

**Analyse environnementale du cycle de vie de
projets de commercialisation du verre mixte
récupéré via des centres de tri de matières
recyclables au Québec**

*Mesurer la performance environnementale des filières
de gestion de fin de vie du verre récupéré au Québec*

Rapport final

Préparé pour **RECYC-QUÉBEC**



Par Quantis

3 mars 2015

QUANTIS CANADA

Quantis est un cabinet de conseil leader en analyse du cycle de vie (ACV) spécialisé dans l'accompagnement d'entreprises afin de mesurer, estimer, comprendre et gérer les impacts environnementaux de leurs produits, services et activités. Quantis est une entreprise internationale qui compte des bureaux aux États-Unis, au Canada, en Suisse et en France et qui emploie près de 70 personnes, parmi lesquelles se trouvent des experts mondialement reconnus en analyse du cycle de vie.

Quantis offre des services de pointe dans les secteurs suivants : empreintes environnementales (indicateurs multiples incluant le carbone et l'eau), écoconception, chaîne d'approvisionnement durable et communications environnementales. Quantis fournit également un logiciel novateur en ACV, *Quantis SUITE 2.0*, qui permet aux organisations d'évaluer, d'analyser et de gérer leur empreinte environnementale avec facilité. Forte de ses relations étroites avec la communauté scientifique et ses collaborations stratégiques en recherche, Quantis a fait ses preuves quant à l'application de ses connaissances et de son expertise pour accompagner ses clients à traduire des résultats issus de l'ACV en décisions et en plans d'action. Pour plus de renseignements, visitez www.quantis-intl.com.

Quantis Canada

info@quantis-intl.com

514 439-9724

info.canada@quantis-intl.com

www.quantis-intl.com

INFORMATIONS DU PROJET	
Titre du projet	Analyse environnementale du cycle de vie de projets de commercialisation du verre mixte récupéré via des centres de tri de matières recyclables au Québec
Mandataire	RECYC-QUÉBEC dans le cadre du Plan d'action 2012-2015 du Comité conjoint sur les matières recyclables de la collecte sélective 141, avenue du Président-Kennedy, 8e étage Montréal, Québec H2X 1Y4
Responsabilité	Les informations contenues dans ce rapport sont obtenues ou déduites de sources considérées comme sûres. Cependant, les auteurs ou leur entreprise déclinent toute responsabilité et ne supportent pas les coûts découlant de l'utilisation de ces informations. L'utilisation de ces informations se fait sous la propre responsabilité de RECYC-QUÉBEC.
Version	Version finale
Équipe de projet	Quantis Rosie Saad, ing. M.Sc.A., Analyste (rosie.saad@quantis-intl.com) François Charron-Doucet, ing. M.Sc.A, Directeur scientifique (francois.charron@quantis-intl.com) Edouard Clément, ing. M.Sc.A., Directeur général (edouard.clement@quantis-intl.com)

Sommaire exécutif

Contexte et objectifs

Dans le cadre de son Plan d'Action 2012-2015, le Comité conjoint sur les matières recyclables de la collecte sélective de RECYC-QUÉBEC a mandaté Quantis Canada pour réaliser une étude d'analyse du cycle de vie de différentes filières de gestion de fin de vie du verre mixte récupéré via des centres de tri de matières recyclables au Québec. L'objectif principal visé par l'étude est **d'évaluer les impacts environnementaux potentiels associés à quatre projets de commercialisation du verre récupéré et de les comparer à trois filières de gestion de fin de vie alternatives**. Cette analyse comparative ne porte que sur l'aspect environnemental et ne prend pas en compte les considérations économiques ou sociales relatives au contexte de l'étude.

Bien qu'il existe plusieurs débouchés possibles pour le verre mixte, le choix des quatre projets de commercialisation suivants a été effectué par RECYC-QUÉBEC. Ce choix regroupe des projets qui sont actuellement réalisables (*) ou qui représentent de nouveaux débouchés particulièrement intéressants (**) pour le marché québécois au moment de l'étude:

- **Bouteille de verre (*)**
- **Poudre de verre, comme ajout cimentaire dans du béton (**)**
- **Laine de fibre de verre (*)**
- **Agrégat de verre, comme agrégat dans du béton (**)**

Cette étude ne vise pas à comparer les projets de commercialisation entre eux, mais à les comparer individuellement à trois scénarios alternatifs. Ceux-ci correspondent à l'enfouissement du verre et à deux projets d'utilisation en lieu d'enfouissement technique (LET), soit comme matériau de recouvrement journalier ou encore comme matériau de sous-fondation des chemins d'accès.

Les objectifs plus spécifiques de l'étude sont de :

1. Mesurer la performance environnementale des systèmes définis par le cycle de vie de chacune des filières de gestion de fin de vie;
2. Hiérarchiser chacun des projets de commercialisation individuellement selon l'importance de leurs bénéfices potentiels par rapport aux trois scénarios alternatifs;
3. Identifier les paramètres-clés, les caractéristiques et les variables des systèmes et fournir une évaluation de leur influence sur les résultats dans le but d'améliorer la performance environnementale des systèmes;
4. Évaluer l'influence des distances de transport sur la performance environnementale des systèmes.

Cette étude vise à supporter une divulgation publique ou une communication impliquant une affirmation comparative sur la performance environnementale individuelle des projets de commercialisation du verre par rapport à son enfouissement ou à deux projets d'utilisation en LET. Ce rapport, disponible publiquement dans son intégralité, sera la pierre angulaire des communications environnementales effectuées par RECYC-QUÉBEC sur un des enjeux qui touche les problématiques du verre recyclé. Conformément aux exigences de la norme ISO 14 040, il a donc fait l'objet d'une revue critique par un comité de parties intéressées et un panel d'experts indépendants.

Méthodologie

La comparaison de la performance environnementale des filières de gestion de fin de vie a été réalisée au moyen de la méthodologie d'analyse du cycle de vie, une démarche encadrée par la série 14 040 des normes ISO.

La fonction primaire de tous les scénarios à l'étude est de « *Gérer du verre mixte récupéré en fin de vie via les centres de tri québécois* ». À l'exception de l'enfouissement, chacun des projets de commercialisation et les deux projets d'utilisation en LET évalués permettent, en plus de gérer le verre en fin de vie, de produire une matière ou un produit destiné à un nouvel usage. Puisque la comparaison de ces différentes filières de gestion de fin de vie implique des fonctions secondaires non équivalentes, il est nécessaire d'étendre les frontières des systèmes afin d'y inclure la production évitée par les scénarios valorisant le verre recyclé. Les flux de référence pour chaque scénario sont déterminés à l'aide de l'unité fonctionnelle qui est définie comme : « *La gestion postconsommation de 1 kilogramme de verre mixte récupéré via les centres de tri au Québec en 2013* ».

La Figure 0-1 illustre les ajustements nécessaires pour effectuer l'extension de frontières afin d'assurer l'équivalence fonctionnelle entre les systèmes et la comparaison entre les quatre scénarios. Cette figure montre que les scénarios qui sont comparés dans cette étude doivent répondre à une fonction principale (gérer du verre mixte récupéré en fin de vie) et trois fonctions secondaires (produire un matériau de recouvrement, un matériau de sous-fondation et un produit fini ou une matière première). Selon le scénario à l'étude (enfouissement, projets d'utilisation en LET ou un des quatre projets de commercialisation), un assemblage de différents systèmes est nécessaire pour fournir de façon équivalente ces quatre fonctions. Cette approche permet de comparer sur une base équivalente et sur un même graphique quatre scénarios de gestion du verre mixte récupéré en fin de vie. Des explications additionnelles sur l'approche d'extension des frontières et les fonctions secondaires des scénarios sont disponibles à la section 2.4.

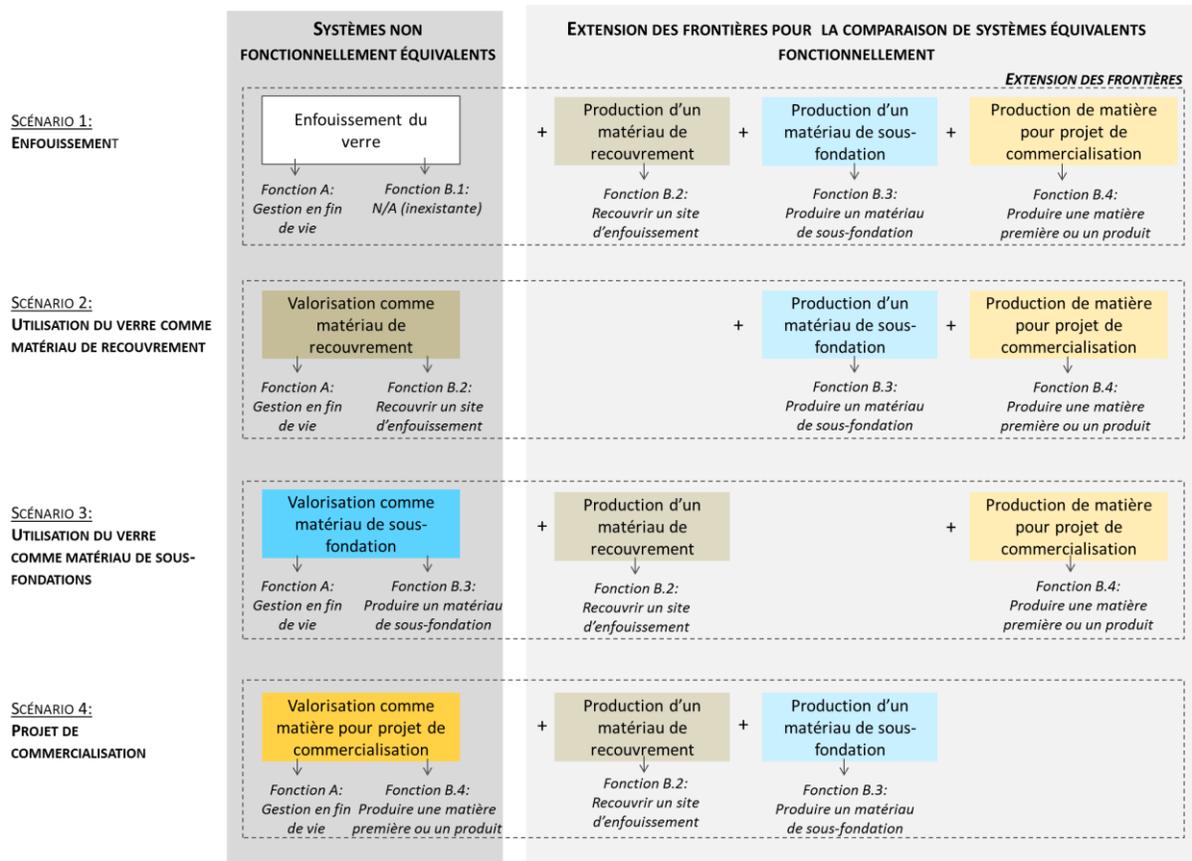


Figure 0-1: Extension des frontières des systèmes à l'étude pour assurer leur équivalence fonctionnelle.

Les fonctions secondaires et les produits ou matières substitués par chacun des projets de commercialisation sont présentés au Tableau 0-1.

Tableau 0-1: Fonctions et produits générés et évités inclus dans l'extension des frontières

Projet de commercialisation		Fonction primaire	Fonction secondaire	Production évitée
N° 4.1	L'utilisation du verre comme matière première dans la fabrication d'une bouteille	Fonction A : Gérer du verre récupéré en fin de vie	Fonction B.4.1 : Produire une bouteille en verre	Bouteille en verre vierge
N° 4.2	L'utilisation du verre comme matière première dans la fabrication de laine de fibre de verre		Fonction B.4.2 : Produire de la laine de fibre de verre	Laine de verre vierge
N° 4.3	L'utilisation du verre en poudre comme ajout cimentaire dans du béton		Fonction B.4.3 : Produire un ajout cimentaire	Ciment Portland
N° 4.4	L'utilisation du verre concassé comme agrégat dans du béton		Fonction B.4.4 : Produire un agrégat	Granulat calcaire (pierre)

Les frontières débutent à la sortie du centre de tri et vont jusqu'à l'élimination définitive du verre mixte ou encore à la sortie de l'usine de production pour un nouvel usage. Les principales étapes sont :

- 1) Le **transport de gestion de fin de vie** du verre mixte du centre de tri jusqu'aux étapes de gestion (enfouissement, conditionnement/traitement, lieu d'utilisation)
- 2) La **gestion de fin de vie** du verre par les filières à l'étude, incluant les étapes de production évitées par les systèmes avec une fonction secondaire.

Cette étude a été réalisée de manière à privilégier l'information la plus crédible et la plus représentative pour le contexte québécois actuel. La collecte de données a été rendue possible grâce à la collaboration de RECYC-QUÉBEC, Éco Entreprises Québec et des intervenants du secteur du recyclage et de la valorisation du verre. Des données primaires représentatives ont ainsi été obtenues par le biais de communications personnelles, d'entretiens téléphoniques et de questionnaires envoyés à plusieurs intervenants du secteur. Il s'agit principalement de données relatives aux distances de transport, au conditionnement du verre, à la production de bouteilles en verre, à la production de poudre et d'agrégat de verre et aux opérations de recouvrement et de remblai en LET. Les données manquantes ont été complétées par des données secondaires provenant de la littérature, des publications de RECYC-QUÉBEC sur les technologies de production, de jugements d'experts ou encore de la base de données d'inventaire du cycle de vie *ecoinvent* v2.2.

L'évaluation des impacts du cycle de vie a été effectuée au moyen de la méthode IMPACT 2002+ vQ2.2 (Jolliet et al., 2003, mise à jour par Quantis (Humbert et al., 2012)). Les impacts environnementaux sont évalués par rapport à trois indicateurs de dommages environnementaux (Santé humaine, Qualité des écosystèmes et Ressources), ainsi qu'un indicateur d'impact (Changements climatiques) et un indicateur d'inventaire (Eau prélevée).

Résultats

Dans le contexte actuel de l'étude, les projets de commercialisation du verre mixte issu des centres de tri québécois présentent généralement une performance environnementale **plus élevée ou sans différence significative** par rapport à l'enfouissement et aux projets d'utilisation en LET (comme matériau de recouvrement journalier ou remblai dans la sous-fondation de chemins d'accès) et ce, pour chacun des cinq indicateurs étudiés. La seule exception à cette tendance concerne le projet d'utilisation du verre concassé comme agrégat dans le béton, scénario présentant des résultats plutôt défavorables pour l'indicateur Santé humaine (toxicité) et Eau prélevée.

La bonne performance environnementale des projets de commercialisation s'explique essentiellement par les bénéfices environnementaux potentiels associés à la substitution de matières/produits (dont la production génère des impacts environnementaux significatifs) par les matières/produits faits de verre récupéré. Plus les impacts environnementaux du cycle de vie de la matière/produit substitué par l'utilisation du verre recyclé sont importants, plus les projets de commercialisation du verre récupéré offrent des bénéfices environnementaux potentiels. Le choix des matières/produits substitués dépend du marché et des technologies de valorisation disponibles, ce qui peut influencer les résultats.

De manière plus spécifique :

- Le projet de commercialisation impliquant **la production d'une bouteille en verre à contenu recyclé** (scénario 4.1) permet de substituer l'utilisation de verre 100 % vierge. Les avantages sont principalement liés à la substitution de l'approvisionnement en verre vierge et sa fusion qui requiert une température plus élevée et, par conséquent, une consommation énergétique plus élevée dans le four pour la production d'une bouteille vierge équivalente. Pour l'indicateur Changements climatiques, la réduction des émissions directes de dioxyde de carbone (CO₂) du processus de décarbonatation associé à la production de verre vierge est également une raison importante de la bonne performance de ce scénario. Ainsi, les résultats, présentés à la Figure 0-2, indiquent un impact environnemental potentiel inférieur à celui de l'enfouissement et des projets d'utilisation en LET : la différence est très significative pour les indicateurs Changements climatiques et Ressources, moins significative pour l'indicateur Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation) et peu concluante pour les indicateurs Santé humaine (effets respiratoires et toxicité) et Qualité des écosystèmes (toxicité). Pour l'indicateur Eau prélevée, les résultats sont également favorables pour ce projet de commercialisation.

	 Changements climatiques	 Acidification/Eutrophisation	 Ecotoxicité	 Ressources	 Effets respiratoires	 Toxicité	 Eau prélevée
Bouteille en verre							
Enfouissement	++	+	x	++	x	x	Favorable
Projets d'utilisation en LET	++	+	x	++	x	x	Favorable

Résultat favorable très significatif	++	Résultat favorable légèrement significatif	+	Résultat non concluant	x
--------------------------------------	----	--	---	------------------------	---

Figure 0-2: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation impliquant la production d'une bouteille en verre par rapport aux scénarios d'enfouissement et d'utilisation en LET.

- Le projet de commercialisation impliquant **la production de laine de fibre de verre à contenu recyclé** (scénario 4.2) permet également de substituer l'utilisation du verre vierge. Des avantages similaires au projet de commercialisation précédent sont notés, soit l'évitement de l'approvisionnement en verre vierge, la réduction de la consommation énergétique dans le four à fusion pour la production de la laine de fibre de verre vierge et la réduction des émissions associées à la décarbonatation. Les résultats, présentés à la Figure 0-3 indiquent ainsi des impacts plus faibles ou sans différences pour ce projet de commercialisation par rapport à l'enfouissement et aux projets d'utilisation en LET et ce, pour tous les indicateurs : la différence entre les résultats est peu significative pour les indicateurs Changements climatiques et Ressources, alors que les résultats sont non concluants pour les indicateurs Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation et

toxicité) et Santé humaine (effets respiratoires et toxicité). Les résultats sont favorables pour l'indicateur Eau prélevée.

	 Changements climatiques	 Acidification/Eutrophisation	 Écotoxicité	 Ressources	 Effets respiratoires	 Toxicité	 Eau prélevée
Laine de verre							
Enfouissement	+	x	x	+	x	x	Favorable
Projets d'utilisation en LET	+	x	x	+	x	x	Favorable

Résultat favorable légèrement significatif	+	Résultat non concluant	x
--	---	------------------------	---

Figure 0-3: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation impliquant la production de laine de fibre de verre par rapport aux scénarios d'enfouissement et d'utilisation en LET.

- Le projet de commercialisation impliquant **la production de poudre de verre** (scénario 4.3) utilisée comme ajout cimentaire substitue l'utilisation de ciment Portland dans du béton. Les bénéfices significatifs relèvent essentiellement de l'évitement d'impacts potentiels associés à la production équivalente de ciment Portland, qui nécessite une consommation énergétique importante lors du processus de formation du clinker et qui génère d'importantes émissions de CO₂ durant la réaction de calcination dans le four à ciment. Les résultats, présentés à la Figure 0-4 indiquent une performance environnementale plus élevée que celle de l'enfouissement et des projets d'utilisation en LET pour chacun des indicateurs étudiés : la différence est très significative pour les indicateurs Changements climatiques, Ressources, Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation) et Santé humaine (effets respiratoires), et moins significative pour les indicateurs Qualité des écosystèmes (toxicité) et Santé humaine (toxicité). Les résultats sont également favorables pour l'indicateur Eau prélevée.

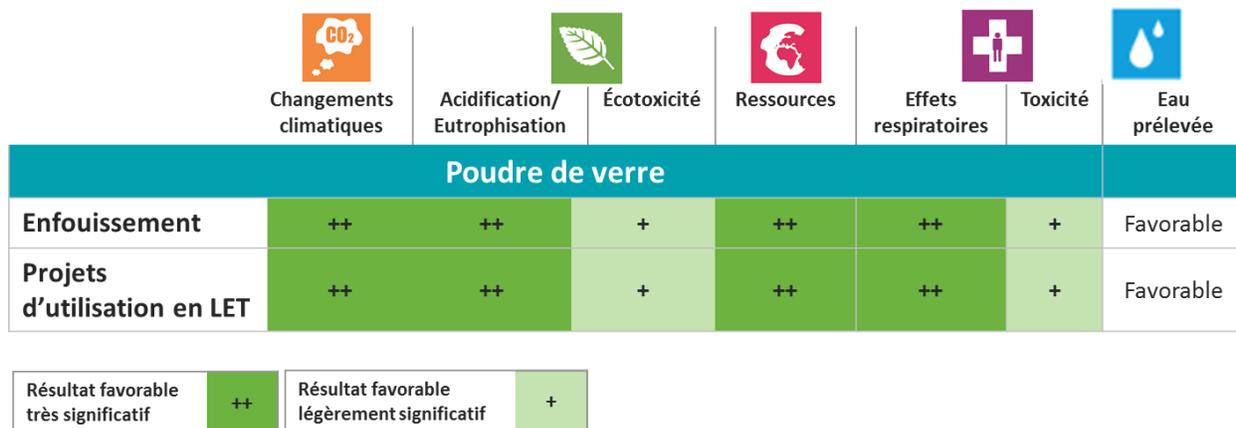


Figure 0-4: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation impliquant la production de poudre de verre par rapport aux scénarios d'enfouissement et d'utilisation en LET.

- Le projet de commercialisation impliquant **la production d'agrégat de verre** (scénario 4.4) substitue l'utilisation d'agrégat calcaire conventionnel dans du béton. Les avantages sont liés à la substitution de l'approvisionnement en agrégat de calcaire extrait des carrières et ensuite concassé. Contrairement aux autres systèmes, les impacts environnementaux de la production de ce matériau substitué sont moins importants.
 - Par rapport à l'enfouissement, les résultats de ce projet de commercialisation, présentés à la Figure 0-5, indiquent un impact environnemental potentiel inférieur avec une différence très significative pour les indicateurs Changements climatiques, Ressources, Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation) et Santé humaine (effets respiratoires) et une différence faiblement significative pour l'indicateur Qualité des écosystèmes (toxicité). Le résultat est également favorable pour l'indicateur Eau prélevée alors qu'il est plutôt défavorable de façon peu significative pour l'indicateur Santé humaine (toxicité).
 - Par rapport aux projets d'utilisation en LET, les résultats présentés à la Figure 0-5 indiquent que les impacts de ce projet de commercialisation sont inférieurs de manière très significative uniquement pour l'indicateur Ressources. Le résultat est favorable, mais peu significatif pour les indicateurs Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation et toxicité) et Santé humaine (effets respiratoires). De plus, le résultat est non concluant pour l'indicateur Changements climatiques et plutôt défavorable pour les indicateurs Santé humaine (toxicité) et Eau prélevée.



Figure 0-5: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation impliquant la production d'agrégat de verre par rapport aux scénarios d'enfouissement et d'utilisation en LET.

Des analyses de sensibilité pour l'indicateur Changements climatiques ont été effectuées sur certains paramètres de l'étude et ont permis de noter que :

- Même si l'enfouissement pouvait s'effectuer à proximité du centre de tri (distance très faible de moins de 1 km, évitant ainsi le transport jusqu'au lieu d'enfouissement), les quatre projets de commercialisation demeurent très significativement préférables et présentent des bénéfices pour l'indicateur Changements climatiques qui varient de 7 à 97 %.
- Si le conditionneur de verre devait être situé à plus de 2 200 km du centre de tri, les bénéfices du projet de commercialisation du verre impliquant la production d'une bouteille en verre recyclé ne seraient plus concluants par rapport à enfouir le verre. Il en est de même pour les projets d'utilisation en LET pour une distance de plus de 2 000 km. La distance probable entre les centres de tri québécois et le lieu de conditionnement varie entre 10 et 1 410 km et la distance évaluée entre le lieu de conditionnement et l'usine de fabrication est de 37 km.
- Dans le cas du projet de commercialisation du verre impliquant la production de laine de fibre de verre recyclé, si le conditionneur de verre devait être situé à plus de 2 170 km du centre de tri, les réductions d'impacts potentiels de ce scénario par rapport à enfouir le verre ne seraient plus basées sur des résultats concluants. Il en est de même pour les projets d'utilisation en LET pour une distance de plus de 2 100 km. La distance probable entre les centres de tri québécois et le lieu de conditionnement varie de 10 à 1 410 km et la distance estimée entre le lieu de conditionnement et l'usine de fabrication située aux États-Unis est de 550 km.
- Les résultats d'un scénario prospectif supposant qu'une usine de fabrication de laine de fibre de verre s'implanterait au Québec indiquent qu'au-delà d'une distance de transport parcourue par camion de 1 750 km effectué entre le lieu de conditionnement et l'usine, l'enfouissement ou les projets d'utilisation en LET deviendraient préférables de manière très significative à ce projet de commercialisation du verre.

- La performance du projet de commercialisation impliquant la production de poudre de verre n'est pas affectée par des distances réalistes pouvant être effectuées au Québec entre le centre de tri et l'usine de micronisation. En effet, il faut une distance totale (c'est-à-dire du centre de tri au lieu de micronisation, puis jusqu'à la bétonnière) effectuée par camion de plus de 9 100 km afin que ce projet de commercialisation ne puisse plus être différencié de l'enfouissement, ou 8 950 km pour les projets d'utilisation en LET. La distance probable entre les centres de tri québécois et l'usine de micronisation varie de 60 à 1 450 km et la distance estimée entre l'usine de micronisation et la bétonnière est de 15 km.
- Le projet de commercialisation du verre impliquant la production d'agrégat peut devenir moins favorable de manière très significative aux projets d'utilisation en LET pour une distance effectuée par camion de plus 115 km entre le centre de tri et l'usine de concassage. Au-delà d'une distance de 300 km, l'enfouissement du verre devient également significativement préférable. La distance probable entre les centres de tri québécois et l'usine de concassage varie de 60 à 1 450 km et la distance estimée entre l'usine de concassage et la bétonnière est de 15 km.
- Si le verre devait être conditionné avant d'être utilisé en LET (comme matériau de recouvrement ou encore comme matériau de sous-fondation), le projet de commercialisation du verre impliquant la production d'agrégat deviendrait préférable aux projets d'utilisation en LET de manière très significative. Ce résultat est valide jusqu'à une distance totale (c'est-à-dire du centre de tri à l'usine de concassage, puis jusqu'à la bétonnière) parcourue par camion de 1 015 km.

Conclusion et recommandations

Cette étude a permis de répondre à l'objectif principal visé, soit d'évaluer les impacts environnementaux potentiels de quatre projets de commercialisation du verre issu des centres de tri québécois, et de les comparer individuellement à trois filières de gestion de fin de vie alternatives, soit l'enfouissement et deux projets d'utilisation en LET. L'étude a également permis de répondre aux quatre objectifs spécifiques cités plus haut.

À la lumière des résultats de l'analyse, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- **Maximiser l'utilisation du verre récupéré plutôt que de l'enfouir.** Dans le contexte de l'étude, il est préférable de réaliser des projets de commercialisation du verre mixte issu des centres de tri québécois plutôt que de l'enfouir : les quatre projets de commercialisation offrent une performance environnementale plus élevée ou sans différence significative par rapport à l'enfouissement ou aux projets d'utilisation en LET et ce, pour tous les indicateurs étudiés. La seule exception est le projet de commercialisation des agrégats de verre, qui semble offrir une performance environnementale légèrement inférieure par rapport à l'enfouissement ou aux projets d'utilisation en LET, et ce, pour l'indicateur Santé humaine (toxicité) et Eau prélevée. Cependant, ce projet demeure préférable ou équivalent aux scénarios alternatifs pour tous les autres indicateurs incluant celui portant sur les Changements climatiques.
- **Prendre en compte les distances de transport dans le développement d'un projet de production d'agrégat de verre.** Comme démontré dans les résultats, l'étape du transport n'est pas un

contributeur important au profil global de la performance environnementale pour la majorité des scénarios évalués. Ainsi, les distances sur lesquelles il faudrait transporter le verre récupéré pour inverser les résultats pour l'indicateur Changements climatiques ne sont pas réalistes à l'échelle du Québec. Cependant, pour le projet de production d'agrégat de verre, les résultats sont plus sensibles aux distances de transport du verre. Dans ce cas, il serait alors important de développer un projet qui minimise les distances d'approvisionnement en verre récupéré d'une éventuelle usine de concassage du verre.

- **Favoriser les projets de commercialisation pour les produits ayant un impact environnemental élevé.** Les bénéfices environnementaux sont plus intéressants lorsqu'une filière de valorisation du verre (projet de commercialisation ou d'utilisation en LET) permet d'éviter la production ou l'utilisation d'une matière ou d'un produit qui génèrent des impacts potentiels significatifs. Afin de maximiser les bénéfices environnementaux de la valorisation du gisement actuel de verre récupéré, il est nécessaire d'identifier les produits ou matières qui peuvent être substitués ou qui pourront être éventuellement substitués et dont les impacts environnementaux de leur production sont les plus élevés.
- **Favoriser le développement des filières de valorisation du verre.** Les résultats montrent que dans la presque totalité des cas, il est toujours mieux de valoriser que d'enfouir le verre. Par conséquent, d'un point de vue environnemental, il serait recommandé de mettre en place les projets de commercialisation à l'étude et de considérer d'autres débouchés possibles pour la valorisation du verre.

Il est important de mentionner que les résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) d'une ACV ne devraient pas constituer la seule base pour supporter une affirmation comparative sur la supériorité environnementale globale ou l'équivalence entre des systèmes. Dans un contexte de prise de décision, des informations supplémentaires à celles prises en compte dans le champ de la présente étude seront nécessaires pour remédier à certaines des limitations propres à l'ÉICV (telles que le choix de valeurs, l'exclusion des informations spatiales et temporelles, de seuil et de réaction dose-effet, l'approche relative et la variation de la précision parmi les catégories d'impacts).

Il convient également de rappeler que les résultats d'une ACV sont des expressions relatives et ne prédisent pas des impacts réels sur les milieux récepteurs, le dépassement des normes, les marges de sécurité ou les risques. De plus, l'analyse comparative effectuée ne prend pas en compte les considérations économiques ou sociales relatives au contexte de l'étude. Les conclusions ne peuvent donc être tirées que sur l'aspect environnemental.

Table des matières

Sommaire exécutif	v
Table des matières	xv
Liste des tableaux.....	xvi
Liste des figures.....	xvi
Liste des abréviations et sigles	xx
1 Introduction	1
1.1 Analyse du cycle de vie.....	1
1.2 Contexte	1
2 Définition des objectifs et du champ de l'étude.....	3
2.1 Objectifs de l'étude et application envisagée	3
2.2 Description des filières de gestion de fin de vie à l'étude	4
2.3 Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence	11
2.4 Processus multifonctionnels et extension des frontières	11
2.5 Frontières du système et étapes du cycle de vie	16
2.6 Sources, hypothèses et données d'inventaire du cycle de vie.....	21
2.7 Cadres d'évaluation des impacts du cycle de vie.....	24
2.8 Interprétation	25
2.9 Revue critique.....	30
3 Résultats et discussion.....	32
3.1 Projet de commercialisation : bouteille de verre	33
3.2 Projet de commercialisation : laine de verre	39
3.3 Projet de commercialisation : poudre de verre.....	44
3.4 Projet de commercialisation : agrégat de verre	49
3.5 Évaluation de la qualité des données d'inventaire.....	55
3.6 Analyses d'incertitude	55
3.7 Analyses de sensibilité.....	59
3.8 Analyses de cohérence et de complétude	77

3.9 Applications et limites	78
3.10 Résumé des résultats et recommandations	80
4 Conclusion	84
5 Références	86
Annexe A : Frontières, données et hypothèses	90
Annexe B : Méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV)	98
Annexe C : Résultats bruts et analyses	106
Annexe D : Évaluation de la qualité des données d'inventaire	157
Annexe E : Rapport de revue critique	161

Liste des tableaux

Tableau 2-1: Fonctions, paramètre d'équivalence et flux de référence pour les produits générés et évités inclus dans l'extension des frontières.....	13
Tableau 2-2 : Processus inclus et exclus des frontières de l'ACV.....	18
Tableau 2-3: Principales sources de données primaires et secondaires	22
Tableau 3-1 : Identification des processus contribuant à l'impact total par filières de gestion de fin de vie (scénario « Bouteille de verre »).....	34
Tableau 3-2: Identification des processus contribuant à l'impact total par filières de gestion de fin de vie (scénario « Laine de verre »).....	40
Tableau 3-3: Identification des processus contribuant à l'impact total par filières de gestion de fin de vie (scénario « Poudre de verre »)	45
Tableau 3-4: Identification des processus contribuant à l'impact total par filières de gestion de fin de vie (scénario « Agrégat de verre »)	50
Tableau 3-5: Analyse de sensibilité - Variation de la distance de transport de collecte	60

Liste des figures

Figure 2-1: Description des scénarios à l'étude.....	4
Figure 2-2: Exemples d'extensions des frontières pour la comparaison de deux systèmes.	15

Figure 2-3: Extension des frontières des systèmes à l'étude pour assurer leur équivalence fonctionnelle.
..... 16

Figure 2-4: Frontières générales du système..... 18

Figure 3-1: Exemple fictif de présentation de l'analyse de contribution..... 33

Figure 3-2: Comparaison de la performance environnementale des systèmes (Bouteille de verre)..... 34

Figure 3-3 : Profil environnemental du système d'utilisation du verre pour la production d'une bouteille par indicateur de dommage. 37

Figure 3-4 : Contribution du transport pour le système d'utilisation du verre pour la production d'une bouteille pour l'indicateur Changements climatiques..... 38

Figure 3-5: Comparaison de la performance environnementale des systèmes (Laine de verre)..... 39

Figure 3-6 : Profil environnemental du système d'utilisation du verre pour la production de laine isolante, par indicateur de dommage..... 42

Figure 3-7: Contribution du transport pour le système d'utilisation du verre pour la production de laine de verre pour l'indicateur Changements climatiques. 43

Figure 3-8: Comparaison de la performance environnementale des systèmes (Poudre de verre)..... 44

Figure 3-9 : Profil environnemental du système d'utilisation du verre pour la production de poudre de verre, par indicateur de dommage. 47

Figure 3-10: Contribution du transport pour le système d'utilisation du verre pour la production de poudre de verre pour l'indicateur Changements climatiques..... 48

Figure 3-11: Comparaison de la performance environnementale des systèmes (Agrégat de verre)..... 50

Figure 3-12 : Profil environnemental du système d'utilisation du verre pour la production d'agrégat de verre, par indicateur de dommage. 53

Figure 3-13: Contribution du transport pour le système d'utilisation du verre pour la production d'agrégat de verre pour l'indicateur Changements climatiques. 54

Figure 3-14: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation impliquant la production de bouteilles en verre par rapport aux scénarios alternatifs d'enfouissement et d'utilisation en LET..... 56

Figure 3-15: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation par la production de laine de verre par rapport aux scénarios alternatifs d'enfouissement et d'utilisation en LET..... 57

Figure 3-16: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation impliquant la production de poudre de verre par rapport aux scénarios alternatifs d'enfouissement et d'utilisation en LET.....	58
Figure 3-17: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation impliquant la production d'agrégat de verre par rapport aux scénarios alternatifs d'enfouissement et d'utilisation en LET.....	59
Figure 3-18: Analyse de sensibilité – contribution du transport de collecte sur 113 km (système Bouteille de verre).....	60
Figure 3-19: Analyse de sensibilité – contribution du transport de collecte sur 113 km (système Laine de verre).....	60
Figure 3-20: Analyse de sensibilité – contribution du transport de collecte sur 113 km (système Poudre de verre).....	60
Figure 3-21: Analyse de sensibilité – contribution du transport de collecte sur 113 km (système Agrégat de verre).....	60
Figure 3-22: Analyse de sensibilité – variation de la distance jusqu'au lieu d'enfouissement (système Agrégat de verre).	62
Figure 3-23: Analyse de sensibilité – variation de la distance jusqu'au conditionneur (système Bouteille de verre).....	63
Figure 3-24: Analyse de sensibilité – variation de la distance jusqu'au conditionneur (système Laine de verre).....	63
Figure 3-25: Analyse de sensibilité – variation de la distance jusqu'à l'usine de micronisation (système Poudre de verre).	64
Figure 3-26: Analyse de sensibilité – variation de la distance jusqu'à l'usine de traitement (système Agrégat de verre).	65
Figure 3-27: Analyse de sensibilité – influence du taux de rejets (système Bouteille de verre).	66
Figure 3-28: Analyse de sensibilité – influence du taux de rejets (système Laine de verre).	67
Figure 3-29: Analyse de sensibilité – étape de déshumidification pour l'indicateur Changements climatiques (système Bouteille de verre).	68
Figure 3-30: Analyse de sensibilité – étape de déshumidification pour l'indicateur Changements climatiques (système Laine de verre).	68

Figure 3-31: Analyse de sensibilité – consommation d’électricité pour l’indicateur Changements climatiques (système Bouteille de verre). 69

Figure 3-32: Analyse de sensibilité – consommation d’électricité pour l’indicateur Changements climatiques (système Laine de verre). 69

Figure 3-33: Analyse de sensibilité – consommation d’énergie pour la production de laine de verre, pour l’indicateur Changements climatiques. 70

Figure 3-34: Analyse de sensibilité – distance de transport jusqu’à l’usine de fabrication de laine de verre aux États-Unis. 71

Figure 3-35: Analyse de sensibilité – localisation de l’usine de production de laine de verre au Québec. 72

Figure 3-36: Analyse de sensibilité – provenance du calcin pour la production de bouteilles de verre au Québec pour l’indicateur Changements climatiques. 73

Figure 3-37: Frontière du système – étape de traitement pour les projets d’utilisation en LET..... 74

Figure 3-38: Analyse de sensibilité – étape de traitement pour les projets d’utilisation en LET (système Bouteille de verre). 75

Figure 3-39: Analyse de sensibilité – étape de traitement pour les projets d’utilisation en LET (système Laine de verre). 75

Figure 3-40: Analyse de sensibilité – étape de traitement pour les projets d’utilisation en LET (système Poudre de verre). 75

Figure 3-41: Analyse de sensibilité – étape de traitement pour les projets d’utilisation en LET (système Agrégat de verre). 75

Liste des abréviations et sigles

ACV	Analyse du cycle de vie
ÉEQ	Éco Entreprises Québec
CC	Changements climatiques
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
DALY	<i>Disabled Adjusted Life Years</i> (en français : Espérance de vie corrigée de l'incapacité)
ÉICV	Évaluation des impacts du cycle de vie (appelé ACVI par ISO)
GES	Gaz à effet de serre
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (en français : Potentiel de réchauffement climatique)
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
ICV	Inventaire du cycle de vie
ISO	Organisation internationale de normalisation
LET	Lieu d'enfouissement technique
MJ primaire	Mégajoules d'énergie primaire. Unité de mesure d'impact pour la catégorie « Ressources »
µm	Micromètre. Unité de longueur du système international (DI)
NO _x	Oxydes d'azote
PDF.m ² .an	« <i>Potentially Disappeared Fraction</i> » sur une certaine surface et sur une durée donnée
PNUE	Programme des Nations unies pour l'environnement
SAQ	Société des alcools du Québec
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SO _x	Oxydes de soufre

1 Introduction

1.1 Analyse du cycle de vie

La prise de conscience croissante de l'importance d'un développement durable et des impacts potentiels sur l'environnement des produits et services a stimulé le développement de méthodes permettant de comprendre, mesurer et réduire ces impacts. Le premier outil pour réaliser cela, et un des seuls permettant une évaluation détaillée et simultanée de plusieurs types d'impacts, est l'analyse du cycle de vie (ACV), une méthode encadrée par les normes 14 040 et 14 044 (2006) de l'Organisation internationale de normalisation (ISO).

L'ACV est une approche internationalement reconnue permettant d'évaluer les impacts potentiels sur la santé humaine et sur l'environnement associés aux produits et services tout au long de leur cycle de vie, de l'extraction des matières premières à leur gestion de fin de vie, incluant notamment les transports, la production et l'utilisation. Entre autres applications, l'ACV permet d'identifier les possibilités d'amélioration de la performance environnementale des produits et services aux diverses étapes de leur cycle de vie, facilite la prise de décisions et sert de support au marketing et à la communication.

1.2 Contexte

De par ses propriétés, le verre est une ressource abondante, amorphe et pouvant être recyclée indéfiniment. D'ailleurs, plusieurs travaux de recherche effectués dans les dernières années se sont orientés vers des pistes intéressantes afin de trouver des débouchés pour une nouvelle utilisation du verre récupéré (Gélinas, 2012; Jansen Industries, 2013; Lachance-Tremblay *et al.* 2014; Lupien, 2006). À l'heure actuelle, bien que plusieurs filières semblent prometteuses, aucune étude n'a permis d'évaluer les bénéfices anticipés relatifs à l'utilisation du verre récupéré au Québec.

Le recyclage du verre mixte issu de la collecte sélective pose certains défis, notamment par rapport aux coûts liés à son transport et sa contamination potentielle dans les centres de tri par des débris de toutes sortes (bouchons métalliques, étiquettes, etc.). Le traitement du verre contenant un niveau élevé de contaminants pourrait engendrer l'usure prématurée des équipements et augmenter les pertes de productivité ainsi que les coûts d'opérations (CRI 2009, HDR Inc. 2012). La méthode de tri utilisée a une incidence sur la qualité du verre mixte issu des centres de tri. Si le verre est généralement extrait en tri négatif dans les centres de tri québécois, certains optent pour un tri manuel positif permettant de retirer le verre en début de procédé pour le séparer des autres matières (CRIQ 2008). C'est le cas des centres de tri de Gatineau, Victoriaville et Thetford Mines dont les technologies employées (munies de trommels de séparation en début de chaîne) permettent de réduire les contaminants et améliorent la qualité de verre mixte sortant (SAQ, 2014).

Lorsqu'il est issu de la collecte sélective, le verre mixte est composé de différentes couleurs résultant des matières collectées en vrac dans les bacs (collecte pêle-mêle). Pour certains débouchés et marchés spécifiques, un traitement est nécessaire pour permettre au verre mixte de répondre aux standards de qualité exigés par les recycleurs. Ceci explique la nécessité de développer et d'exploiter divers

débouchés pour la valorisation du verre mixte, des solutions pouvant être plus bénéfiques sur le plan environnemental plutôt que de le stocker ou de l'éliminer dans un lieu d'enfouissement technique (LET).

