c'est l'étape de construction initiale qui contribue le plus aux résultats d'indicateurs. Une analyse plus détaillée montre que ce sont la production de clinker, utilisé dans le béton de ciment, et de manière plus limitée les productions d'acier (pour le revêtement de béton de ciment) et de gravier (pour la fondation et la sous-fondation). Seule la catégorie d'impact *Utilisation des ressources fossiles et nucléaires* a un profil différent puisque c'est la production de bitume pour l'étape d'entretien (pour le resurfaçage) qui y contribue le plus. La production de clinker et d'acier demandent beaucoup d'énergie mais ne sont que les deuxième et troisième contributeurs pour cette catégorie, ce qui explique l'importance moindre de l'étape de construction initiale pour cette catégorie d'impact.

Pour le système BB, l'étape de construction initiale reste la plus contributrice à l'ensemble des résultats d'indicateurs, mais la reconstruction ayant lieu plus tôt et le nombre d'interventions y étant plus élevé font que ces deux autres étapes ont également des contributions importantes pour ce système. Dans le détail, ce sont les productions de bitume et d'enrobé bitumineux, puis celles de gravier et de pierre concassée qui contribuent le plus aux différents indicateurs. Seule la catégorie *Utilisation des ressources minérales* montre un profil différent puisque ce sont les processus nécessitant la construction d'infrastructures de production, e.g. l'usine de production d'enrobé, qui sont les principaux contributeurs.



**Figure 4 : Contribution des principales étapes du cycle de vie pour les systèmes BC et BB, pour les catégories de dommages/impacts considérées, pour le cas-type 16**

Il est difficile de comparer ces résultats à ceux de l'étude de 2009 puisque l'analyse de contribution avait alors été faite pour un score unique, obtenu par agrégation des

résultats d'indicateurs de catégories de dommages/impacts, une fois normalisés et pondérés. Cependant, les productions de ciment, d'acier, de bitume et d'enrobé bitumineux étaient déjà les contributeurs principaux. Seules les productions de béton de ciment et de sel déglaçant semblent être moins contributrices pour l'étude mise à jour.

### 3.2.3 Analyse d'incertitude

Tout comme pour l'étude de 2009, une analyse d'incertitude de type Monte-Carlo a été réalisée afin d'obtenir une indication de la robustesse des conclusions. Le nombre d'itérations est toujours de 1 000. Les scores donnés aux critères de la « Pedigree matrix » utilisée pour caractériser les incertitudes associées aux paramètres utilisés dans la modélisation des systèmes sont présentés à l'Annexe E. Le Tableau 8 présente la proportion des itérations pour laquelle les conclusions sont les mêmes que celles obtenues en utilisant les valeurs déterministes pour les paramètres, c'est-à-dire identifiant le même type de chaussée comme étant préférable, pour tous les cas-types et toutes les catégories de dommages/impacts considérées.

**Tableau 8: Proportion des itérations de l'analyse d'incertitude confirmant les résultats déterministes, pour tous les cas types et toutes les catégories de dommages/d'impacts considérées.**

Catégorie de dommage/ impact	SH	QÉ	URFN	URM	RCCT
Cas-type 1	98%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 2	98%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 3	98%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 4	97%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 5	98%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 6	98%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 7	97%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 8	96%	98%	100%	100%	100%
Cas-type 9	97%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 10	98%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 11	97%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 12	97%	99%	100%	100%	100%
Cas-type 13	98%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 14	98%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 15	98%	100%	100%	100%	100%
Cas-type 16	96%	97%	100%	100%	100%

SH : Santé humaine, QÉ : Qualité des écosystèmes, URFN : Utilisation des ressources fossiles et nucléaires, URM : Utilisation des ressources minérales, RCCT : Changement climatique à court terme, UR : Utilisation des ressources, CC : Changement climatique

Cette analyse d'incertitude indique une très grande robustesse des conclusions de cette étude. En effet, pour les catégories *Utilisation des ressources fossiles et nucléaires*, *Utilisation des ressources minérales* et *Changement climatique à court terme*, aucune itération ne résulte en une inversion des conclusions. Pour la catégorie *Qualité des écosystèmes*, seuls les cas-types 8, 12 et 16 présentent une très faible proportion d'inversions des conclusions (moins de 3%). Alors que pour la catégorie *Santé humaine*, la proportion d'inversions des conclusions est comprise entre 1 et 4% pour l'ensemble des cas-types. Il est toujours important de garder à l'esprit que cette analyse d'incertitude n'est présentée qu'à titre d'indicateur de la variabilité des conclusions de

cette étude. En effet, la variabilité de chacun des paramètres est approximée à l'aide de la « Pedigree matrix » et ne correspond pas à une mesure de la variabilité réelle.

### 3.2.4 Analyses de sensibilité

Les mêmes analyses de sensibilité que pour l'étude de 2009 ont été menées ici, à quelques modifications près.

Tout d'abord, pour les analyses de sensibilité sur les données de production du bitume et du ciment, ce sont dorénavant les données d'ecoinvent qui servent de référence et celles précédemment utilisées servent de scénarios alternatifs. Pour la carbonatation, l'équation utilisée est toujours la même mais la valeur de ses paramètres a été adaptée aux nouvelles données. Ces nouvelles valeurs sont présentées dans le avec  $K(t) = k_1(t) * k_2 * k_3$

et S, la surface pouvant être carbonatée, calculée en utilisant l'équation :

$$S = 2 * \frac{Volume}{\acute{e}paisseur}$$

Or cette dernière équation n'est valable que si les deux faces de l'objet étudié ont la capacité d'absorber du CO<sub>2</sub>, comme c'est le cas pour un mur. Dans le cas d'une chaussée de béton, une seule face est exposée au CO<sub>2</sub>, la formule devient donc :

$$S = \frac{Volume}{\acute{e}paisseur}$$

Tableau 9. Dans le cadre de cette étude, le béton de ciment considéré est constitué d'un mélange des quatre types de béton étudiés, dans des proportions égales. Le rapport de 2009 contenait une erreur, présentant le paramètre  $\rho_{ciment}$  comme étant la masse volumique du ciment. Il s'agit en réalité de la masse de ciment par m<sup>3</sup> de béton. De plus, l'étude précédente utilisait la formule :

$$CO_2(kg) = 0.383 * S * \rho_{ciment} * X_{clinker} * K(t) * \sqrt{t}$$

avec

$$K(t) = k_1(t) * k_2 * k_3$$

et S, la surface pouvant être carbonatée, calculée en utilisant l'équation :

$$S = 2 * \frac{Volume}{\acute{e}paisseur}$$

Or cette dernière équation n'est valable que si les deux faces de l'objet étudié ont la capacité d'absorber du CO<sub>2</sub>, comme c'est le cas pour un mur. Dans le cas d'une chaussée de béton, une seule face est exposée au CO<sub>2</sub>, la formule devient donc :

$$S = \frac{Volume}{\acute{e}paisseur}$$

**Tableau 9: Paramètres utilisés pour la modélisation de l'analyse de sensibilité sur la carbonatation du béton, pour le cas-type 16.**

Paramètre	$\rho_{ciment}$	$X_{clinker}$	$t_{enseveli}$	$t_{exposé}$	$k_{1,enseveli}$	$k_{1,exposé}$	$k_2$	$k_3$
Valeur pour le béton GU	340 kg/m <sup>3</sup>	92.5%	7 ans	43 ans	7.5 E-4 m.an <sup>1/2</sup>	1.0 E-3 m.an <sup>1/2</sup>	1.0	1.00
Valeur pour le béton GUL	306 kg/m <sup>3</sup>	92.5%	7 ans	43 ans	7.5 E-4 m.an <sup>1/2</sup>	1.0 E-3 m.an <sup>1/2</sup>	1.0	1.05
Valeur pour le béton ternaïre FS et CV	255 kg/m <sup>3</sup>	92.5%	7 ans	43 ans	7.5 E-4 m.an <sup>1/2</sup>	1.0 E-3 m.an <sup>1/2</sup>	1.0	1.10
Valeur pour le béton Ternaïre FS et laitier	248.2 kg/m <sup>3</sup>	92.5%	7 ans	43 ans	7.5 E-4 m.an <sup>1/2</sup>	1.0 E-3 m.an <sup>1/2</sup>	1.0	1.15

En ce qui concerne l'analyse de sensibilité sur l'augmentation de la consommation de carburant des véhicules circulant sur l'une ou l'autre des chaussées, la même approche que celle décrite dans l'étude de 2009 a été suivie mais les résultats obtenus sont bien moins extrêmes. Cela nous a conduit à penser que la précédente étude avait en réalité pris en compte l'intégralité (100%) de la consommation de carburant des véhicules circulants sur l'une ou l'autre des chaussées et non une unique augmentation de 1% de cette consommation. Les résultats obtenus sont environ deux ordres de grandeur en dessous de ceux de l'étude de 2009, ce qui semble confirmer cette hypothèse. Cette analyse de sensibilité a été réalisée sur le cas-type 16, l'augmentation de la consommation de carburant des véhicules circulant sur l'une ou l'autre des chaussées a donc été modélisée par 1% du carburant consommé par les 90 000 véhicules par jour, 75 % de voitures et 25 % de camions, roulant sur 5 km, soit la longueur de la chaussée prise en compte par l'unité fonctionnelle. Les conclusions de cette analyse de sensibilité ont été validées sur le cas-type 1.

Pour l'analyse de sensibilité sur la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie, c'est maintenant ReCiPe 2016 (Huijbregts et al., 2017) qui a été choisie puisqu'elle correspond à une version mise à jour de ReCiPe 2008, elle-même basée sur EcoIndicator99. C'est la version Égalitaire (E) de ReCiPe qui a été utilisée car elle adopte l'approche la plus conservatrice. En plus d'être une des méthodes ÉICV les plus récentes, ReCiPe est particulièrement intéressante à utiliser car elle prend en compte de très nombreuses catégories d'impacts, dont l'écotoxicité marine et terrestre, ainsi que les effets de la formation d'ozone troposphérique (i.e. smog) sur les écosystèmes, non prises en compte par IMPACT World+. Elle ne considère cependant pas l'acidification marine (due à l'absorption de CO<sub>2</sub> atmosphérique), ni celle de l'eau douce, ni encore la pollution thermique des eaux qui sont, elles, prise en compte par IMPACT World+.