C'est dans le cadre du Plan d'Action 2012-2015 du Comité conjoint sur les matières recyclables de la collecte sélective¹, mis sur pied par RECYC-QUÉBEC en 2009, que Quantis Canada a été mandaté afin de réaliser un projet d'analyse du cycle de vie (ACV) de différentes filières de gestion de fin de vie du verre mixte récupéré via la collecte sélective au Québec. Plus particulièrement, ce projet vise à comparer les impacts environnementaux potentiels associés à quatre projets de commercialisation du verre récupéré et ce, par rapport à trois scénarios alternatifs. Les projets de commercialisation sont les suivants :

- Utilisation du verre récupéré comme matière première dans la production d'une bouteille en verre avec contenu recyclé
- Utilisation du verre récupéré comme matière première dans la production de laine de fibre de verre² avec contenu recyclé
- Transformation du verre récupéré en poudre de verre utilisée comme ajout cimentaire dans le béton
- Transformation du verre récupéré en agrégat de verre utilisé comme agrégat dans le béton

Les projets ne sont pas comparés entre eux, chacun sera comparé individuellement aux trois scénarios alternatifs suivants :

- 1) Enfouissement du verre;
- 2) Utilisation du verre comme matériau de recouvrement journalier dans les LET;
- 3) Utilisation du verre comme matériau de sous-fondation des chemins d'accès des LET.

Cette étude est conforme aux exigences des normes ISO 14 040 et 14 044. Elle a fait l'objet d'une revue critique par un comité de parties prenantes constitué d'un expert indépendant en ACV et de spécialistes dans le domaine de la gestion des matières résiduelles et du recyclage du verre au Québec.

Ce rapport se présente comme suit :

- Les objectifs et le champ de l'étude (**section 2**);
- Les résultats du volet environnemental, leur interprétation et les recommandations associées (**section 3**);
- Les conclusions résultantes (**section 4**).

¹ Plan d'action disponible en ligne :

http://www.recyq-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Plan_action_2012_2015_Comite_conjoint_VersionFinale.pdf

² Également appelée laine de verre

2 Définition des objectifs et du champ de l'étude

Cette section présente le modèle d'étude définissant le cadre méthodologique auquel doivent se conformer les phases subséquentes de l'ACV et ce, suivant les normes ISO 14 040 et 14 044 (2006).

2.1 Objectifs de l'étude et application envisagée

Le but de cette étude est d'évaluer **les impacts environnementaux potentiels associés à quatre projets de commercialisation du verre mixte récupéré via des centres de tri de matières recyclables au Québec** et de les comparer à trois filières de gestion de fin de vie alternatives; soit l'enfouissement du verre et deux projets d'utilisation en LET¹.

Les projets de commercialisation sont :

- Utilisation du verre comme matière première dans la production d'une bouteille en verre avec contenu recyclé
- Utilisation du verre comme matière première dans la production de laine de verre avec contenu recyclé
- Transformation du verre en poudre de verre utilisée comme ajout cimentaire dans le béton
- Transformation du verre en agrégat de verre utilisé comme agrégat dans le béton

Les deux projets d'utilisation en LET correspondent à l'utilisation du verre mixte récupéré via la collecte sélective comme :

- Matériau de recouvrement dans les LET
- Matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès des LET

Les objectifs plus spécifiques de l'étude sont de :

- I. Mesurer la performance environnementale des systèmes définis par le cycle de vie de chacune des filières de gestion de fin de vie ;
- II. Hiérarchiser chacun des projets de commercialisation individuellement selon l'importance de leurs bénéfices potentiels par rapport aux trois scénarios alternatifs;
- III. Identifier les paramètres-clés, les caractéristiques et les variables des systèmes et fournir une évaluation de leur influence sur les résultats dans le but d'améliorer la performance environnementale des systèmes;
- IV. Évaluer l'influence des distances de transport sur la performance environnementale des systèmes.

Conformément aux exigences des normes ISO, les revues critiques d'ACV sont facultatives lorsque les résultats sont voués à un usage interne par le mandataire. Cependant, une telle revue est une étape

¹ L'expression « utilisation en LET » a remplacé l'expression « application régionale » que l'on retrouve dans le rapport de revue critique (disponible à l'Annexe E). Cette modification a été effectuée suite au processus de revue critique. Les deux expressions décrivent exactement les mêmes systèmes.

importante pour assurer la validité des résultats et des conclusions visant à supporter des affirmations comparatives rendues publiques, suivant les normes ISO 14 040 (2006).

Cette étude vise à supporter une divulgation publique ou une communication impliquant une affirmation comparative sur la performance environnementale individuelle des projets de commercialisation du verre par rapport à son enfouissement ou à deux projets d'utilisation en LET. Ce rapport, publiquement disponible dans son intégralité, sera la pierre angulaire des communications environnementales effectuées par RECYC-QUÉBEC sur un des enjeux qui touche les problématiques du verre recyclé. Conformément aux exigences de la norme ISO 14 040, il a donc fait l'objet d'une revue critique par un comité de parties intéressées et un panel d'experts indépendants. Pour plus de détail sur le processus de revue critique, se référer à la section 2.9 du rapport.

Cette étude n'a pas pour objectif d'évaluer les conséquences des prises de décisions par RECYC-QUÉBEC et ses partenaires.

2.2 Description des filières de gestion de fin de vie à l'étude

Le verre mixte récupéré via les centres de tri de matières recyclables au Québec est issu de la collecte sélective. Au total, **quatre systèmes distincts** sont à l'étude. Pour chacun, une ACV comparative de **quatre scénarios** décrivant différentes filières de gestion de fin de vie est réalisée. La Figure 2-1 illustre une description schématisée des scénarios à l'étude.

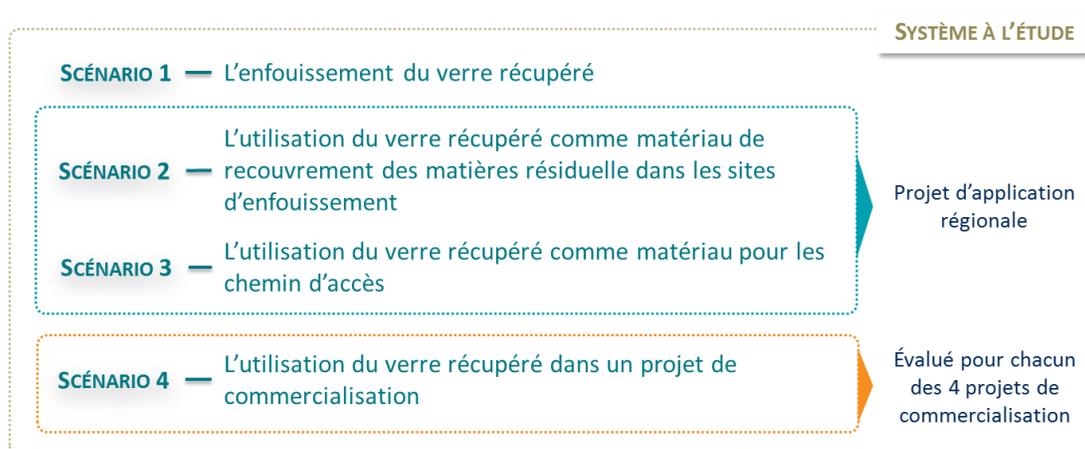


Figure 2-1: Description des scénarios à l'étude.

Le scénario 4, soit celui décrivant la filière « projet de commercialisation », est évalué pour chacun des quatre produits suivants de manière séparée :

- Scénario 4.1 : Bouteille de verre
- Scénario 4.2 : Laine de verre
- Scénario 4.3 : Poudre de verre
- Scénario 4.4 : Agrégat de verre

Il est important de noter que cette étude ne constitue pas une évaluation exhaustive de tous les débouchés ou filières de valorisation du verre disponibles sur le marché. Il existe en effet d'autres

débouchés commerciaux du verre mixte tels que, la production de silice précipitée pouvant être employée dans les peintures, les encres, les cosmétiques, etc. (SAQ, 2008); l'incorporation de verre dans les chaussées en enrobé bitumineux (Lachance Tremblay, 2014), l'utilisation du verre comme paillis d'aménagement (SAQ, 2014), comme matériau de filtration pour les piscines¹ ou encore comme matériau de remplissage pour des forages géothermiques (Tricentris, 2010).

Le choix des projets de commercialisation évalués dans le cadre de cette étude a été effectué par RECYC-QUÉBEC. Ce choix regroupe des projets qui sont actuellement réalisables ou qui représentent de nouveaux débouchés particulièrement intéressants pour le marché québécois au moment de l'étude:

- un scénario potentiellement réalisable (mais non opérationnel à ce jour): production d'une bouteille en verre;
- un scénario réalisable (actuellement en démarrage²): production de laine de verre;
- deux scénarios en développement à court terme : production de poudre et d'agrégat de verre.

2.2.1 La collecte

Au Québec, les matières résiduelles de verre sont récupérées à partir de la collecte sélective municipale ou encore à partir de la consignation (privée et publique). Cette étude s'intéresse uniquement au verre provenant du système de la collecte sélective.

La collective sélective mise sur la récupération des matières résiduelles recyclables en vue de leur recyclage afin de les valoriser, les réutiliser et les introduire à nouveau dans un cycle de production pour la fabrication de produits. La population québécoise ainsi que plusieurs institutions, commerces et industries (ICI) sont desservis par un service municipal de collecte sélective qui permet de récupérer les matières recyclables déposées dans les bacs. Ces matières collectées sont par la suite transportées vers les centres de tri où elles sont triées (tri manuel, tri mécanique, tri optique).

Au centre tri, les matières résiduelles collectées sont séparées par catégories. Le verre est généralement trié sous forme concassée, mais aucun broyage intentionnel n'est effectué. Ce verre récupéré et trié, nommé *verre mixte*, peut ensuite être valorisé de différentes manières. Dans certains cas, celui-ci peut également se retrouver en fin de vie dans les sites d'enfouissement.

Les filières de gestion de fin de vie par valorisation de la matière ont l'avantage de réduire la quantité de matières résiduelles envoyées aux sites d'enfouissement et, surtout, de substituer des matières premières vierges dans la fabrication de nouveaux produits. Les filières de gestion à l'étude sont présentées dans les sections qui suivent.

¹ Matériaux utilisés pour la filtration des piscines en vente chez Magasin Trévi Boucherville, Magasin Maître Piscinier Repentigny, etc.

² Selon les informations obtenues en date de février 2015, 2M Ressources avait amorcé les opérations de démarrage d'une nouvelle ligne pour le traitement du verre en provenance de la collecte sélective et dont le calcin sera utilisé pour fabriquer de la laine de verre.

2.2.2 L'enfouissement du verre

Le scénario 1 correspond à l'enfouissement du verre provenant de la collecte sélective. Celui-ci s'effectue dans un lieu d'enfouissement technique (LET) situé au Québec.

2.2.3 Projets d'utilisation en LET

Les scénarios 2 et 3 correspondent à l'utilisation du verre récupéré dans deux projets d'utilisation en LET, soit respectivement comme matériau de recouvrement journalier ou comme matériau dans la sous-fondation de leurs chemins d'accès.

Utilisation du verre comme matériau de recouvrement dans les lieux d'enfouissement

Actuellement, plusieurs LET utilisent le verre provenant de la collecte sélective comme matériau pour le recouvrement journalier. Ce matériau, utilisé comme remplacement au sable, est acheminé des centres de tri des régions avoisinantes aux sites d'enfouissement par camion. Il est ensuite étendu au moyen d'une pelle mécanique ou d'un compacteur.

Le recouvrement journalier des matières résiduelles dans les LET ou dans les lieux d'enfouissement sanitaires (LES) est une mesure préventive régie par le *Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles*. Un tel recouvrement est effectué dans le but de limiter le dégagement d'odeurs, la propagation d'incendie, la prolifération d'animaux ou d'insectes et l'envol d'éléments légers (MDDEFP, 2006). Ainsi, à la fin de chaque journée d'exploitation, les matières résiduelles sont recouvertes d'une couche de sol ou d'autres matériaux dont les propriétés respectent les exigences d'exploitation.

D'autres types de matériaux peuvent également être utilisés pour le recouvrement journalier tel des sols non contaminés, du *fluff*¹ automobile ou encore des particules fines provenant de centres de tri de matériaux secs.

Utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès des lieux d'enfouissement technique

Le verre provenant de la collecte sélective peut également être employé dans la sous-fondation des chemins d'accès aux écocentres ou aux LET.

C'est le cas d'un projet pilote réalisé dans l'écocentre de Sherbrooke où le verre concassé issu du centre de tri et de récupération de la région a servi comme matériau de remblai à la base de la sous-fondation lors de la construction du chemin d'accès. En effet, le verre concassé est très perméable et peu susceptible au gel, des propriétés mécaniques et physiques intéressantes et recherchées dans un matériau de sous-fondation. Selon le rapport réalisé par Lupien (2006), du verre récupéré au centre de tri a été préalablement concassé puis épandu à l'aide d'un tracteur à chaîne — qui effectue un premier compactage, suivi d'un rouleau compresseur conventionnel qui termine l'opération. Un échantillonnage

¹ Lors du recyclage des automobiles, les matériaux non métalliques, soit les plastiques, le caoutchouc, le verre et les tissus, se retrouvent sous la forme d'un sous-produit, communément appelé résidus de déchetage ou «fluff».

du verre mixte concassé utilisé a permis de déterminer un contenu en déchets d'environ 2,9 % de sa masse sèche.

Ce matériau est utilisé comme remplacement à la pierre concassée habituellement employée dans des conditions similaires.

2.2.4 Projets de commercialisation du verre

Conditionnement du verre

Le verre récupéré au centre de tri doit être conditionné avant d'être vendu aux recycleurs et manufacturiers de verre qui le valorisent et l'utilisent comme matière première dans leur production.

L'étape de traitement du verre, appelée conditionnement, s'effectue au moyen d'une série d'opérations qui permettent de le trier et de le séparer des autres matières résiduelles. Selon les informations collectées chez 2M Ressources (seul producteur de calcin agréé au Québec) et auprès d'un expert dans le domaine¹, les principales étapes effectuées chez les conditionneurs sont :

- tamisage selon la granulométrie pour séparer les matières non favorables au recyclage du verre;
- tri manuel et détection de métal
- concassage des matières de plus de 0,6 cm (¼ po)
- déshumidification
- tri et détection des métaux ferreux et non ferreux
- tri optique pour retirer les fragments de porcelaine
- broyage selon la grosseur de billes souhaitée par le client
- détection des métaux ferreux et non-ferreux dans les rejets

Le verre mixte broyé et nettoyé peut maintenant servir de calcin (c.-à-d. de verre recyclé), prêt à être enfourné ou intégré dans la fabrication d'un produit à contenu recyclé.

Au Québec, l'entreprise 2M Ressources gère principalement le verre provenant de la consigne et une faible partie provenant de la collecte sélective. Des démarches en cours sont toutefois entamées afin de mettre en place les installations nécessaires pour le conditionnement du verre issu de la collecte sélective (2M Ressources, 2013). Il existait un deuxième producteur de calcin, Klareco, qui traitait uniquement le verre provenant de la collecte sélective, mais celui-ci a fermé ses portes en avril 2013.

Quatre projets de commercialisation, correspondant chacun au scénario 4, sont évalués et présentés dans les sections qui suivent.

Utilisation du verre comme matière première dans la production d'une bouteille en verre avec contenu recyclé

Les bouteilles et les contenants en verre produits au Québec sont fabriqués par l'entreprise Owens-Illinois, à leur usine située à Montréal. Deux types de produits sont actuellement fabriqués :

- bouteilles en verre ambre, avec un contenu recyclé variant de 50 à 60 %

¹ Communication personnelle avec un ancien responsable chez Klareco

- contenants en verre clair, avec un contenu recyclé variant de 30 à 40 %

L'utilisation du calcin dans la fabrication de bouteilles et de contenants recyclés nécessite que le calcin soit séparé par couleur. C'est pourquoi, à l'heure actuelle, le contenu en calcin utilisé dans la fabrication d'une bouteille et/ou contenant en verre provient majoritairement de verre conditionné, issu de la consigne, et séparé par couleur (ambre et claire). Une faible quantité de calcin est produite à partir de verre mixte conditionné provenant de la collecte sélective (2M Ressources 2013, Owens-Illinois 2013).

Dans cette étude, il est supposé que l'étape de conditionnement inclut une étape de tri des couleurs et qu'une nouvelle ligne de production de contenants ou de bouteilles en verre, autre que clair et ambré, est mise en place à l'usine existante pour traiter le calcin des couleurs restantes. L'ajout de cette ligne permettrait l'utilisation de tout le calcin provenant de la collecte sélective dans la production des bouteilles en verre recyclé. La moyenne de contenu en verre recyclé pour toutes les lignes de production est estimée à 45% dans cette étude. Il est important de noter que ce scénario représente un projet non opérationnel au Québec.

La fabrication d'une bouteille de verre s'effectue selon cinq étapes :

- la fusion des matières premières à très haute température dans un four chauffé au gaz naturel et à l'électricité pour produire le verre liquide.
- la découpe du verre fondu, refroidi, en cylindres de tailles uniformes.
- la mise en forme des contenants à l'aide d'un premier moule qui sert à former des paraisons, puis d'un deuxième moule qui sert à donner au récipient sa forme définitive. Le processus employé est nommé soufflé - soufflé (Blow & Blow).
- un contrôle de qualité des contenants.
- le conditionnement, soit la palettisation et l'expédition chez les clients.

Pour la fabrication des bouteilles et des contenants à contenu recyclé, le calcin est alimenté directement dans les fours et permet de substituer une partie de la matière première (sable de silice, calcaire et carbonate de sodium). En plus de réduire la quantité requise en matières premières, l'utilisation de calcin permet aussi d'économiser de l'énergie à l'étape de la fusion du verre, et ce, sans modifier les propriétés du produit fini. La performance d'une bouteille à contenu recyclé et celle d'une bouteille à contenu vierge ayant des masses et des volumes de contenance égaux sont ainsi jugées équivalentes.

Selon le GPI (2010), l'ajout de 10 % de calcin permet de réduire de 2 à 3 % l'énergie nécessaire à la fusion des matières. Ceci est dû au fait que la température de fusion du calcin est inférieure à celle du sable, utilisé comme matière première lors de la production d'une bouteille de verre vierge. L'utilisation du calcin ne modifie pas les propriétés techniques d'un contenant, sa performance et son apparence physique (WRAP, 2013).

Utilisation du verre comme matière première dans la production de laine de verre avec contenu recyclé

La laine de verre est une laine isolante composée principalement de sable, de fondants (calcaire, dolomite, etc.) et de liants. Ces isolants sont généralement vendus en rouleaux ou en panneaux incluant ou non une couche de papier Kraft. De plus en plus, et selon les manufacturiers, les laines de verre

renferment un contenu en verre recyclé, qui varie entre 25 et 75 % (Owens Corning, 2012; CertainTeed, 2013).

La fabrication de la laine de verre s'effectue selon cinq étapes :

- la fusion des constituants de matières premières (sable et fondants) à très haute température dans un four électrique ou fonctionnant au gaz naturel.
- le fibrage du verre fondu au moyen d'une couronne semblable à des « assiettes percées » pour former un matelas de fibres agglomérées.
- l'étuvage, étape où les fibres sont pulvérisées d'un liant afin de permettre l'encollage et la formation d'un matelas de laine stable.
- la découpe en panneaux des produits finis.
- le conditionnement, soit la palettisation et l'expédition chez les clients.

Comme dans le cas des bouteilles en verre, l'utilisation de calcin dans la production de laine de verre ne modifie pas les propriétés du produit fini. Sa performance technique est donc jugée équivalente à celle d'une laine de verre vierge de résistance thermique égale.

À l'heure actuelle, il n'existe pas d'usine de fabrication de laine de verre au Québec. Le calcin qui était produit au Québec par l'usine Klareco était anciennement acheminé aux fabricants de laines minérales situés aux États-Unis (Klareco, 2013). Dans contexte actuel, la modélisation de ce scénario dans le cadre de l'étude représente un projet non opérationnel au Québec¹.

Transformation du verre en poudre de verre utilisé comme ajout cimentaire dans le béton

Le développement d'une technologie permettant d'introduire et d'optimiser le verre mixte dans la composition du béton est le fruit des recherches de la Chaire SAQ de valorisation du verre dans les matériaux de l'Université de Sherbrooke² lancée en 2004. Son objectif est de trouver des solutions novatrices pour donner une seconde vie aux bouteilles de verre récupérées.

Possédant les propriétés d'un matériau pouzzolanique³, la poudre est utilisée comme ajout cimentaire en remplacement d'une fraction du ciment Portland dans des bétons ordinaires et de hautes performances. Selon les études et les essais menés par la Chaire SAQ, la poudre de verre pourrait remplacer de 20 à 30 % du ciment Portland d'une structure en béton (Tagnit-Hamou et Bengougam, 2012; Dallaire, 2013). Il est à noter que l'utilisation du verre dans le béton (taille de grains de verre variant de 160 à 2 500 μm) nécessiterait une précaution spéciale pour éviter une réaction alcali-silice qui est délétère avec le ciment (Idir, 2010). Des études sont en cours dans le cadre des activités de la Chaire SAQ pour éliminer cet effet (Tagnit-Hamou 2013). Il est donc supposé dans la présente étude que les éventuelles précautions à prendre n'auraient aucun impact sur les résultats.

¹ Comme mentionné précédemment, au moment de publier cette étude, 2M Ressources avait amorcé les opérations de démarrage d'une nouvelle ligne pour le traitement du verre en provenance de la collecte sélective et dont le calcin sera utilisé pour fabriquer de la laine de verre.

² Site web de la Chaire SAQ : <http://www.usherbrooke.ca/chaire-vvm/>

³ Matériau pouzzolanique ou pouzzolane : matériau siliceux qui, lorsque mélangé à de la chaux, forme un produit liant.

À l'heure actuelle, plusieurs applications de ce type ont déjà vu le jour, incluant des planchers de succursales de la SAQ (Société des alcools du Québec), une dalle expérimentale en béton à la Maison du développement durable (SAQ, 2013; Dallaire, 2013; Maison du développement durable, 2013), ainsi que plusieurs trottoirs de la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2013) et un mur antibruit à Boucherville (Jansen Industries, 2013). Les travaux expérimentaux indiquent que l'utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire améliorerait la performance du béton, entraînerait une durée de vie prolongée du béton, le rendrait plus imperméable et lui conférerait un indice de réflectance solaire élevé¹.

La technologie demeure cependant en cours de développement et n'est pas encore commercialisée à grande échelle au Québec. L'usine de micronisation du verre au Québec (Tricentris, 2013a, 2013b), située à Lachute, détient la licence commerciale de cette technologie. Cette usine conditionne le verre mixte récupéré issu des centres de tri afin et le micronise en vue d'obtenir une poudre de verre pouvant être utilisée comme ajout cimentaire dans du béton (Gélinas, 2013).

Le ciment, principal constituant actif du béton qui joue le rôle de liant, est produit à partir de l'extraction de deux matières premières, le calcaire et l'argile, qui sont mélangées pour ensuite être cuites à très haute température. Compte tenu de la production très énergivore du ciment, le recyclage du verre en vue de son utilisation comme ajout cimentaire et en remplacement au ciment permettrait d'éventuelles économies d'énergie liée à la transformation des matières premières. En plus du ciment, le béton est composé de granulats, de sable et d'eau. Ces matières premières sont entreposées dans des silos. Un doseur sélectionne et pèse ces matières qui sont par la suite transférées dans une bétonnière où le malaxage est effectué avant de livrer le béton au chantier (Holcim, 2013).

Dans le contexte actuel, la modélisation de ce scénario dans le cadre de l'étude représente un projet en cours de développement au Québec.

Transformation du verre en agrégat de verre utilisé comme agrégat dans le béton

L'utilisation des agrégats de verre dans du béton s'inscrit dans le contexte des mêmes recherches menées par la Chaire SAQ décrites précédemment. Cependant, à la différence de la poudre de verre, ces agrégats sont utilisés en remplacement d'une fraction de granulats conventionnels (par exemple les calcaires comme la pierre) contenus dans le béton (SAQ, 2013). Les applications relatives aux dalles de béton déjà effectuées contiennent jusqu'à 70 % d'agrégats. Ces derniers proviennent de verre trié et conditionné selon la granulométrie souhaitée. De même que pour l'utilisation de la poudre de verre, l'incorporation des agrégats de verre se fait lors du malaxage (Holcim, 2013). Cet ajout permet de réduire la quantité de matières premières nécessaires, en l'occurrence de la pierre, et par conséquent les émissions liées à leur production. À l'instar de la poudre de verre, l'historique relativement court de l'utilisation des agrégats de verre ne permet pas de connaître avec certitude les impacts sur la performance du béton, telle que sa durée de vie. Pour cette raison, il est posé comme hypothèse que la performance d'un béton avec agrégats de verre est identique à celle d'un béton avec agrégats conventionnels.

¹ Projet de démonstration : <http://www.voirvert.ca/projets/projet-demonstration/dalle-integrant-du-verre-recycle>,
http://www.socpra.com/Tagnit-Hamou_detail.html

Comme dans le cas de la poudre de verre, le verre mixte provenant des centres de tri est traité puis concassé chez Tricentris afin de produire les agrégats de verre utilisés dans du béton (Tricentris, 2013b).

Dans le contexte actuel, la modélisation de ce scénario dans le cadre de l'étude représente un projet en cours de développement au Québec.

2.3 Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence

En ACV, les systèmes sont évalués sur la base de leur fonction. La **fonction primaire** des systèmes à l'étude consiste à :

« Gérer du verre mixte récupéré en fin de vie via les centres de tri québécois ».

Toutefois, à l'exception de l'enfouissement, les scénarios de fin de vies évalués sont des filières qui, en plus de gérer le verre, le valorisent en fournissant un produit. Ainsi, les scénarios 2, 3 et 4 (incluant les quatre projets de commercialisation du verre) ont une **fonction secondaire**, soit celle de « *produire une matière secondaire ou un produit fini* ».

De tels scénarios multifonctionnels sont traités par la méthode de l'extension des frontières en vue de conserver l'équivalence fonctionnelle des systèmes évalués. Une description détaillée de cette approche se trouve à la section 2.4, incluant la définition des unités fonctionnelles pour chaque fonction secondaire. De plus, les flux de référence pour chaque scénario sont présentés au Tableau 2-1.

L'**unité fonctionnelle** pour la fonction primaire, c'est-à-dire la référence quantitative à laquelle se rapportent les calculs d'inventaire et d'évaluation des impacts, permettant de répondre à la fonction primaire se définit comme suit :

« La gestion postconsommation de 1 kilogramme de verre mixte récupéré via les centres de tri au Québec en 2013 ».

2.4 Processus multifonctionnels et extension des frontières

Une comparaison entre les différents scénarios n'est possible que lorsque les systèmes évalués sont équivalents en termes de fonctions qu'ils remplissent. Comme mentionné plus haut, les filières de valorisation, soit les projets de commercialisation du verre (scénario 4) et ceux d'utilisation en LET (scénarios 2 et 3), sont des systèmes multifonctionnels qui permettent de gérer le verre à sa fin de vie (fonction A) et de produire du verre recyclé, une matière destinée à un nouvel usage (fonction B). Or, la filière de gestion de fin de vie par enfouissement gère uniquement le verre (fonction A). Il est donc essentiel d'assurer une équivalence fonctionnelle entre les différentes filières de fin de vie évaluées.

Pour ce faire, une approche par extension des frontières est utilisée de manière à tenir compte des fonctions secondaires non équivalentes (fonction B) remplies par les filières de valorisation (scénarios 2, 3 et 4). En effet, conformément à la norme ISO 14 044 (2006), l'extension des frontières est la première approche à considérer dans le cas de systèmes multifonctionnels qui sont indivisibles. Cette approche respecte donc la hiérarchie proposée par ISO pour une démarche d'affectation.

Ainsi, les frontières doivent être étendues pour y inclure la production évitée d'un produit substitué fournissant une fonction équivalente à celle de la fonction secondaire.

La fonction secondaire remplie par chaque filière à l'étude (c.-à-d. en plus de la fonction principale) est définie comme suit pour les deux projets d'utilisation en LET :

- Scénario 2 : Utilisation du verre comme matériau de recouvrement journalier dans les lieux d'enfouissement (fonction B.2) :
« Recouvrir de façon journalière une surface dans un LET »
- Scénario 3 (fonction B.3): Utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès des lieux d'enfouissement technique :
« Produire un matériau de sous-fondation utilisé dans les chemins d'accès des LET »

Et pour les quatre projets de commercialisation :

- Scénario 4.1 : Utilisation du verre comme matière première dans la production d'une bouteille en verre avec contenu recyclé (fonction B.4.1) :
« Produire une bouteille en verre »
- Scénario 4.2 : Utilisation du verre comme matière première dans la production de laine de verre avec contenu recyclé (fonction B.4.2) :
« Produire de la laine de verre »
- Scénario 4.3 : Transformation du verre en poudre de verre utilisée comme ajout cimentaire dans le béton (fonction B.4.3) :
« Produire un ajout cimentaire »
- Scénario 4.4 : Transformation du verre en agrégat de verre utilisé comme agrégat dans le béton (fonction B.4.4) :
« Produire un agrégat cimentaire »

La quantification des autres fonctions, c'est-à-dire l'unité fonctionnelle, est présentée au Tableau 2-1. L'unité fonctionnelle est déduite en considérant les paramètres de l'unité fonctionnelle de la fonction primaire (1 kg de verre mixte récupéré) et les paramètres et caractéristiques de performance des produits générés.

Le Tableau 2-1 présente donc :

- la fonction secondaire remplie par chacune des filières de gestion de fin de vie;
- l'unité fonctionnelle pour chaque fonction secondaire;
- les paramètres clés d'équivalence ayant servi à établir l'unité fonctionnelle et permettre de réaliser l'extension des frontières de manière cohérente ;
- les flux de référence indiquant la quantité de produits analysés (générés et évités) nécessaires pour satisfaire l'unité fonctionnelle de chaque fonction secondaire.

Tableau 2-1: Fonctions, paramètre d'équivalence et flux de référence pour les produits générés et évités inclus dans l'extension des frontières

Scénarios		Unité fonctionnelle associée à la fonction secondaire	Produits générés	Produit évité	Paramètre d'équivalence
N°1	Enfouissement du verre	N/A		N/A	N/A
N°2	Utilisation du verre comme matériau de recouvrement journalier dans les LET	Recouvrir $6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ d'un lieu d'enfouissement technique pour une couverture correspondant à une épaisseur d'un mètre de sable.	1 kg verre avec une masse volumique apparente ⁽¹⁾ de $1\,620 \text{ kg/m}^3$ Taux de rejet au centre de tri : 0 % Couvrance égale à celle du sable.	1,02 kg de sable avec une masse volumique apparente ⁽²⁾ de $1\,650 \text{ kg/m}^3$	Unité volumique : $6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ de surface avec une couvrance correspondant à une épaisseur d'un mètre de sable.
N°3	Utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès d'un LET	Produire $6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ d'un matériau de remblai pour la sous-fondation d'un chemin d'accès d'un LET.	1 kg verre avec une masse volumique apparente ⁽¹⁾ de $1\,620 \text{ kg/m}^3$ Taux de rejet au centre de tri : 0 %	1,02 kg de gravier avec une masse volumique apparente ⁽²⁾ de $1\,650 \text{ kg/m}^3$	Unité volumique: $6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ de matériau de sous-fondation.
N°4.1	Utilisation du verre comme matière première dans la production d'une bouteille de verre avec contenu recyclé	Produire une bouteille de verre de 2,14 kg.	Une bouteille de verre de 2,14 kg avec un contenu recyclé moyen de 45 % (équivalant à 0,965 kg de verre recyclé et 1,18 kg de verre vierge) Taux de rejets à l'étape de conditionnement ⁽⁴⁾ : 3,5 %	Une bouteille de verre de 2,14 kg avec un contenu 100 % vierge	Unité de produit : Une bouteille de 2,14 kg

Scénarios		Unité fonctionnelle associée à la fonction secondaire	Produits générés	Produit évité	Paramètre d'équivalence
N°4.2	Utilisation du verre comme matière première dans la production d'une laine de verre avec contenu recyclé	Produire 1,93 kg de laine de verre	1,93 kg de laine de verre avec un contenu recyclé moyen de 50 % ^(5,6) (équivalant à 0,965 kg de verre recyclé et 0,965 kg de verre vierge) Taux de rejets à l'étape de conditionnement ⁽⁴⁾ : 3,5 %	1,93 kg de laine de verre 100 % vierge de résistance thermique équivalente	Unité massique : 1,93 kg de laine de verre
N°4.3	Transformation du verre en poudre de verre utilisée comme ajout cimentaire dans le béton	Produire $3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ d'un ajout cimentaire	0,985 kg de verre micronisé avec une masse volumique spécifique ⁽⁷⁾ de $2\,540 \text{ kg/m}^3$ Taux de rejets à l'étape de micronisation ⁽⁷⁾ : 1,5 %	1,22 kg de ciment Portland avec une masse volumique spécifique ⁽⁸⁾ de $3\,150 \text{ kg/m}^3$	Unité volumique : $3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ d'ajout cimentaire.
N°4.4	Transformation du verre en agrégat de verre utilisé comme agrégat dans le béton	Produire $4,4 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ d'agrégat cimentaire	0,985 kg d'agrégat de verre avec une masse volumique spécifique ⁽⁷⁾ de $2\,490 \text{ kg/m}^3$ Taux de rejet à l'étape de concassage : 1,5 %	1,07 kg de granulat (pierre) avec une masse volumique spécifique ⁽⁹⁾ de $2\,700 \text{ kg/m}^3$	Unité volumique : $4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ d'agrégat cimentaire

⁽¹⁾ Lupien, 2006 ; ⁽²⁾ Kellenberger et al., 2007; ⁽³⁾ Owens Illinois, 2013; ⁽⁴⁾ Taux de rejets correspondant au taux de contamination par les autres matières (2M Ressources, 2013); ⁽⁵⁾ Owens Corning, 2012; ⁽⁶⁾ CertainTeed, 2013; ⁽⁷⁾ Tricentris, 2013b. Le taux de rejet réel peut atteindre 3 %, toutefois l'influence de ce taux de rejet sur les conclusions de l'étude est non significative; ⁽⁸⁾ PCA, 2013 ⁽⁹⁾ Pavement Interactive, 2012.

À titre d'exemple, la Figure 2-2 illustre deux approches pour appliquer le principe d'extension des frontières servant à rétablir l'équivalence entre les scénarios d'enfouissement du verre et de son utilisation comme matériau de recouvrement. En résumé, il est possible de rétablir l'équivalence fonctionnelle entre deux scénarios soit en soustrayant un système qui fournit la fonction secondaire au scénario de valorisation (approche 1) ou en additionnant ce même système au scénario d'enfouissement (approche 2). Les deux approches produisent des résultats identiques dans l'absolu, mais la représentation graphique des résultats est différente. Avec l'approche 1, le résultat pour chaque scénario peut être comparé de façon indépendante avec n'importe quel autre scénario. De plus, en fonction de l'impact relatif entre les impacts potentiels générés par les systèmes soustraits, les résultats de l'approche 1 peuvent être positifs ou négatifs. Puisque cette étude désire éviter de mettre l'accent sur la comparaison entre la performance environnementale des projets de commercialisation et que la comparaison de scores négatifs et positifs peut compliquer l'interprétation de certains résultats, l'approche 2 est utilisée dans cette étude.

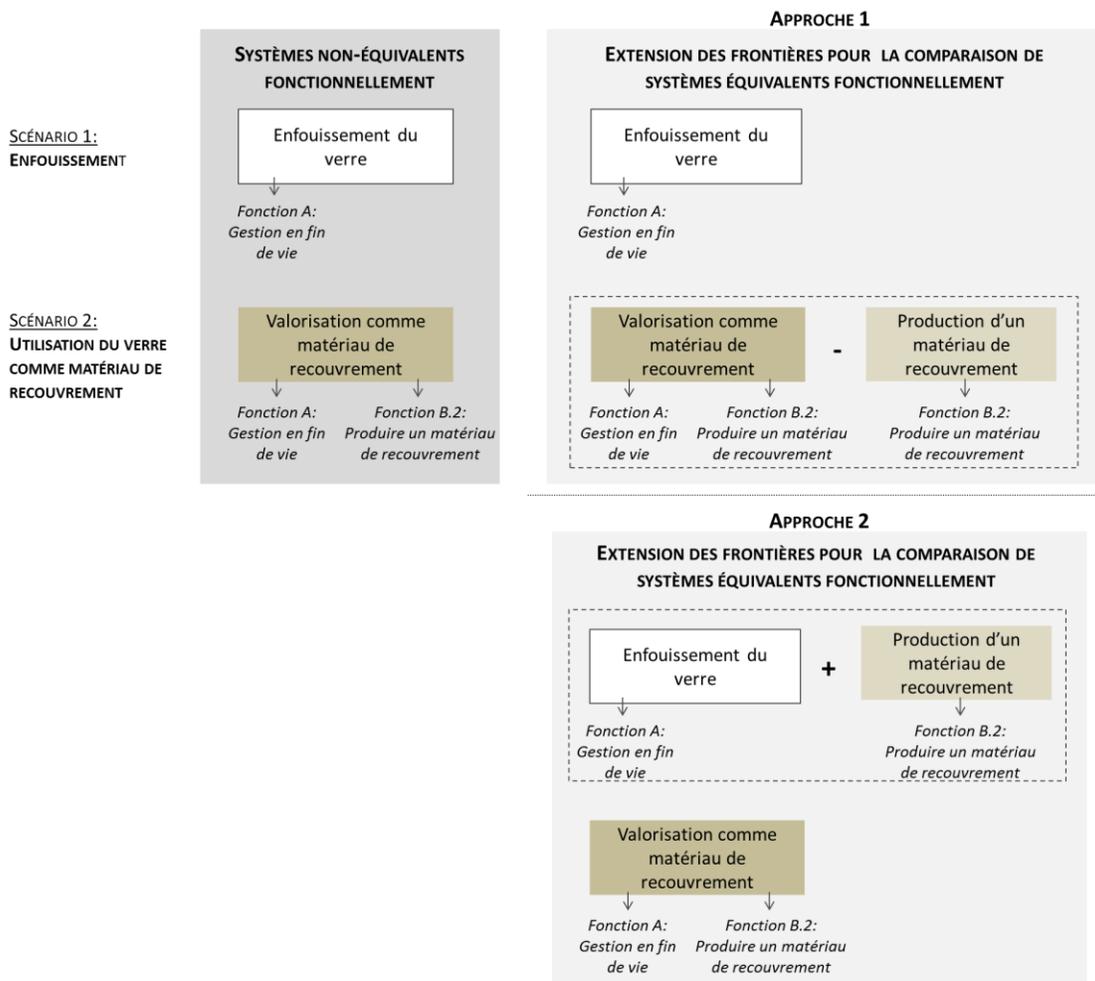


Figure 2-2: Exemples d'extensions des frontières pour la comparaison de deux systèmes.

La Figure 2-3 illustre les ajustements effectués lors de l'extension des frontières selon l'approche 2 et permettant la comparaison entre les quatre scénarios. Cette figure montre que les scénarios qui sont comparés dans cette étude doivent répondre à une fonction principale (gérer du verre mixte récupéré en fin de vie) et trois fonctions secondaires (produire un matériau de recouvrement, un matériau de sous-fondation et un produit fini ou une matière première). Selon le scénario à l'étude (enfouissement, projets d'utilisation en LET ou un des quatre projets de commercialisation), un assemblage de différents systèmes est nécessaire pour fournir de façon équivalente ces quatre fonctions. Cette approche permet de comparer sur une base équivalente et sur un même graphique, quatre scénarios de gestion du verre mixte récupéré en fin de vie. Les schémas détaillés de chacune des boîtes se trouvent à l'Annexe A.

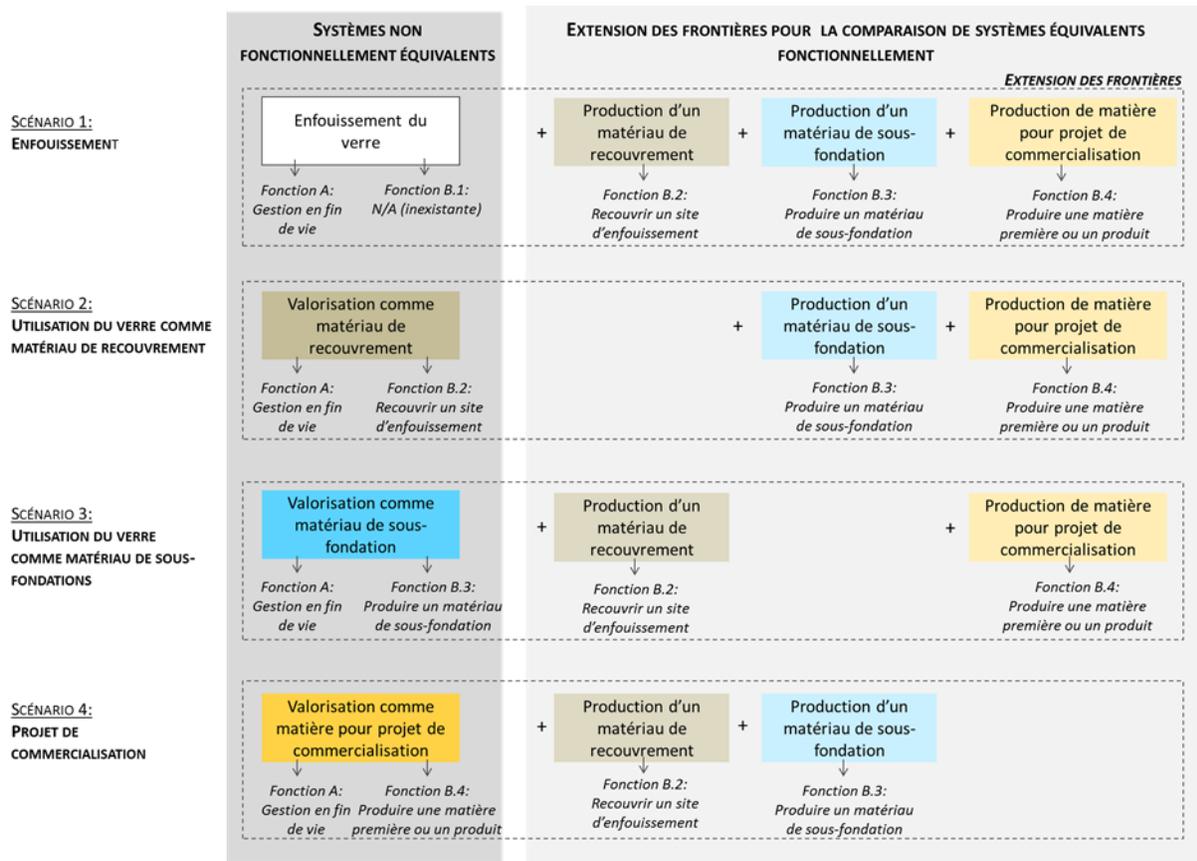


Figure 2-3: Extension des frontières des systèmes à l'étude pour assurer leur équivalence fonctionnelle.