Enfin, l'analyse de sensibilité sur les chaussées en béton armé continu (BAC) a vu une grande partie de ses paramètres être modifiés suite aux nouvelles données fournies par le MTQ (dimensionnement, quantité de matériaux utilisés, disparition de la fondation drainante, nouvelle séquence d'interventions). Un des changements les plus significatifs par rapport à l'étude de 2009 est la division des chaussées en BAC en deux types distincts : celles renforcées à l'aide d'acier et celles utilisant du polymère renforcé de fibres de verre (PRFV). L'étude précédente considérait une chaussée combinant les deux matériaux. Les autres données ayant été modifiées sont présentées dans l'Annexe D de ce rapport.

Le Tableau 10 résume les résultats des différentes analyses de sensibilité est les compare à ceux obtenus en 2009. Les résultats d'indicateurs de dommages/impacts

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

pour les deux systèmes ont été considérés équivalents (indiqué par « -- ») lorsqu'ils montrent une différence de moins de 5 %. Les analyses de sensibilité n'ont été réalisées cette fois-ci que pour le cas-type 16, sauf pour l'analyse de sensibilité sur la consommation de carburant des véhicules qui a également été réalisée pour le cas-type 1 et celle sur la méthode ÉICV qui a été réalisée pour l'ensemble des cas-types.

**Tableau 10 : Système ayant le résultat d'indicateur de dommage/impact le plus élevé, pour chaque analyse de sensibilité, pour les deux études.**

Étude	Étude de 2020					Étude de 2009			
	SH	QÉ	URFN	URM	RCCT	SH	QÉ	UR	CC
Référence	BC	BC	BB	BC	BC	BC	BC	BB	BC
Fumées de bitume	BC	BC	BB	BC	BC	BC	BC	BB	BC
Bitume	BC	BC	BB	BC	BC	BB (avec ecoinvent)	BC	BB	BC
Ciment	BC	BC	BB	BC	BC	BC	BC	BB	BC
Carbonatation	BC	BC	BB	BC	BC	BC	BC	BB	BC
Transport 100 km	BC	BC	BB	BC	BC	BC	BC	BB	BC
Transport 250 km	BC	BC	BB	BC	BC	BC	BC	BB	BC
Transport 1000 km	--	--	BB	BC	--	BB (cas 4, 7, 8, 11, 12, 15 et 16)	BB (cas 4, 7, 8, 11, 12, 15 et 16)	BB	BB (cas 4, 7, 8, 11, 12, 15 et 16)
Consommation de carburant des véhicules augmentant pour le système BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC
Consommation de carburant des véhicules augmentant pour le système BB	BB	BB	BB	BC	BB	BB	BB	BB	BB
Autre méthode ÉICV	BC	BC	BB	BC	BC	BC	BC	BC (pour EcoIndicator99-Individualiste)	BC
BAC – acier	BAC	BC≈BAC	BB	BC	BC≈BAC	BAC	BAC	BAC	BAC
BAC – PRFV	BC≈BAC	BC≈BAC	BB	BC≈BAC	BC≈BAC	BAC	BAC	BAC	BAC

Ainsi la plupart des scénarios alternatifs testés n'entraînent pas de changement des conclusions de l'étude. En plus des analyses de sensibilité sur les émissions de fumées de bitume, les données de production de ciment et la carbonatation qui ne montraient déjà pas de changement des conclusions dans l'étude de 2009, les études de sensibilité sur les données de production du bitume et sur l'utilisation d'une autre méthode ÉICV qui pouvaient en montrer précédemment dans certains cas spécifiques ne le font plus.

Il est intéressant de remarquer qu'avec l'utilisation de la méthode ReCiPe 2016 (E), même si les conclusions restent les mêmes, la contribution des catégories d'impacts aux

catégories de dommages est modifiée. En effet, pour la catégorie *Santé humaine*, la contribution de la catégorie *Changement climatique* diminue fortement, ainsi que celle de *Formation de particules fines*, alors que celle de *Toxicité humaine, cancérigène* et *Toxicité humaine, non cancérigène* augmentent beaucoup. De même le résultat d'indicateur de *Qualité des écosystèmes* est moins influencé par *Changement climatique* et *Transformation des terres* mais beaucoup plus par *Écotoxicité marine*. Ces changements mènent à une forte augmentation de la contribution de l'étape d'exploitation des chaussées, donc de la production de sel déglacant. Par exemple pour la chaussée de type BC du cas-type 16, sa contribution passe de respectivement 6,3 % et 4,7 % des résultats d'indicateurs pour *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* avec IMPACT World+ à respectivement 16,6 % et 12,9 % avec ReCiPe 2016 (E), alors que les émissions de sel, une fois épandu sur la chaussée, sont toujours exclues de l'analyse.

L'analyse concernant les distances de transport moyennes des matériaux permet d'observer, comme pour l'étude de 2009, un renversement des conclusions pour toutes les catégories de dommages/impacts considérées mis à part *Utilisation de ressources minérales*, avec le système BC devenant préférable à partir de 1000 km.