2.5 Frontières du système et étapes du cycle de vie

2.5.1 Description des frontières du système

Les frontières délimitent le système à évaluer de manière à identifier les étapes, les processus et les flux qui doivent être pris en compte dans l'ACV. Dans la présente étude, les frontières incluent l'ensemble des activités pertinentes à l'atteinte des objectifs (section 2.1) et à la réalisation de la fonction et de l'unité fonctionnelle (section 2.3). Elles incluent également les processus et les flux contribuant de manière significative à l'impact environnemental potentiel du système.

Cette étude vise à comparer des filières de gestion de fin de vie du verre uniquement. Par conséquent, les étapes liées à la première vie et à l'utilisation du verre avant sa récupération sont exclues des frontières des systèmes. De plus, le caractère comparatif de cette étude permet d'exclure certaines étapes des frontières qui sont identiques d'un scénario à l'autre. Ainsi, puisque tous les scénarios évalués gèrent le verre postconsommation mixte issu de la collecte sélective, les étapes de collecte et de tri (opérations relatives au centre de tri), dont les impacts sont identiques pour toutes les filières comparées, sont exclues. Bien qu'il existe différentes techniques de tri (tri positif/tri négatif), cette étude n'a pas pour objectif de comparer leurs performances environnementales et leur influence sur la qualité du flux de verre mixte sortant des centres de tri. De ce fait, la même qualité de verre sortant du centre de tri est considérée lors de la comparaison entre les différentes options de filières de gestion de fin de vie.

Pour les filières de gestion de fin de vie relatives aux scénarios 2 et 3 (projets d'utilisation en LET) ainsi qu'au scénario 4 (projets de commercialisation), les étapes considérées identiques entre le produit utilisant le verre mixte et le produit substitué sont exclues des frontières des systèmes.

Ainsi, les étapes d'utilisation et de gestion de fin de vie relatives à une bouteille de verre recyclé et celle d'une bouteille de verre vierge sont identiques. Il en est de même pour le scénario de laine de verre recyclé dont le produit est utilisé et géré de manière similaire à son substitut composé de laine de verre vierge. Ceci est établi sur la base de leur performance technique identique, leur permettant de remplir la même fonctionnalité.

Comme il a été mentionné précédemment, des travaux expérimentaux indiquent que l'utilisation de la poudre de verre améliore la performance du béton lorsqu'il est comparé à son équivalent utilisant du ciment Portland, dont une plus grande imperméabilité et durabilité, un indice de réflectance plus élevée, etc. Il serait en théorie possible de capturer dans cette étude les bénéfices environnementaux associés à l'utilisation de la poudre de verre, en élargissant les frontières de la présente étude pour y inclure des scénarios d'utilisation et de fin de vie du béton. Cependant, l'inclusion de ces étapes dépasse le cadre de cette étude. Ainsi, le cas spécifique du scénario de la poudre de verre suppose que les performances techniques des deux bétons sont équivalentes. Cette approche peut-être perçue comme « conservatrice » dans la mesure où les avantages additionnels de la poudre de verre ne sont pas comptabilisés par le cadre actuel de l'étude. Un raisonnement similaire est appliqué pour le scénario relatif à l'agrégat de verre.

Les frontières débutent ainsi à la sortie du centre de tri et vont jusqu'à l'élimination définitive du verre ou encore à la production d'un matériau/produit destiné à un nouvel usage. Ces frontières établies sont de type « *de la porte au tombeau* » (ou « *gate-to-grave* »).

Les principales étapes comprises dans le système définissant chacune des filières de gestion de fin de vie du verre sont :

- 1) Le **transport de gestion de fin de vie** du verre mixte du centre de tri jusqu'aux étapes de gestion (enfouissement, conditionnement/traitement, lieu d'utilisation) ;
- 2) La **gestion de fin de vie** du verre par les filières à l'étude.

La Figure 2-4 schématise les frontières générales des systèmes étudiés. Les processus et flux inclus et exclus de l'analyse sont également résumés au Tableau 2-2. Les schémas détaillés de chacune des boîtes se trouvent à l'Annexe A.

Par ailleurs, pour tous les sous-systèmes, les processus d'« amont » identifiables sont inclus de manière à fournir la vue la plus complète possible du système. Par exemple, dans le cas de l'énergie utilisée pour un transport, non seulement les émissions liées à la combustion de carburant sont considérées, mais aussi les processus et matières nécessaires à la production de ce carburant. De cette manière, les chaînes de production de tous les entrants sont remontées jusqu'à l'extraction des matières premières.

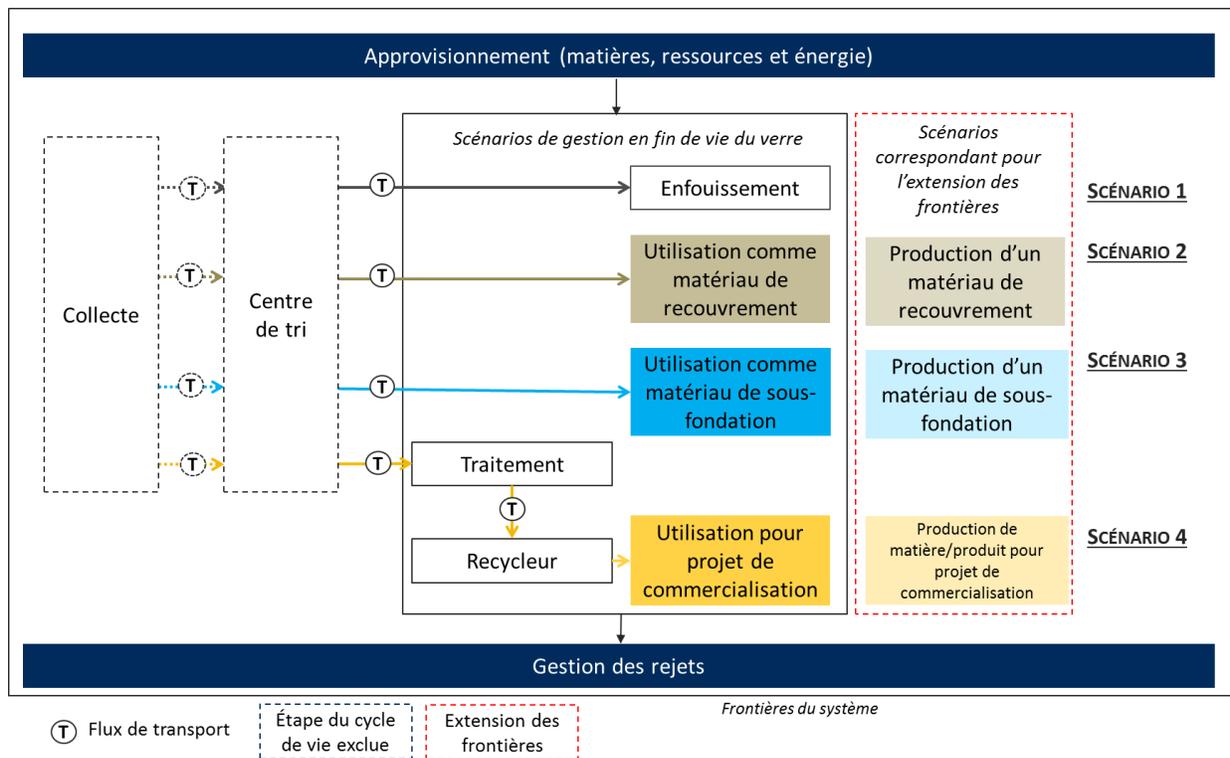


Figure 2-4: Frontières générales du système.

Tableau 2-2 : Processus inclus et exclus des frontières de l'ACV

Étapes du cycle de vie	Processus/sous-processus	Description
Filière de gestion de fin de vie par enfouissement (scénario 1)		
Transport jusqu'au lieu d'enfouissement	Infrastructures des camions	Inclus : la production et fin de vie des camions
	Opérations des camions	Inclus : la consommation de carburant, entretien des véhicules, usure des infrastructures routières
Enfouissement du verre	Infrastructures des lieux d'enfouissement	Inclus : la construction et fin de vie des infrastructures et des machineries
	Opérations sur site	Inclus : les émissions de l'opération

Étapes du cycle de vie	Processus/sous-processus	Description
Filières de gestion de fin de vie : projets d'utilisation en LET (scénarios 2 et 3)		
Transport jusqu'au lieu d'utilisation	Infrastructures des camions	Inclus : production et fin de vie des camions
	Opération des camions	Inclus : consommation de carburant, entretien des véhicules, usure des infrastructures routières
Utilisation du verre pour le recouvrement journalier / remblayage de sous-fondation des chemins d'accès	Opérations sur site (recouvrement/remblayage)	Inclus : émissions de l'opération Inclus : construction et fin de vie de la machinerie – bouteur
	Production évitée : production équivalente de sable/gravier	Inclus : extraction, acheminement et transformation de matières premières nécessaires à la production de sable/gravier Inclus : transport de la matière jusqu'au lieu de recouvrement/remblayage – consommation de carburant Inclus : ensablement/remblayage, consommation de carburant, construction et fin de vie de la machinerie
	Utilisation et fin de vie	Exclus : durée d'occupation du recouvrement/remblayage et gestion de fin de vie (étapes considérées identiques pour le verre utilisé et les matières substituées)
Filières de gestion de fin de vie: tous les projets de commercialisation (scénario 4)		
Transport jusqu'au lieu de traitement	Infrastructures des camions	Inclus : production et fin de vie des camions
	Opération des camions	Inclus : consommation de carburant, entretien des véhicules, usure des infrastructures routières
Bouteille en verre (scénario 4.1)		
Conditionnement du verre (traitement)	Opérations de conditionnement	Inclus : construction et infrastructures de l'usine, consommation énergétique requise pour l'opération
Transport jusqu'au lieu de production	Infrastructures des camions	Inclus : production et fin de vie des camions
	Opération des camions	Inclus : consommation de carburant, entretien des véhicules, usure des infrastructures routières
Fabrication de la bouteille de verre	Production	Inclus : construction et infrastructures du site, consommation énergétique requise
	Production évitée : production équivalente de bouteille de verre vierge	Inclus : extraction, acheminement et transformation des matières premières nécessaires à la production d'une bouteille de verre vierge, consommation énergétique requise
	Distribution, utilisation et fin de vie	Exclus : transport vers les détaillants, manutention et entreposage, utilisation et fin de vie du produit (étapes considérées identiques pour le verre utilisé et les matières substituées)
Laine de verre (scénario 4.2)		
Conditionnement du verre (traitement)	Opérations de conditionnement	Inclus : construction et infrastructures de l'usine, consommation énergétique requise pour l'opération
Transport jusqu'au lieu de production	Infrastructures des camions	Inclus : production et fin de vie des camions
	Opération des camions	Inclus : consommation de carburant, entretien des véhicules, usure des infrastructures routières
Fabrication de la laine de verre	Production	Inclus : construction et infrastructures du site, consommation énergétique requise

Étapes du cycle de vie	Processus/sous-processus	Description
		Exclus : ajout de liant ou revêtement (étapes considérées identiques pour la laine de verre à contenu recyclé et vierge)
	Production évitée : production équivalente de laine de verre vierge	Inclus : extraction, acheminement et transformation des matières premières nécessaires à la production de laine de verre vierge, consommation énergétique requise
	Distribution, utilisation et fin de vie	Exclus : transport vers les détaillants, manutention et entreposage, utilisation et fin de vie du produit (étapes considérées identiques pour le verre utilisé et les matières substituées)
Poudre de verre (scénarios 4.3)		
Conditionnement du verre (traitement)	Micronisation (traitement)	Inclus : construction et infrastructures, consommation énergétique requise
Transport jusqu'à la bétonnière	Infrastructures des camions	Inclus : production et fin de vie des camions
	Opération des camions	Inclus : consommation de carburant, entretien des véhicules, usure des infrastructures routières
Fabrication du béton	Production évitée : production équivalente de ciment Portland	Inclus : extraction, acheminement et transformation des matières premières nécessaires à la production de ciment, consommation énergétique requise
	Coulage du béton	Exclus : construction et infrastructures (matériaux, ressources et énergie) (étapes considérées identiques pour l'ajout cimentaire et le ciment substitué)
	Distribution, utilisation et fin de vie de la structure de béton	Exclus : transport jusqu'au lieu d'utilisation finale (chantiers, etc.), utilisation et fin de vie du produit (étapes considérées identiques pour la structure en béton contenant la poudre de verre et celle contenant du ciment en proportion équivalente)
Agrégat de verre (scénarios 4.4)		
Conditionnement du verre (traitement)	Concassage (traitement)	Inclus : la construction et infrastructures, consommation énergétique requise
Transport jusqu'à la bétonnière	Infrastructures des camions	Inclus : production et fin de vie des camions
	Opération des camions	Inclus : consommation de carburant, entretien des véhicules, usure des infrastructures routières
Fabrication du béton	Production évitée : production équivalente de pierre	Inclus : extraction, acheminement et transformation des matières premières nécessaires à la production de pierre, consommation énergétique requise
	Coulage du béton	Exclus : construction et infrastructures (matériaux, ressources et énergie) (étapes considérées identiques pour l'ajout de granulats et les granulats conventionnels substitués)
	Distribution, utilisation et fin de vie de la structure de béton	Exclus : transport jusqu'au lieu d'utilisation finale (chantiers, etc.), utilisation et fin de vie du produit (étapes considérées identiques pour la structure en béton contenant les agrégats de verre et celle contenant des agrégats conventionnels en proportion équivalente)

2.5.2 Critères de coupure

Certains processus et leurs flux peuvent être exclus sur la base d'un critère de coupure. Un critère de 1 % est généralement appliqué et est défini en fonction d'une évaluation de la masse, de l'énergie primaire et de la pertinence environnementale. Cela signifie que les processus et les flux peuvent être omis s'ils représentent moins de 1 % de la masse, de l'énergie primaire totale connue et que cette quantité représente moins de 1 % de l'impact environnemental total potentiel (c.-à-d. pertinence environnementale) et ce, en se basant généralement sur l'expérience passée, un court calcul, ou un jugement d'expert.

Tous les processus pour lesquels des données sont disponibles sont pris en compte, même si leur contribution est inférieure à 1 %. Dans certains cas, des approximations et des jugements d'experts ont été utilisés pour compenser l'absence de données. Aucun critère de coupure n'a donc été utilisé en tant que tel, mis à part les critères qui s'appliquent aux processus de la base de données *ecoinvent v2.2* (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, SCLCI, 2010).

2.5.3 Frontières géographiques et temporelles

La présente étude se veut une ACV représentative du contexte québécois pour l'année 2013. La modélisation des filières de gestion de fin de vie du verre récupéré à partir de la collecte sélective a donc été réalisée de manière à répondre à ce critère. Les étapes de traitement et de fabrication ainsi que les transports sont représentatifs des localisations géographiques où ces activités se déroulent.

Toutefois, il est important de noter que certains processus compris dans les frontières de l'étude peuvent avoir lieu n'importe où ou à n'importe quel moment s'ils sont nécessaires à la réalisation de l'unité fonctionnelle. C'est le cas des processus associés à l'approvisionnement en matières premières qui peuvent avoir lieu au Québec ou ailleurs dans le monde. Certains processus, comme ceux relatifs à l'enfouissement, peuvent également générer des émissions sur une période plus longue que celle de l'année de référence, soit quelques décennies à plus d'un siècle et même des millénaires. Cette période dépend de la conception et des paramètres d'opération des lieux d'enfouissement ainsi que de la modélisation de leurs émissions dans l'environnement. Dans cette étude, toutes ces émissions sont prises en compte dans les résultats indépendamment du lieu ou du moment où elles sont générées.

2.6 Sources, hypothèses et données d'inventaire du cycle de vie

Les données requises pour l'ACV concernent les matières premières utilisées, l'énergie consommée ainsi que les rejets générés à chaque étape du cycle de vie du système évalué.

La collecte de données est une étape importante pour la réalisation de l'étude puisque la qualité d'une ACV dépend de celle des données employées dans l'analyse. Tous les efforts ont donc été faits pour que les informations et les données les plus crédibles et les plus représentatives soient obtenues. La collecte a été réalisée de manière itérative entre Quantis, RECYC-QUÉBEC, Éco Entreprises Québec et des intervenants du secteur de la récupération, du recyclage et de la valorisation du verre.

L'inventaire du cycle de vie (ICV) est réalisé de manière à privilégier les données spécifiques à cette étude. Ainsi, dans la mesure du possible, des **données primaires** ont été collectées auprès des

intervenants du secteur pour les distances de transport, le conditionnement du verre, la production de bouteilles de verre, la production de poudre et d'agrégats de verre et les opérations de recouvrement et de remblai pour les projets d'utilisation en LET. Ces données ont été obtenues par le biais de communications personnelles avec des responsables du secteur, d'entretiens téléphoniques et de questionnaires.

Malgré les efforts consentis, il n'a pas été possible d'obtenir d'informations spécifiques quant à la fabrication de laine de verre, notamment les étapes du processus et la consommation d'énergie nécessaire.

Ainsi, lorsque les données n'étaient pas disponibles ou difficilement accessibles, des sources de données secondaires ont été utilisées. Celles-ci proviennent de la littérature, des publications de RECYC-QUÉBEC sur les technologies de production, de jugements d'experts ou encore de bases de données reconnues.

Les principales sources de données utilisées sont présentées au Tableau 2-3. De plus, l'Annexe A présente de manière détaillée l'ensemble des sources de données et les hypothèses employées.

Les données, rapportées à l'unité fonctionnelle, ont été compilées au sein d'un logiciel spécialisé, soit SimaPro 7.2 qui est commercialisé par la firme néerlandaise PRé Consultants.

Tableau 2-3: Principales sources de données primaires et secondaires

Donnée	Description	Source
Distance et modélisation des transports	Distance de transport moyenne - des centres de tri vers les lieux d'enfouissement et les conditionneurs - des conditionneurs vers les utilisateurs Impact du transport par camion	ÉEQ (2013) RECYC-QUÉBEC(2013) Moyenne obtenue à l'aide d'un calculateur considérant les principaux centres de tri, conditionneurs et utilisateurs probables. Processus de la base de données interne de Quantis.
Enfouissement du verre	Impacts de l'enfouissement du verre	<i>ecoinvent</i> (Doka, 2007)
Conditionnement du verre	Technologie de production du calcin, consommation énergétique et taux de rejets : pour les scénarios Bouteille de verre et Laine de verre, caractéristiques du verre conditionné.	2M Ressources (2013) Jugement d'expert ⁽¹⁾
Utilisation du verre comme matériau de recouvrement ou de sous-fondation	Caractéristiques du verre, provenance, opérations sur sites	Jugement d'expert ⁽²⁾ Lupien (2006)
Production de bouteilles en verre	Caractéristiques de la bouteille, contenu recyclé, matières premières, technologie de production et bénéfice énergétique de l'utilisation de calcin	Owens-Illinois (2013) GPI (2010) CIRAIG (2010)
Production de laine de verre	Caractéristiques de la laine isolante, contenu recyclé, matières premières, technologie de production et bénéfice énergétique de l'utilisation de calcin	Pellegrino et al. (2002) Flanagan et Davies (2003) <i>ecoinvent</i> (Kellenberger et al. 2007)
Production de sable et de gravier	Caractéristiques du sable et du gravier, extraction des matières premières et technologie de production	<i>ecoinvent</i> (Kellenberger et al. 2007)

Donnée	Description	Source
Production de la poudre et des agrégats de verre	Caractéristiques de la poudre et des agrégats de verre, technologie de production	Tagnit-Hamoum et Bengougam (2012) Tricentris (2013a, 2013b) Jugements d'experts ^(3,4)
Production de ciment	Caractéristiques du sable et du gravier, extraction des matières premières et technologie de production	<i>ecoinvent</i> (Kellenberger et al. 2007)

⁽¹⁾ Communication personnelle avec un ancien responsable chez Klareco

⁽²⁾ Informations obtenues auprès de responsables opérant dans des lieux d'enfouissements au Québec

⁽³⁾ Communication personnelle avec un responsable chez Holcim

⁽⁴⁾ Communication personnelle avec un responsable chez Jansen Industries

La base de données d'inventaire du cycle de vie utilisée est celle de *ecoinvent v2.2* (SCLCI, 2010). Cette base de données européenne est particulièrement reconnue par la communauté scientifique internationale de par sa complétude vis-à-vis des nombreux processus inclus ainsi que la qualité des données considérées (qualité des procédés de validation, complétude des données, etc.). Développée sur la base de moyennes technologiques, cette base de données propose des données génériques pouvant être ajustées afin d'améliorer la représentativité des systèmes et qui permettent de combler l'information manquante.

Compte tenu du biais que peut entraîner l'utilisation de données européennes, cette étude utilise une version adaptée de cette base de données, plus représentative du contexte géographique considéré¹. Ainsi, les mélanges d'approvisionnement énergétique (bouquet énergétique) européens ont été modifiés et remplacés par :

- Le bouquet énergétique québécois ou ontarien pour les processus d'avant-plan décrivant les activités et les opérations (c.-à-d. la consommation d'électricité des différents procédés de production) ayant lieu dans la région concernée;
- Le bouquet énergétique nord-américain pour tous les processus d'approvisionnement d'arrière-plan auxquels font appel les processus d'avant-plan. Une telle adaptation est jugée appropriée sachant que les processus d'approvisionnement peuvent avoir lieu n'importe où en Amérique du Nord.

La description de chacun de ces mélanges d'approvisionnement énergétique est disponible à l'Annexe A.

¹ Au moment de la réalisation de cette étude, la nouvelle banque de données d'inventaire du cycle de vie québécoise (*ecoinvent 3.1*) n'était pas disponible.

2.7 Cadres d'évaluation des impacts du cycle de vie

L'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) a pour but de traduire les flux élémentaires quantifiés dans l'inventaire du cycle de vie en différentes catégories d'impacts sur l'environnement et sur la santé humaine, selon des modèles de devenir, d'exposition et d'effet des polluants, ou de raréfaction des ressources. C'est ainsi qu'à chaque substance de l'inventaire est associé un facteur de caractérisation spécifique, permettant de calculer son score d'impact. La somme des scores d'impact des différentes substances détermine l'impact total du système pour un indicateur donné. Par la suite, ces catégories d'impacts sont agrégées en un nombre réduit de catégories de dommages environnementaux, ce qui facilite la communication des résultats et la prise de décision. Les résultats de l'ÉICV présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels, il s'agit d'expressions relatives et ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, les marges de sécurité ou les risques.

Tout comme pour l'inventaire, le calcul des impacts potentiels associés aux émissions inventoriées est effectué au moyen du logiciel spécialisé SimaPro 7.2, commercialisé par la firme néerlandaise PRÉ Consultants.

La méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie IMPACT 2002+ vQ2.2 (Jolliet et al., 2003, mise à jour par Quantis (Humbert et al., 2012)) est celle qui a été retenue pour cette étude. Celle-ci a été préférée aux autres méthodes d'évaluation puisqu'elle fait partie des méthodes les plus reconnues par la communauté ACV et dont les facteurs de caractérisation sont fréquemment mis à jour. Cette méthode propose également une approche complète orientée à la fois vers les impacts intermédiaires et les dommages permettant d'associer les résultats de l'ICV à seize catégories intermédiaires et à quatre catégories de dommages. La documentation associée à cette méthode ÉICV (Annexe B) définit l'ensemble des indicateurs pour chaque catégorie et les modèles de caractérisation qui y sont associés.

Afin de simplifier la compréhension des résultats, les indicateurs de dommages agrégés ont été utilisés. Ceux-ci permettent de limiter à 4 les indicateurs étudiés, mais font l'objet d'une modélisation additionnelle de la chaîne de cause à effet pour atteindre la cible représentant l'indicateur de dommage. Quoique cette agrégation permette une simplification utile pour l'interprétation des résultats, elle apporte également une incertitude supplémentaire (voir sous-section 2.8.3). Bien que l'utilisation des indicateurs de dommages soit assez largement répandue en vue de simplifier la compréhension des résultats, elle ne fait pas toujours consensus parmi les experts en ACV. Pour cette raison et par souci de transparence, les résultats désagrégés par catégorie d'impacts intermédiaires sont présentés à l'Annexe C.

Les catégories évaluées sont les suivantes :

Catégories de dommages (unité de l'indicateur de catégorie)

- Changements climatiques (kg CO₂éq) (horizon 100 ans – GIEC, 2007);
- Santé humaine (DALY) ;
- Qualité des écosystèmes (PDF*m²*an) ;
- Ressources (MJ primaire) ;

Indicateur d'inventaire (unité)

- Eau prélevée (litre d'eau équivalent).

Il est important de noter que les catégories d'impacts évaluées ne couvrent pas l'ensemble des impacts environnementaux possibles liés aux activités humaines, notamment le bruit, les odeurs et les champs électromagnétiques. De plus, certains entrants, substances ou émissions ne possèdent pas de facteur de caractérisation ce qui peut entraîner une sous-estimation de l'impact total des scénarios à l'étude.

Une deuxième évaluation basée sur une autre méthode ÉICV, soit la méthode ReCiPe (Goedkoop et al., 2009), est effectuée en analyse de sensibilité. Cette analyse permet de tester la robustesse des résultats obtenus par la méthode IMPACT 2002+ en vérifiant si la variabilité des modèles de caractérisation a une influence sur les conclusions de l'étude.

2.8 Interprétation

L'interprétation constitue la dernière phase de l'ACV et permet de discuter et de mettre en perspective les résultats obtenus suite à l'ÉICV. Cette phase inclut une comparaison des impacts environnementaux potentiels associés aux projets de commercialisation du verre mixte récupéré au Québec et aux trois filières de gestion de fin de vie alternatives; soit l'enfouissement du verre et les deux projets d'utilisation en LET.

La section 3 présente les résultats globaux ainsi qu'une analyse complète et approfondie de la performance de chacun des systèmes évalués, incluant :

- **Analyse de contribution** pour identifier les principaux paramètres et étapes du cycle de vie contribuant le plus aux impacts environnementaux potentiels évalués;
- **Évaluation de la qualité des données d'inventaire** pour vérifier la fiabilité des résultats quant à la qualité et la représentativité des données utilisées;
- **Analyse d'incertitude** liée aux modèles de caractérisation des impacts environnementaux employés;
- **Analyses de sensibilité** sur les paramètres dont les données présentent une grande variabilité ou une incertitude importante, afin d'évaluer la robustesse des résultats;
- **Analyse de cohérence et de complétude** quant aux règles appliquées à l'ensemble des systèmes comparés.

2.8.1 Analyses de contribution

Dans le cadre de cette étude, l'analyse de contribution s'est résumée à observer l'importance relative des différents processus modélisés à l'impact potentiel global évalué pour chacune des catégories de dommages mentionnées à la section 2.7. Les résultats détaillés de l'analyse de contribution sont disponibles à l'Annexe C.

En parallèle à l'évaluation de la qualité des données utilisées, il est essentiel de vérifier dans quelle mesure ces données contribuent à l'impact potentiel global du système à l'étude. En effet, une donnée de qualité inférieure peut très bien convenir dans le cas d'un processus dont la contribution est faible. Par contre, des données de bonne qualité doivent être recherchées pour les processus qui influencent grandement les conclusions de l'étude.

2.8.2 Évaluation de la qualité des données

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

Selon la norme ISO, une évaluation qualitative des données doit être faite afin d'assurer leur qualité :

- a) Temporelle
- b) Géographique
- c) Technologique
- d) Fidélité
- e) Complétude
- f) Représentativité
- g) Cohérence
- h) Reproductibilité
- i) Source des données
- j) Incertitude des informations

Bien qu'aucune méthode particulière ne soit actuellement prescrite par la norme ISO, deux critères ayant une influence sur la qualité de l'inventaire ont été choisis pour faire l'objet d'une analyse qualitative de la qualité des données :

- **Fiabilité** : concerne i) les sources, les méthodes d'acquisition et les procédures de vérification des données. Une donnée jugée fiable est une donnée vérifiée et mesurée sur le terrain. Ce critère se réfère principalement à la quantification des flux.
- **Représentativité** : Évaluation de l'adéquation entre les données utilisées et le contexte de l'étude (f). Cette évaluation porte à la fois sur la représentativité a) temporelle, b) géographique et c) technologique. Ce critère se rapporte principalement au choix des processus servant à modéliser le système d'arrière-plan.

Quatre niveaux de qualité sont définis :

- Une donnée de haute qualité est définie comme une donnée représentative du contexte (année et géographie) de l'étude. La technologie modélisée est la même que celle utilisée par le processus à l'étude.

- Une donnée de qualité moyenne est représentative du contexte des cinq dernières années et a été adaptée partiellement pour le contexte géographique de l'étude. La technologie modélisée est similaire à celle à l'étude.
- Une donnée de qualité minimum est représentative du contexte des 10 dernières années ou elle est issue d'une base de données ACV reconnue. Elle a été adaptée partiellement pour le contexte géographique de l'étude et la technologie modélisée s'apparente à celle à l'étude.
- Une donnée de basse qualité n'est pas nécessairement documentée par rapport à son âge, son contexte géographique ou la technologie modélisée.

De plus, une donnée est jugée de qualité suffisante lorsque :

- Elle offre une fiabilité et une représentativité considérées moyennes pour les données importantes.
- Elle offre une fiabilité et une représentativité considérées minimales pour les données peu importantes.

Les résultats de l'évaluation de la qualité des données d'inventaire pour la présente étude sont présentés à l'Annexe D. En résumé, la qualité des données de cette étude est jugée suffisante pour répondre à ses objectifs. L'analyse complète de la qualité des données est présentée à la section 3.5 et l'Annexe D.

2.8.3 Analyse d'incertitude

Une analyse d'incertitude sommaire a été réalisée afin de renforcer ou d'infirmer les conclusions de cette étude.

En plus de l'incertitude liée à la qualité des données d'inventaire, il existe une incertitude sur les modèles de caractérisation des émissions et des ressources employées. Celle-ci concerne les deux étapes de caractérisation, soit la caractérisation des flux élémentaires en scores d'impacts intermédiaires, ainsi que celle de ces mêmes scores d'impact intermédiaires en indicateurs de dommages.

L'intervalle d'incertitude associée à chacun des facteurs de caractérisation varie grandement d'un indicateur à l'autre. En effet, la précision des modèles de caractérisation des impacts environnementaux dépend de recherches scientifiques actuelles ayant lieu dans le domaine de l'ACV et de l'intégration des résultats de ces recherches dans les méthodes d'opérationnalisation de celle-ci. Sur la base d'un jugement d'expert de l'analyste et d'estimations similaires retrouvées dans la littérature (Humbert et al., 2009), les incertitudes sur les scores finaux pour les différents indicateurs présentés sont les suivantes :

- Changements climatiques : 10 %
- Santé humaine (effets respiratoires) : 30 %
- Santé humaine (toxicité) : un ordre de grandeur (facteur 10)
- Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation) : 30 %
- Qualité des écosystèmes (toxicité) : un ordre de grandeur (facteur 10)
- Ressources : 10 %

L'indicateur Eau prélevée représente un flux d'inventaire pour lequel il n'y a pas encore d'intervalle d'incertitude qui y est associée. En effet, l'inventaire des flux d'eau dans les bases de données commerciales, incluant la base donnée *ecoinvent* v2.2 utilisée dans cette étude, n'est pas toujours réalisé et documenté de façon cohérente entre les différents processus modélisés. Cette incohérence rend très difficile l'estimation de l'incertitude qui peut varier grandement d'un processus à l'autre. Dans ce contexte, cet indicateur est évalué par rapport au résultat déterministe obtenu, mais les résultats doivent être perçus comme des indicateurs de tendance, dont l'exactitude mériterait d'être confirmée par une empreinte eau spécifique et plus détaillée.

Les scores des scénarios sont ensuite comparés deux à deux en retirant la contribution des processus ou étapes du cycle de vie identiques entre les systèmes pour ainsi ne conserver que les impacts non corrélés. Pour chaque comparaison, trois niveaux de différences sont définis :

- différence très significative : l'écart minimal est respecté (les barres d'incertitudes ne se chevauchent pas)
- différence légèrement significative : au maximum 50 % de l'écart minimal est respecté (les barres d'incertitudes se chevauchent d'au plus 50 %)
- résultat non concluant : l'écart minimal n'est pas respecté (les barres d'incertitudes se chevauchent de plus de 50 %)

Cette méthode se veut plus simple et plus rapide que la méthode de Monte-Carlo normalement utilisée dans ce type d'étude, tout en offrant une représentativité suffisante. Elle ne permet toutefois pas d'évaluer l'incertitude liée aux flux d'inventaire ni d'offrir une vision quantitative de la robustesse des résultats.

Les résultats détaillés de cette analyse d'incertitude se trouvent à la section 3.6 et l'Annexe C.

2.8.4 Analyses de sensibilité

Plusieurs paramètres utilisés lors de la modélisation des systèmes présentent une incertitude ou une grande variabilité affectant les résultats ainsi que les conclusions tirées. Afin d'évaluer la robustesse des résultats vis-à-vis des hypothèses posées, une analyse de sensibilité des paramètres suivants a été réalisée :

- Distance de **transport** :
 - **Collecte** : inclusion de l'étape de collecte et variation de la distance de récupération;
 - **Vers les lieux d'enfouissement** : variation de la distance entre les centres de tri et les lieux d'enfouissement;
 - **Vers le conditionneur pour le traitement du verre** : variation de la distance entre les centres de tri et le lieu de conditionnement du verre;
 - **Vers l'usine de micronisation pour le traitement du verre** : variation de la distance entre les centres de tri et le lieu de micronisation et de traitement du verre;
- **Taux de rejets** à l'étape du conditionnement;

- **Étape de déshumidification lors du conditionnement** : omission de cette étape additionnelle de consommation de gaz naturel pour les séchoirs;
- **Consommation d'électricité** requise pour l'étape de conditionnement : variation de la consommation d'électricité nécessaire pour la production de calcin;
- **Consommation énergétique** pour la production de laine de verre;
- **Lieu de production** :
 - Variation de la distance de transport vers l'usine de fabrication de laine de verre aux États-Unis;
 - Fabrication de laine de verre au Québec;
- **Provenance du calcin** pour la production de bouteilles en verre : utilisation de calcin produit à l'extérieur du Québec comme substitut;
- **Traitement du verre** pour son utilisation dans les projets d'utilisation en LET.

Une telle analyse permet d'évaluer la robustesse des résultats vis-à-vis des paramètres dont la donnée est incertaine ou de faible qualité. Une comparaison entre les résultats des analyses de sensibilité et ceux des scénarios de base est présentée à la section 3.7.

Il est à noter que les analyses de sensibilité ont été conduites seulement pour l'indicateur Changements climatiques. Étant donné que les paramètres testés se rapportent essentiellement tous à des quantités d'énergie consommées ou des distances de transport (donc un processus de combustion), des processus dont les résultats des différents indicateurs sont relativement bien corrélés, il est considéré que les tendances générales observées pour l'indicateur Changements climatiques vont également s'appliquer aux autres indicateurs.

Par ailleurs, afin de tester la robustesse des résultats, l'évaluation des impacts est également effectuée au moyen d'une deuxième méthode, ReCiPe (Goedkoop et al., 2009).

2.9 Revue critique

Puisque les résultats de cette étude sont destinés à être divulgués et portent sur une affirmation comparative, une revue critique a été réalisée selon les trois étapes suivantes :

- **Phase 1a:** revue des aspects techniques et de la conformité avec la norme ISO 14044 par un comité formé d'experts en analyse du cycle de vie (ACV), d'experts techniques et de parties prenantes;
- **Phase 1b:** revue supplémentaire de la conformité avec la norme ISO 14044 par un comité strictement formé d'experts en ACV; et
- **Phase 2:** revue par des parties prenantes.

L'ensemble du processus de revue a été présidée par Madame Caroline Gaudreault, experte ACV indépendante. La composition des comités lors des différentes phases est présentée au Tableau 2-5.

Tableau 2-5 : Membres constituants du comité de revue critique

Nom	Rôle/Expertise	Affiliation
Caroline Gaudreault	Présidente, experte ACV	Consultante indépendante
Phase 1a		
Sébastien Cloutier	Membre, partie prenante	SAQ
Alain Leduc	Membre, partie prenante	Ville de Montréal
Mourad Ben Amor	Membre, expert ACV	Université de Sherbrooke
Arezki Tagnit Hamou	Membre, expert industrie du verre	Université de Sherbrooke
Phase 1b		
Jean-François Ménard	Membre, expert ACV	CIRAIG
Greg Doudrich	Membre, expert ACV	expert indépendant
Christophe Ménigault	Membre, expert ACV	Deloitte
Nöellie Oudet	Membre, expert ACV	Deloitte
Phase 2		
Taraneh Sephasalari	Membre, partie prenante	Régie de récupération de l'Estrie
Michel Marquis	Membre, partie prenante	2M Ressources
Josianne Hébert	Membre, partie prenante	Direction des matières résiduelles Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC)

Conformément aux normes ISO 14 040 et 14 044 (2006), les objectifs de la revue critique sont d'assurer que :

- Les méthodes utilisées par Quantis pour réaliser l'analyse du cycle de vie sont :
 - cohérentes avec la norme internationale ISO 14 040 ;
 - valables d'un point de vue technique et scientifique ;
 - appropriées et raisonnables par rapport à l'objectif de l'étude ;
- Les interprétations de Quantis reflètent les limitations identifiées et l'objectif de l'étude ;
- Le rapport détaillé est transparent et cohérent.

Le rapport de revue critique complet comprenant l'ensemble des corrections exigées par le comité de revue critique, ainsi que les ajustements apportés par l'équipe de projet est disponible sur demande.

3 Résultats et discussion

Cette section présente les résultats de l'évaluation relative à chacun des quatre systèmes évalués. La **comparaison de la performance environnementale** de chacune des filières de gestion de fin de vie du verre récupéré au Québec est d'abord effectuée. Cela correspond à un graphique indiquant la performance environnementale globale relative, c'est-à-dire normalisée par rapport au scénario montrant le résultat le plus élevé pour chaque indicateur considéré.

Suite à l'analyse de la performance environnementale des quatre scénarios, les résultats de l'**analyse de contribution** sont ensuite présentés de manière à identifier la part des scores d'impacts attribuables à la technologie de gestion de fin de vie du verre (c.-à-d. les « impacts générés »¹¹) et celle associée aux produits substitués (c.-à-d. les « impacts des substituts ») (se référer à la section 2.4). La Figure 3-1 montre une illustration simplifiée de la manière dont les résultats de l'analyse de contribution sont présentés. L'impact total de chaque scénario correspond à la somme des impacts potentiels générés par le scénario de gestion de fin de vie en question et ceux engendrés par les substituts équivalents nécessaires pour rétablir l'équivalence fonctionnelle entre les systèmes. Il est à noter que cette figure présente un exemple fictif des résultats.

Enfin, les résultats des analyses additionnelles sont présentés. Celles-ci incluent l'**analyse d'incertitude** et l'**analyse de sensibilité** quant à certains paramètres identifiés à la sous-section 2.8.4.

Les sections 3.1 à 3.4 présentent respectivement les résultats spécifiques à chacun des quatre projets de commercialisation, comparés aux trois autres filières de gestion de fin de vie, soit les scénarios alternatifs d'enfouissement et des projets d'utilisation en LET. Les résultats bruts détaillés pour l'ensemble des scénarios se trouvent à l'Annexe C.

¹¹ Il est important de se rappeler que l'ACV ne mesure pas des impacts réels, mais plutôt potentiels. Tout au long de cette section, l'utilisation du terme impact se rapporte implicitement à la notion d'impact potentiel telle que décrite à la section 2.7.

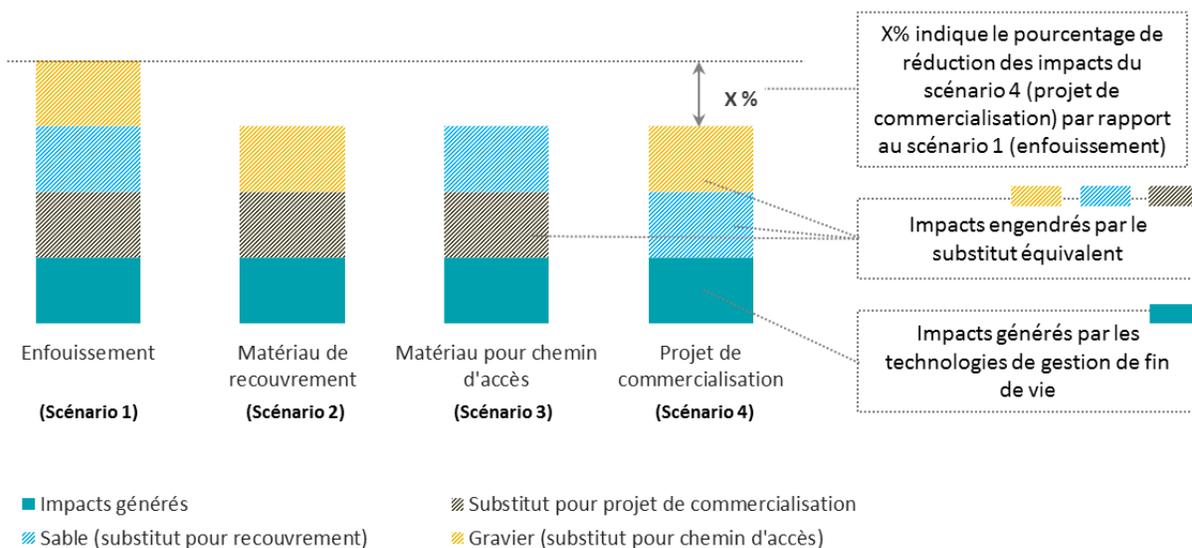


Figure 3-1: Exemple fictif de présentation de l'analyse de contribution.

3.1 Projet de commercialisation : bouteille de verre

3.1.1 Performance environnementale

La Figure 3-2 illustre la performance environnementale du scénario « Bouteille de verre » comparé aux trois scénarios alternatifs en LET.

Les résultats indiquent des bénéfices environnementaux liés au projet de commercialisation du verre récupéré en l'utilisant comme matière première dans une bouteille par rapport aux autres scénarios. Ces bénéfices désignent une réduction des impacts potentiels par rapport à ceux de l'enfouissement variant entre 8 et 19 % selon l'indicateur de dommage évalué. De même, lorsque comparées aux deux projets d'utilisation en LET, les réductions envisagées par le scénario de production d'une bouteille de verre sont de 7 à 15 % selon l'indicateur. En fonction de l'indicateur d'impact évalué, ces résultats indiquent des différences parfois non significatives ou encore peu concluantes (se référer à l'analyse d'incertitude présentée à la section 3.6).