L'hypothèse d'une augmentation de 1% de la consommation de carburant des véhicules circulant sur l'une ou l'autre chaussée permet de tirer les mêmes conclusions qu'en 2009, même une fois l'erreur explicitée précédemment corrigée. Ainsi la chaussée causant une augmentation, même très légère, de la consommation de carburant, devient alors systématiquement la pire, pour l'ensemble des catégories de dommages/impacts considérées à l'exception de *Utilisation des ressources minérales*, pour laquelle le système BB est toujours préférable.

Enfin, l'analyse sur l'utilisation de chaussées en béton armé continu (BAC) conduit globalement aux mêmes conclusions qu'en 2009. En effet, ce type de chaussée, avec un renforcement à base d'acier ou de polymère, n'est jamais préférable. Elle est même dans la plupart des cas la pire, avec des résultats d'indicateurs supérieurs ou équivalents à ceux pour le système BC. Seules les catégories d'impacts *Utilisation de ressources fossiles et nucléaires* et *Utilisation de ressources minérale*, ne la présentent pas systématiquement comme la moins bonne des trois types de chaussées, contrairement à l'étude de 2009 pour laquelle les masses supplémentaires d'acier et de composite étaient considérées pour la même chaussée en BAC.

### **3.3 Limites de l'étude**

#### **3.3.1 Limites de l'ICV**

Les limites de l'ICV restent globalement les mêmes qu'en 2009 et ont été adressées de la même manière, c'est-à-dire principalement à l'aide des analyses de sensibilité présentées dans la section précédente. La seule différence est que les infrastructures pour les usines de béton de ciment et d'enrobé bitumineux ont été incluses dans cette mise à jour.

En ce qui concerne les indicateurs de qualité des données, le rapport final de l'étude de 2009 fournit, dans le Tableau 5-8, à chaque étape du cycle de vie, un score de 1 à 5. Le Tableau 5-7 de ce même rapport décrit les significations de ces scores allant de 1 pour une donnée spécifique et fiable (pour la qualité de données) et potentiellement

faiblement contributrice (pour la contribution potentielle à l'impact), à 5 pour des données manquantes et potentiellement fortement contributrices. Les scores déterminés restent identiques à ceux de l'étude de 2009, à l'exception de deux étapes du cycle de vie. Premièrement, les processus d'opération de machines sont mieux modélisés dans ecoinvent v3.6 et pourraient se voir attribuer le score de 2 pour la qualité des données pour modéliser les processus. Deuxièmement, la production des produits de marquage est maintenant mieux modélisée qu'en 2009 et pourrait donc se voir attribuer le score de 3 en termes de qualité des données, mais son score de contribution devrait être réévalué à 2 à cause de la contribution potentiellement très importante de certains des éléments constitutifs de la peinture à l'eau, dont la quantité utilisée a fortement augmenté comparativement à l'étude de 2009.

### **3.3.2 Limites de l'ÉICV**

De la même manière que pour les limites de l'ICV, les limites de l'ÉICV restent très semblables à celles de l'étude de 2009. Même si la méthode IMPACT World+ est basée sur des données plus récentes, prend en compte plus de catégories d'impacts au sein des catégories de dommages et caractérise plus de flux élémentaires que la méthode IMPACT 2002+, elle comprend toujours plusieurs limites. D'une part, elle ne considère toujours pas certains types d'impacts comme par exemple le bruit, les odeurs et les champs électromagnétiques. D'autre part elle ne caractérise toujours pas l'ensemble des flux élémentaires inventoriés (364 flux élémentaires sur 929, soit environ 39 % de l'inventaire).

Il est encore une fois important de noter que les résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie représentent des résultats d'indicateurs quantifiant des impacts environnementaux potentiels et non réels. Il s'agit d'expressions relatives (à l'unité fonctionnelle notamment) qui ne permettent pas de prédire les impacts finaux ou le risque sur les milieux récepteurs et le dépassement des normes ou marges de sécurité.

## 4 CONCLUSIONS

L'objectif de ce projet était de mettre à jour l'analyse de 2009 portant sur la comparaison des profils environnementaux de chaussées en béton de ciment et en enrobé bitumineux.

Malgré la modification d'une grande partie des données utilisées pour modéliser les systèmes, ainsi que de la modélisation elle-même des systèmes dans une moindre mesure, aucun changement d'importance n'a été observé quant aux résultats générés : les catégories de dommages *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* ainsi que les catégories d'impacts *Utilisation des ressources fossiles et nucléaires* et *Changement climatique à court terme* restent systématiquement favorables aux chaussées en enrobé bitumineux alors que la catégorie d'impact *Utilisation des ressources minérales* est toujours favorable aux chaussées en béton de ciment.

L'analyse d'incertitude indique une très grande robustesse des conclusions de l'étude puisque trois des cinq catégories de dommages/impacts considérées ne présentent aucune inversion des conclusions tirées des résultats déterministes sur les 1000 itérations réalisées. Tandis que pour les deux autres catégories, *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*, tous les cas-types montrent une proportion supérieure à 96% des itérations confirmant ces conclusions.