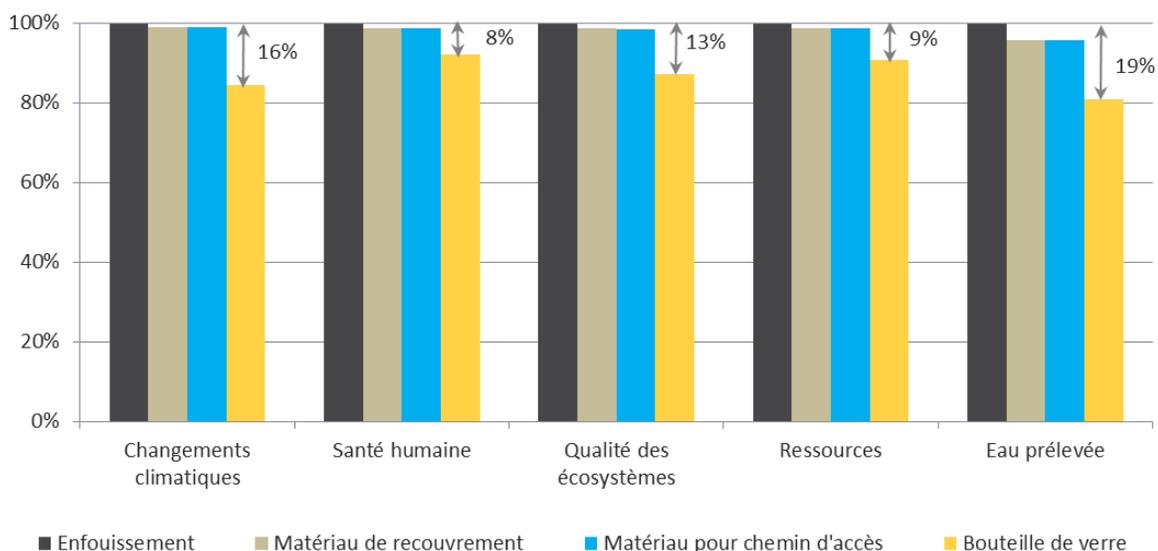


Figure 3-2: Comparaison de la performance environnementale des systèmes (Bouteille de verre).

3.1.2 Analyse de contribution

Contribution des technologies de gestion de fin de vie et des substituts

Le rappel des processus contribuant à l'impact potentiel total comptabilisé pour chacune des filières est fourni au Tableau 3-1. L'impact potentiel total correspond à la somme des impacts potentiels générés par le scénario de gestion de fin de vie en question et ceux engendrés par les substituts équivalents nécessaires pour rétablir l'équivalence fonctionnelle entre les systèmes.

Tableau 3-1 : Identification des processus contribuant à l'impact total par filières de gestion de fin de vie (scénario « Bouteille de verre »)

Scénario de filières de gestion de fin de vie		Impact total	
		Impacts générés	Impacts engendrés par les substituts équivalents
N°1	Enfouissement	Enfouissement du verre	Production équivalente aux produits des scénarios 2, 3 et 4 : - sable - gravier - bouteille de verre 100 % vierge
N°2	L'utilisation du verre comme matériau de recouvrement journalier dans les LET	Utilisation du verre comme matériau de recouvrement	Production équivalente aux produits des scénarios 3 et 4 : - gravier - bouteille de verre 100 % vierge
N°3	L'utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins	Utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins	Production équivalente aux produits des scénarios 2 et 4 : - sable

Scénario de filières de gestion de fin de vie		Impact total	
		Impacts générés	Impacts engendrés par les substituts équivalents
	d'accès de LET	d'accès	- bouteille de verre 100 % vierge
N°4.1	L'utilisation du verre comme matière première dans la fabrication d'une bouteille	Traitement du verre et son utilisation comme matière première pour la production d'une bouteille à contenu recyclé	Production équivalente aux produits des scénarios 2 et 3 : - sable - gravier

La Figure 3-3 présente le profil des quatre filières de gestion de fin de vie par indicateurs de dommages :

- L'impact associé à la production d'une bouteille de verre vierge est le principal contributeur à l'impact (au moins 92 %) des scénarios d'enfouissement ou d'utilisation en LET.
- L'impact des étapes de traitement du verre et de la fabrication d'une bouteille à contenu recyclé contribue à la presque totalité (99 %) de l'impact du scénario de commercialisation. Cependant, la Figure 3-3 montre également que l'impact de produire une bouteille recyclée est inférieur à celui de la production d'une bouteille de verre vierge, ce qui explique essentiellement les bénéfices du scénario de commercialisation par rapport aux autres scénarios.
- Les principaux contributeurs à la réduction des impacts associés à la substitution du verre vierge par du verre recyclé sont les suivants :
 - 45 % de la réduction des émissions de GES est due à la diminution des émissions de CO₂ associées à la décarbonatation du calcaire, du carbonate de sodium et de la dolomite. La bouteille avec un contenu recyclé utilise 45 % moins de ces intrants dans sa fabrication par rapport à celle en verre vierge.
 - Environ 30 % de la réduction des émissions de GES est liée à la diminution de la combustion de gaz naturel nécessaire pour les opérations de fusion du verre lors de la fabrication d'une bouteille avec un contenu recyclé par rapport à la bouteille de verre vierge. Dans cette étude, il est estimé que l'utilisation de 45 % de calcin permet une réduction d'environ 11 % de la consommation de gaz naturel pour l'étape de fusion du verre. .
 - Le reste des réductions d'impacts potentiels sur l'indicateur Changements climatiques s'explique par la diminution des distances de transport nécessaire pour approvisionner l'usine de bouteilles en matières premières, en particulier le transport du carbonate de sodium.
 - Il est à noter cependant que si l'on compare uniquement les émissions de GES associées à la production du mélange de matières premières entrant dans la composition du verre, incluant le calcin, le mélange de verre recyclé a légèrement plus d'impact (environ 7 %) que celui de la bouteille vierge. En effet, pour cet indicateur, à l'exception du carbonate de sodium, la production des matières premières substituées par le calcin (sable, calcaire, dolomite et feldspath) a moins d'impact que la production d'une quantité équivalente de calcin. Cette augmentation d'impact est largement compensée par les réductions énumérées ci-dessus.
 - Les conclusions sont similaires pour l'indicateur Ressources; pour cet indicateur, les réductions s'expliquent uniquement par la réduction de la consommation de gaz naturel et

la diminution des distances de transport pour l’approvisionnement en matières premières. Pour les indicateurs Santé humaine, Qualité des écosystèmes et Eau prélevée, en plus de la réduction de la consommation d’énergie et des distances de transport, le mélange de matières premières à globalement plus d’impact pour la bouteille vierge que pour la bouteille recyclée. En particulier, la production du carbonate de sodium, du calcaire et de la dolomite a des impacts potentiels équivalents ou supérieurs à ceux de la production du calcaire pour ces trois indicateurs.

- Les impacts potentiels générés par les technologies de gestion de fin de vie suivantes sont faibles par rapport à l’impact total pour chacun des scénarios : l’enfouissement du verre ($\leq 1\%$), son utilisation comme matériau de recouvrement (1 à 4 %) et pour les chemins d’accès des LET (1 à 4 %).
- Les impacts des substituts associés aux utilisations en LET (sable et gravier) ne présentent qu’une faible contribution à l’impact total des scénarios concernés (1 à 4 %).
- Dans ce contexte, par rapport au scénario de commercialisation, les impacts générés ou les impacts des substituts des utilisations en LET ont peu d’influence sur la comparaison des scénarios.

Étant donné que seuls les impacts potentiels associés à la production d’une bouteille de verre vierge ou recyclé ont une contribution importante à tous les résultats présentés à la Figure 3-3, les observations suivantes s’appliquent à tous les scénarios à l’étude :

- Autant pour la production d’une bouteille de verre vierge que recyclée, les principaux GES, contributeurs à l’indicateur Changements climatiques, sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l’oxyde nitreux (N_2O) et sont responsables respectivement de 93 %, 6 % et 1 % de l’impact. Les procédés de combustion (p. ex. gaz naturel à l’usine, moteur des camions, etc.) sont responsables de la plupart de ces émissions suivies, dans une moindre mesure, par les émissions de décarbonatation à l’usine.
- L’indicateur Santé humaine est dominé par les émissions associées à la catégorie d’impact Effets respiratoires inorganiques (contribution de 84 %). Les émissions les plus problématiques sont les oxydes d’azote (NO_x), les oxydes de soufre (SO_x) et les particules atmosphériques provenant de la combustion de carburants fossiles dans les différents procédés industriels et étapes de transport dans le cycle de vie des bouteilles, dont en particulier les émissions à l’usine de bouteilles en verre.
- La contribution des catégories d’impact à l’indicateur Qualité des écosystèmes est plus variée et comprend principalement les catégories Écotoxicité terrestre (57 %), Occupation des sols (18 %) et Acidification et eutrophisation terrestre (13 %). Les principales étapes et émissions contributrices à cet indicateur sont également variées mais davantage reliées aux opérations de l’usine de bouteilles : émission de zinc, cuivre et aluminium lors du traitement des effluents (Écotoxicité terrestre), utilisation des terres pour la production de la fibre des cartons d’emballage (Occupation des sols) et émissions directes de NO_x à la cheminée de l’usine de bouteilles (Acidification et eutrophisation terrestre).

Le score pour l'indicateur Ressources s'explique essentiellement par l'utilisation d'énergie primaire non renouvelable. Le type d'énergie la plus consommée est le gaz naturel utilisé à l'usine de bouteilles qui représente environ 60 % des impacts potentiel de cet indicateur. Pour l'indicateur Eau prélevée, les quantités d'eau concernent essentiellement la production de matières premières (principalement le carbonate de sodium) qui nécessitent de l'eau pour leur production.

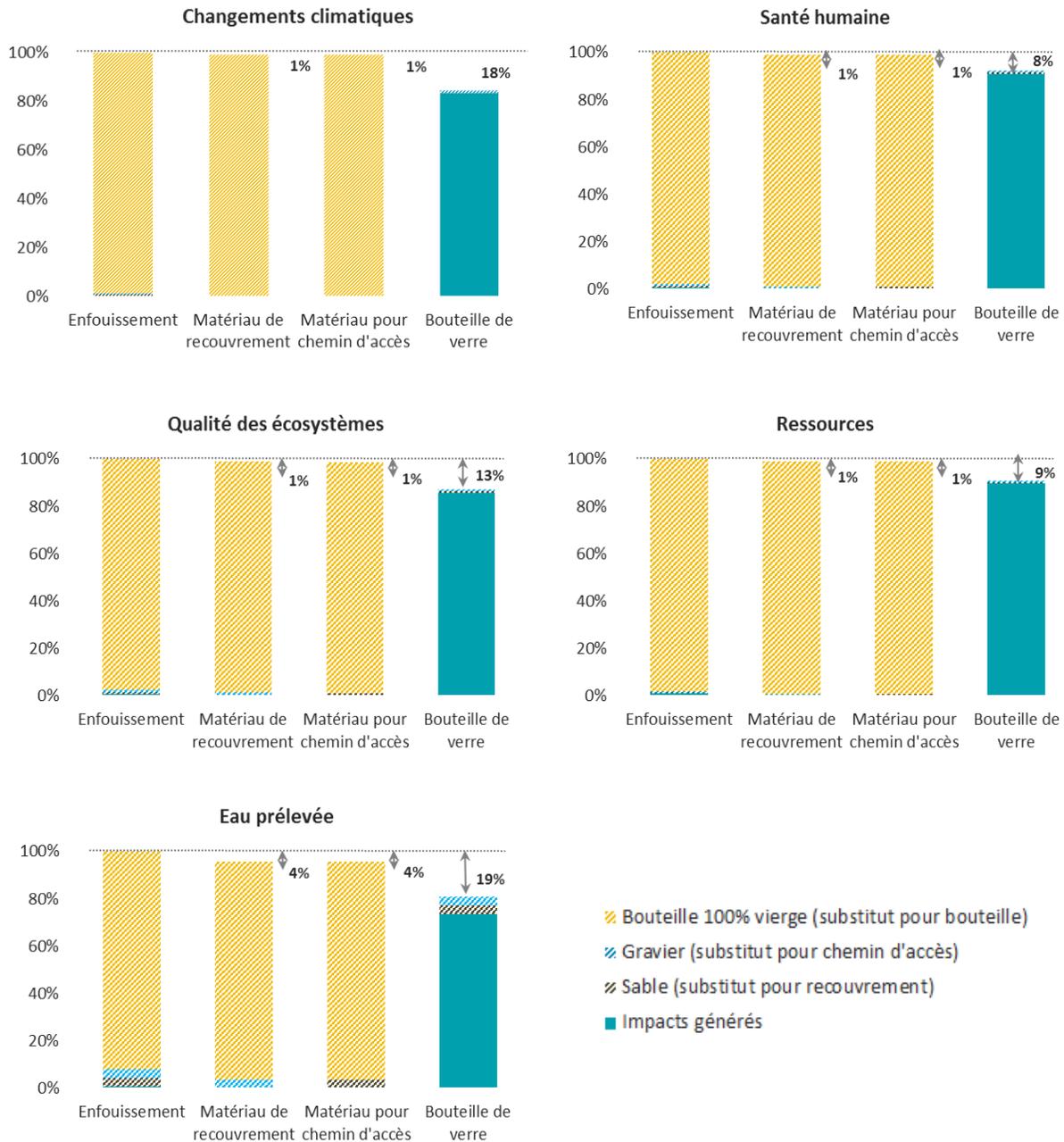


Figure 3-3 : Profil environnemental du système d'utilisation du verre pour la production d'une bouteille par indicateur de dommage.

Contribution du transport

La distance de transport totale que parcourt le verre récupéré au Québec, du centre de tri jusqu'à sa gestion de fin de vie, est un paramètre d'intérêt. La distance totale inclut les trajets suivants :

- Transport jusqu'au lieu de gestion de fin de vie : transport des centres de tri jusqu'au lieu d'enfouissement (pour les scénarios 1 et 2), jusqu'au lieu du chemin d'accès dans les LET (scénario 3) et jusqu'au lieu de conditionnement du verre (scénario 4.1)
- Transport jusqu'au recycleur (applicable uniquement pour le scénario 4.1) : transport du lieu de conditionnement jusqu'au recycleur

La Figure 3-4 présente les résultats de contribution du transport pour l'indicateur Changements climatiques. Pour le scénario Bouteille de verre, l'étape du transport contribue de 1 à 3 % de l'impact total et d'au plus 1 % pour les autres scénarios.

Pour le scénario Bouteille de verre, le transport jusqu'au conditionneur est responsable d'environ 91 % des impacts du transport de cette étape. Les principaux impacts liés aux transports sont les émissions de CO₂ dues à la combustion de carburant dans les camions.

La distance de transport étant un paramètre extrêmement variable à travers le Québec, qui dépend non seulement des municipalités, mais aussi de la localisation des lieux de traitement et d'utilisation, les résultats des analyses de sensibilité réalisées sur les distances de transport se trouvent à la section 3.7.

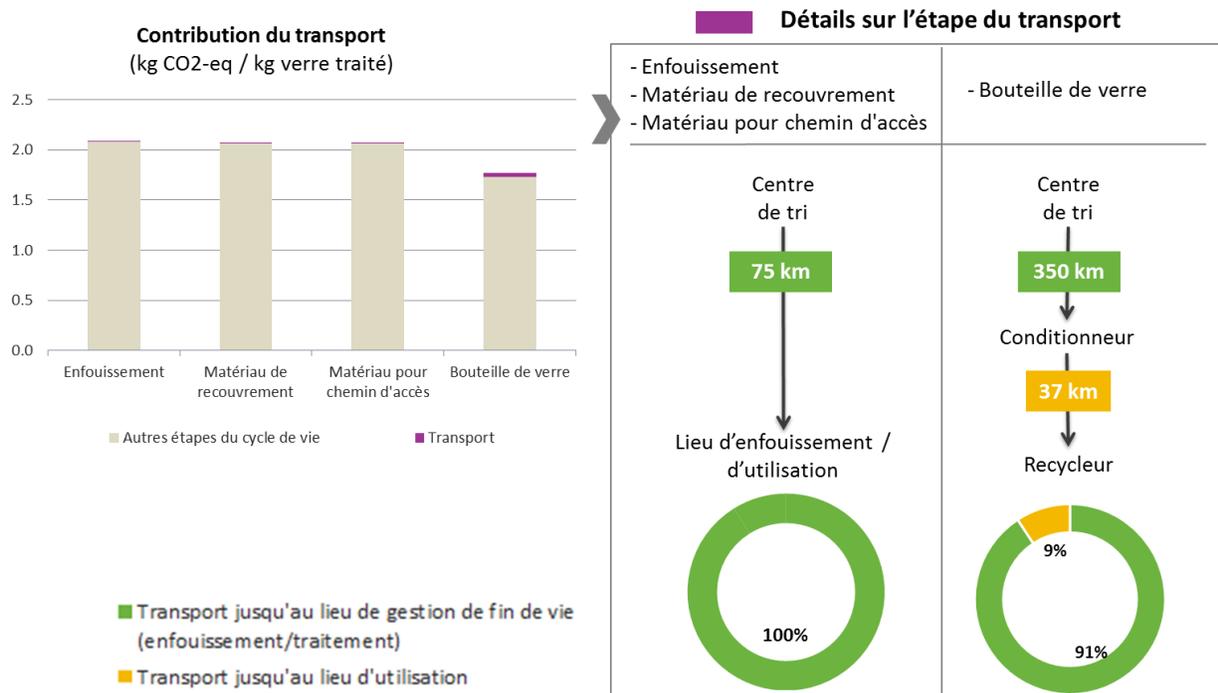


Figure 3-4 : Contribution du transport pour le système d'utilisation du verre pour la production d'une bouteille pour l'indicateur Changements climatiques.

3.2 Projet de commercialisation : laine de verre

3.2.1 Performance environnementale

La comparaison de la performance environnementale du scénario « Laine de verre » aux trois scénarios alternatifs en LET est illustrée à la Figure 3-5.

Les résultats indiquent des bénéfices environnementaux liés au projet de commercialisation du verre récupéré en l'utilisant comme matière première dans la production d'une laine isolante par rapport aux autres scénarios. Ces bénéfices désignent une réduction des impacts potentiels par rapport à ceux de l'enfouissement qui varie entre 6 et 12 % selon l'indicateur de dommage évalué. De même, lorsque comparées aux deux projets d'utilisation en LET, les réductions potentielles pour le scénario de production d'une laine de verre sont de 6 à 11 % selon l'indicateur. Ces résultats indiquent toutefois des différences peu significatives et parfois peu concluantes pour la majorité des indicateurs (se référer à la section 3.6 relative à l'analyse d'incertitude).

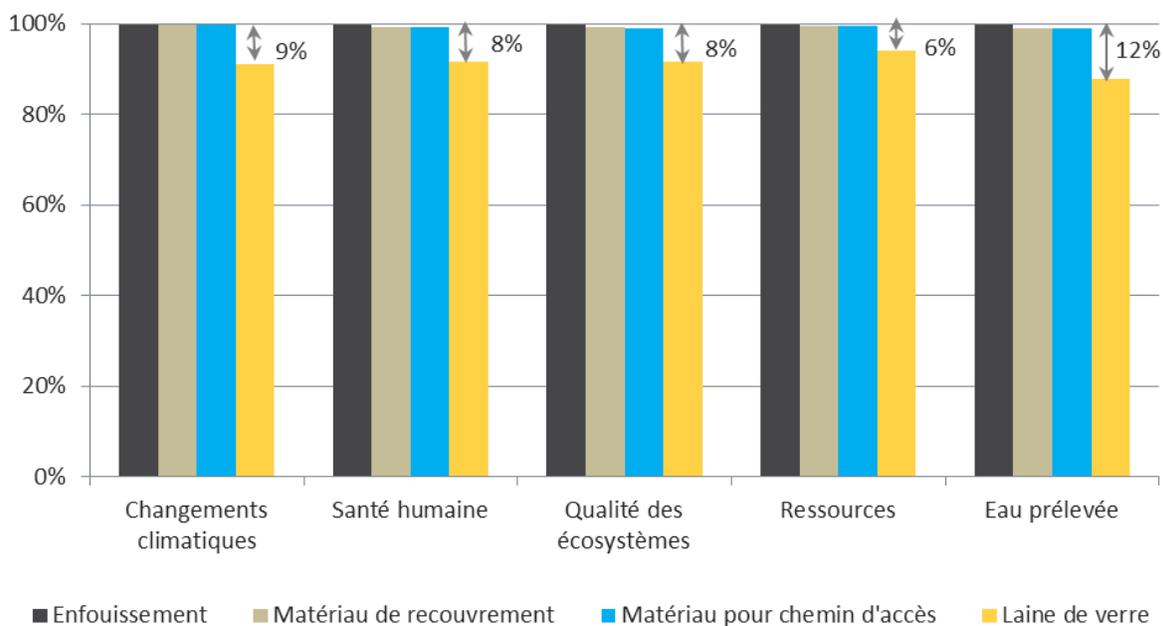


Figure 3-5: Comparaison de la performance environnementale des systèmes (Laine de verre).

3.2.2 Analyse de contribution

Contribution des technologies de gestion de fin de vie et des substituts

Le rappel des processus contribuant à l'impact potentiel total comptabilisé pour chacune des filières est fourni au Tableau 3-2. L'impact potentiel total correspond à la somme des impacts potentiels générés par le scénario de gestion de fin de vie en question et ceux engendrés par les substituts équivalents nécessaires pour rétablir l'équivalence fonctionnelle entre les systèmes.

Tableau 3-2: Identification des processus contribuant à l'impact total par filières de gestion de fin de vie (scénario « Laine de verre »)

Scénario de filières de gestion de fin de vie		Impact total	
		Impacts générés	Impacts engendrés par les substituts équivalents
N°1	Enfouissement	Enfouissement du verre	Production équivalente aux produits des scénarios 2, 3 et 4 : - sable - gravier - laine de verre 100 % vierge
N°2	L'utilisation du verre comme matériau de recouvrement journalier dans les LET	Utilisation du verre comme matériau de recouvrement	Production équivalente aux produits des scénarios 3 et 4 : - gravier - laine de verre 100 % vierge
N°3	L'utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès	Utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès	Production équivalente aux produits des scénarios 2 et 4 : - sable - laine de verre 100 % vierge
N°4.2	L'utilisation du verre comme matière première dans la fabrication d'une laine de verre	Traitement du verre et son utilisation comme matière première pour la production d'une laine isolante à contenu de verre recyclé	Production équivalente aux produits des scénarios 2 et 3 : - sable - gravier

La Figure 3-6 présente le profil des quatre filières de gestion de fin de vie par indicateurs de dommages :

- L'impact associé à la production de laine de verre vierge est le principal contributeur à l'impact (au moins 99 %) des scénarios d'enfouissement ou d'utilisation en LET.
- L'impact des étapes de traitement du verre et de la fabrication de laine isolante à contenu recyclé contribue de manière dominante (au moins 99 %) à l'impact du scénario de commercialisation. Cependant, la Figure 3-6 montre également que l'impact de produire une laine recyclée est inférieur à celui de la laine de verre vierge, ce qui explique essentiellement les bénéfices du scénario de commercialisation par rapport aux autres scénarios.
- Les principaux contributeurs à la réduction des impacts liée à la substitution de verre vierge par du verre recyclé sont les suivants :
 - environ 80 % des réductions d'émissions de GES sont liées à la diminution de la consommation d'électricité nécessaire pour l'opération du four pour la fusion du verre. L'utilisation d'un taux de 50 % de calcin dans la laine permet de réduire de 12,5 % la consommation d'électricité du four à fusion. Le reste des réductions d'émissions de GES est

expliqué par la diminution des émissions de CO₂ associées à la décarbonatation du calcaire, du carbonate de sodium et de la dolomite. La fibre de verre recyclé utilise 50 % moins de ces intrants dans son procédé par rapport à la fibre de verre vierge.

- À l'instar de la bouteille de verre et pour les mêmes raisons, les émissions de GES associées à la production du mélange de matières premières entrant dans la composition du verre, incluant le calcin, sont légèrement plus élevées pour la laine de verre recyclé (environ 6 %) que pour la laine de verre vierge. Cette augmentation d'impact est cependant largement compensée par les réductions énumérées ci-dessus.
- Les conclusions sont similaires pour l'indicateur Ressources à l'exception que les réductions s'expliquent essentiellement par la réduction de la consommation d'électricité à l'usine. Pour les indicateurs Santé humaine, Qualité des écosystèmes et Eau prélevée, en plus de la réduction de consommation d'énergie, le mélange de matières premières à plus d'impact pour la laine de verre vierge que recyclé pour les mêmes raisons que le projet de commercialisation de la bouteille de verre.
- Les impacts potentiels générés par les technologies de gestion de fin de vie suivantes sont faibles par rapport à l'impact total pour chacun des scénarios : l'enfouissement du verre ($\leq 1\%$), son utilisation comme matériau de recouvrement ($\leq 1\%$) et pour les chemins d'accès ($\leq 1\%$).
- Les impacts des substituts associés aux utilisations en LET (sable et gravier) ne présentent qu'une faible contribution à l'impact total des scénarios concernés (au plus 1 %).
- Dans ce contexte, par rapport au scénario de commercialisation, les impacts générés ou les impacts des substituts des utilisations en LET ont peu d'influence sur la comparaison des scénarios.

Puisque seuls les impacts potentiels associés à la production de laine de verre vierge ou recyclé ont une contribution importante à tous les résultats présentés à la Figure 3-6, les observations suivantes s'appliquent à tous les scénarios à l'étude :

- Autant pour la production de laine de verre vierge que pour celle faite à partir de verre recyclé, les principaux GES, contributeurs à l'indicateur Changements climatiques, sont le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄), suivant les proportions respectives de 91 % et de 8 %. Les autres GES contribuent en totalité à environ 1 %. Les émissions de GES associées à la production d'électricité aux États-Unis, dont principalement les centrales au charbon, expliquent la majorité de la contribution à cet indicateur.
- L'indicateur Santé humaine est dominé par les émissions associées à la catégorie d'impact Effets respiratoires inorganiques (contribution de 84 %). Les émissions les plus problématiques sont les oxydes d'azote, les oxydes de soufre et les particules atmosphériques provenant de la combustion de carburants fossiles pour la production d'électricité.
- Pour sa part, le score de l'indicateur Qualité des écosystèmes est majoritairement expliqué par la catégorie d'impact Écotoxicité terrestre (59 %). Les catégories Acidification et eutrophisation terrestre (20 %) et Eau turbinée (10 %) ont également une contribution notable à cet indicateur de dommage. Les principales émissions contributrices pour la catégorie Écotoxicité terrestre sont les émissions dans l'air et le sol de métaux (aluminium,

civre, zinc, etc.). Pour la catégorie Acidification et eutrophisation terrestre se sont les émissions à l'air de NO_x et d'ammoniac. Pour l'indicateur Eau turbinée, c'est la contribution des centrales hydroélectriques au bouquet énergétique américain qui explique cet impact. Toutes ces émissions ou tous ces impacts sont en majeure partie directement reliés à la production d'électricité utilisée à l'usine de laine de verre.

- Pour l'indicateur Ressource, la consommation de carburants fossiles pour produire de l'électricité, de même que le gaz naturel utilisé à l'usine expliquent 70 % des impacts potentiels.
- La production d'électricité représente également la majorité de la contribution à l'indicateur Eau prélevée (62 %).

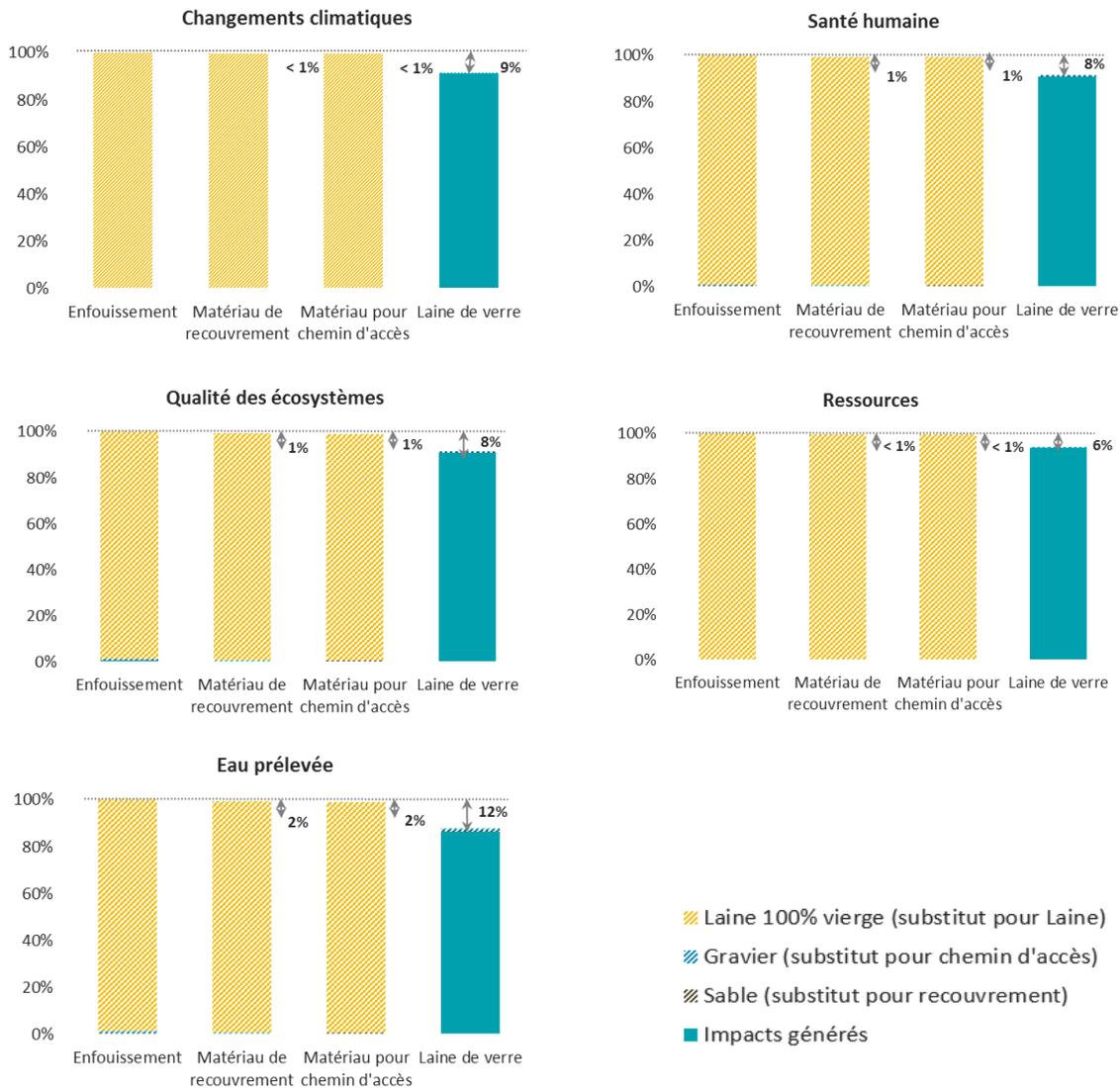


Figure 3-6 : Profil environnemental du système d'utilisation du verre pour la production de laine isolante, par indicateur de dommage.

Contribution du transport

La distance de transport totale que parcourt le verre récupéré au Québec, du centre de tri jusqu'à sa gestion de fin de vie, est un paramètre d'intérêt. La distance totale inclut les trajets suivants :

- Transport jusqu'au lieu de gestion de fin de vie : transport des centres de tri jusqu'au lieu d'enfouissement (pour les scénarios 1 et 2), jusqu'au lieu du chemin d'accès dans les LET (scénario 3) et jusqu'au lieu de traitement du verre (scénario 4.2)
- Transport jusqu'au lieu d'utilisation : transport du lieu de gestion de fin de vie jusqu'au recycleur (applicable uniquement pour scénario 4.2)

La Figure 3-7 présente les résultats de contribution du transport pour l'indicateur Changements climatiques. Pour le scénario Laine de verre, l'étape du transport contribue de 1 à 4 % de l'impact total et à moins de 1 % pour les autres scénarios.

Pour le scénario Laine de verre, le transport jusqu'au lieu d'utilisation, soit aux États-Unis où l'usine de production est située, ainsi que celui jusqu'au conditionneur sont tous deux responsables respectivement de 60 % et de 40 % des impacts de cette étape. Les principaux impacts liés aux transports sont les émissions de CO₂ dues à la combustion de carburant dans les camions.

La distance de transport étant un paramètre extrêmement variable à travers le Québec, qui dépend non seulement des municipalités, mais aussi de la localisation des lieux de traitement et d'utilisation, les résultats des analyses de sensibilité réalisées sur les distances de transport se trouvent à la section 3.7.

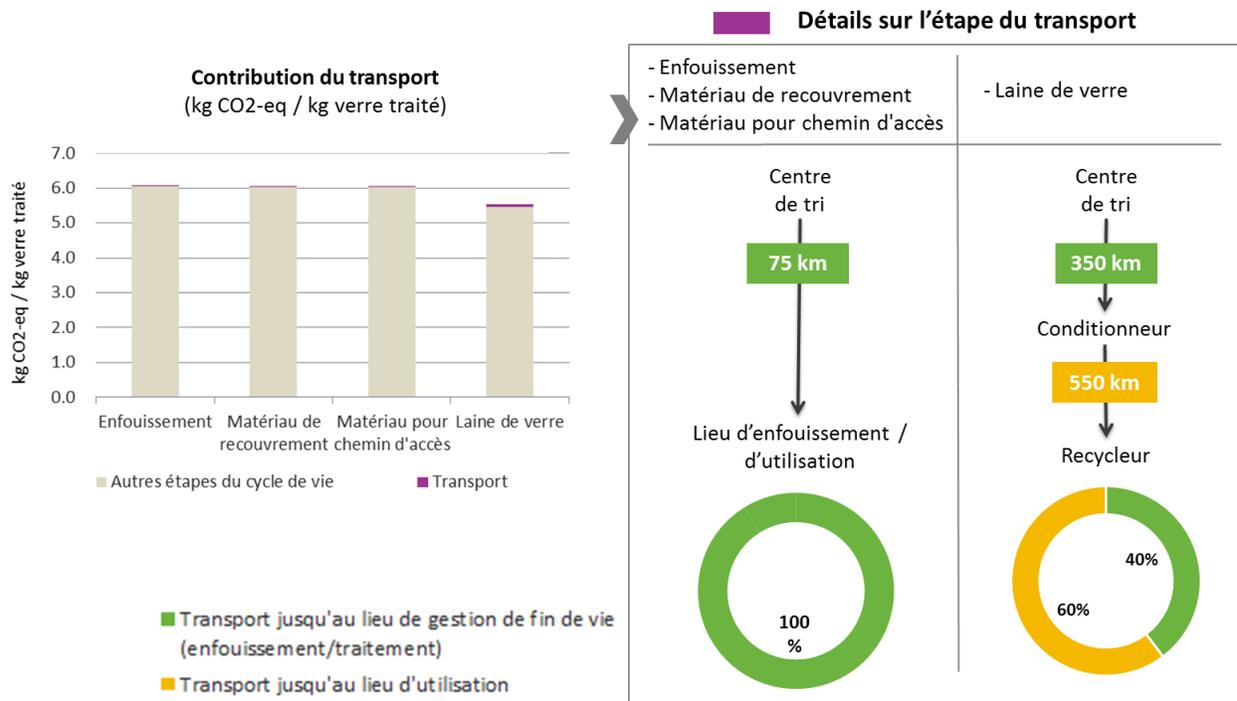


Figure 3-7: Contribution du transport pour le système d'utilisation du verre pour la production de laine de verre pour l'indicateur Changements climatiques.

3.3 Projet de commercialisation : poudre de verre

3.3.1 Performance environnementale

Les résultats de la comparaison de la performance environnementale du scénario « Poudre de verre » aux trois scénarios alternatifs en LET sont présentés à la Figure 3-8.

Les résultats indiquent des bénéfices environnementaux liés au projet de commercialisation du verre récupéré en l'utilisant comme ajout cimentaire dans le béton. Ces bénéfices désignent une réduction des impacts potentiels par rapport à ceux de l'enfouissement qui varie entre 47 et 95 % selon l'indicateur de dommage évalué. De même, lorsque comparées aux deux projets d'utilisation en LET, les réductions envisagées par le scénario de production d'une poudre de verre sont de 29 à 95 % selon l'indicateur. En fonction de l'indicateur d'impact évalué, ces résultats indiquent toutefois des différences moins significatives (se référer à l'analyse d'incertitude présentée à la section 3.6).

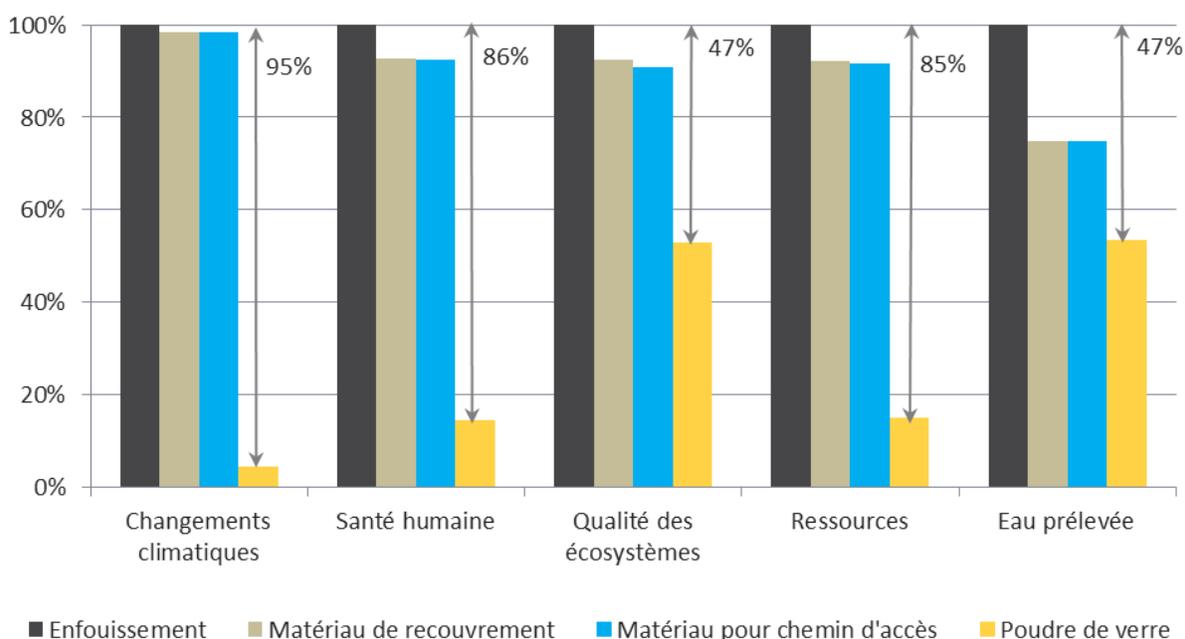


Figure 3-8: Comparaison de la performance environnementale des systèmes (Poudre de verre).

3.3.2 Analyse de contribution

Contribution des technologies de gestion de fin de vie et des substituts

Le rappel des processus contribuant à l'impact potentiel total comptabilisé pour chacune des filières est fourni au Tableau 3-3. L'impact de chaque scénario correspond à la somme des impacts potentiels générés par le scénario de gestion de fin de vie en question et ceux engendrés par les substituts équivalents nécessaires pour rétablir l'équivalence fonctionnelle entre les systèmes.

Tableau 3-3: Identification des processus contribuant à l'impact total par filières de gestion de fin de vie (scénario « Poudre de verre »)

Scénario de filières de gestion de fin de vie		Impact total	
		Impacts générés	Impacts engendrés par les substituts équivalents
N°1	Enfouissement	Enfouissement du verre	Production équivalente aux produits des scénarios 2, 3 et 4 : - sable - gravier - ciment Portland
N°2	L'utilisation du verre comme matériau de recouvrement journalier dans les LET	Utilisation du verre comme matériau de recouvrement	Production équivalente aux produits des scénarios 3 et 4 : - gravier - ciment Portland
N°3	L'utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès	Utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès	Production équivalente aux produits des scénarios 2 et 4 : - sable - ciment Portland
N°4.3	L'utilisation du verre comme ajout cimentaire dans le béton	Traitement et micronisation du verre pour son utilisation comme ajout cimentaire	Production équivalente aux produits des scénarios 2 et 3 : - sable - gravier

La Figure 3-9 présente le profil des quatre filières de gestion de fin de vie par indicateurs de dommages :

- La production de ciment Portland est le principal contributeur à l'impact (au moins 52 %) des scénarios d'enfouissement ou d'utilisation en LET.
- Les étapes de traitement du verre et de fabrication d'une poudre de verre contribuent de manière importante (au moins 43 %) à l'impact du scénario de commercialisation. Pour l'indicateur *Eau prélevée*, ces étapes ne comptent que pour 18 % du score total, alors que la production de sable et de gravier en sont responsables à 41 % chacun. Ceux-ci nécessitent des quantités d'eau plus importantes lors des processus d'extraction et de lavage pour leur production. Cependant, la Figure 3-9 montre également que l'impact de produire une poudre de verre utilisée comme ajout cimentaire est inférieur à celui du ciment Portland, ce qui explique essentiellement les bénéfices du scénario de commercialisation par rapport aux autres scénarios.
- Les principales explications des résultats obtenus à la Figure 3-9 sont les suivantes :
 - Les émissions de GES liées à la production de poudre de verre représentent à peine 3 % des émissions liées à la production d'une quantité fonctionnellement équivalente de ciment portland. La grande majorité des impacts de la production du ciment provient de la production du clinker. En plus d'être un processus énergivore, la production de clinker génère d'importantes émissions de CO₂ durant la réaction de calcination dans le four à ciment. À l'opposé, les émissions GES associées à la production de poudre de verre se limitent essentiellement aux émissions associées à la production d'électricité utilisée lors de l'étape de micronisation et au transport du verre récupéré vers l'usine de micronisation.