En ce qui concerne les analyses de sensibilité, la robustesse des conclusions semble plus grande qu'en 2009 puisque seules les analyses de sensibilité sur des scénarios alternatifs modélisant une augmentation de la consommation de carburant des véhicules circulant sur les chaussées, et une très forte augmentation de la distance de transport moyenne des différents matériaux, présentent une modification des conclusions. Dans le premier cas, la chaussée entraînant une hausse de la consommation de carburant des véhicules sera défavorisée pour toutes les catégories de dommages/impacts considérées, à l'exception de la catégorie *Utilisation des ressources minérales*, toujours favorable aux chaussées en enrobé bitumineux. Dans le second cas, seule une distance dépassant 1000 km entraîne un changement dans les conclusions avec les chaussées en béton de ciment devenant favorisée pour toutes les catégories sauf *Utilisation des ressources minérales*.

Enfin la chaussée de type BAC ne semble jamais être favorisée, quelle que soit la catégorie de dommage/impact.

Une conclusion définitive quant au choix du type de chaussée à privilégier n'est malgré tout toujours pas possible en raison de la catégorie *Utilisation des ressources fossiles et nucléaires* qui favorise les chaussées en béton de ciment à l'inverse de toutes les autres et de l'influence toujours dominante de l'effet potentiel des chaussées sur la consommation de carburant des véhicules circulant sur celles-ci.

Les recommandations du rapport de 2009, en particulier concernant la possibilité de pondérer les différents résultats d'indicateurs de catégories de dommages/impacts pour obtenir un score unique et la nécessité d'étudier d'avantage les effets du type de chaussée sur la consommation de carburant des véhicules s'appliquent donc toujours. Une nouvelle recommandation pourrait également être faite sur l'importance d'améliorer la précision des données concernant l'étape de marquage puisque l'influence de celle-ci

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON  
DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

sur les résultats semble pouvoir devenir bien plus importante qu'en 2009, en fonction notamment de la manière dont sont modélisés les produits de marquage.

## 5 RÉFÉRENCES

BULLE, C., MARGNI, M., PATOUILLARD, *et al.* «IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 24, no 9, 2019, p. 1653-16674.

HUIJBREGTS, M.A.J., STEINMANN, Z.J.N., ELSHOUT, P.M.F. *et al.* « ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. », *Int J Life Cycle Assess* vol. 22, 2017, p.138-147

ISO (2006a). ISO 14040: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre, Organisation internationale de normalisation, 24 p.

ISO (2006b). ISO 14044: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices, Organisation internationale de normalisation, 56 p.

THÉBEAU, D. Fichier Excel reçu par courrier électronique, discussions téléphoniques et échanges de messages électroniques avec Denis Thébeau, Direction du Laboratoire des chaussées, Service des chaussées, Secteur Expertise en conception des chaussées, Ministère des Transports du Québec, 2020

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

---

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON  
DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

Le contenu de cette annexe est le même que pour le rapport de 2009

***ANNEXE B :***  
***REVUE BIBLIOGRAPHIQUE***

---

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON  
DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

Le contenu de cette annexe est le même que pour le rapport de 2009 puisque la mise à jour de la revue de littérature n'était pas un objectif de ce projet.

**ANNEXE C :**  
**REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES SYSTÈMES ÉTUDIÉS**

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

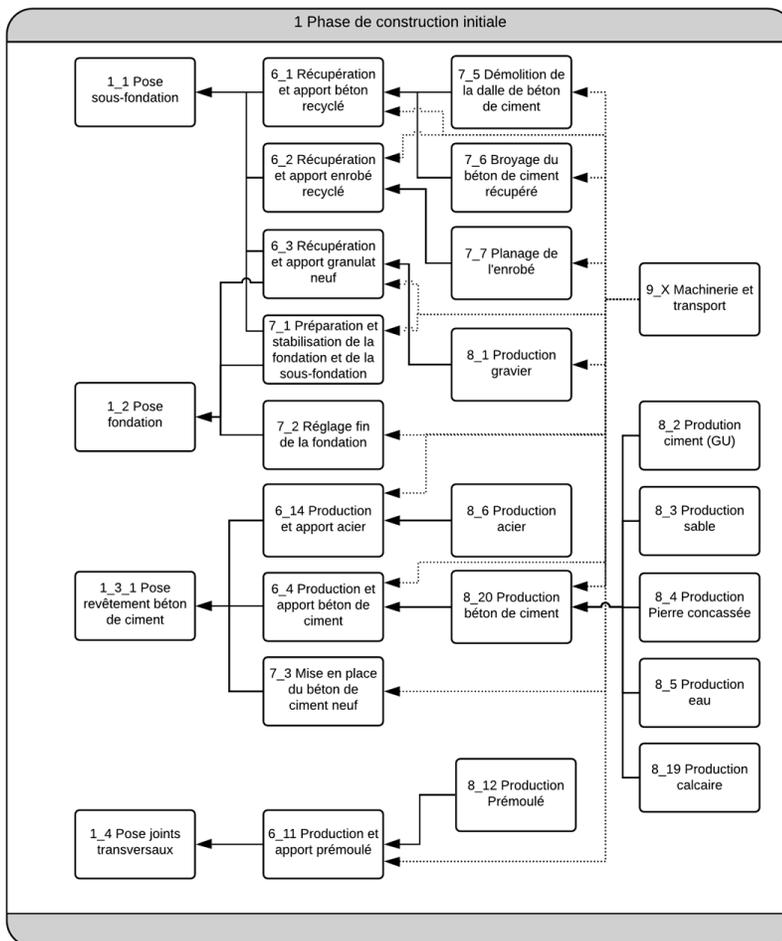


Figure C.1 :Étape de construction initiale du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC)