- Le four servant à la production du clinker est également à l'origine de la majorité des impacts pour les indicateurs Ressources (utilisation de carburants fossiles comme le charbon et les huiles lourdes), Santé humaine (émissions dans l'air à la cheminée) et Eau prélevée (consommation d'eau directe à l'usine de ciment). Pour sa part, le plus important contributeur aux indicateurs Qualité des écosystèmes est la production du minerai de calcaire utilisé comme matière première dans le four à ciment.
- Concernant les impacts potentiels de la poudre de verre pour les indicateurs Ressources, Santé humaine, Qualité des écosystèmes et Eau prélevée, ils sont tous également dominés par la production d'électricité utilisée pour la micronisation.
- Les impacts potentiels des substituts associés aux utilisations en LET (sable et gravier) ne présentent individuellement qu'une faible contribution à l'impact total des scénarios enfouissement et utilisations en LET (au plus 6 %, à l'exception de l'indicateur Eau prélevée pour lequel leur contribution atteint chacun 22 %).
- Pour le scénario de commercialisation de la poudre de verre, la contribution individuelle des substituts associés aux utilisations en LET est plus importante (entre 8 et 41 %) :
 - Autant pour le gravier que le sable, le transport est le principal contributeur aux indicateurs Changements climatiques, Ressources, Santé humaine et Qualité des écosystèmes (entre 52 et 74 %). La seule exception est l'indicateur Eau prélevée pour lequel c'est la production des matériaux qui domine les impacts.
- Les impacts potentiels générés par les technologies de gestion de fin de vie sont plutôt faibles par rapport à l'impact total pour chacun des scénarios : l'enfouissement du verre (1 à 7 %), son utilisation comme matériau de recouvrement (<1 à 4 %) et pour les chemins d'accès (<1 à 4 %).

Pour l'ensemble des indicateurs, la production de ciment Portland est le processus déterminant dans la comparaison des scénarios. Pour ce processus, on observe que :

- Les principaux GES, contributeurs à l'indicateur Changements climatiques, sont le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄), suivant les proportions respectives de 98 % et de 2 %;
- L'indicateur Santé humaine est dominé par la catégorie de dommage Effets respiratoires inorganiques (contribution de 85 %). Les émissions provenant directement du four à ciment sont les plus problématiques, dont les oxydes d'azote, les particules atmosphériques et les oxydes de soufre.
- Pour sa part, le score de l'indicateur Qualité des écosystèmes s'explique par les contributions des catégories d'impact Écotoxicité terrestre (58 %), Acidification et eutrophisation terrestre (18 %) et Eau turbinée (21 %). Les principales émissions contributrices pour la catégorie Écotoxicité terrestre sont les émissions de métaux dans l'air (aluminium, cuivre, zinc, etc.) et pour la catégorie Acidification et eutrophisation terrestre se sont les émissions à l'air d'oxydes d'azote, d'oxydes de soufre et d'ammoniac. Pour l'indicateur Eau turbinée, c'est la contribution des centrales hydroélectriques au bouquet énergétique québécois qui explique cet impact. Toutes ces émissions ou tous ces impacts sont en majeure partie directement reliés à la production de clinker.

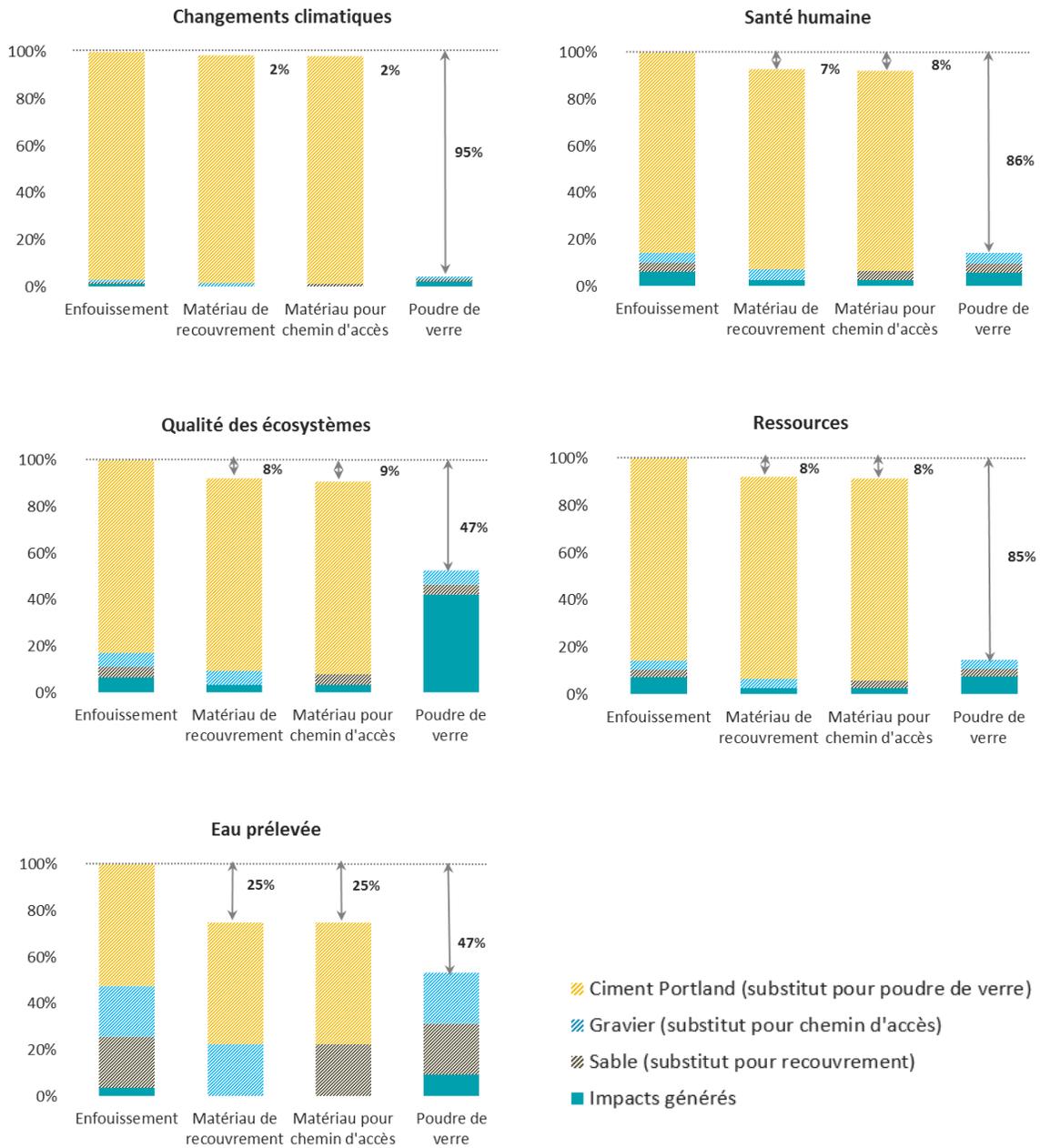


Figure 3-9 : Profil environnemental du système d'utilisation du verre pour la production de poudre de verre, par indicateur de dommage.

Contribution du transport

La distance de transport totale que parcourt le verre récupéré au Québec, du centre de tri jusqu'à sa gestion de fin de vie, est un paramètre d'intérêt. La distance totale inclut les trajets suivants :

- Transport jusqu'au lieu de gestion de fin de vie : transport des centres de tri jusqu'au lieu d'enfouissement (pour les scénarios 1 et 2), jusqu'au lieu du chemin d'accès dans les LET (scénario 3) et jusqu'au lieu de micronisation du verre (scénario 4.3)
- Transport jusqu'au lieu d'utilisation : transport du lieu de gestion de fin de vie jusqu'à l'utilisateur final (applicable uniquement pour scénario 4.3)

La Figure 3-10 présente les résultats de contribution du transport pour l'indicateur Changements climatiques. Pour le scénario Poudre de verre, l'étape du transport contribue de 1 à 20 % de l'impact total et de 1 à 2 % pour les autres scénarios.

Les impacts associés aux trajets nécessaires pour la micronisation du verre et celui pour son utilisation en bétonnières présentent des contributions de 80 % et de 20 % respectivement de l'impact total. Les principaux impacts liés aux transports sont les émissions de CO₂ dues à la combustion de carburant dans les camions.

La distance de transport étant un paramètre extrêmement variable à travers le Québec qui dépend non seulement des municipalités, mais aussi de la localisation des lieux de traitement et d'utilisation, les résultats des analyses de sensibilité réalisées sur les distances de transport se trouvent à la section 3.7.

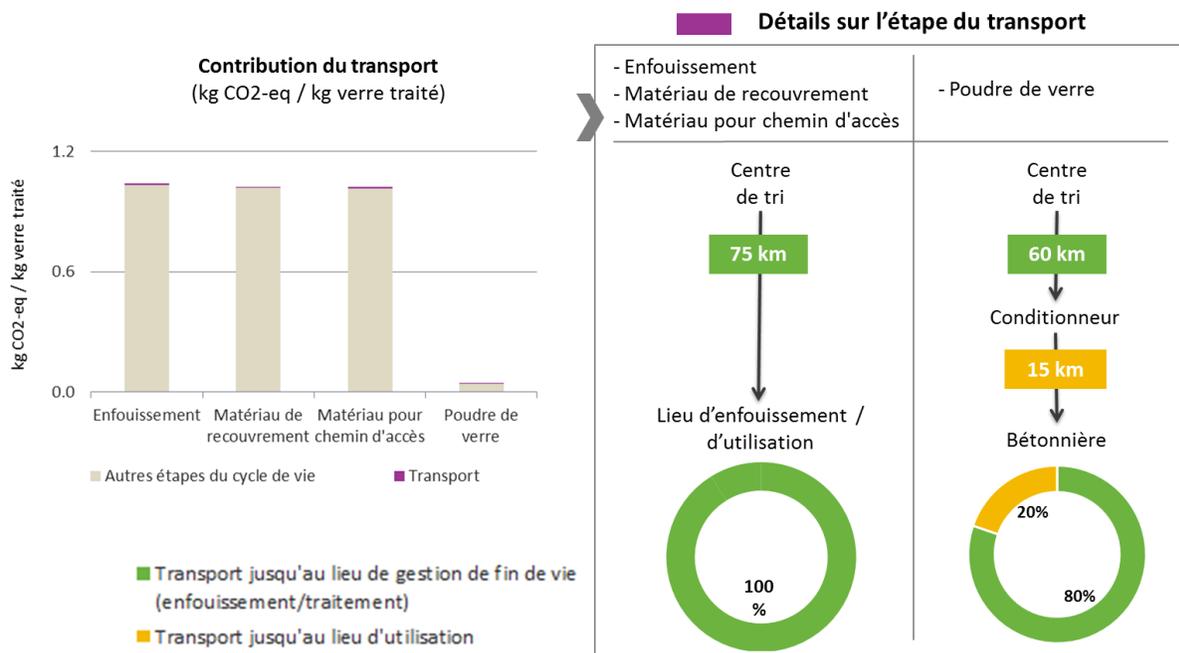


Figure 3-10: Contribution du transport pour le système d'utilisation du verre pour la production de poudre de verre pour l'indicateur Changements climatiques.

3.4 Projet de commercialisation : agrégat de verre

3.4.1 Performance environnementale

La comparaison de la performance environnementale du scénario « agrégat de verre » aux trois scénarios alternatifs en LET est illustrée à la Figure 3-11.

Les résultats indiquent certains bénéfices environnementaux liés au projet de commercialisation du verre récupéré visant à l'utiliser comme agrégat dans du béton.

Lorsque comparés au scénario d'enfouissement du verre, ces bénéfices représentent une réduction des impacts potentiels qui varie entre 1 et 48 %. Pour les indicateurs Changements climatiques, Santé humaine, Qualité des écosystèmes et Ressources, ces réductions sont soit légèrement ou très significatives, à l'exception de l'indicateur Toxicité pour lequel l'enfouissement est préférable, mais de façon peu significative (se référer à l'analyse d'incertitude présentée à la section 3.6). De plus, les résultats ne sont pas concluants pour l'indicateur Eau prélevée

Lorsque comparées aux deux scénarios de projets d'utilisation en LET, les tendances quant aux performances environnementales varient d'un indicateur à l'autre. En effet, les impacts du scénario de projet de commercialisation sont inférieurs à ceux des projets d'utilisation en LET pour les indicateurs Ressources, Qualité des écosystèmes et Santé humaine. En fonction de ces indicateurs, les bénéfices environnementaux relatifs au projet de commercialisation varient entre 22 et 66 %. Les résultats sont toutefois non concluants pour l'indicateur Changements climatiques, pour lequel l'impact de chacun de ces trois scénarios est très similaire et ne présente pas de différence significative (se référer à l'analyse d'incertitude présentée à la section 3.6). Pour l'indicateur Eau prélevée, les résultats montrent une tendance plutôt défavorable pour le projet de commercialisation, particulièrement par rapport aux projets d'utilisation en LET.

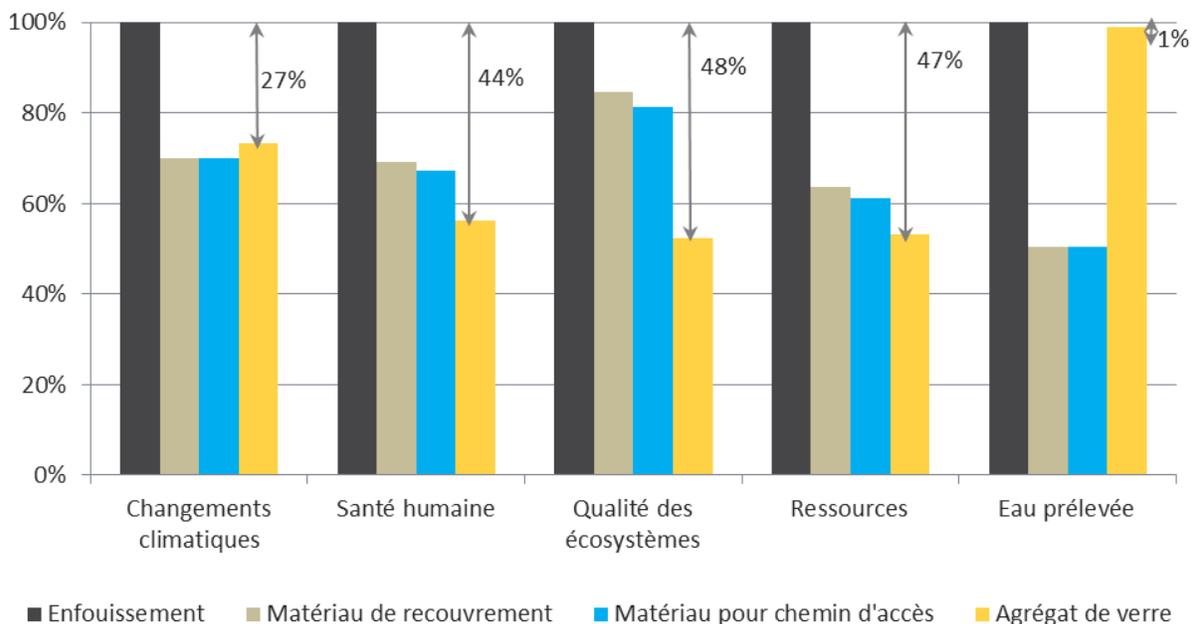


Figure 3-11: Comparaison de la performance environnementale des systèmes (Agrégat de verre).

3.4.2 Analyse de contribution

Contribution des substituts

Le rappel des processus contribuant à l'impact potentiel total comptabilisé pour chacune des filières est fourni au Tableau 3-4. L'impact de chaque scénario correspond à la somme des impacts potentiels générés par le scénario de gestion de fin de vie en question et ceux engendrés par les substituts équivalents nécessaires pour rétablir l'équivalence fonctionnelle entre les systèmes.

Tableau 3-4: Identification des processus contribuant à l'impact total par filières de gestion de fin de vie (scénario « Agrégat de verre »)

Scénario de filières de gestion de fin de vie		Impact total	
		Impacts générés	Impacts engendrés par les substituts équivalents
N°1	Enfouissement	Enfouissement du verre	Production équivalente aux produits des scénarios 2, 3 et 4 : - sable - gravier - granulats conventionnels (pierre)
N°2	L'utilisation du verre comme matériau de recouvrement journalier dans les LET	Utilisation du verre comme matériau de recouvrement	Production équivalente aux produits des scénarios 3 et 4 : - gravier - granulats conventionnels (pierre)
N°3	L'utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès	Utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès	Production équivalente aux produits des scénarios 2 et 4 : - sable - granulats conventionnels (pierre)

Scénario de filières de gestion de fin de vie		Impact total	
		Impacts générés	Impacts engendrés par les substituts équivalents
N°4.4	L'utilisation du verre comme agrégat dans le béton	Traitement et concassage du verre pour son utilisation comme agrégat	Production équivalente aux produits des scénarios 2 et 3 : - sable - gravier

La Figure 3-12 présente le profil des quatre filières de gestion de fin de vie par indicateurs de dommages :

- Les étapes de traitement du verre et de fabrication d'agrégat de verre présentent une contribution qui varie de 12 à 59 % de l'impact du scénario de commercialisation.
- La production d'agrégat conventionnel, le granulats calcaire (pierre concassée), présente une contribution d'au moins 33 % de l'impact total des scénarios d'enfouissement ou d'utilisation en LET pour tous les indicateurs sauf celui de l'Eau prélevée pour lequel il présente une contribution de 5 %, expliquée par des quantités d'eau plus faibles requises pour la production du granulats. Ce résultat semble toutefois être sous-estimé dans la mesure où il devrait être comparable au résultat des produits substitués par les projets d'utilisation en LET, produits également naturels (sable et gravier). La documentation (*ecoinvent v.2.2*) étant limitée quant à la quantité d'eau prélevée nécessaire pour la pierre concassée, la donnée utilisée risque de ne pas être assez représentative du contexte spécifique de l'étude.
- La Figure 3-12 montre également que l'impact de produire un agrégat de verre est inférieur (ou presque similaire) au produit qu'il substitue, soit l'agrégat conventionnel. Si la différence d'impact entre les deux produits est faible ou nulle, le scénario de commercialisation ne génère pas de bénéfices environnementaux par rapport aux autres scénarios d'utilisation en LET.
- La contribution des impacts potentiels générés par les autres technologies de gestion de fin de vie à l'impact total de chacun des scénarios est généralement plus importante que dans le cas des autres projets de commercialisation. En résumé, la contribution des impacts potentiels générés par l'enfouissement du verre est de 8 à 34 %, pour son utilisation comme matériau de recouvrement de 9 à 20 % et pour les chemins d'accès de 9 à 22 %.
- Les impacts des substituts associés aux utilisations en LET (sable et gravier) présentent une contribution raisonnable par rapport à l'impact total des scénarios concernés (9 à 29 %). Cette contribution est encore plus importante pour l'indicateur *Eau prélevée* et qui s'élève à 86 %.
- Contrairement à ce qui a été observé dans l'étude des projets de commercialisation précédents, la contribution des processus d'enfouissement, ainsi que de production de sable et gravier est généralement non négligeable. Il est donc pertinent d'approfondir l'analyse de ces processus en plus de celui de la production des agrégats de verre.
- Concernant l'enfouissement, les impacts de chaque indicateur sont distribués de façon plus ou moins égale entre le transport du verre (du centre de tri au site d'enfouissement) et les opérations et émissions directement sur le site d'enfouissement. Les impacts potentiels de l'indicateur Santé humaine sont largement dominés par la catégorie Effets respiratoires inorganiques (contribution de 96 %) qui s'expliquent par les émissions d'oxydes d'azote, de

particules atmosphériques et d'oxydes de soufre provenant de la combustion de carburant fossiles dans les moteurs de camions (transport) et de la machinerie (opération du site). Le transport et, dans une moindre mesure, les émissions de lixiviat au site d'enfouissement expliquent les impacts sur la catégorie Écotoxicité terrestre, principale contributrice à l'indicateur Qualité des écosystèmes (71 %). Les émissions directement dans le sol sont en cause, particulièrement le zinc et l'aluminium. La consommation de pétrole pour le transport et les opérations du site décrit l'essentiel de la contribution aux indicateurs Changements climatiques et Ressource. Pour sa part, l'indicateur Eau prélevée est davantage dominé par les impacts liés à la construction du site d'enfouissement, en particulier l'eau utilisée pour la production de gravier.

- Pour la production évitée de sable utilisé dans le recouvrement journalier des sites d'enfouissement, tous les indicateurs sont dominés par le processus de transport du sable (de la carrière au site d'enfouissement), à l'exception de l'indicateur Eau prélevée qui est dominé par l'eau utilisée à la sablière. Par conséquent, les indicateurs Changements climatiques, Santé humaine, Qualité des écosystèmes et Ressources sont dominés par les émissions ou la consommation de ressources associées à l'utilisation des camions : émissions à l'air de dioxyde de carbone (Changement climatiques), d'oxydes d'azote, de particules atmosphériques et d'oxydes de soufre (Effets respiratoires, inorganiques), émissions au sol de zinc et d'aluminium dues à l'abrasion des pneus (Écotoxicité terrestre), consommation de pétrole (Énergie primaire non renouvelable).
- Le profil environnemental de la production évitée de gravier utilisé comme matériau dans la sous-fondation est très semblable à celui du sable et les mêmes explications sont applicables pour décrire la contribution des émissions et des catégories d'impacts aux catégories de dommages.
- Finalement, la contribution aux impacts potentiels de la production d'agrégat de verre est dominée essentiellement par deux processus : le transport du centre de tri à l'usine de micronisation (Santé humaine et Ressources) et l'étape de micronisation (Changements climatiques, Qualité des écosystèmes et Eau prélevée). Les contributeurs associés au transport ont déjà été décrits dans les paragraphes précédents. Pour sa part, la source des impacts potentiels de la micronisation pour les Changements climatiques et la Qualité des écosystèmes est associée à l'utilisation de l'électricité dont l'utilisation de carburants fossiles dans le bouquet énergétique québécois et les impacts sur les écosystèmes de l'eau turbinée lors de la production d'hydroélectricité. L'indicateur Eau prélevée est totalement dominée par l'utilisation d'eau à l'usine de micronisation.

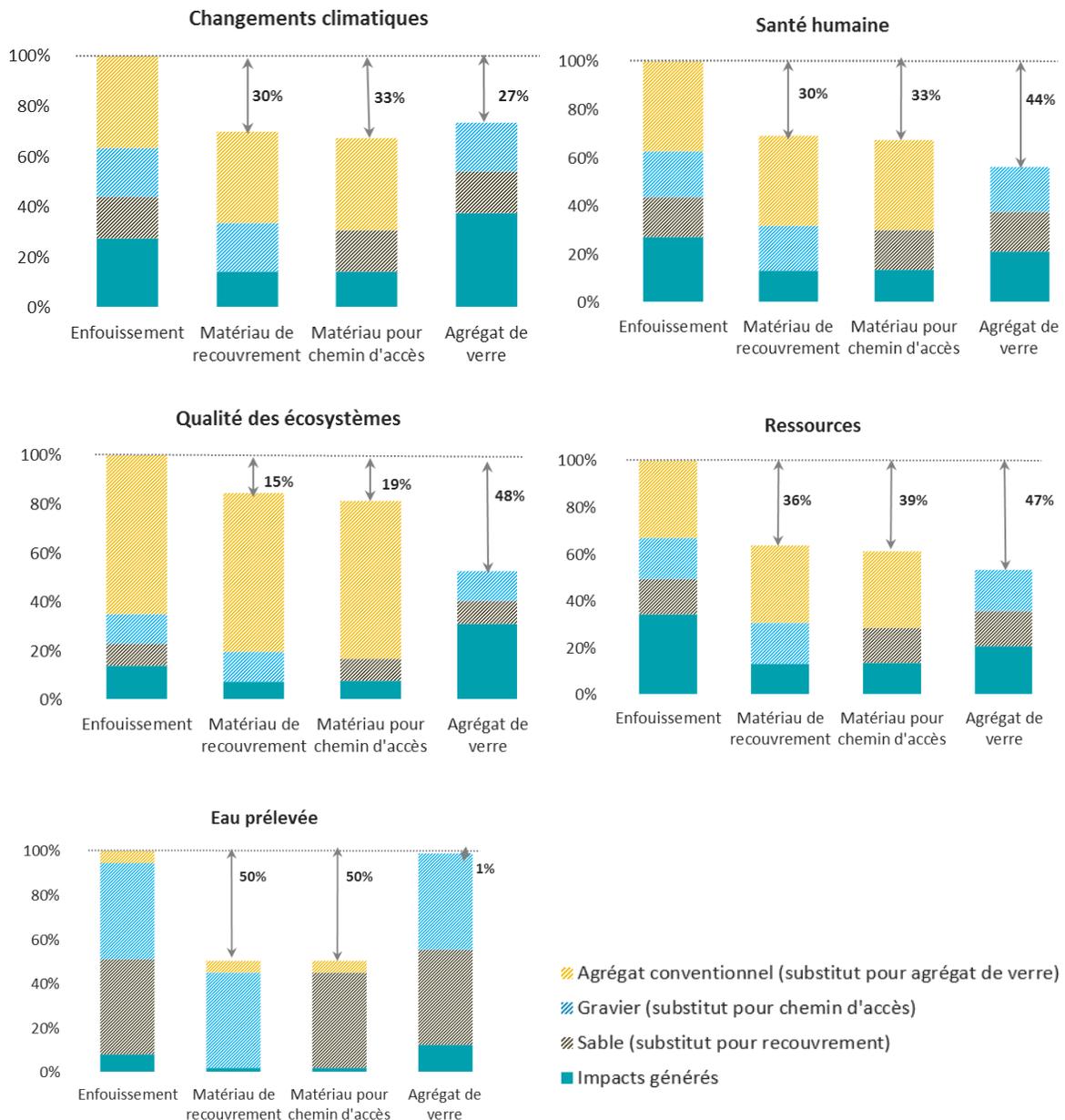


Figure 3-12 : Profil environnemental du système d'utilisation du verre pour la production d'agrégat de verre, par indicateur de dommage.

Contribution du transport

La distance de transport totale que parcourt le verre récupéré au Québec, du centre de tri jusqu'à sa gestion de fin de vie est un paramètre d'intérêt. La distance totale inclut les trajets suivants :

- Transport jusqu'au lieu de gestion de fin de vie : transport des centres de tri jusqu'au lieu d'enfouissement (pour les scénarios 1 et 2), jusqu'au lieu du chemin d'accès dans les LET (scénario 3) et jusqu'au lieu de concassage du verre (scénario 4.4) ;

- Transport jusqu'au lieu d'utilisation : transport du lieu de gestion de fin de vie jusqu'à l'utilisateur final (applicable uniquement pour scénario 4.4) ;

La Figure 3-13 présente les résultats de contribution du transport pour l'indicateur Changements climatiques. Pour le scénario Agrégat de verre, l'étape du transport contribue de 2 à 24 % de l'impact total et de 3 à 19 % pour les autres scénarios.

Les impacts associés aux trajets nécessaires pour le traitement du verre et celui pour son utilisation en bétonnières présentent des contributions de 80 % et de 20 % respectivement de l'impact total. Les principaux impacts liés aux transports sont les émissions de CO₂ dues à la combustion de carburant dans les camions.

La distance de transport étant un paramètre extrêmement variable à travers le Québec, qui dépend non seulement des municipalités, mais aussi de la localisation des lieux de traitement et d'utilisation, les résultats des analyses de sensibilité réalisées sur les distances de transport se trouvent à la section 3.7.

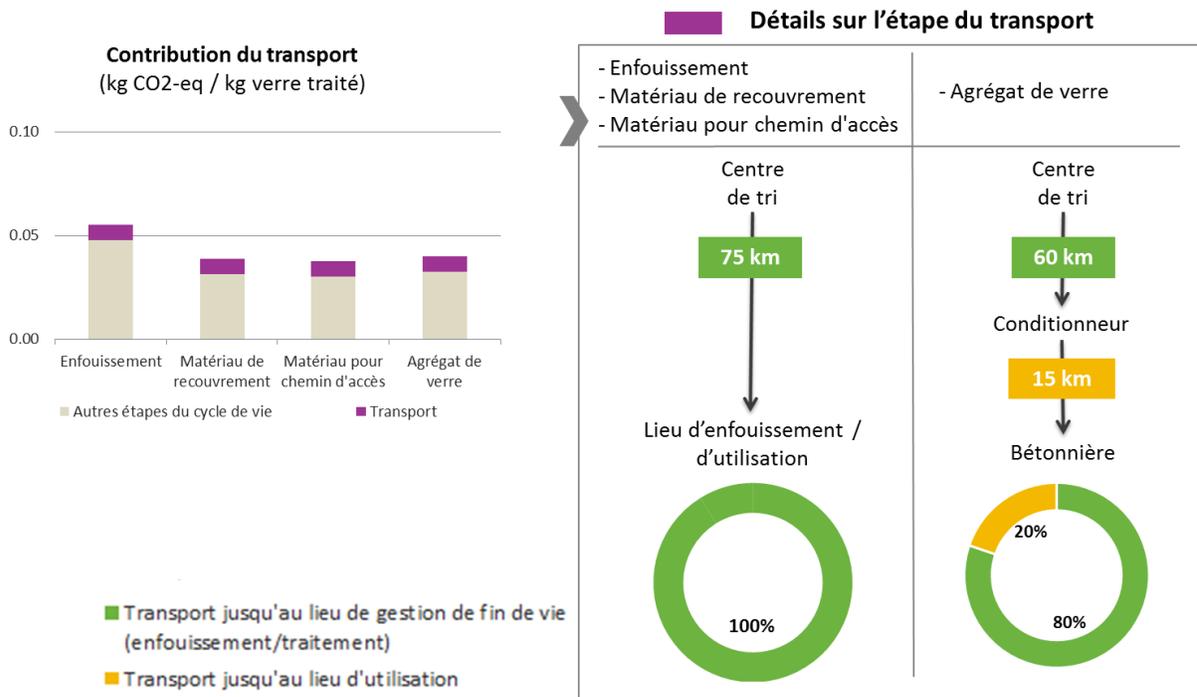


Figure 3-13: Contribution du transport pour le système d'utilisation du verre pour la production d'agrégat de verre pour l'indicateur Changements climatiques.

3.5 Évaluation de la qualité des données d'inventaire

Certains processus ayant une contribution significative aux impacts potentiels des systèmes évalués ont été modélisés au moyen de sources de données secondaires ou encore génériques. La qualité de ces données a été jugée suffisante pour atteindre les objectifs de l'étude dans l'analyse de la qualité des données. Cependant, elle pourrait être améliorée à l'aide de recherches plus approfondies ou de collectes de données plus spécifiques auprès des intervenants concernés.

Les résultats de l'analyse complète de la qualité des données d'inventaire sont résumés à l'Annexe D.

Certains paramètres estimés, représentant par le fait même une limite et diminuant la certitude avec laquelle les conclusions peuvent être tirées, ont été testés en analyse de sensibilité à la section 3.7.

Les principales données à améliorer afin d'assurer la robustesse des résultats sont présentées ci-dessous. Ceux marqués d'un astérisque (*) sont évalués en analyse de sensibilité détaillée dans ce rapport. Pour les autres données qui ne sont pas considérées comme d'intérêt prioritaire dans le contexte de la présente étude ou pour lesquelles il n'existe pas d'autres sources d'information crédibles à tester, leur influence est discutée de façon qualitative à la section 3.7.

- **Étape de conditionnement du verre récupéré :**
 - Consommation énergétique (gaz naturel) (*)
 - Taux de rejets (*)
- **Production de la laine de verre**
 - Consommation énergétique pour la fusion et hors fusion (électricité et gaz naturel) (*)
 - Quantité de matières premières
- **Production de ciment Portland au Québec**
- **Production d'agrégat de calcaire au Québec, produit substitué par l'agrégat de verre**
- **Projets d'utilisation en LET**
 - Opérations de recouvrement et de remblayage
 - Propriétés des matériaux (sable, pierre et verre concassé)

3.6 Analyses d'incertitude

Les résultats détaillés des analyses d'incertitude pour chacun des systèmes composés de quatre scénarios sont présentés à l'Annexe C. Pour chacun des systèmes comparés, cette analyse permet d'évaluer le seuil de significativité associé aux indicateurs d'impacts évalués tels qu'ils sont présentés à la sous-section 2.8.3.

Les résultats des observations pour chacun des projets de commercialisation sont présentés de la Figure 3-14 à la Figure 3-17. Les pourcentages (ou facteurs) pour chaque indicateur indiquent l'intervalle d'incertitude considéré sur le score de l'indicateur (voir la sous-section 2.8.3 pour les explications sur la façon dont sont déterminés les seuils de significativité).

La performance environnementale du scénario d'enfouissement du verre (scénario 1) est inférieure à celle des scénarios de projets d'utilisation en LET (matériau de recouvrement (scénario 2) et matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès (scénario 3)) et ce, pour les cinq indicateurs évalués. Les différences sont significatives pour les indicateurs Changements climatiques, Santé humaine (effets respiratoires), Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation) et Ressources. La différence entre les résultats est moins significative pour les indicateurs Santé humaine (toxicité) et Qualité des écosystèmes (toxicité). Ceci est observé à partir du chevauchement des intervalles d'incertitude. Pour l'indicateur Eau prélevée, une comparaison des impacts indique également que les scénarios de projets d'utilisation en LET sont préférables au scénario d'enfouissement.

Bouteille de verre

Les bénéfices environnementaux de la filière de gestion de fin de vie du verre impliquant la production de bouteilles à contenu recyclé (scénario 4.1) sont très significatifs par rapport aux scénarios d'enfouissement et de projets d'utilisation en LET pour les indicateurs Changements climatiques et Ressources. Les résultats d'impacts pour l'indicateur Eau prélevée sont également plus faibles, indiquant que ce projet de commercialisation est favorable par rapport aux trois autres scénarios. Toutefois, la différence entre les résultats est moins significative pour l'indicateur Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation) et non concluants pour les indicateurs Santé humaine (effets respiratoires et toxicité) et Qualité des écosystèmes (toxicité), dû au chevauchement important des intervalles d'incertitude.

	 Changements climatiques (10%)	 Acidification/Eutrophisation (30%)	 Ecotoxicité (X 10)	 Ressources (10%)	 Effets respiratoires (30%)	 Toxicité (X 10)	 Eau prélevée
Bouteille en verre							
Enfouissement	++	+	x	++	x	x	Favorable
Projets d'utilisation en LET	++	+	x	++	x	x	Favorable

Résultat favorable très significatif	++	Résultat favorable légèrement significatif	+	Résultat non concluant	x
--------------------------------------	----	--	---	------------------------	---

Figure 3-14: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation impliquant la production de bouteilles en verre par rapport aux scénarios alternatifs d'enfouissement et d'utilisation en LET.

Laine de verre

La comparaison de la performance environnementale de la filière de gestion de fin de vie du verre impliquant la production de laine isolante à contenu recyclé (scénario 4.2) indique un résultat favorable, mais peu significatif par rapport à l'enfouissement et les projets d'utilisation en LET pour les indicateurs Changements climatiques et Ressources. Pour l'indicateur Eau prélevée, une comparaison des résultats indique également que l'impact du scénario de projet de commercialisation est inférieur à celui des projets d'utilisation en LET et d'enfouissement. Cependant, les résultats ne sont pas concluants pour les

indicateurs Santé humaine et Qualité des écosystèmes, dû au chevauchement prononcé des intervalles d'incertitude.

	 Changements climatiques (10%)	 Acidification/Eutrophisation (30%)	 Écotoxicité (X 10)	 Ressources (10%)	 Effets respiratoires (30%)	 Toxicité (X 10)	 Eau prélevée
Laine de verre							
Enfouissement	+	x	x	+	x	x	Favorable
Projets d'utilisation en LET	+	x	x	+	x	x	Favorable

Résultat favorable légèrement significatif	+	Résultat non concluant	x
--	---	------------------------	---

Figure 3-15: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation par la production de laine de verre par rapport aux scénarios alternatifs d'enfouissement et d'utilisation en LET.

Poudre de verre

La filière de gestion de fin de vie du verre impliquant la production de poudre de verre utilisée comme ajout cimentaire dans du béton (scénario 4.3) présente une meilleure performance environnementale que celles des scénarios d'enfouissement et des projets d'utilisation en LET et ce, pour chacun des cinq indicateurs étudiés. Les résultats de bénéfices environnementaux sont très significatifs pour la majorité des indicateurs : Changements climatiques, Ressources, Santé humaine (effets respiratoires) et Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation). Les résultats sont également favorables pour l'indicateur Eau prélevée par rapport à l'enfouissement et les projets d'utilisation en LET. Le faible chevauchement des intervalles d'incertitude pour l'indicateur Qualité des écosystèmes (toxicité) et Santé humaine (toxicité) indique que les résultats peuvent être légèrement incertains.

	 Changements climatiques (10%)	 Acidification/Eutrophisation (30%)	 Ecotoxicité (X 10)	 Ressources (10%)	 Effets respiratoires (30%)	 Toxicité (X 10)	 Eau prélevée
Poudre de verre							
Enfouissement	++	++	+	++	++	+	Favorable
Projets d'utilisation en LET	++	++	+	++	++	+	Favorable
Résultat favorable très significatif	++	Résultat favorable légèrement significatif	+				

Figure 3-16: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation impliquant la production de poudre de verre par rapport aux scénarios alternatifs d'enfouissement et d'utilisation en LET.

Agrégat de verre

La filière de gestion de fin de vie du verre impliquant la production d'agrégat de verre utilisé comme agrégat dans du béton (scénario 4.4) indique une meilleure performance environnementale que celle de l'enfouissement de manière significative pour les indicateurs Changements climatiques, Ressources, Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation) et Santé humaine (effets respiratoires). La différence est toutefois moins significative pour l'indicateur Qualité des écosystèmes (toxicité), alors que le résultat est plutôt défavorable pour l'indicateur Santé humaine (toxicité). Pour l'indicateur Eau prélevée, les résultats d'impacts sont également plus faibles, indiquant que ce projet de commercialisation est favorable par rapport aux trois autres scénarios.

La comparaison avec les projets d'utilisation en LET indique une meilleure performance environnementale de façon claire pour le scénario d'agrégat de verre uniquement pour l'indicateur Ressources. Le résultat est favorable, mais peu significatif pour les indicateurs Qualité des écosystèmes et Santé humaine (effets respiratoires), non concluant pour l'indicateur Changements climatiques et plutôt défavorable pour les indicateurs Santé humaine (toxicité) et Eau prélevée.

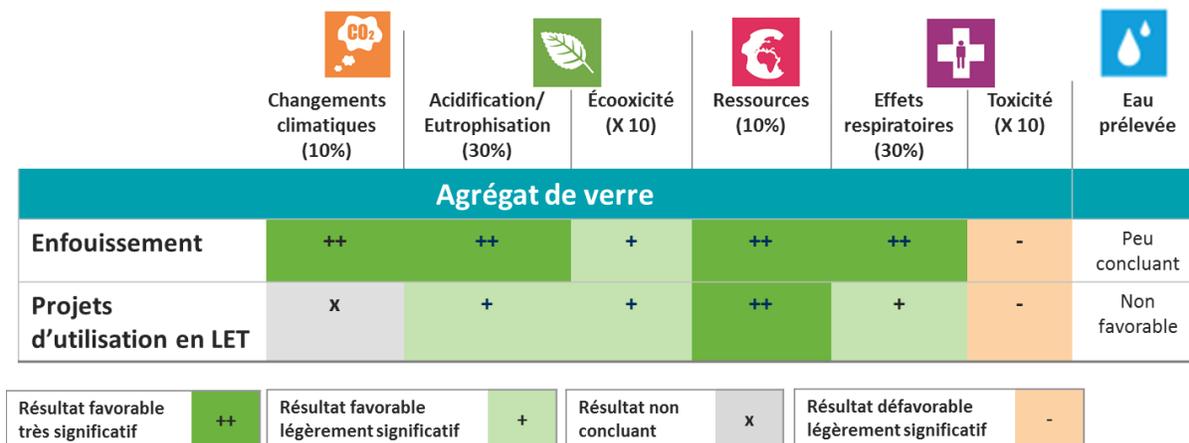


Figure 3-17: Comparaison de la performance environnementale du projet de commercialisation impliquant la production d'agrégat de verre par rapport aux scénarios alternatifs d'enfouissement et d'utilisation en LET.

3.7 Analyses de sensibilité

Plusieurs analyses de sensibilité ont été effectuées afin d'évaluer l'influence de certains paramètres sur les résultats et les conclusions de l'étude. Les paramètres retenus pour ces analyses ont été présentés à la sous-section 2.8.4.

Afin de simplifier la présentation des résultats, seul l'indicateur Changements climatiques est illustré dans les analyses qui suivent.

3.7.1 Distance de transport de collecte

Dans le but de d'évaluer l'impact sur les résultats de considérer la distance totale parcourue par le verre, de sa collecte jusqu'à sa gestion en fin de vie, une analyse de sensibilité est réalisée de manière à inclure le transport de collecte dans les frontières du système.

La distance d'un parcours de collecte moyen au Québec pour la récupération du verre est estimée à 113 km avec une variation de 48 à 500 km dépendamment des municipalités (EEQ, 2013; RECYC-QUÉBEC, 2013).

Comme le montrent les Figure 3-18 à Figure 3-21, l'inclusion d'un parcours de collecte moyen (113 km) augmente l'impact potentiel total de chacun des scénarios et réduit de façon plus ou moins marquée la différence relative entre les scénarios. Cependant, les conclusions et les résultats des analyses d'incertitude demeurent exactement les mêmes, car cette étape est identique pour tous les scénarios à l'étude et n'affecte donc pas leur différence absolue. L'intérêt de cette analyse est donc de montrer la contribution de cette étape de transport par rapport aux autres étapes du cycle de vie prises en compte dans chaque scénario. Pour l'indicateur Changements climatiques, cette contribution varie de 1 à 67 % selon le scénario étudié (Figure 3-18 à Figure 3-21).

Le Tableau 3-5 présente également la contribution du transport de collecte pour une variation de la distance des municipalités vers les centres de tri (de 48 à 500 km). Un parcours de collecte d'environ 48 km est représentatif des 18 plus grands organismes municipaux responsables de la collecte sélective

des centres urbains du Québec (dont Montréal, Québec, Granby, Shawinigan, etc.). À l'inverse, un parcours plus long qui s'étend à 500 km est représentatif d'une ville ou d'un village très éloigné (p.ex. Sept-Îles, Tadoussac ou Ste-Anne-du-Lac).

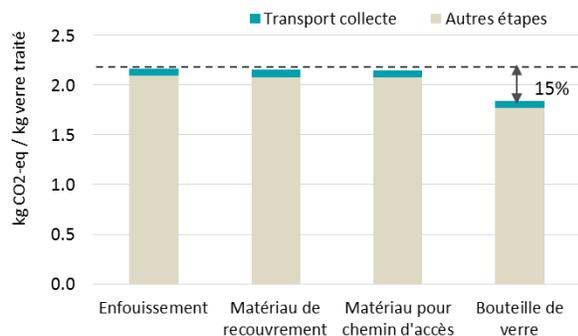


Figure 3-18: Analyse de sensibilité – contribution du transport de collecte sur 113 km (système Bouteille de verre).

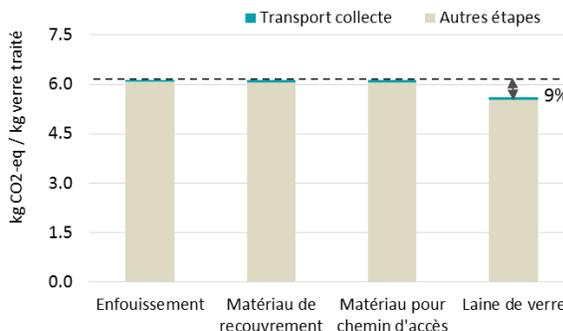


Figure 3-19: Analyse de sensibilité – contribution du transport de collecte sur 113 km (système Laine de verre).

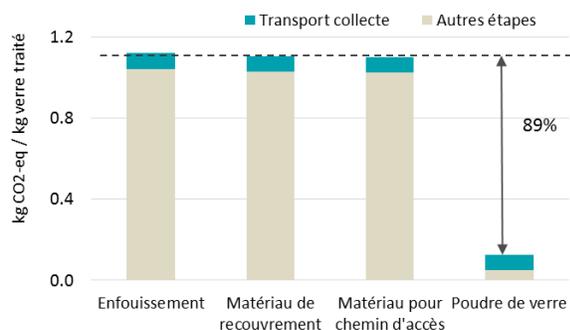


Figure 3-20: Analyse de sensibilité – contribution du transport de collecte sur 113 km (système Poudre de verre).

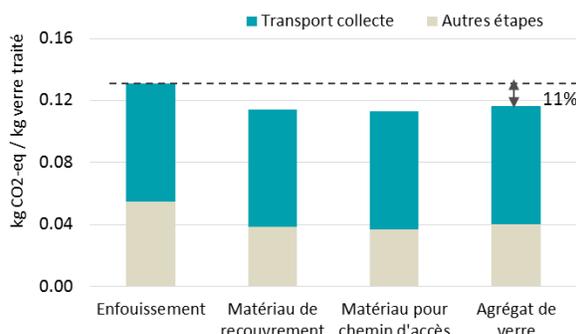


Figure 3-21: Analyse de sensibilité – contribution du transport de collecte sur 113 km (système Agrégat de verre).

Tableau 3-5: Analyse de sensibilité - Variation de la distance de transport de collecte

Contribution de l'étape du transport de collecte			
	scénario de base :	48 km	500 km
	113 km		
Système : Bouteille de verre			
Enfouissement	4 %	1 %	13 %
Matériau de recouvrement	4 %	1 %	13 %
Matériau pour chemin d'accès	4 %	1 %	13 %
Bouteille de verre	4 %	1 %	13 %
Système : Laine de verre			

Contribution de l'étape du transport de collecte			
	scénario de base : 113 km	48 km	500 km
Enfouissement	1 %	1 %	5 %
Matériau de recouvrement	1 %	1 %	5 %
Matériau pour chemin d'accès	1 %	1 %	5 %
Laine de verre	1 %	1 %	6 %
Système : Poudre de verre			
Enfouissement	7 %	3 %	23 %
Matériau de recouvrement	7 %	3 %	23 %
Matériau pour chemin d'accès	7 %	3 %	23 %
Poudre de verre	62 %	21 %	68 %
Système : Agrégat de verre			
Enfouissement	58 %	20 %	67 %
Matériau de recouvrement	67 %	22 %	70 %
Matériau pour chemin d'accès	68 %	22 %	70 %
Agrégat de verre	66 %	22 %	69 %

3.7.2 Distance de transport des centres de tri vers les lieux d'enfouissement

La distance de transport moyenne estimée au Québec entre des centres de tri et les lieux d'enfouissement est de 75 km et peut varier entre 25 et 500 km.

Ce type de transport contribue très peu à l'ensemble des profils de performance des scénarios de l'enfouissement et ceux des utilisations en LET. Ainsi l'analyse de sensibilité indique que :

- Même pour une distance pratiquement nulle (c'est-à-dire lorsque l'enfouissement ou la réalisation de projets d'utilisation en LET est à moins de 1 km du centre de tri), l'utilisation du verre pour la production de bouteilles en verre recyclé ou de poudre de verre demeure très significativement préférable à l'enfouissement ou à l'utilisation en LET. Pour la laine de verre, les conclusions sont également inchangées : le bénéfice pour le projet avec la laine de verre recyclé est légèrement significatif pour une distance variant entre <1 km et 500 km.
- Pour le système de valorisation en agrégat de verre, l'option d'enfouissement du verre reste également moins favorable, et ce, même pour une distance de <1 km du centre de tri. Pour ce qui est de la comparaison avec les deux projets d'utilisation en LET, le projet agrégat de verre devient favorable de manière très significative par rapport au scénario d'utilisation du verre comme matériau de recouvrement et comme matériau de sous-fondation pour des distances de 152 et de 171 km respectivement (Figure 3-22).

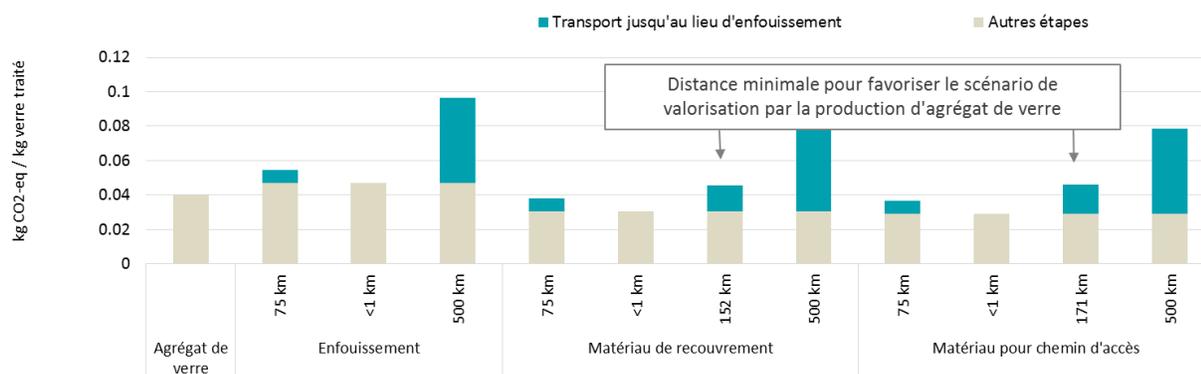


Figure 3-22: Analyse de sensibilité – variation de la distance jusqu’au lieu d’enfouissement (système Agrégat de verre).

3.7.3 Distance de transport des centres de tri vers le conditionneur de verre

Les projets de commercialisation du verre impliquant la production de bouteilles en verre ou de laine de verre avec contenu recyclé nécessitent une étape de traitement du verre chez un conditionneur. La distance moyenne estimée est de 350 km et est basée sur la localisation de différents centres de tri du Québec et le conditionneur de verre (localisé actuellement à Saint-Jean-sur-Richelieu). Une variation de cette distance de 10 à 1 400 km est effectuée afin de refléter la localisation des différents centres de tri.

Les résultats de l’analyse de sensibilité indiquent que la variation de la distance pour l’intervalle indiqué ne modifie pas les conclusions quant à la performance des projets de commercialisation par rapport aux autres options. Toutefois, si le conditionneur de verre devait être situé à plus de 3 650 km du centre de tri, l’impact potentiel du scénario de projet de commercialisation du verre impliquant la production de bouteilles en verre recyclé deviendrait supérieur à celui de l’enfouissement. Il en est de même pour les projets d’utilisation en LET dont le score de l’indicateur Changements climatiques devient moins grand que celui du projet de commercialisation de la bouteille pour une distance de plus de 3 470 km (Figure 3-23). Cependant, en prenant en compte le seuil de significativité pour l’indicateur Changements climatiques (voir sous-section 2.8.3), les résultats deviennent non concluants dès que les distances dépassent 2 200 km (enfouissement) et 2 000 km (projets d’utilisation en LET).

Les mêmes observations peuvent être effectuées pour le projet de commercialisation de laine de verre recyclé (Figure 3-24). En effet, les distances du centre de tri jusqu’au conditionneur pour que les projets d’utilisation en LET et l’enfouissement égalent la performance de la laine de verre recyclé sont de 5 640 km et de 5 700 km respectivement. Par ailleurs, dès que la distance du conditionneur dépasse les 2 170 km (enfouissement) et 2 100 km (utilisations en LET), il est impossible de conclure sur l’indicateur Changements climatiques.

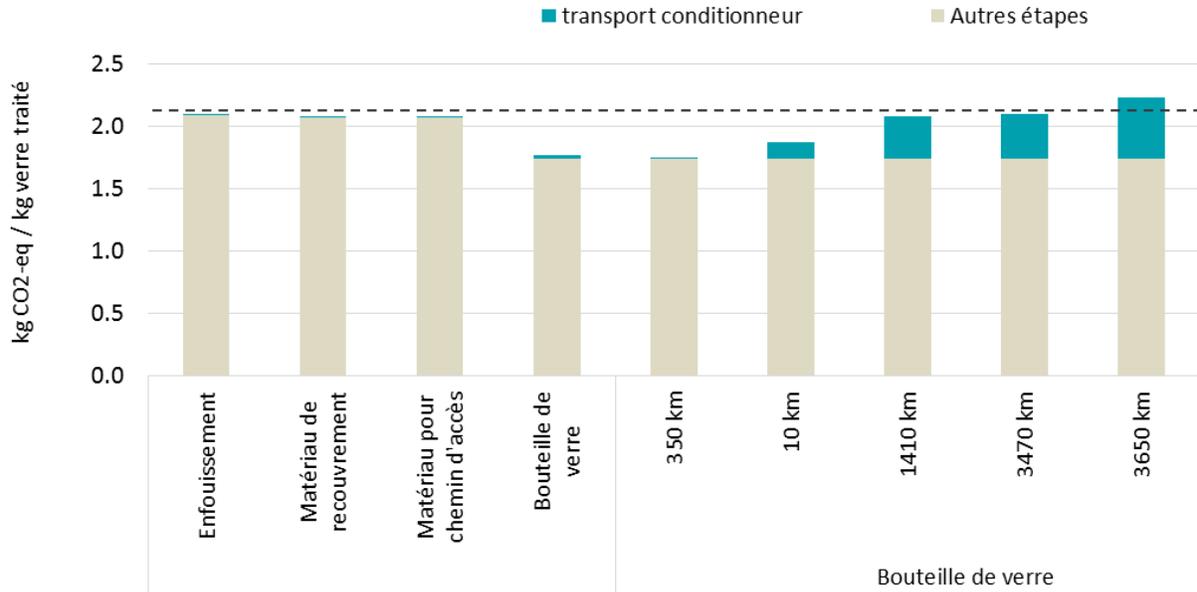


Figure 3-23: Analyse de sensibilité – variation de la distance jusqu’au conditionneur (système Bouteille de verre).

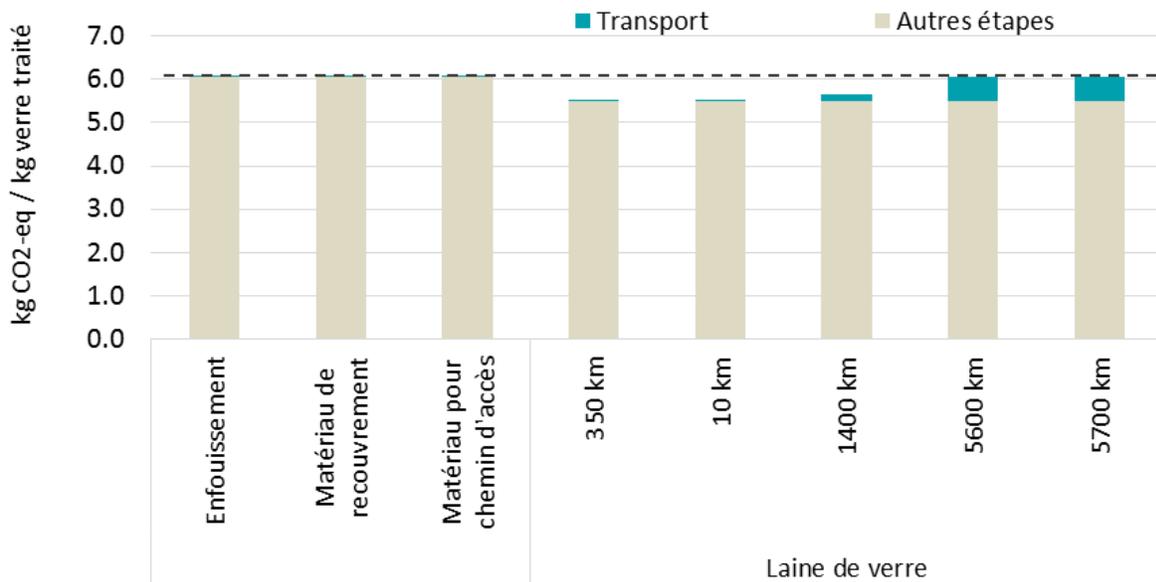


Figure 3-24: Analyse de sensibilité – variation de la distance jusqu’au conditionneur (système Laine de verre).

3.7.4 Distance de transport des centres de tri vers l’usine de traitement du verre

Les productions de poudre et d’agrégat de verre s’effectuent à l’usine de micronisation du verre située à Lachute. L’approvisionnement en verre récupéré se fait actuellement à une distance de 60 km (Tricentris, 2013). Cette analyse vise à évaluer l’influence de cette distance sur les résultats, en analysant la possibilité que l’approvisionnement s’effectue de tous les centres de tri du Québec. Une distance moyenne de 410 km est obtenue à partir des différentes localisations de ces centres et peut s’étendre jusqu’à un rayon 1 450 km.

Les résultats de l'analyse de sensibilité sur cette distance de transport montrent que les impacts potentiels pour le scénario poudre de verre deviennent égaux à ceux des projets d'utilisation en LET et d'enfouissement pour des distances respectives de 9 974 km et de 10 140 km (Figure 3-25). En considérant le seuil de significativité, la poudre de verre n'est plus significativement favorable pour des distances de 9 100 km (enfouissement) et 8 950 km (projets d'utilisation en LET).

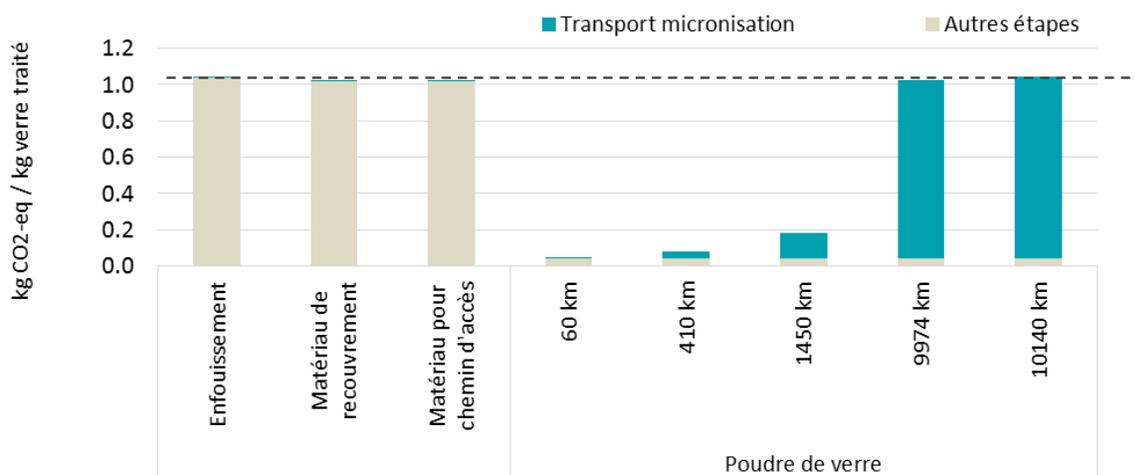


Figure 3-25: Analyse de sensibilité – variation de la distance jusqu'à l'usine de micronisation (système Poudre de verre).

Pour le système relatif au projet de commercialisation du verre impliquant la production d'agrégat, les résultats indiquent que si l'usine de concassage devait être située à une distance de plus de 300 km du centre de tri, le scénario d'enfouissement du verre deviendrait préférable de manière très significative au projet de commercialisation. À l'inverse, la production d'agrégat de verre n'est plus significativement meilleure si la distance de transport dépasse les 145 km. Le point d'égalité entre ces deux options se trouve pour sa part à 215 km.

Les résultats précédents (sous-section 3.4.1) ont montré l'absence de différence significative pour l'indicateur Changements climatiques entre les projets d'utilisation en LET et le projet de commercialisation impliquant la production d'agrégat de verre. La variation de distance de transport entre le centre de tri et l'usine de traitement indique qu'un parcours de moins de 1 km peut favoriser de manière très significative le projet de commercialisation. À l'inverse, un parcours de plus de 115 km peut favoriser de manière très significative les projets d'utilisation en LET.

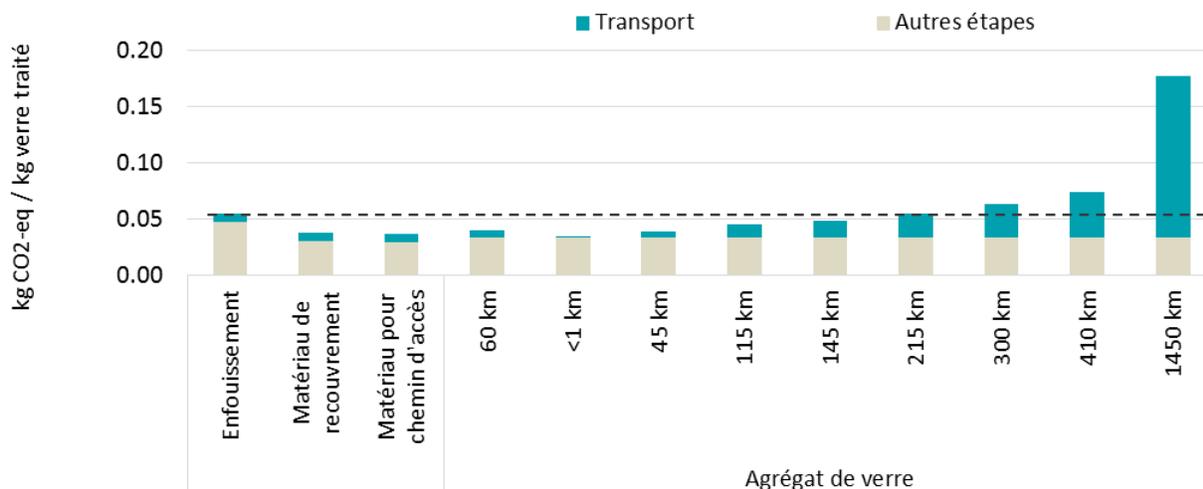


Figure 3-26: Analyse de sensibilité – variation de la distance jusqu’à l’usine de traitement (système Agrégat de verre).

3.7.5 Taux de rejets à l’étape du conditionnement

Le taux de rejets de matières pour le conditionnement du verre est grandement variable, puisqu’il dépend de la qualité de la matière issue des centres de tri. Ce taux reflète en quelque sorte le niveau de contamination de la matière reçue (soit le verre mixte) avant d’être conditionnée. Un taux initial de 3,5 % est estimé, basé sur l’information communiquée par le conditionneur de verre qui opère au Québec. Toutefois, il est important de noter que ce dernier traite majoritairement le verre de bouteilles reçues des brasseurs ou de la consigne, soit des verres qui sont généralement propres et déjà séparés en fonction des couleurs. Selon les communications établies avec des spécialistes du secteur, les rejets peuvent être importants lors du tri du verre de la collecte sélective, étant donné que la matière acheminée des centres peut être très contaminée et mélangée à d’autres matières. Ces rejets sont transportés par camion vers les sites d’enfouissement où ils sont gérés.

Une analyse de sensibilité est donc effectuée sur ce paramètre en considérant une variation raisonnable du taux entre 3,5 % (scénario de base) et 30 % pour les systèmes qui emploient du verre conditionné, c’est-à-dire la production de bouteilles et de laine de verre. Les résultats montrent que pour des taux s’élevant jusqu’à 30 %, les résultats comparatifs des différents scénarios sur une base relative sont très peu sensibles. Le scénario du projet de commercialisation du verre impliquant la production de bouteilles de verre demeure préférable de manière très significative aux trois autres scénarios que sont l’enfouissement et les deux projets d’utilisation en LET (Figure 3-27). Pour sa part, le scénario de laine de verre demeure légèrement significatif par rapport aux trois autres scénarios (Figure 3-28).

Il est à noter que les résultats relatifs, présentés dans les figures qui suivent, ne permettent pas de voir que pour 1 kg de verre mixte récupéré au centre de tri, plus le taux de rejets augmente, moins il y a de verre mixte conditionné disponible pour produire une bouteille ou de la laine de verre. C’est qu’en réduisant le taux de verre disponible pour le recyclage, plusieurs paramètres sont modifiés en même temps incluant les fonctions secondaires des systèmes. En effet, moins de bouteilles ou de laine de verre sont produites, donc moins de produits équivalents sont évités. Dans ces scénarios de

commercialisation, les impacts générés décroissent donc de façon proportionnelle avec les impacts évités. D'autre part, les impacts pour gérer les rejets augmentent également de façon proportionnelle avec le taux de rejets. À terme, pour des taux élevés de rejets, les impacts potentiels des scénarios de commercialisation vont rejoindre ceux du scénario d'enfouissement. Cependant, les résultats montrent ici que les bénéfices nets d'utiliser 70 % du verre recyclé pour remplacer des produits faits de verre vierge restent bien supérieurs aux impacts d'enfouir 30 % du verre.

Il convient de noter que l'usure des équipements par le verre dans les centres de traitement n'est pas capturée par cette analyse. Ainsi, les dommages prématurés qui nécessiteraient de remplacer les équipements plus rapidement ne sont pas pris en compte dans la présente étude.

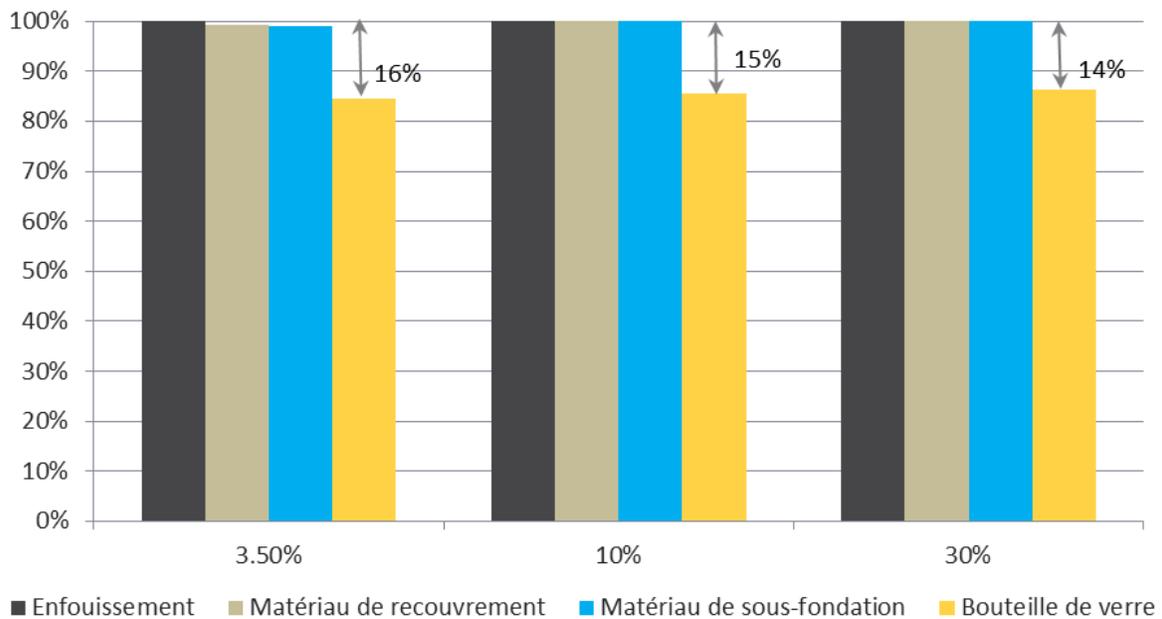


Figure 3-27: Analyse de sensibilité – influence du taux de rejets (système Bouteille de verre).

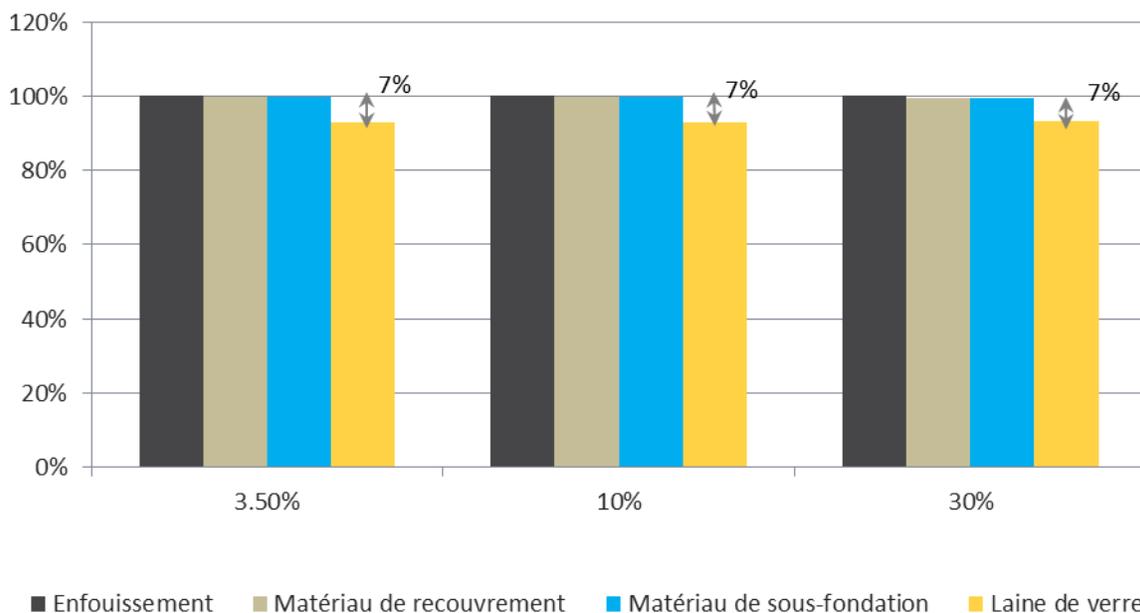


Figure 3-28: Analyse de sensibilité – influence du taux de rejets (système Laine de verre).

3.7.6 Étape de déshumidification chez le conditionneur

Selon les informations fournies par le conditionneur implanté au Québec qui traite le verre de bouteilles reçues des brasseurs ou de la consigne (2M Ressources), la production de calcin à partir de verre issu de la collecte sélective nécessite l'utilisation d'un séchoir pour l'étape de déshumidification du verre. Cette étape engendre une consommation énergétique additionnelle de gaz naturel. Dans les scénarios de base impliquant l'utilisation de verre conditionné étudiés précédemment, une consommation de gaz naturel¹ de 0,99 MJ/kg calcin a été utilisée.

Une analyse de sensibilité excluant cette étape est réalisée pour les deux systèmes concernés; la bouteille de verre et la laine de verre.

Les résultats indiquent que la présence ou non d'une telle consommation de gaz naturel ne modifie pas les conclusions pour l'indicateur Changements climatiques pour le projet de production de bouteilles de verre, qui reste très significativement préférable à l'enfouissement et aux projets d'utilisation en LET (Figure 3-29). Pour sa part, le projet de production de laine de verre reste légèrement significatif par rapport à tous les autres scénarios (Figure 3-30). Pour une consommation de 3,5 MJ/kg calcin (c.-à-d. 3,5 fois la consommation du scénario de base), la différence entre les impacts de l'enfouissement du verre, les projets d'utilisation en LET et les deux projets de commercialisation n'est plus significative. Si la consommation dépassait ces seuils, ces projets de commercialisation pourraient devenir non

¹ Jugement d'expert : Communication personnelle avec un ancien responsable chez Klareco

favorables par rapport aux scénarios alternatifs. Il est important de noter cependant que de tels taux de consommation de gaz naturel pour le conditionnement du verre sont jugés improbables.

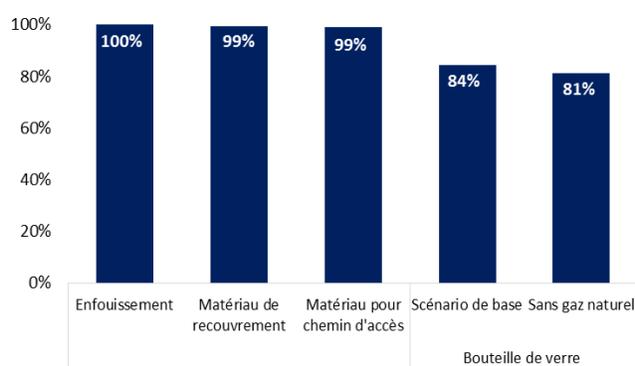


Figure 3-29: Analyse de sensibilité – étape de déshumidification pour l’indicateur Changements climatiques (système Bouteille de verre).

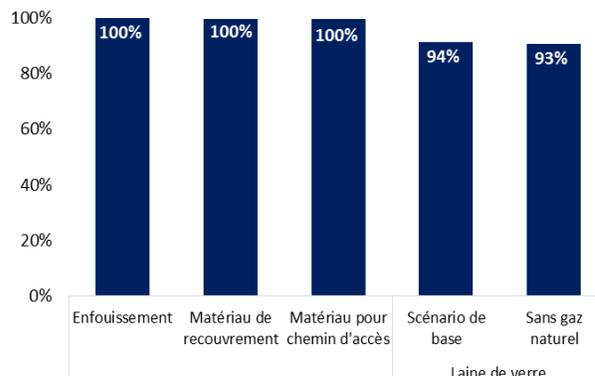


Figure 3-30: Analyse de sensibilité – étape de déshumidification pour l’indicateur Changements climatiques (système Laine de verre).

3.7.7 Consommation d’électricité pour l’étape de conditionnement du verre

La consommation électrique nécessaire pour le conditionnement du verre est un paramètre pouvant influencer la performance des projets de commercialisation du verre qui requièrent du calcin. Ainsi, une analyse de sensibilité est réalisée.

Les résultats montrent que pour l’indicateur Changements climatiques, une consommation électrique est de plus de 10 kWh/kg calcin (c’est-à-dire 400 fois plus élevée que la consommation du scénario de base), fait en sorte que le projet de commercialisation du verre impliquant la production de bouteilles à contenu recyclé présente un impact similaire au scénario d’enfouissement ou à ceux des projets d’utilisation en LET (Figure 3-31). En prenant en compte les seuils de significativité, il devient impossible de conclure si la consommation électrique atteint 5,25 kWh/kg calcin (210 fois le scénario de base).

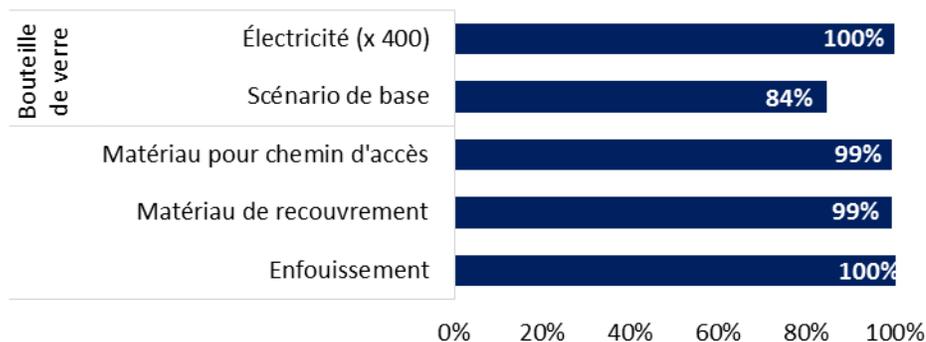


Figure 3-31: Analyse de sensibilité – consommation d’électricité pour l’indicateur Changements climatiques (système Bouteille de verre).

Les mêmes observations peuvent être effectuées pour le scénario de projet de commercialisation impliquant la production de laine de verre à contenu recyclé, qui peut avoir un score pour l’indicateur Changements climatiques supérieur pour une consommation électrique de plus de 16,6 kWh/kg calcin (c’est-à-dire 650 fois plus élevée que la consommation du scénario de base) (Figure 3-32). En prenant en compte le seuil de significativité, il devient impossible de conclure si la consommation électrique atteint 5,88 kWh/kg calcin (soit 230 fois le scénario de base).

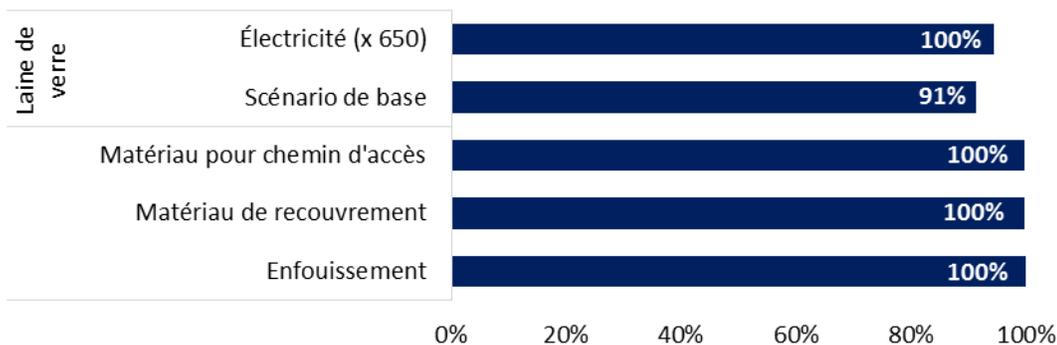


Figure 3-32: Analyse de sensibilité – consommation d’électricité pour l’indicateur Changements climatiques (système Laine de verre).

Il est important de noter cependant que ces taux de consommation électrique pour le conditionnement du verre sont jugés improbables.

3.7.8 Consommation énergétique pour la fabrication de laine de verre

En plus des valeurs utilisées pour le scénario de base (tirées de Pellegrino et al., 2002), une revue de la littérature a permis d’identifier différentes consommations énergétiques pour la fabrication de laine de verre (Lippatt, 2007; Kellenberger et al., 2007). Les données recensées couvrent la consommation

d'énergie pour la fusion et hors fusion (voir tableau dans la Figure 3-33). Celles-ci sont évaluées en analyse de sensibilité tant pour le scénario de production de laine de verre à contenu recyclé que pour celui de laine de verre vierge.

Les résultats pour l'indicateur Changements climatiques indiquent que dans les deux cas, les conclusions demeurent les mêmes et le projet de commercialisation du verre impliquant la production de laine de verre recyclé est une option préférable à l'enfouissement et aux projets d'utilisation en LET de manière légèrement significative. Les bénéfices environnementaux varient faiblement en fonction de la consommation énergétique (Figure 3-33). En effet, les variations de consommation d'énergie touchent autant la laine de verre vierge que la laine de verre recyclé et ce, même en considérant l'économie d'énergie associée à utiliser du calcin (2,5 % d'économie par tranche de 10 % de calcin supplémentaire sur l'énergie de fusion).

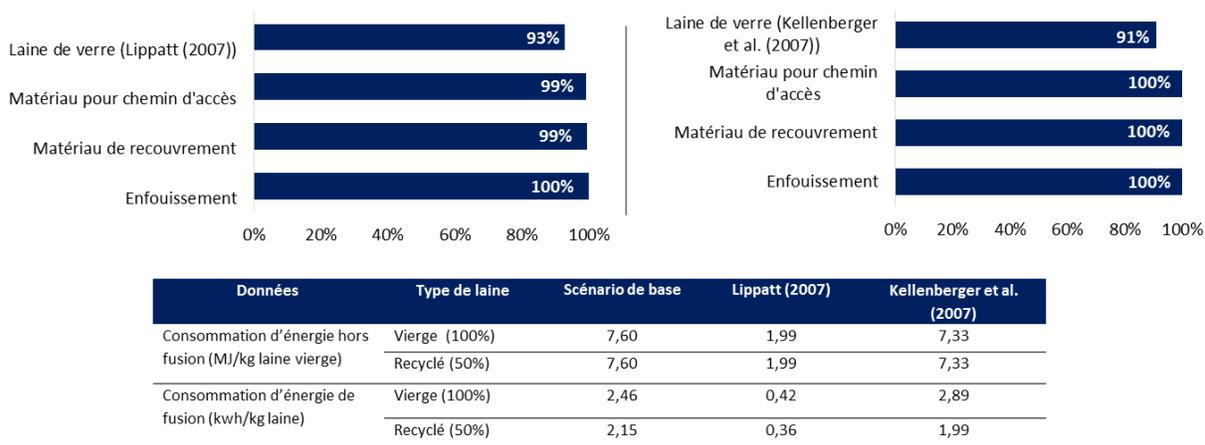


Figure 3-33: Analyse de sensibilité – consommation d'énergie pour la production de laine de verre, pour l'indicateur Changements climatiques.

3.7.9 Lieu de production de la laine de verre

Actuellement, il n'existe pas d'usine de production de laine de verre au Québec. Par conséquent, le calcin produit au Québec est acheminé aux États-Unis (parcours estimé à 550 km).

Distance de transport entre le conditionneur de verre et l'usine de fabrication aux États-Unis

Une analyse de sensibilité sur la distance de transport et la localisation de l'usine de fabrication de laine de verre recyclé aux États-Unis est réalisée sur l'indicateur Changements climatiques. Les résultats d'une variation de cette distance indiquent que pour une distance de 2 500 km, il n'est plus possible de conclure sur la comparaison entre le scénario de projet de commercialisation de laine de verre et ceux d'enfouissement du verre ou des projets d'utilisation en LET (Figure 3-34). Pour une distance inférieure à 2 500 km, le résultat favorable pour la laine de verre reste légèrement significatif.

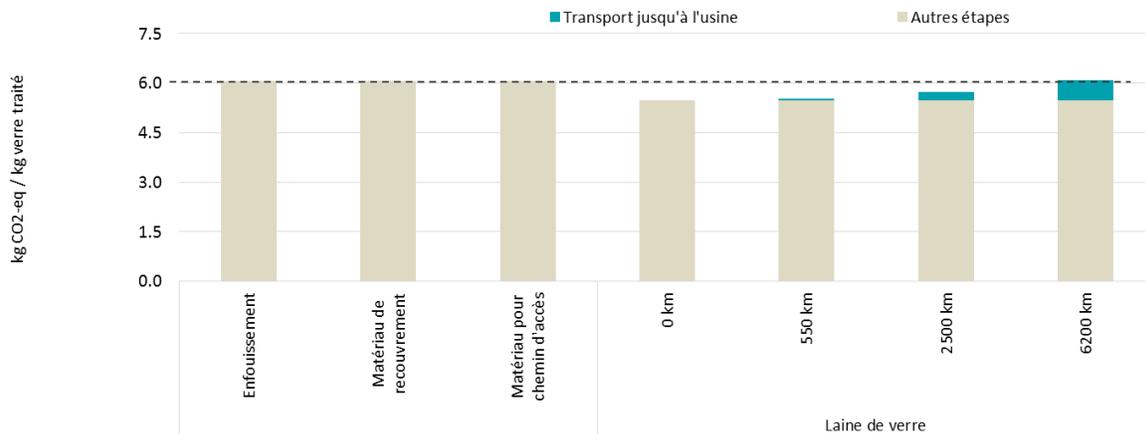


Figure 3-34: Analyse de sensibilité – distance de transport jusqu'à l'usine de fabrication de laine de verre aux États-Unis.

Fabrication de laine de verre au Québec

Cette analyse de sensibilité étudie les conséquences d'implanter une usine de production au Québec dans un rayon de 60 km de l'usine de conditionnement du verre. Les résultats indiquent des bénéfices environnementaux d'environ 2 % pour ce projet de commercialisation par rapport aux projets d'utilisation en LET et l'enfouissement. Cette différence demeure favorable de façon légèrement significative. Il devient impossible de conclure entre le projet de commercialisation et les projets d'utilisation en LET et l'enfouissement si la distance d'approvisionnement en calcin atteint respectivement 175 km et 240 km. Les projets d'utilisation en LET et l'enfouissement auront un score approximativement semblable à celui du projet de commercialisation si la distance atteint 650 km et ils deviennent même très significativement favorables pour une distance de 1 750 km (Figure 3-35).

Il est également intéressant de noter l'impact potentiel qu'aurait l'implantation d'une usine de production de laine de verre au Québec sur les résultats de l'étude. La réduction de l'impact associé à l'utilisation d'un bouquet énergétique québécois plus propre à l'usine de laine de verre permet de réduire de plus de 3,3 kg CO₂-eq. par kg de verre traité les impacts de produire de la laine de verre vierge et de 2,9 kg CO₂-eq. les impacts de la laine de verre recyclé.

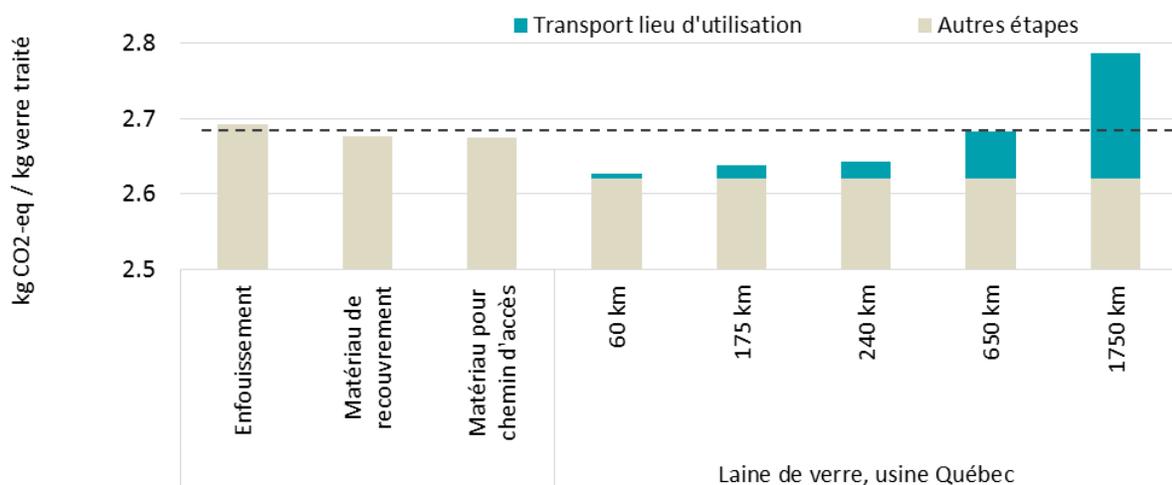


Figure 3-35: Analyse de sensibilité – localisation de l’usine de production de laine de verre au Québec.