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

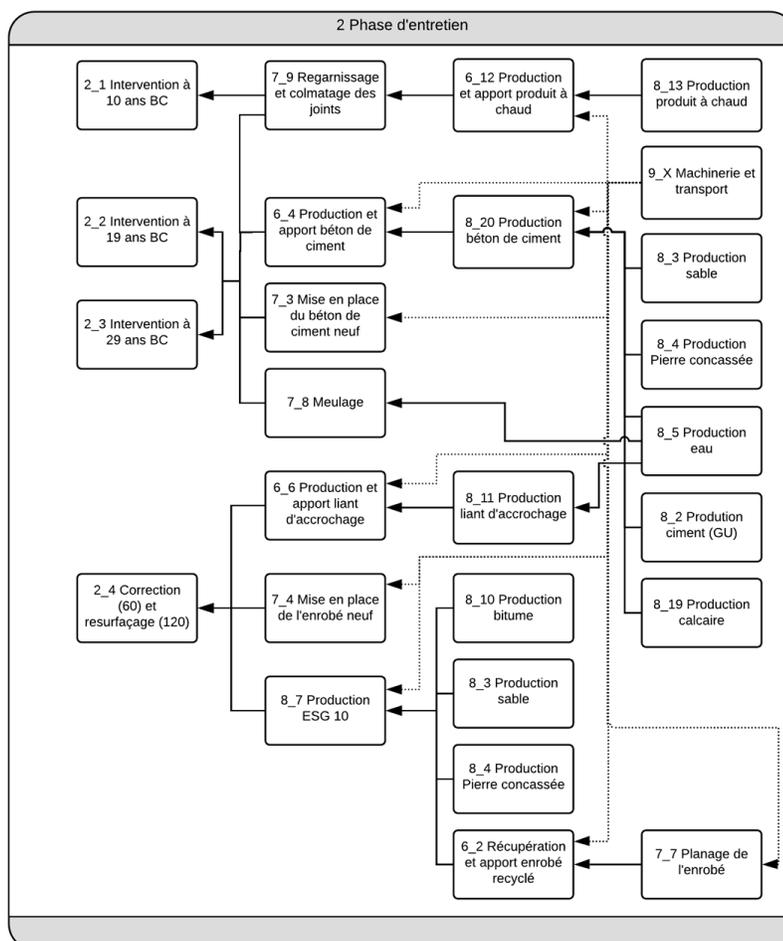


Figure C.2 : Étape d'entretien du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC)

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

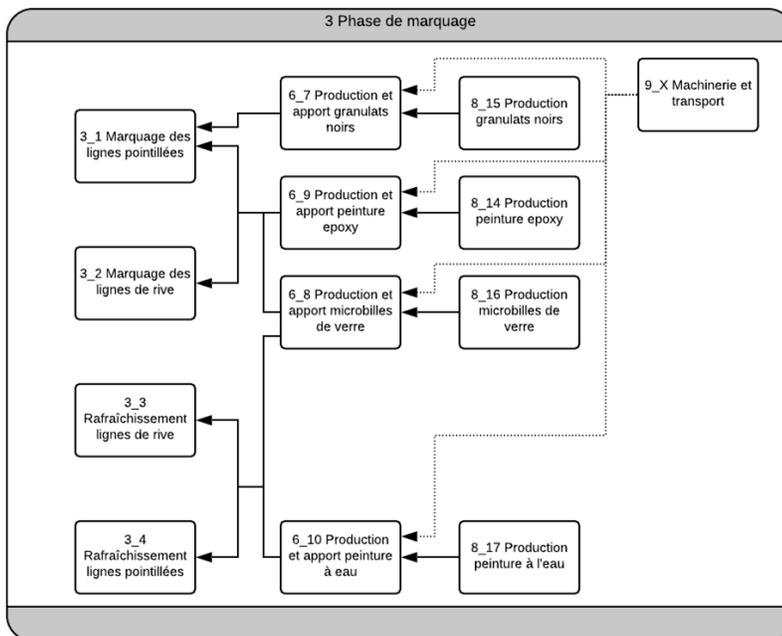


Figure C.3 :Étape de marquage du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC)

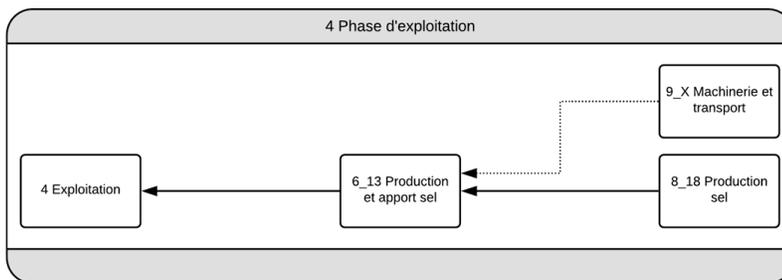


Figure C.4 :Étape d'exploitation du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC)