3.7.10 Provenance du calcin pour la bouteille de verre

Pour des raisons économiques, les fabricants de bouteilles intègrent de plus en plus de la matière recyclée dans leurs produits, faisant en sorte qu’il n’existe pratiquement plus de bouteilles contenant uniquement de la matière (verre) vierge sur le marché. Dans un tel contexte, le calcin ne substituerait pas du verre 100 % vierge, mais serait plutôt utilisé en remplacement au calcin qui proviendrait de juridictions situées à l’extérieur du Québec pour la production d’une bouteille à contenu recyclé équivalent.

Ainsi, deux analyses de sensibilité évaluent l’influence de la provenance du calcin qui est substitué sur les résultats de l’indicateur Changements climatiques en supposant deux localisations : l’Ontario ou, plus largement, l’Amérique du Nord. Aux fins de chaque analyse, l’étape de conditionnement du verre est supposée dans le lieu de provenance du calcin qui est par la suite acheminé par camion jusqu’à l’usine de production de bouteilles, située à Montréal. Les étapes de collecte jusqu’au conditionneur sont posées similaires au scénario de base.

Afin de simplifier la présentation des résultats, ceux-ci sont présentés uniquement par rapport au scénario d’enfouissement. Les résultats indiquent que le projet de commercialisation du verre récupéré au Québec pour la production d’une bouteille à contenu recyclé n’est pas significativement différent de son substitut, soit la bouteille à contenu recyclé dont le calcin proviendrait de l’extérieur du Québec, si ce calcin est transporté sur une distance de moins de 1 000 km.

Des différences légèrement significatives en faveur du calcin québécois sont observées pour des distances d’approvisionnement en calcin entre 1 000 et 2 250 km de l’extérieur du Québec. Si la distance dépasse 2 250 km, alors le calcin québécois est très significativement préférable. Les réductions d’impacts sont principalement liées au transport d’approvisionnement en calcin par camion et, dans une moindre mesure, au bouquet énergétique qui varie en fonction du lieu d’implantation du conditionneur dans ces régions. Par ailleurs, pour des opérations similaires, un conditionneur qui opère au Québec est

généralement avantage par ses plus faibles impacts de GES, étant donné la prépondérance de l'hydroélectricité. Cependant, en considérant l'ensemble de la production d'une bouteille de verre, la contribution de la consommation d'électricité à l'étape de conditionnement est très faible et cet aspect n'est donc pas très déterminant.

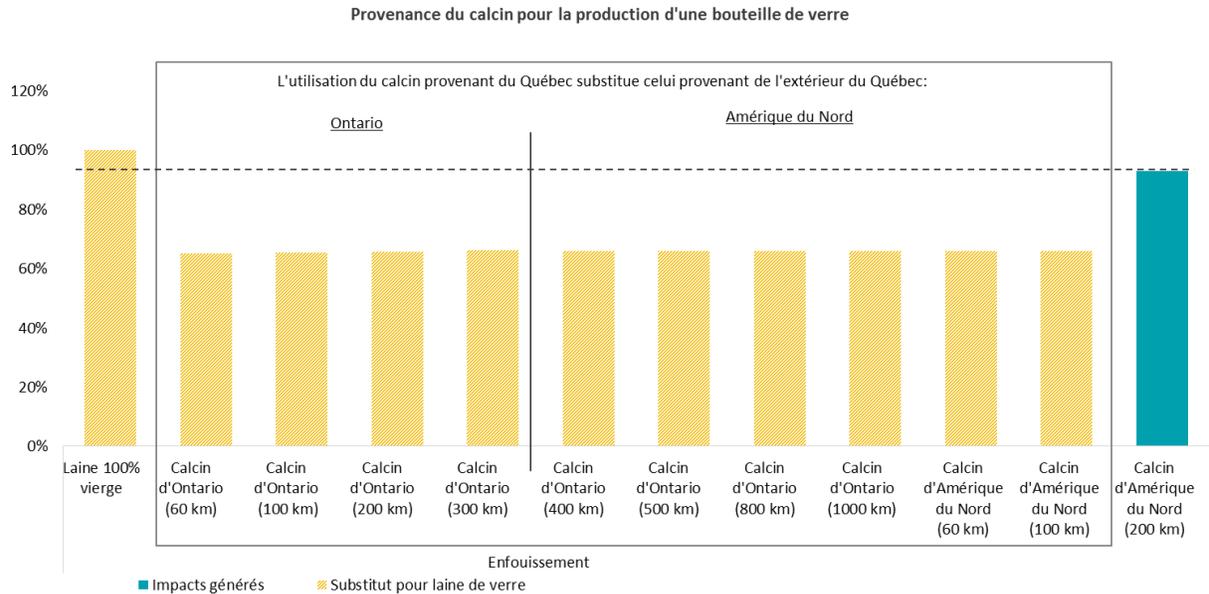


Figure 3-36: Analyse de sensibilité – provenance du calcin pour la production de bouteilles de verre au Québec pour l'indicateur Changements climatiques.

3.7.11 Traitement du verre pour les projets d'utilisation en LET

Une analyse de sensibilité incluant une étape de traitement du verre, soit son conditionnement, pour les projets d'utilisation en LET est réalisée. Cette analyse permet d'évaluer l'impact engendré par cette étape additionnelle pouvant être nécessaire pour certaines applications, dont l'utilisation du verre de la collecte sélective comme matériau de recouvrement journalier.

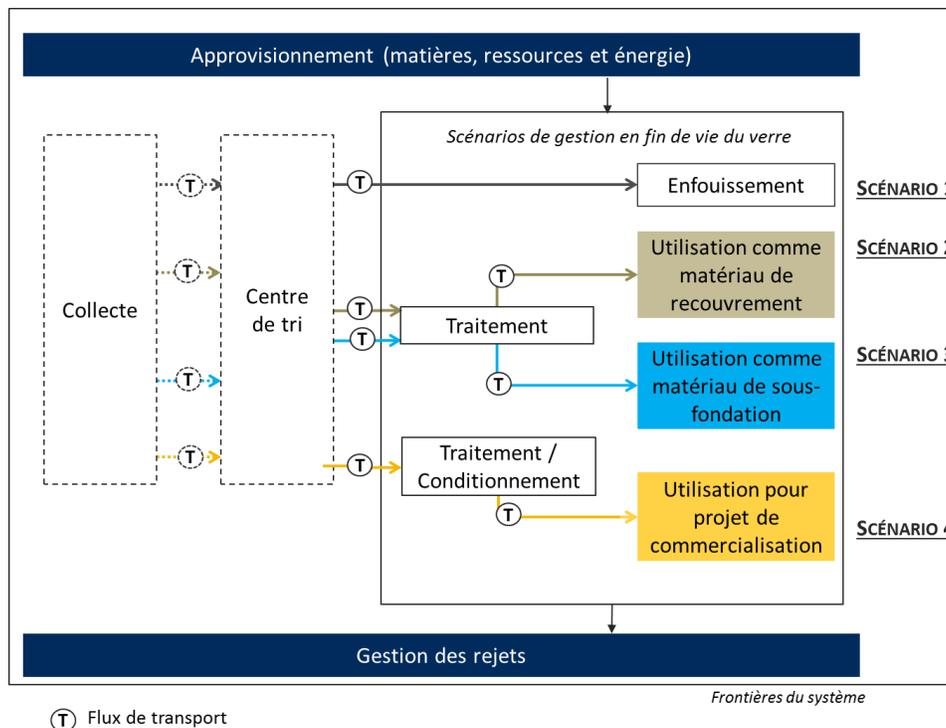


Figure 3-37: Frontière du système – étape de traitement pour les projets d’utilisation en LET.

L’ajout de cette étape aux projets d’utilisation en LET augmente les bénéfices potentiels des projets de commercialisation pour l’indicateur Changements climatiques (Figure 3-38 à Figure 3-41). Ces bénéfices sont les suivants :

- Bouteille de verre : la réduction passe de 15 à 19 %
- Laine de verre : la réduction passe de 8 à 10 %
- Poudre de verre : la réduction passe de 95 à 96 %
- Agrégat de verre : la réduction passe de 5 à 73 %

La Figure 3-41 montre clairement que le projet de commercialisation relatif à l’agrégat de verre est le plus sensible à l’inclusion d’une étape de conditionnement pour les projets d’utilisation en LET. Pour l’indicateur Changement climatiques, les conclusions pour les projets d’utilisation en LET passent de non concluantes à très significativement en faveur du projet de commercialisation. Ce résultat est valide jusqu’à une distance totale parcourue par un camion entre le centre de tri, l’usine de concassage et la bétonnière de 1 015 km. Au-delà de cette distance, la comparaison avec les projets d’utilisation en LET redevient non concluante.

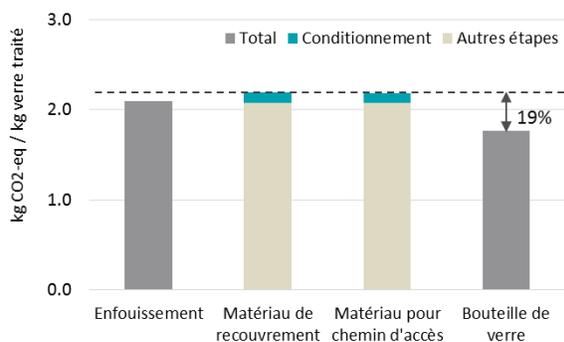


Figure 3-38: Analyse de sensibilité – étape de traitement pour les projets d’utilisation en LET (système Bouteille de verre).

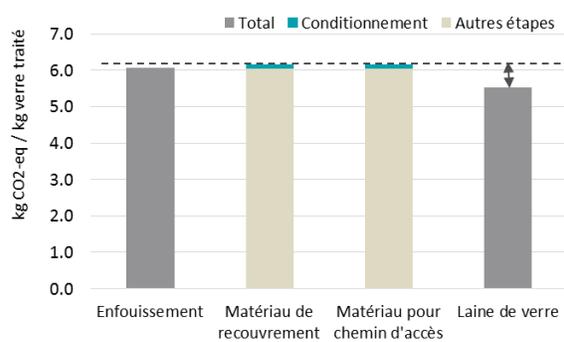


Figure 3-39: Analyse de sensibilité – étape de traitement pour les projets d’utilisation en LET (système Laine de verre).

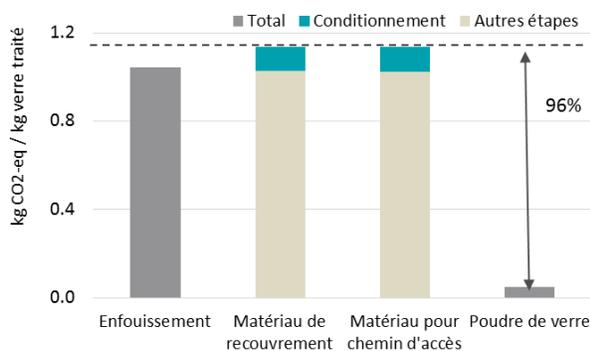


Figure 3-40: Analyse de sensibilité – étape de traitement pour les projets d’utilisation en LET (système Poudre de verre).

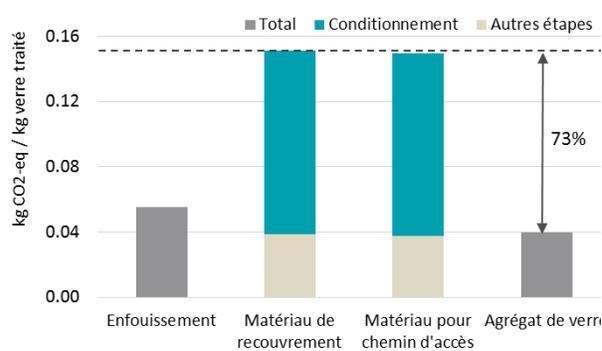


Figure 3-41: Analyse de sensibilité – étape de traitement pour les projets d’utilisation en LET (système Agrégat de verre).

3.7.12 Évaluation des impacts avec la méthode ReCiPe

Afin de tester la robustesse des résultats, l'évaluation des impacts (ÉICV) est également effectuée au moyen d'une deuxième méthode, ReCiPe (Goedkoop et al., 2009). Cette analyse permet de vérifier si la variabilité des modèles de caractérisation a une influence significative sur les conclusions.

Trois indicateurs de dommages sont évalués par la méthode ReCiPe: Santé humaine, Qualité des écosystèmes et Ressources. En plus des catégories d'impacts légèrement différentes de par leur modélisation, la principale différence entre les deux méthodes est que la méthode ReCiPe pousse la modélisation des impacts potentiels des gaz à effet de serre jusqu'aux impacts finaux des catégories de dommages Santé humaine et Qualité des écosystèmes.

Les résultats obtenus par la méthode ReCiPe (H/A) sont présentés à l'Annexe C, ainsi que la contribution de la catégorie Changements climatiques aux catégories de dommages Santé humaine et Qualité des écosystèmes. Pour tous les scénarios et les trois indicateurs de dommages étudiés, cette évaluation indique la même hiérarchie que celle obtenue avec IMPACT 2002+ à l'exception des comparaisons entre

le projet de commercialisation des agrégats de verre et les deux projets d'utilisation en LET pour la catégorie Qualité des écosystèmes. La différence relative entre les scénarios d'utilisation en LET et le projet de commercialisation devient négative avec la méthode ReCiPe (plus d'impact potentiel pour le projet d'agrégat de verre) contrairement à une différence positive avec IMPACT 2002+. Cette différence s'explique par le fait que la contribution relative des impacts des gaz à effet de serre sur cet indicateur de dommage est très importante dans la méthode ReCiPe. Cette catégorie d'impact représente au moins 64 % de la contribution totale à l'indicateur Qualité des écosystèmes. Étant donné que la méthode IMPACT 2002+ présentait déjà une différence négative entre le projet de commercialisation et les projets d'utilisation en LET pour l'indicateur Changements climatiques, cette différence se reflète maintenant dans la catégorie Qualité des écosystèmes. Les tendances différentes observées ne sont donc pas contradictoires, mais illustrent simplement la différence dans la méthodologie utilisée par les deux méthodes pour regrouper les indicateurs d'impacts en indicateurs de dommages.

Globalement, l'analyse de sensibilité avec la méthode ReCiPe (H/A) confirme les résultats. Leur robustesse est jugée élevée, puisque le choix de la méthode ne semble pas modifier de façon importante les conclusions lors de la comparaison des scénarios étudiés.

3.7.13 Analyse qualitative des autres données jugées de qualité moindre

La section 3.5 a identifié une liste de données dont la qualité a été jugée suffisante pour atteindre les objectifs de l'étude, mais qui pourrait être améliorée à l'aide de données plus spécifiques. Une partie de ces données ont été testées en analyse de sensibilité dans les sections précédentes. Cette section vise à couvrir, à l'aide d'une discussion qualitative, l'impact potentiel sur les résultats d'une variation des données non traitées dans les analyses de sensibilité.

Quantité de matières premières pour la production de laine de verre

La donnée pour les matières premières entrantes dans la fabrication de la laine de verre provient du processus ecoinvent *Glass wool mat, at plant/CH* qui a été adapté pour les différents teneurs en verre recyclé modélisées. Bien que ce processus est considéré comme vieux selon les standards d'ecoinvent (1995) et mériterait d'être mis à jour, il est jugé que l'influence d'un changement serait faible pour les deux raisons suivantes :

- les matières premières ne sont pas les principaux contributeurs aux impacts potentiels de ce processus, qui est dominé par la consommation d'électricité.
- Une part importante des matières premières sont utilisées autant pour la laine de verre vierge que celle fabriquée avec du verre recyclé et ce, souvent dans les mêmes proportions. Cela limite donc le potentiel de cette donnée à modifier les conclusions comparatives de l'étude.

Production de ciment Portland au Québec

La donnée de production du ciment est basée sur la donnée de la base de données ecoinvent *Portland cement, strength class Z 42.5, at plant/CH* adaptée pour le contexte géographique québécois (électricité). Cette donnée a une contribution extrêmement importante pour les scénarios d'enfouissement et des projets d'utilisation en LET qui sont comparés au scénario Poudre de verre.

Malgré cette contribution importante, cette donnée n'est pas très sensible. Comme le démontre les analyses d'incertitudes à l'Annexe C, même si l'impact du ciment Portland était divisé par deux (ce qui revient essentiellement à diminuer de moitié l'impact des scénarios enfouissement et projets d'utilisation en LET), la majorité des conclusions ne serait pas affectée, même en considérant les seuils de significativité. De plus, il est peu probable que la donnée utilisée dans cette étude surestime par un facteur 2 les impacts du ciment.

Production d'agrégat de calcaire au Québec, produit substitué par l'agrégat de verre

La production des agrégats de calcaire au Québec, utilisés dans la production de béton, a été modélisée à l'aide du processus ecoinvent *limestone, milled, loose, at plant/kg/CH* adapté au contexte québécois (électricité). Cette donnée est un contributeur non négligeable pour les scénarios d'enfouissement et les projets d'utilisation en LET qui sont comparés au scénario Agrégat de verre. De plus, plusieurs résultats pour ce projet de commercialisation sont à la limite des seuils de significativité incluant les indicateurs Changements climatiques, Santé humaine et Qualité des écosystèmes. Étant donné l'absence de données spécifiques au contexte québécois, il est difficile de juger de la variabilité de cette donnée, mais une comparaison avec des données de nature similaires (sable et gravier) montre une variabilité potentiellement importante. Dans ce contexte, l'amélioration de cette donnée devrait être une priorité pour les futures itérations de cette étude.

Opérations de recouvrement et de remblayage et propriétés des matériaux (sable, pierre et verre concassé)

Les données pour les opérations de recouvrement et de remblayage sont basées sur une estimation d'expert, non validée par des données spécifiques. Elles sont donc effectivement de qualité plus faible que la majorité des autres données. Cependant, ces données ne sont pas jugées sensibles, car il est très probable que ces impacts soient identiques pour tous les scénarios à l'étude. En effet, il n'y a pas de raison de croire que les opérations de recouvrement et de remblayage avec du verre récupéré soient différentes de celles avec les matériaux de substitution (gravier et sable).

Pour leur part, les propriétés des matériaux pourraient affecter la quantité de matière substituée par quantité de verre récupéré. Cependant, pour la grande majorité des scénarios étudiés (en particulier ceux touchant les projets de commercialisation de bouteilles, de laine de verre et de poudre de verre), ces processus sont généralement négligeables. La seule exception étant le projet de commercialisation d'agrégat de verre, mais le potentiel de modification des conclusions apparaît bien moindre que celui associé au processus de production d'agrégat de calcaire.

3.8 Analyses de cohérence et de complétude

Les systèmes évalués dans le cadre de cette étude ont été représentés de manière conforme à la définition des objectifs et du champ de l'étude. Les hypothèses, les règles de coupures et d'extension des frontières ont été appliquées de façon similaire et cohérente à l'ensemble des scénarios étudiés et comparés. L'utilisation de données issues de sources variables, et dont la qualité peut être différente d'une filière de gestion de fin de vie à l'autre, peut influencer la représentativité technologique,

temporelle et géographique des processus modélisés. Ainsi, afin de maximiser l'uniformité et la cohérence des données utilisées, un effort a été effectué afin d'adapter la base de données ICV aux contextes québécois et nord-américain, notamment en ce qui a trait au mélange d'approvisionnement énergétique. Par ailleurs, pour un processus sans équivalent exact dans la base de données, l'utilisation de données substitutives (*proxy*) a été documentée. Parmi les paramètres qui présentaient une certaine incertitude, comme les frontières de l'étude ou la performance des scénarios, des analyses de sensibilité ont été réalisées et ont permis de bien délimiter les conditions pour lesquelles les conclusions principales demeurent valides. Les limites liées aux variabilités des données ont également été discutées. Par conséquent, la cohérence dans la modélisation des systèmes à l'étude est jugée suffisante pour atteindre les objectifs fixés.

La complétude de l'étude est également jugée adéquate par rapport à ses objectifs. Des processus ont été exclus des frontières seulement lorsqu'ils étaient équivalents entre les systèmes comparés. Sur la base des règles de coupure utilisées dans cette étude, aucun processus d'avant-plan ou donnée primaire n'a été exclu de la modélisation. Seuls les critères de coupure qui s'appliquent aux processus de la base de données *ecoinvent v2.2* ont été utilisés sur les données secondaires (voir section 2.5 pour le détail). Par conséquent, il est considéré qu'aucune donnée avec une contribution estimée supérieure aux règles de coupure n'était manquante dans cette étude. Par ailleurs, pour les données manquantes (par ex. la fabrication de la laine de verre), une analyse de sensibilité a été effectuée afin de vérifier l'influence des hypothèses et des estimations employées.

Ce rapport d'étude a été documenté suivant les meilleures pratiques disponibles et de façon à assurer la reproductibilité des résultats. L'ensemble des sources de données et les hypothèses employées sont détaillés à l'Annexe A.

3.9 Applications et limites

Cette ACV vise à évaluer différents projets de commercialisation du verre récupéré au Québec afin d'évaluer les impacts environnementaux potentiels selon cinq indicateurs, soit Changements climatiques, Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Ressources et Eau prélevée. Quatre projets sont analysés et comparés à trois filières de gestion de fin de vie alternatives : 1) l'enfouissement du verre; 2) l'utilisation du verre comme matériau pour le recouvrement journalier des LET et 3) l'utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès des LET. Les quatre projets de commercialisation évalués de manière distincte sont l'utilisation du verre pour la production de :

- Bouteilles de verre à contenu recyclé
- Laine de verre à contenu recyclé
- Poudre de verre, utilisée comme ajout cimentaire
- Agrégat de verre, utilisé comme agrégat calcaire

Toutes conclusions pouvant être tirées de l'étude hors de son contexte original doivent être évitées.

Les résultats peuvent être utilisés pour :

- Mesurer la performance environnementale des différentes filières de gestion de fin de vie du verre issu de la collecte sélective au Québec;
- Hiérarchiser chacun des projets de commercialisation individuellement, selon l'importance de leurs impacts et bénéfices environnementaux potentiels, par rapport aux trois filières de gestion de fin de vie alternatives et ce, sans pour autant comparer la performance des quatre projets entre eux;
- Communiquer sur les bénéfices environnementaux potentiels (lorsque applicables) des projets de commercialisation du verre récupéré via les centres de tri québécois par rapport à son enfouissement ou aux projets d'utilisation en LET;
- Orienter les travaux du Comité conjoint sur les matières recyclables de la collecte sélective¹ dans le secteur du recyclage du verre;
- Identifier les paramètres, dont les distances de transport, qui influencent la performance environnementale de chacune des filières de gestion de fin de vie.

Les principales limites pouvant cependant être soulevées concernent :

- Les frontières de l'étude, dans la mesure où les étapes relatives au centre de tri, à l'utilisation et à la fin de vie des produits issus des projets de commercialisation sont exclues. Les conclusions portent ainsi sur la comparaison des filières de gestion de fin de vie uniquement et ne permettent pas de comparer des produits finis entre eux.
- La nature spécifique des technologies de valorisation évaluées, soit les projets de commercialisation et d'utilisation en LET. Les résultats sont valides pour les conditions et les hypothèses décrites pour chacun des systèmes, puisque certains (poudre et agrégat de verre) ne sont pas pleinement commercialisés et font l'objet de projets pilotes afin d'en tester la faisabilité technique. Ces résultats sont valides en supposant que les performances techniques des produits finis et de leurs équivalents sont similaires.
- Le choix et les hypothèses émises quant à la matière ou au produit évité par les projets de commercialisation et d'utilisation en LET du verre. Les résultats obtenus sont valides pour le produit substitué mentionné et supposant une performance technique équivalente. Une comparaison exhaustive des différents produits évités par le verre mixte devrait être réalisée pour chacun des projets de commercialisation et des projets d'utilisation en LET afin de dresser un portrait plus complet.
- La complétude et la validité des données d'inventaire. Plus particulièrement :
 - l'utilisation de données secondaires provenant de bases de données ACV européennes qui peut influencer la validité des résultats pour un contexte d'étude québécois.
 - l'utilisation d'hypothèse et d'estimations quant à la production de la laine de verre, des distances de transport utilisées, des opérations de recouvrement journalier en LET et de remblai dans la sous-fondation des chemins d'accès de LET.

¹ Plan d'action disponible au lien : http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Plan_action_2012_2015_Comite_conjoint_VersionFinale.pdf

- La faible qualité et les incohérences sur les données « eau » dans la base de données *ecoinvent*, ainsi que l'absence d'information sur l'incertitude de ces données : ces faits exigent de considérer avec précautions les résultats de l'indicateur Eau prélevée.

Les ÉICV ne devraient pas constituer la seule base pour supporter une affirmation comparative sur la supériorité environnementale globale ou l'équivalence entre des systèmes. Des informations supplémentaires seront nécessaires pour remédier à certaines des limitations propres à l'ÉICV. Les choix de valeurs, l'exclusion des informations spatiales et temporelles, de seuil et de réaction dose-effet, l'approche relative et la variation de la précision parmi les catégories d'impacts sont des exemples de ces limitations.

Il convient enfin de rappeler que les résultats de l'ACV sont des expressions relatives et ne prédisent pas des impacts réels sur les milieux récepteurs, le dépassement des normes, les marges de sécurité ou les risques. De plus, l'analyse comparative effectuée ne prend pas en compte les considérations économiques ou sociales relatives au contexte de l'étude. Les conclusions ne peuvent donc être tirées que sur l'aspect environnemental.

3.10 Résumé des résultats et recommandations

À la lumière des résultats de l'ACV et celles des analyses de sensibilité, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- **Maximiser l'utilisation du verre récupéré plutôt que de l'enfouir.** Dans le contexte de l'étude, les projets de commercialisation du verre mixte issu des centres de tri québécois montrent une meilleure performance environnementale ou ne présentent pas de différence significative par rapport à l'enfouissement (scénario 1) et aux projets d'utilisation en LET (matériau de recouvrement journalier (scénario 2) ou matériau de remblai dans la sous-fondation des chemins d'accès (scénarios 3)) et ce, pour chacun des cinq indicateurs étudiés. La seule exception étant le projet de commercialisation des agrégats de verre, qui montre des résultats plutôt défavorables pour les indicateurs Santé humaine (toxicité) et Eau prélevée. De même, les projets d'utilisation en LET sont préférables à l'enfouissement du verre pour les cinq indicateurs évalués. Les filières de gestion de fin de vie par l'utilisation du verre et sa valorisation (projets de commercialisation et projets d'utilisation en LET) sont avantageuses dans la mesure où elles permettent d'éviter l'utilisation de matière (vierge ou un autre produit de fonction équivalente qu'elle substitue) ayant un impact environnemental plus important. Plus les produits substitués génèrent des impacts potentiels élevés, plus les bénéfices environnementaux de la valorisation du verre deviennent intéressants. De manière plus spécifique :
 - Le projet de commercialisation impliquant la production de bouteilles de verre à contenu recyclé (scénario 4.1) a un impact environnemental potentiel inférieur à celui de l'enfouissement et des projets d'utilisation en LET. La différence est très significative pour les indicateurs Changements climatiques et Ressources, moins significative pour l'indicateur Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation), et non concluante pour les indicateurs Santé humaine (effets respiratoires et toxicité) et Qualité des écosystèmes (toxicité).

- Le projet de commercialisation impliquant la production de laine de verre à contenu recyclé (scénario 4.2) indique de façon légèrement significative une performance environnementale plus élevée que celle de l'enfouissement et des projets d'utilisation en LET (Changements climatiques et Ressources) ou non concluante (Qualité des écosystèmes et Santé humaine).
 - Le projet de commercialisation impliquant la production de poudre de verre (scénario 4.3) présente une performance environnementale très ou légèrement significativement supérieure à celle de l'enfouissement et des projets d'utilisation en LET pour chacun des indicateurs étudiés (Changements climatiques, Ressources, Qualité des écosystèmes et Santé humaine).
 - Le projet de commercialisation impliquant la production d'agrégat de verre (scénario 4.4) a un impact environnemental potentiel inférieur de façon légèrement ou très significative à celui de l'enfouissement et des projets d'utilisation en LET pour les indicateurs Ressources, Qualité des écosystèmes et Santé humaine (effets respiratoires). Le résultat est inférieur, mais de façon légèrement significative pour l'indicateur Santé humaine (toxicité). Pour l'indicateur Changements climatiques, ce projet offre une performance environnementale très significativement plus élevée que celle de l'enfouissement et non concluante par rapport aux projets d'utilisation en LET.
- **Prendre en compte les distances de transport dans le développement d'un projet de production d'agrégat de verre.** Comme démontré dans les résultats, l'étape du transport n'est pas un contributeur environnemental important pour la majorité des scénarios évalués. Ainsi, les distances pour lesquelles il faudrait transporter le verre récupéré pour modifier (voire inverser) les résultats pour l'indicateur Changements climatiques ne sont généralement pas réalistes à l'échelle du Québec. :
 - Même si l'enfouissement pouvait s'effectuer à proximité du centre de tri (distance de moins de 1 km, évitant ainsi le transport jusqu'au lieu d'enfouissement), les quatre projets de commercialisation demeureraient très significativement favorables et présenteraient des bénéfices pour l'indicateur Changements climatiques variant de 7 à 97 %.
 - Si le conditionneur de verre devait être situé à plus de 2 200 km du centre de tri, les bénéfices du projet de commercialisation impliquant la production de bouteilles de verre recyclé ne seraient plus concluants par rapport à enfouir le verre. Il en est de même pour les projets d'utilisation en LET pour une distance de plus de 2 000 km. La distance probable entre les centres de tri québécois et le lieu de conditionnement varie entre 10 et 1 410 km et la distance évaluée entre le lieu de conditionnement et l'usine de fabrication est de 37 km.
 - Dans le cas du projet de commercialisation impliquant la production de laine de verre recyclé, si le conditionneur de verre devait être situé à plus de 2 170 km du centre de tri, les réductions d'impacts potentiels de ce scénario par rapport à enfouir le verre ne seraient plus basées sur des résultats concluants. Il en est de même pour les projets d'utilisation en LET pour une distance de plus de 2 100 km. La distance probable entre les centres de tri québécois et le lieu de conditionnement varie de 10 à 1 410 km et la distance estimée entre le lieu de conditionnement et l'usine de fabrication située aux États-Unis est de 550 km.

- Si l'usine de fabrication de laine de verre opérant aux États-Unis devait être située à plus de 2 500 km de l'usine de conditionnement du verre (Québec), il ne serait plus possible de conclure par rapport aux scénarios d'enfouissement et de projets d'utilisation en LET.
- Si une usine de fabrication de laine de verre à contenu recyclé s'implantait au Québec, la distance d'approvisionnement en calcin produit au Québec devrait être inférieure à 1 750 km. Sinon, l'enfouissement ou les projets d'utilisation en LET seraient préférables de manière très significative.
- Pour que les bénéfices de la valorisation par la production de poudre de verre ne soient plus concluants par rapport à l'enfouissement et aux projets d'utilisation en LET, il faudrait un parcours en camion entre le centre de tri et l'usine de micronisation de 8 950 km (utilisation en LET) ou de 9 100 km (enfouissement).
- Si l'usine de concassage du verre devait être située à plus de 115 km du centre de tri, le projet de valorisation impliquant la production d'agrégat de verre pourrait devenir moins favorable de manière très significative par rapport aux projets d'utilisation en LET. Il en est de même pour une distance de plus de 300 km pour l'enfouissement.
- **Favoriser les projets de commercialisation pour les produits ayant un impact environnemental élevé.** Les bénéfices environnementaux sont plus intéressants lorsqu'une filière de valorisation du verre (projet de commercialisation ou d'utilisation en LET) permet d'éviter la production ou l'utilisation d'une matière ou d'un produit qui génèrent des impacts potentiels significatifs. Afin de maximiser les bénéfices environnementaux de la valorisation du gisement actuel de verre récupéré, il est nécessaire d'identifier les produits ou matières qui peuvent être substitués ou qui pourront être éventuellement substitués et dont les impacts environnementaux de leur production sont les plus élevés.
- **Favoriser le développement des filières de valorisation du verre.** Les résultats montrent que dans la presque totalité des cas, il est toujours mieux de valoriser que d'enfouir le verre. Par conséquent, d'un point de vue environnemental, il serait recommandé de mettre en place les projets de commercialisation à l'étude et de considérer d'autres débouchés possibles pour la valorisation du verre.
- **Améliorer la qualité de certaines données.** Certains processus ayant une contribution significative aux impacts potentiels des systèmes évalués ont été modélisés au moyen de sources de données secondaires ou encore génériques. La qualité de telles données, bien que jugée suffisante pour atteindre les objectifs de l'étude, pourrait être améliorée à l'aide d'une recherche plus approfondie ou d'une collecte de données plus spécifique auprès des intervenants concernés.

Les principales données à améliorer afin d'assurer la robustesse des résultats sont les suivantes par étape du cycle de vie ou processus :

- Étape de conditionnement du verre récupéré :
 - Consommation énergétique (gaz naturel)
 - Taux de rejets

- Production de la laine de verre
 - Consommation énergétique pour la fusion et hors fusion (électricité et gaz naturel)
 - Quantité de matières premières
- Production de ciment Portland au Québec
- Production d'agrégat calcaire au Québec, produit substitué par l'agrégat de verre
- Projets d'utilisation en LET
 - Opérations de recouvrement et de remblayage
 - Propriétés des matériaux (sable, pierre et verre concassé)

4 Conclusion

Cette étude d'analyse du cycle de vie (ACV) de différentes filières de gestion de fin de vie du verre mixte récupéré via des centres de tri de matières recyclables au Québec a permis de répondre à l'objectif principal visé par l'étude, soit d'évaluer les impacts environnementaux potentiels associés à quatre projets de commercialisation du verre récupéré et de les comparer à trois filières de gestion de fin de vie alternatives, dont l'enfouissement et deux projets d'utilisation en LET.

Plus particulièrement, cette étude a permis de:

- Mesurer la performance environnementale des systèmes définis par le cycle de vie de chacune des filières de gestion de fin de vie;
- Hiérarchiser chacun des projets de commercialisation individuellement, selon l'importance de leurs bénéfices potentiels, par rapport aux trois scénarios alternatifs;
- Identifier les paramètres-clés, incluant les distances de transport, afin d'identifier des actions ou des moyens d'optimisation dans le but d'améliorer la performance des projets de commercialisation étudiés pour qu'ils représentent un choix favorable.

Les analyses comparatives effectuées ne prennent pas en compte les considérations économiques ou sociales relatives au contexte de l'étude. Les conclusions ne peuvent donc être tirées que sur l'aspect environnemental.

Globalement, dans le contexte de l'étude, l'enfouissement du verre n'est pas un contributeur important aux résultats de tous les indicateurs environnementaux étudiés. Ainsi, en raison de l'extension des frontières, les bénéfices environnementaux potentiels associés aux projets de commercialisation sont essentiellement une conséquence de la substitution de matières/produits (dont la production génère des impacts environnementaux importants) par le verre récupéré. Plus les impacts environnementaux du cycle de vie de la matière/produit substitué par l'utilisation du verre recyclé sont importants, plus les projets de commercialisation du verre récupéré offrent des bénéfices environnementaux potentiels. Le même raisonnement s'applique aux projets d'utilisation en LET.

Le choix des matières/produits substitués dépend du marché et des technologies de valorisation disponibles, ce qui peut influencer les résultats.

Pour chacun des indicateurs évalués, la valorisation à partir des projets de commercialisation du verre mixte issu des centres de tri québécois indique une performance environnementale plus élevée ou sans différence significative par rapport à l'enfouissement du verre ou son utilisation dans des projets d'utilisation en LET (matériau de recouvrement journalier ou matériau de remblai dans la sous-fondation des chemins d'accès). Seul le projet relatif à l'agrégat de verre indique une performance plutôt défavorable pour un indicateur (Santé humaine (toxicité)).

Selon l'indicateur évalué, les bénéfices environnementaux associés à chacun des projets de commercialisation sont liés à la substitution des matières/produits qu'elles permettent d'éviter, notamment :

- Le verre récupéré valorisé par la production d'une bouteille de verre à contenu recyclé substitue l'utilisation de verre 100 % vierge ou encore de calcin provenant de l'extérieur du Québec;
- Le verre récupéré valorisé par la production de laine de verre isolante à contenu recyclé substitue l'utilisation du verre 100 % vierge;
- Le verre récupéré micronisé pour la production de poudre de verre utilisée comme ajout cimentaire substitue l'utilisation de ciment Portland dans du béton;
- Le verre récupéré concassé substitue l'utilisation d'agrégat calcaire conventionnel dans du béton.

Les projets d'utilisation en LET peuvent constituer un second choix intéressant dans la mesure où elles permettent de valoriser le verre récupéré et d'éviter l'utilisation de matières naturelles :

- Le verre récupéré utilisé comme matériau de recouvrement journalier substitue le sable;
- Le verre récupéré utilisé comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès permet d'éviter l'emploi du gravier.

Dans une perspective de valorisation du verre mixte issu des centres de tri québécois, son utilisation comme matière/produit dans les projets de commercialisation offre plusieurs avantages, notamment :

- Réduire les rejets de verre postconsommation en évitant leur élimination dans un LET;
- Favoriser des économies d'énergie, puisque la fonte du verre recyclé nécessite une température moins élevée que les matières premières généralement utilisées dans la fabrication du verre vierge (sable de silice, calcaire et carbonate de sodium). Ceci se traduit également par une durée de vie prolongée des fours;
- Réduire les impacts potentiels, principalement les émissions de GES et l'exploitation des ressources naturelles, liés à la production des matières premières évitées et leurs transports.

Des développements ultérieurs vers d'autres débouchés possibles pour la valorisation du verre sont à exploiter.

5 Références

- 2M Ressources (2013) Communication personnelle avec M. Marquis
- CertainTeed (2013) Environmental product declaration of Sustainable Insulation® Unfaced and Kraft Faced Batts. Disponible en ligne :
http://www.certainteed.com/resources/CertainTeed_Sustainable_Insulation_EPD.pdf (page consultée en août 2013)
- CIRAIG (2010) Analyse du cycle de vie de contenants de bière au Québec – Recyc-Québec. Disponible en ligne : <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/publications/consigne/2010/Analyse-cycle-biere-rap.pdf> (page consultée en octobre 2013)
- Container Recycling Institute (CRI) (2009) Understanding economic and environmental impacts of single-stream collection systems. Disponible en ligne : <http://www.container-recycling.org/assets/pdfs/reports/2009-SingleStream.pdf>
- Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) (2008). Diagnostic des centres de tri québécois. Disponible en ligne : <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/Diagnostic-c-tri2008.pdf>
- Dallaire M (2013) Le béton et la poudre de verre comme ajout cimentaire : un choix logique pour Équiterre et la Maison du développement durable. Formes 9 (3.13), 37. Disponible en ligne : http://www.rediscoverconcrete.ca/assets/files/sustainability/V9N3_Dossier-b%C3%A9ton.pdf (consultée en octobre 2013)
- Doka G (2007) Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Final reportecoinvent Data v2.0 No.13. Swiss Center of Life Cycle Inventories, Dübendorf
- Éco Entreprises Québec (EEQ) (2013) Calculs effectués par Éco Entreprises Québec, à partir de données utilisées dans l'analyse des coûts par activités (ACA) de 2010
- Flanagan J and Davies M (2003) Glass recycling – Life cycle carbon dioxide emissions. Sheffield: British Glass, 45p.
- Gélinas L (2012) La valorisation de la chaîne du verre. Présentation de la Société des alcools du Québec (SAQ) donnée à la conférence Écotech Québec. Disponible en ligne : <http://www.ecotechquebec.com/documents/files/Sommets/saq-sommet2012.pdf> (page consultée en octobre 2013)
- Glass Packaging Institute (GPI) (2010) Environmental Overview: Complete Life Cycle Assessment of North American Container Glass. Disponible en ligne : <http://www.gpi.org/learn-about-glass/life-cycle-assessment> (page consultée en août 2013)
- Goedkoop MJ, Heijungs R, Huijbregts M, De Schryver A, Struijs J, Van Zelm R (2009). ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition Report 1: Characterisation, 126p. Disponible en ligne : <http://www.lcia-recipe.net/>

- HDR Inc. (2012) An Assessment of Single and Dual Stream Recycling: Including Current Program Performance in Large Ontario Municipalities (Updated March 4, 2013). Étude pour *Waste Diversion Ontario et Continuous Improvement Fund Office*. Disponible en ligne: http://cif.wdo.ca/projects/documents/716-Final_Report-REV.pdf
- Holcim (2013) Communication personnelle avec des responsables chez Holcim
- Humbert S, Rossi V, Margni M, Jolliet O and Loerincik Y (2009) Life cycle assessment of two baby food packaging alternatives: glass jars vs. plastic pots. *Int J of LCA*, 14(2), 95-106
- Humbert S, De Schryver A, Margni M and Jolliet O (2012). "IMPACT 2002+ User Guide: Draft for version Q2.2 (version adapted by Quantis)". Quantis, Lausanne, Switzerland. Available at: <http://www.quantis-intl.com/impact2002> or sebastien.humbert@quantis-intl.com.
- Idir R, Cyr M, Tagnit-Hamou A (2010). Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons ? Étude des propriétés des bétons de verre. *Verre*, vol 16 no.5/6, pp.70-77
- ISO 14040 (2006). Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre
- ISO 14044 (2006). Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices
- Jansen Industries (2013). Une première mondiale : un mur antibruit fabriqué avec de la poudre de verre récupéré! Disponible en ligne : <http://www.jansenindustrie.com/une-premiere-mondiale-un-mur-antibruit-fabrique-avec-de-la-poudre-de-verre-recupere/>
- Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G and Rosenbaum R (2003). IMPACT 2002+ : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *Int J Life Cycle Assess* 8(6), 324-330
- Kellenberger D, Althaus HJ, Jungbluth N, Künniger T, Lehmann M and Thalmann P (2007) Life Cycle Inventories of Building Products. Final reportecoinvent Data v2.0 No.7. Swiss Center of Life Cycle Inventories, Dübendorf
- Klareco (2013) Communication personnelle avec des anciens responsables chez Klareco
- Lachance Tremblay E, Vaillancourt M, Meunier M (2014) Incorporation du verre de postconsommation dans les chaussées en enrobé bitumineux (Avant-projet). *Via Bitume*, vol 9 no.1, pp.14-17
- Lippiatt B (2007) BEES 4.0: Building for Environmental and Economic Sustainability -Technical Manual and User Guide, NISTIR 7423, National Institute of Standards and Technology. Disponible en ligne: http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=860108 (page consultée en octobre 2013)http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=860108
- Lupien C (2006) Projet pilote de valorisation du verre récupéré (non forme pour le conditionnement) dans la construction de chaussées, rapport produit pour RECYC-Québec. Disponible en ligne: http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/MICI/ProjetP_ValoVerre.pdf (page consultée en août 2013)

- Maison du développement durable (2013) Parcours d'interprétation du bâtiment. Site web : <http://www.maisondeveloppementdurable.org/services/parcours-dinterpretation-batiment> (page consultée en octobre 2013)
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) (2006) Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles. Disponible en ligne : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R19.HTM (page consultée en octobre 2013)
- Owens Corning (2012) Environmental product declaration of EcoTouch® Unfaced Insulation. Disponible en ligne : <http://insulation.owenscorning.com/professionals/insulation/products/r-30-fiberglas-insulation/> (page consultée en août 2013)
- Owens-Illinois (2013) Communication personnelle et visite d'usine située à Montréal
- Pavement Interactive (2012) Coarse Aggregate Specific Gravity Disponible en ligne : <http://www.pavementinteractive.org/article/coarse-aggregate-specific-gravity/> (page consultée en décembre 2013)
- Pellegrino JL, Sousa L, Levine E (2002) Energy and Environmental Profile of the US Glass Industry. Columbia (US), Energetics, prepared for the US Department of Energy – Office of Industrial Technologies, 108 p
- Portland Cement Association (PCA) (2013) Données de la masse volumique, Disponible en ligne : http://www.cement.org/tech/faq_unit_weights.asp (page consultée en octobre 2013)
- RECYC-QUÉBEC(2013) Calculs effectués par Recyc-Québec, à partir de données utilisées dans l'analyse des coûts par activités (ACA) 2010
- SAQ (2008) Bilan environnemental 2008 – Vert le bon goût. Disponible en ligne : <http://www.saq.com/content/SAQ/fr/a-propos/responsabilite-societale/developpement-durable/documents.html>
- SAQ (2013) Bilan de développement durable 2012-2013. Disponible en ligne : <http://s7d9.scene7.com/is/content/SAQ/bilan-developpement-durable-2013-fr> (page consultée en octobre 2013)
- SAQ (2014) Débouchés commerciaux. Disponible en ligne : <http://www.saq.com/content/SAQ/fr/a-propos/responsabilite-societale/valorisation-du-verre/actions-saq-debouches-commerciaux-verre.html>
- Swiss Centre for Life Cycle Inventories (SCLCI) (2010) ecoinvent database v2.2. <http://www.ecoinvent.org/home>
- Tagnit-Hamou A (2013) Communication personnelle
- Tagnit-Hamou A and Bengougam T (2012) The Use of Glass Powder as Supplementary Cementitious Material: Field trials in slab, wall, and sidewalk concrete mixtures. Concrete International 34 (3), 56-61

Tricentris (2010) Certification LEED® Canada Or au centre de tri des matières recyclables de Terrebonne.