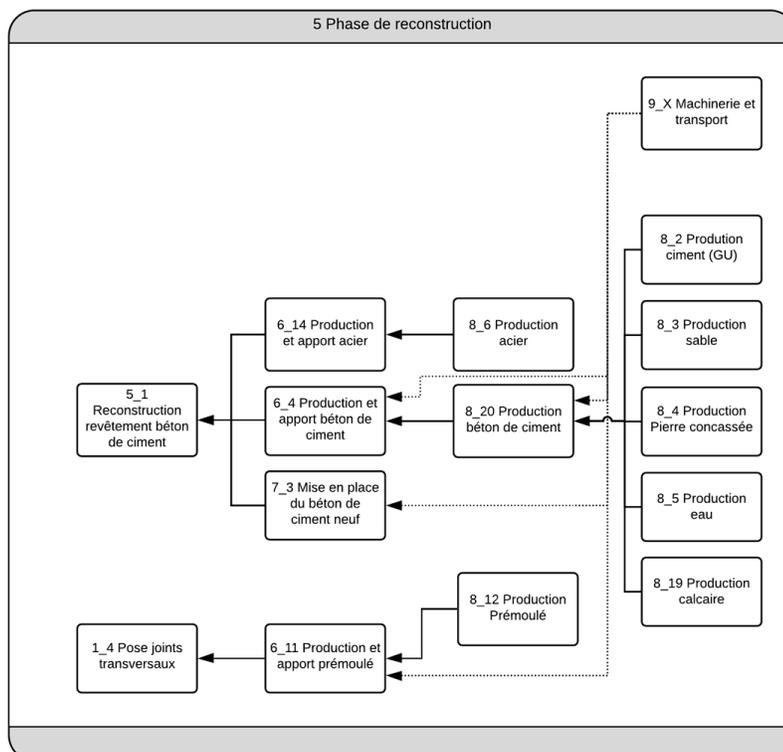


Figure C.5 :Étape de reconstruction du cycle de vie des chaussées en béton de ciment (système BC)

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

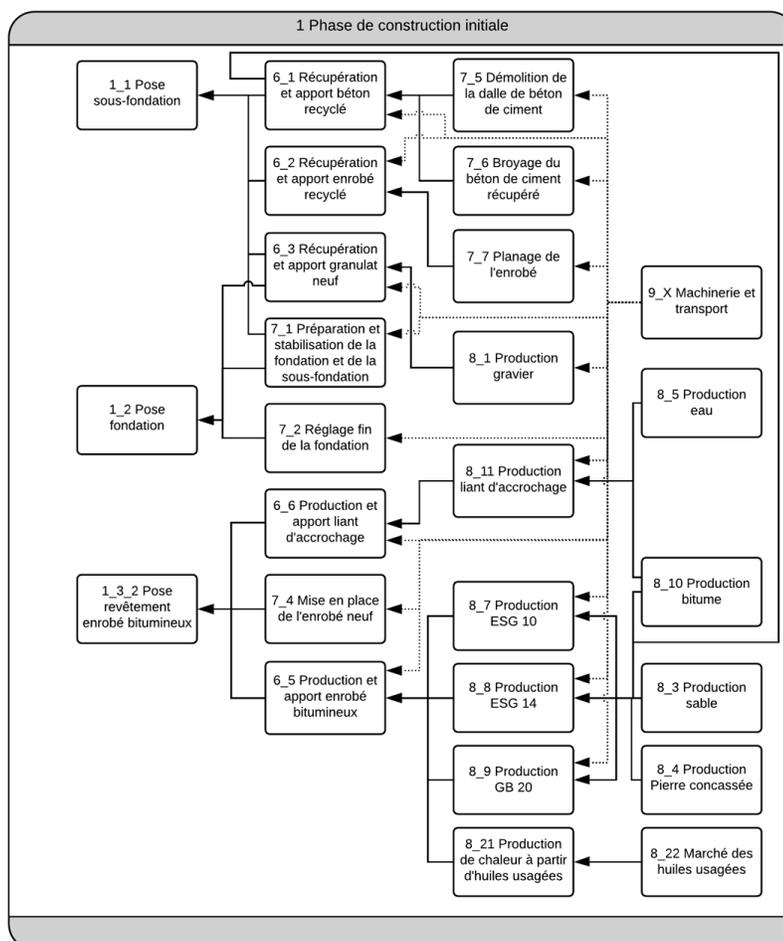


Figure C.6 :Étape de construction initiale du cycle de vie des chaussées en enrobé bitumineux (système BB)

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

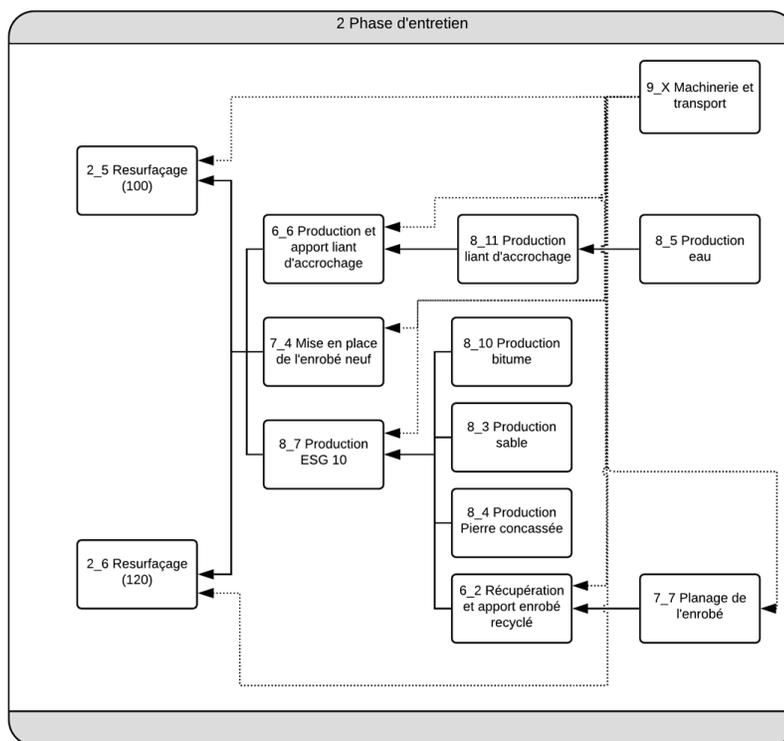
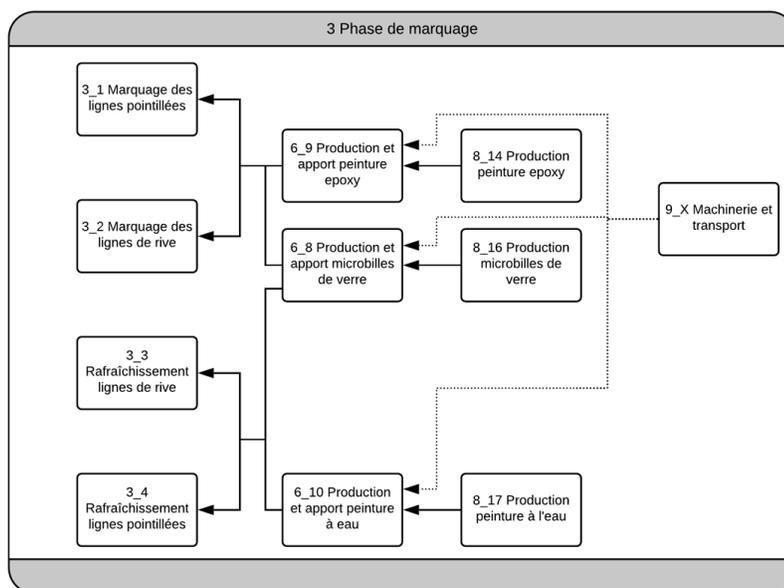


Figure C.7 : Étape d'entretien du cycle de vie des chaussées en enrobé bitumineux (système BB)



**Figure C.8 : Étape de marquage du cycle de vie des chaussées en enrobé bitumineux (système BB)**

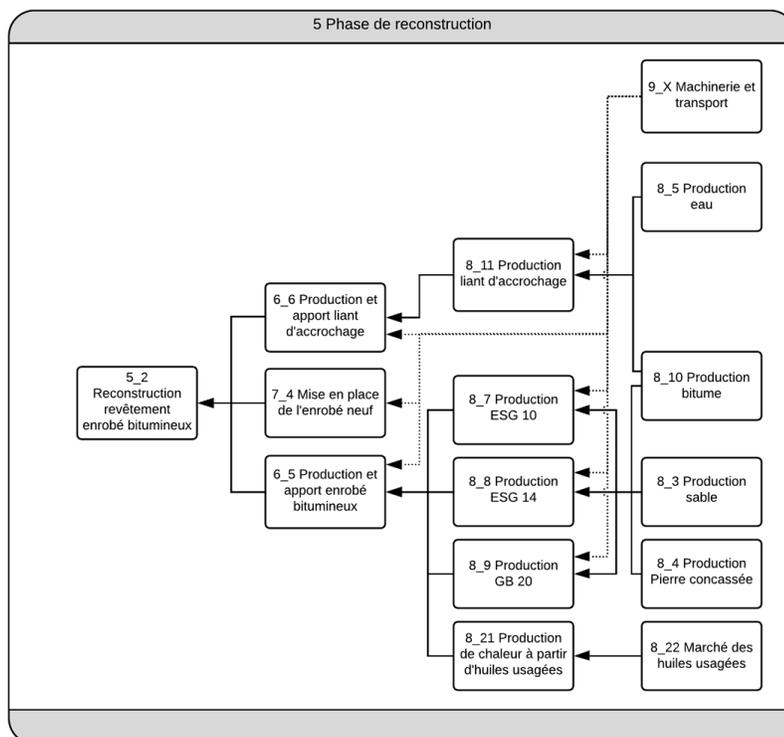


Figure C.9 :Étape de reconstruction du cycle de vie des chaussées en enrobé bitumineux (système BB)

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

---

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON  
DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

Le contenu de cette annexe est compris dans le fichier suivant :  
« Pi457\_Rpt\_final\_Annexe\_D »

**ANNEXE E :**  
**RÉSULTATS**

---

MISE À JOUR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) COMPARATIVE DES CHAUSSÉES EN BÉTON  
DE CIMENT ET EN ENROBÉ BITUMINEUX

Le contenu de cette annexe est compris dans le dossier suivant :  
« Pi457\_Rpt\_final\_Annexe\_E »