Disponible en ligne : <http://www.tricentris.com/uploads/File/Livret-LEED.pdf>

Tricentris (2013a) Usine de micronisation du verre. Disponible en ligne:

<http://www.tricentris.com/Initiatives/Projets/Micronisation-du-verre> (page consultée en octobre 2013)

Tricentris (2013b) Communication personnelle et collecte de données auprès de responsables chez Tricentris

Ville de Montréal (2013) Des bouteilles de verre qui se transforment en trottoir. Vidéo en ligne :

http://www.youtube.com/watch?v=LLpBxhfPQUo&list=TLpNllyH_EVuWwH-Xs8sWRkbf1rn5cD8Ly

WRAP (2013) Understanding recycled content in glass: a guide for packaging and product decision makers. Disponible en ligne : <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/understanding-recycled-content-in-glass.pdf>

Annexe A : Frontières, données et hypothèses

Les figures suivantes illustrent de manière plus détaillée les frontières de chacune des filières de fin de vie.

Les données et les hypothèses sont présentées dans le fichier :
RecycQc_ACV Verre_Annexe A_2015-03-04_Final.xls

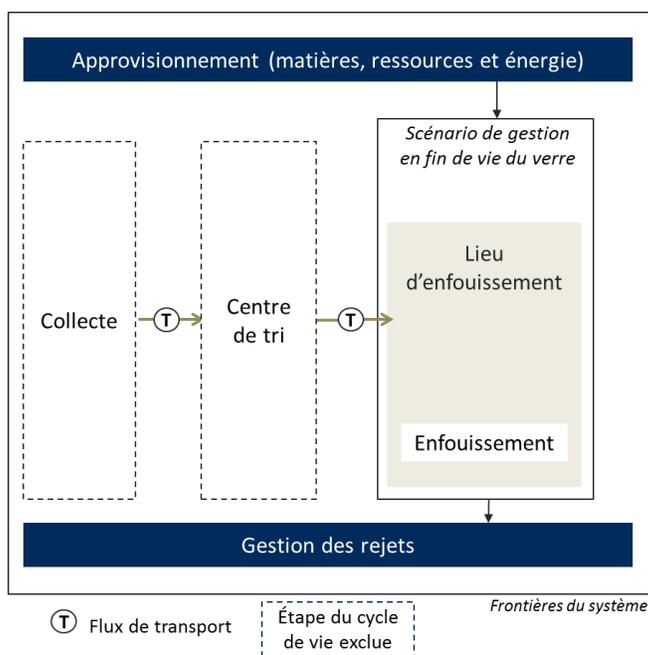


Figure A- 1 : Frontières du système de l'enfouissement du verre.

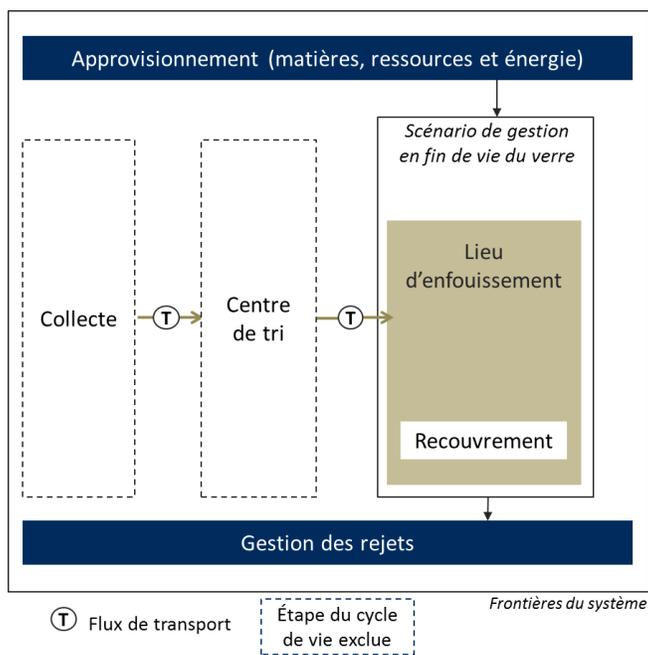


Figure A- 2: Frontières du système pour l'utilisation du verre comme matériau pour recouvrement journalier.

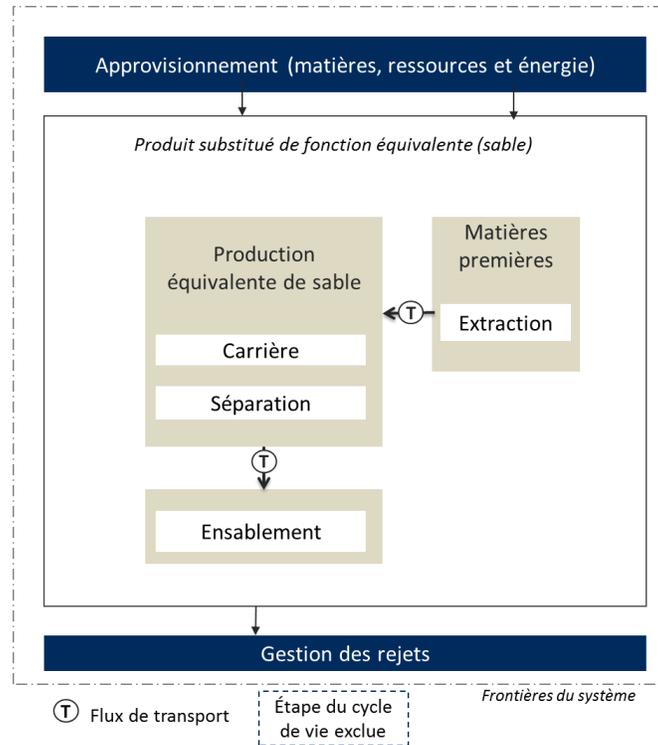


Figure A- 3: Frontières du système pour la production de sable (extension des frontières – substitut pour le matériau de recouvrement journalier).

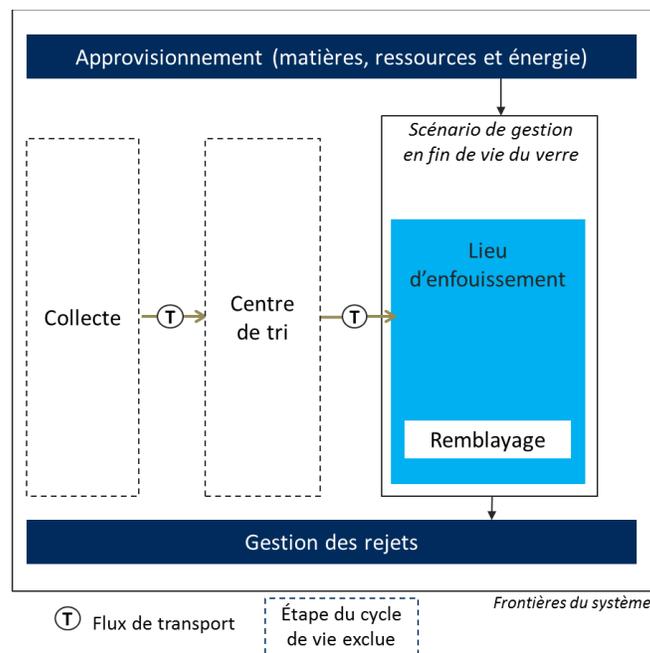


Figure A- 4: Frontières du système pour l'utilisation du verre par comme matériau de sous-fondation pour les chemins d'accès des LET.

Analyse environnementale du cycle de vie de projets de commercialisation du verre mixte récupéré via des centres de tri de matières recyclables au Québec

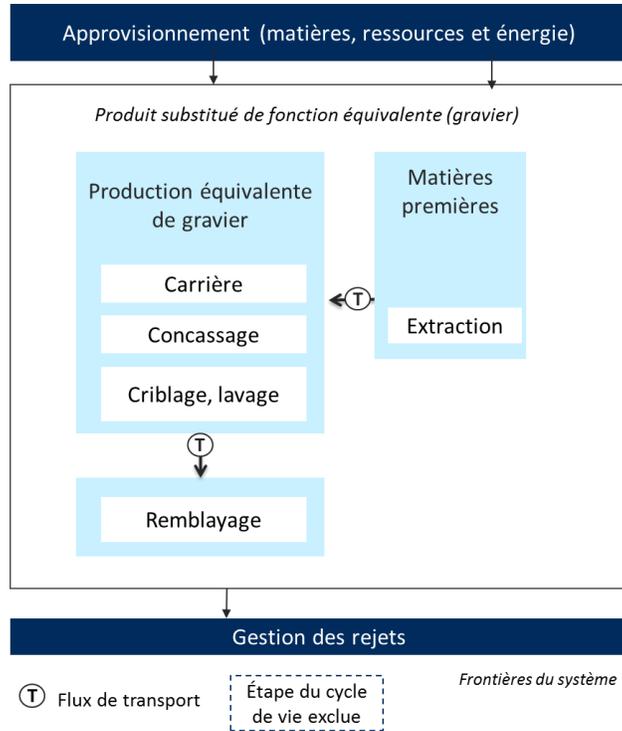


Figure A- 5: Frontières du système pour la production de gravier (extension des frontières – substitut pour le matériau de sous-fondation).

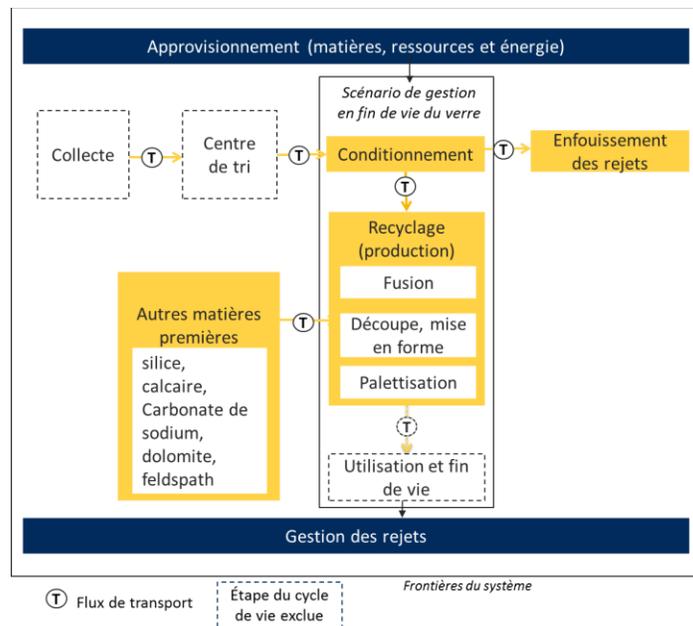


Figure A- 6: Frontières du système pour l'utilisation du verre pour la production de bouteille de verre à contenu recyclé.

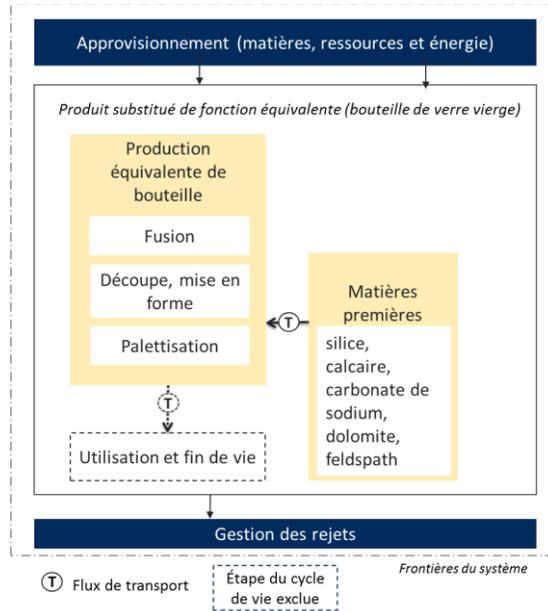


Figure A- 7: Frontières du système pour la production de bouteille de verre vierge (extension des frontières – substitut pour la production de bouteille à contenu recyclé).

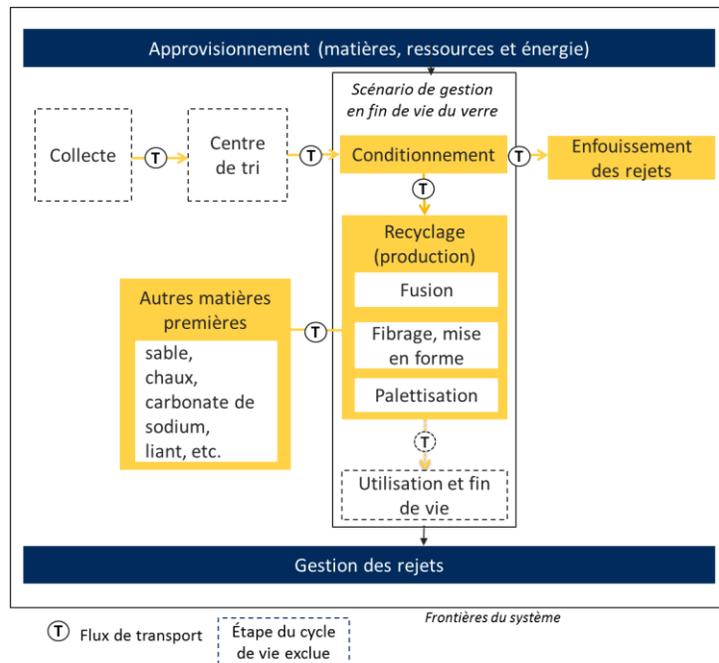


Figure A- 8: Frontières du système pour l'utilisation du verre pour la production de laine de verre à contenu recyclé.

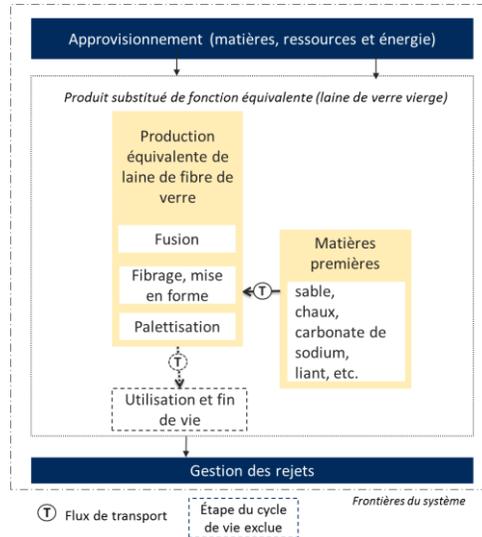


Figure A- 9: Frontières du système pour la production de laine de verre vierge (extension des frontières – substitut pour la production de laine de verre à contenu recyclé).

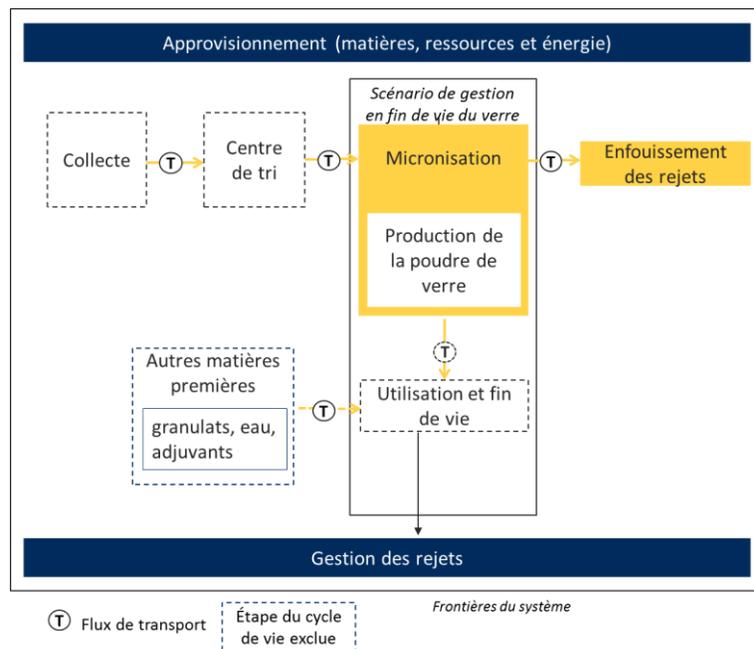


Figure A- 10: Frontières du système pour l'utilisation du verre pour la production de poudre de verre.

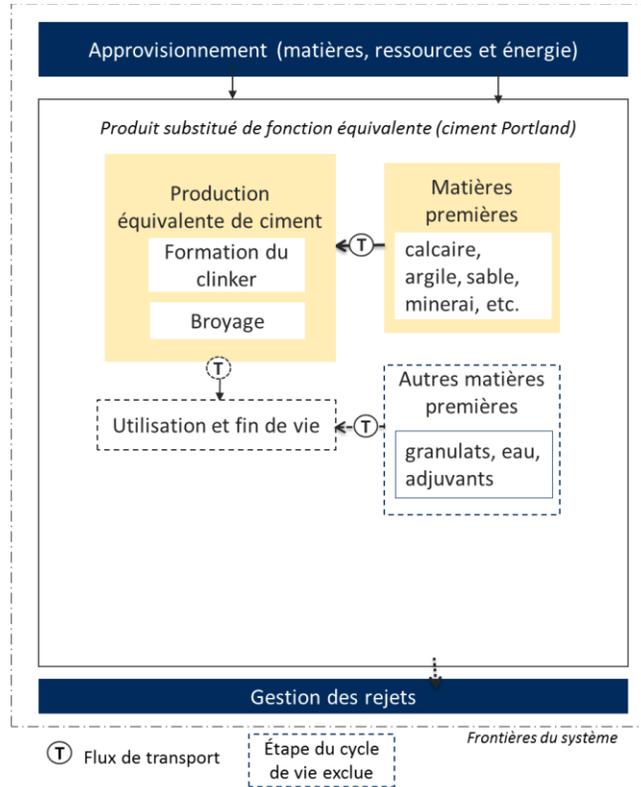


Figure A- 11: Frontières du système pour la production de ciment Portland (extension des frontières – substitut pour la production de poudre de verre).

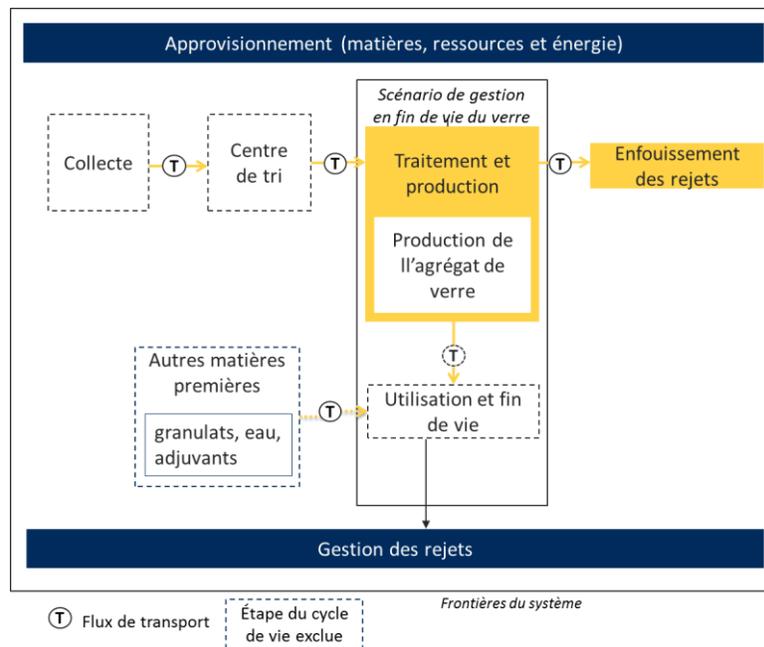


Figure A- 12: Frontières du système pour l'utilisation du verre pour la production d'agrégat de verre.

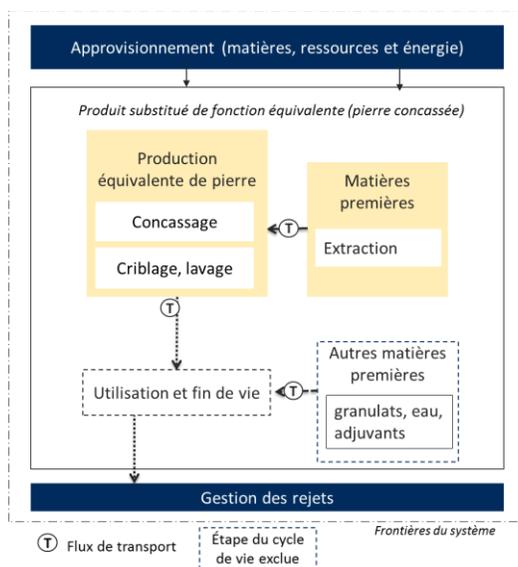


Figure A- 13: Frontières du système pour la production de pierre concassé (extension des frontières – substitut pour la production d’agrégat de verre).

Annexe B :
Méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV)

L'Analyse du cycle de vie environnementale

L'analyse du cycle de vie (ACV), ou écobilan est une méthode scientifique permettant l'évaluation des impacts environnementaux potentiels de produits, de procédés, de services ou d'entreprises sur l'ensemble de leur cycle de vie (extraction des matières premières, production, transports, utilisation, fin de vie). Cette approche bénéficie du soutien du Programme des Nations Unies pour la Protection de l'Environnement (PNUE) et repose sur une méthodologie encadrée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), en particulier les normes ISO 14040 (2006) (conditions et guidances) et ISO 14044 (2006) (principes et structure).

L'ACV aide à identifier les opportunités pour améliorer les performances environnementales des produits, services ou entreprises à différentes étapes de leur cycle de vie, informer les décideurs industriels, les organisations gouvernementales ou non gouvernementales (par exemple pour la planification stratégique, pour déterminer des priorités ou pour optimiser le design des produits), permettre la sélection des indicateurs de performance environnementale pertinents, l'incorporation de techniques de mesure, et le marketing (par exemple pour la mise en place de schéma d'écolabel, faire ou produire une déclaration environnementale). La méthodologie de l'ACV est donc particulièrement adéquate pour étudier les produits et les services de façon holistique. Elle permet d'identifier les priorités d'action et d'éviter un déplacement des impacts lors de l'introduction d'un nouveau produit ou d'une nouvelle technologie.



Figure A-1 : Étapes du cycle de vie d'un produit.

L'ACV se déroule en quatre phases :

- 1) la définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- 2) l'analyse de l'inventaire ;
- 3) l'évaluation des impacts ;
- 4) l'interprétation.

Les principaux aspects méthodologiques de chacune de ces phases sont décrits ci-dessous.

Définition des objectifs et du champ de l'étude

La première phase de l'ACV, appelée définition des objectifs et du champ de l'étude, présente la raison de l'étude et la façon dont celle-ci sera conduite afin d'atteindre cette fin. Le système de produits, défini par l'ISO comme un ensemble de processus élémentaires liés par des flux de matière et d'énergie qui remplissent une ou plusieurs fonctions y est décrit et détaillé.

Dans ce sens, l'objet d'une ACV est caractérisé par ses fonctions et non seulement en termes de ses produits finaux. Ceci permet la comparaison de produits qui n'ont pas la même performance fonctionnelle par unité de produit (p. ex. une tasse de polystyrène à usage unique et une tasse en céramique qui est réutilisée plusieurs fois), puisque la quantification de la performance fonctionnelle, au moyen de l'unité fonctionnelle, fournit une référence à partir de laquelle sont mathématiquement normalisés les entrants et les sortants des systèmes comparés (p. ex. boire deux tasses de café par jour durant un an). La spécification de l'unité fonctionnelle est le point de départ de la définition des frontières du système de produits puisqu'elle indique quels sont les processus élémentaires qui doivent être inclus pour remplir cette fonction.

La nature des données utilisées et les principales hypothèses sont également décrites dans cette première phase de l'ACV.

Analyse de l'inventaire

La seconde phase de l'ACV, appelée l'analyse de l'inventaire du cycle de vie (ICV), est la quantification des flux élémentaires impliqués durant le cycle de vie complet des produits, services, procédés ou entreprises évalués, c'est-à-dire de l'ensemble des extractions de ressources de la biosphère et des émissions dans l'air, l'eau et le sol.

Pour ce faire, une collecte de données primaires (spécifiques au cas à l'étude) et secondaires (issues de publications ou de bases de données reconnues) est nécessaire. Les données sont rapportées à l'unité fonctionnelle, puis compilées au sein d'un logiciel spécialisé. Le logiciel employé dans le cadre de cette étude est Quantis Suite 2.0. v.2011.

Évaluation des impacts

La troisième phase de l'ACV consiste en l'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV). Elle a pour but de traduire les flux élémentaires quantifiés dans l'inventaire du cycle de vie dans différentes catégories d'impact sur l'environnement et la santé humaine, selon des modèles de devenir, d'exposition et de

toxicité des polluants, ou de raréfaction des ressources. C'est ainsi qu'à chaque substance de l'inventaire est associé un facteur de caractérisation spécifique, permettant de calculer son score d'impact. La somme des scores d'impact des différentes substances détermine l'impact total du système pour un indicateur donné. Dans un second temps, ces catégories d'impact sont regroupées au sein d'un nombre réduit d'indicateurs de dommages environnementaux, ce qui facilite la communication des résultats et la prise de décision.

Dans le cadre de cette étude, la méthode d'EICV employée est la méthode européenne internationalement reconnue et revue par les pairs IMPACT 2002+ (vQ2.2) (Jolliet *et al.*, 2003 mise à jour par Quantis¹). Celle-ci propose une approche orientée à la fois vers les impacts intermédiaires et les dommages permettant d'associer tous les résultats de l'ICV à quatorze catégories intermédiaires et à quatre indicateurs de dommage. La Figure A-2 montre la structure globale d'IMPACT 2002+, faisant le lien entre l'ICV et les différents indicateurs. Une flèche pleine symbolise une relation connue et modélisée quantitativement basée sur les sciences naturelles. Les relations entre les catégories intermédiaires et de dommages qui sont suspectées, mais pas modélisées de manière quantitative sont indiquées par des flèches en traitsillés.



Figure A-2 : Schéma global de la méthode IMPACT 2002+ v.Q.2.2 (Jolliet et al. 2003 mise à jour par Humbert et al. (2011)).

La liste suivante décrit de manière succincte les différentes catégories intermédiaires de la méthode IMPACT 2002+ vQ2.2.

1. Toxicité humaine :

¹ www.quantis-intl.com/impact2002.php

La toxicité humaine mesure les impacts sur la santé humaine associés aux impacts cancérigènes et non cancérigènes causés par des polluants émis dans l'environnement et entrant en contact avec l'humain par la respiration, par la nourriture ou par la boisson. Les impacts cancérigènes et non cancérigènes peuvent, dans certains cas, être représentés comme deux indicateurs séparés.

2. Effets respiratoires (aussi appelé le smog d'hiver ou le « smog de Londres ») :

Les effets respiratoires sont causés par des polluants comme les particules fines primaires (PM_{2.5}) et secondaires (PM_{2.5} provenant des NO_x, NH₃ et SO₂ notamment). Ces polluants sont principalement émis par les industries, la production de chaleur et électricité à partir de combustibles liquides et solides et les transports. L'agriculture est aussi une source importante d'ammoniac (NH₃).

3. Radiations ionisantes :

Cette catégorie mesure les impacts sur la santé humaine causés par des substances émettant des radiations. Ces substances sont principalement émises par l'industrie nucléaire, mais certaines peuvent aussi être présentes de manière naturelle à des concentrations élevées (p.ex. radon).

4. Destruction de la couche d'ozone :

Cette catégorie mesure le potentiel de réduction de la couche d'ozone stratosphérique (O₃) et de l'augmentation des UV (rayonnement ultraviolet) atteignant la surface de la Terre. Ces UV peuvent engendrer des impacts sur la santé humaine comme les cancers de la peau et les cataractes. Des dommages sur les écosystèmes terrestres et aquatiques ont aussi lieu. Les polluants détruisant la couche d'ozone, comme les CFC (chlorofluorocarbones) sont émis par certains processus spécifiques, et notamment par les processus nécessitant de puissants systèmes de refroidissements.

5. Oxydation photochimique :

Cette catégorie mesure les effets sur la santé humaine (et éventuellement sur la croissance des plantes) provenant de la formation d'ozone troposphérique (O₃) (aussi appelé le smog d'été ou le « smog de Los Angeles »). Les polluants responsables de la formation d'ozone troposphérique comme les NO_x et les composés organiques volatils (COV) sont principalement émis par le trafic routier et les activités industrielles, ainsi que par l'industrie agricole et sylvicole.

6. Écotoxicité aquatique :

Cette catégorie mesure les effets sur les écosystèmes aquatiques (eaux fraîches) en termes de réduction de biodiversité causée par les émissions écotoxiques (notamment les métaux lourds) dans l'environnement.

7. Écotoxicité terrestre :

Cette catégorie mesure les effets sur les écosystèmes terrestres en termes de réduction de biodiversité causée par les émissions écotoxiques (notamment les métaux lourds) dans l'environnement.

8. Acidification aquatique :

Se réfère à la réduction des populations de poisson et autres espèces aquatiques causée par une acidification des eaux. Les substances responsables de l'acidification, comme les NO_x, le NH₃, et le SO_x,

peuvent être émises par l'industrie lourde, la production de chaleur et d'électricité avec des combustibles liquides et solides, ainsi que par le trafic et l'agriculture.

9. Eutrophisation aquatique :

Se réfère à l'augmentation graduelle en nutriments des eaux, permettant une augmentation de la biomasse notamment algale, qui lorsqu'elle se dégrade consomme l'oxygène dissout dans l'eau et amène à une réduction des espèces les plus sensibles à la concentration en oxygène dissout. Ces nutriments sont principalement associés au phosphore et aux nitrates contenus dans les détergents et les engrais.

10. Acidification et eutrophisation terrestre :

Cette catégorie mesure le changement en nutriments et le niveau d'acidité dans le sol. Ceci change les conditions naturelles pour la croissance des plantes et leur compétition. Lors d'un excès de nutriments, le nombre d'espèces observées et la santé de l'écosystème terrestre sont réduits. Les substances responsables de cet effet, comme les NO_x, le NH₃, et le SO_x, peuvent être émises par l'industrie lourde, la production de chaleur et d'électricité avec des combustibles liquides et solides, ainsi que par le trafic et l'agriculture.

11. Occupation des sols :

Cette catégorie mesure la réduction de biodiversité causée par l'utilisation du sol. Cette catégorie est dominée par l'agriculture et la déforestation.

12. Eau turbinée :

Cette catégorie mesure la quantité d'eau turbinée pour la production d'électricité (en m³). Les impacts sur la biodiversité associés au turbinage de l'eau dépendent de la localisation du site de production électrique (abondance ou pénurie en eau) et du type de centrale (réservoir ou au fil de l'eau).

13. Effet de serre :

Cette catégorie correspond aux impacts résultant des changements du climat. Elle mesure le potentiel du réchauffement climatique des gaz à effet de serre (GES) émis dans l'atmosphère. Les principaux GES sont le CO₂ émis par la combustion des énergies fossiles ainsi que les feux de forêt, le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O), tous deux émis principalement par l'agriculture.

14. Énergie primaire non renouvelable :

La consommation des ressources énergétiques fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), ainsi que de l'uranium, extraites de la terre se mesure en énergie primaire non renouvelable (en MJ primaire), calculée selon le pouvoir calorifique supérieur du combustible. Ces ressources sont sujettes à l'épuisement. La production électrique, de chaleur, et de combustible sont les principaux consommateurs d'énergie fossile et d'uranium.

15. Extraction de minerai :

Cette catégorie mesure le surplus d'énergie (en MJ) liés à l'effort additionnel nécessaire pour extraire le minerai à partir de mines de moindre concentration. Le concept de surplus d'énergie est basé sur

l'hypothèse que lorsqu'une ressource est extraite, une énergie additionnelle sera nécessaire pour extraire cette même ressource dans le futur.

16. Eau prélevée :

Cette catégorie inventorie le volume d'eau (en m³) prélevé pour tous types de besoins : irrigation, refroidissement, eau de procédé, eau de boisson, etc., et de toutes origines (eaux douces souterraines et de surface et eaux océaniques). Cet indicateur ne tient pas compte du changement de qualité de l'eau utilisée.

Ces seize catégories intermédiaires d'impact sont ensuite traduites au sein de quatre indicateurs de dommages (endpoint) et d'un indicateur d'inventaire suivants :

1. Changements climatiques (kg CO₂éq)

Cet indicateur est calculé sur la base du potentiel de réchauffement global (GWP) sur 100 ans de divers gaz à effet de serre tel que prescrit par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC 2007). Les substances connues pour contribuer au réchauffement planétaire sont ajustées selon leur GWP, exprimé en kilogrammes de dioxyde de carbone (CO₂) équivalents. Parce que l'absorption et l'émission de CO₂ à partir de sources biologiques peuvent souvent conduire à des interprétations erronées des résultats, il n'est pas rare d'exclure ce CO₂ biogénique lors de l'évaluation des GWP. Conformément à la recommandation du Publicly Available Standard (PAS) 2050 pour le calcul de l'empreinte carbone (BSI 2011), l'absorption et l'émission de CO₂ biogénique ne sont pas comptabilisées. Le CO₂ d'origine non spécifiée est par défaut associé à du CO₂ d'origine fossile. Le GWP du méthane (CH₄) d'origine fossile est fixé à 27.75 kg CO₂-eq/kgCH₄, afin de tenir compte de l'effet de sa dégradation en CO₂. Celui du méthane d'origines biogénique ou non spécifiée est fixé à 25 kg CO₂-eq/kgCH₄. Bien que le monoxyde de carbone (CO) ne soit pas un gaz à effet de serre, un facteur de caractérisation de 1,9 kg CO₂-eq/kgCO lui est associé afin de prendre en compte sa transformation partielle en CO₂.

2. Santé humaine (DALY)

Cette catégorie prend en compte les substances qui affectent les êtres humains de par leurs effets toxiques (cancérogènes et non cancérogènes) ou respiratoires, ou qui induisent une augmentation des radiations UV par la destruction de la couche d'ozone. L'évaluation de l'impact global des systèmes sur la santé humaine est réalisée suivant l'indicateur de dommages « Human health » de la méthode IMPACT 2002+, dans lequel la mortalité et la morbidité induites sont combinées dans un score exprimé en DALY (Disability-adjusted Life Years), une unité employée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

3. Qualité des écosystèmes (PDF*m²*an)

La qualité des écosystèmes peut être compromise par le rejet de substances qui causent l'acidification ou l'eutrophisation des sols et des eaux, dont la toxicité affecte la faune, ou par l'occupation des terres. Les effets du turbinage des eaux pour la production hydroélectrique sur la faune aquatique sont également pris en compte. L'évaluation de l'impact global des systèmes sur la qualité des écosystèmes a été réalisée suivant l'indicateur de dommages « Ecosystem quality » de la méthode IMPACT 2002+.

quantifié en fraction d'habitats potentiellement disparus, sur une surface donnée et durant une certaine période de temps, (PDF*m²*an).

4. Ressources (MJ primaire)

Cet indicateur traduit l'utilisation de ressources non renouvelables ou l'utilisation de ressources renouvelables à un rythme supérieur à celui de leur renouvellement. Plus d'importance peut être accordée à certains matériaux en fonction de leur abondance et de leur difficulté d'acquisition. L'évaluation de l'impact global des systèmes sur l'épuisement des ressources a été réalisée suivant l'indicateur de dommages « Ressources » de la méthode IMPACT 2002+, qui combine l'utilisation d'énergie primaire de sources non renouvelables et l'extraction de minerai. L'utilisation d'énergie primaire non renouvelable inclut la consommation de ressources fossiles et nucléaires, mais exclut les sources d'énergie renouvelables à toutes les étapes du cycle de vie des systèmes de produits et dans l'ensemble des processus impliqués en amont. L'utilisation d'énergies non renouvelables pour la production d'énergie renouvelable est cependant prise en compte. L'extraction de minerai est une estimation de la quantité additionnelle d'énergie qui serait nécessaire pour en extraire une quantité donnée supplémentaire, du fait d'une accessibilité rendue plus difficile (basé sur la méthode Eco-indicateur 99). Cet indicateur est exprimé en mégajoules (MJ primaire).

5. Prélèvement d'eau (m³)

Cet indicateur d'inventaire traduit l'utilisation d'eau de toutes origines (douce ou océanique) et pour tous types d'usages (industrie, agriculture et boisson), à l'exception de l'eau turbinée pour la production d'électricité (voir catégories intermédiaires).

Interprétation

L'interprétation, quatrième phase de l'ACV, a pour objectif d'analyser les résultats, d'établir des conclusions, d'expliquer les limites et de fournir des recommandations en se basant sur les résultats des phases précédentes de l'étude. L'interprétation doit respecter les exigences décrites dans la définition des objectifs et du champ de l'étude et tenir compte des contraintes relatives aux hypothèses posées, ainsi qu'à l'incertitude des données employées et du modèle d'évaluation des impacts.

Annexe C : Résultats bruts et analyses

L'Annexe C présente l'ensemble des résultats bruts par indicateurs de dommages, les résultats bruts par catégories intermédiaires, les résultats de l'analyse de contribution, les résultats de l'analyse de sensibilité

Résultats bruts – indicateurs de dommages

Tableau C- 1: Résultats bruts - Scénario d'enfouissement du verre (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Transport vers lieu d'enfouissement	7.39E-03	7.95E-09	2.28E-03	1.17E-01	5.89E-05
Enfouissement verre	7.60E-03	9.66E-09	2.02E-03	2.00E-01	2.20E-04
Total	1.50E-02	1.76E-08	4.30E-03	3.17E-01	2.79E-04

Tableau C- 2: Résultats bruts - Scénario d'utilisation du verre comme matériau de recouvrement (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Transport vers lieu d'enfouissement	7.39E-03	7.95E-09	2.28E-03	1.17E-01	5.89E-05
Opérations de recouvrement	1.95E-04	3.71E-10	2.91E-05	2.90E-03	8.84E-07
Total	7.59E-03	8.32E-09	2.31E-03	1.20E-01	5.97E-05

Tableau C- 3: Résultats bruts – Substitut pour le scénario d'utilisation du verre comme matériau de recouvrement (sable) (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Production	2.25E-03	3.31E-09	7.79E-04	3.32E-02	1.44E-03
Transport vers lieu d'enfouissement	6.53E-03	7.01E-09	2.01E-03	1.04E-01	5.20E-05
Opérations de recouvrement	1.98E-04	3.76E-10	2.94E-05	2.93E-03	8.95E-07
Total	8.98E-03	1.07E-08	2.82E-03	1.40E-01	1.49E-03

Tableau C- 4: Résultats bruts –Scénario d'utilisation du verre comme matériau de sous-fondation des chemins d'accès de LET (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Transport vers LET	7.39E-03	7.95E-09	2.28E-03	1.17E-01	5.89E-05
Opérations de remblayage	3.19E-04	6.05E-10	4.74E-05	4.73E-03	1.44E-06
Total	7.71E-03	8.55E-09	2.32E-03	1.22E-01	6.03E-05

Tableau C- 5: Résultats bruts – Substitut pour le scénario d'utilisation du verre comme matériau de sous-fondation des chemins d'accès de LET (gravier) (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Production	3.76E-03	4.55E-09	1.74E-03	5.49E-02	1.44E-03
Transport vers LET	6.53E-03	7.01E-09	2.01E-03	1.04E-01	5.20E-05
Opérations de remblayage	3.21E-04	6.10E-10	4.78E-05	4.76E-03	1.45E-06
Total	1.06E-02	1.22E-08	3.80E-03	1.63E-01	1.50E-03

Tableau C- 6: Résultats bruts – Scénario de projet de commercialisation : bouteille de verre (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Transport vers conditionneur	3.45E-02	3.71E-08	1.06E-02	5.47E-01	2.75E-04
Conditionnement du verre	7.77E-02	1.28E-08	5.71E-03	1.25E+00	4.07E-04
Transport vers recycleur	3.52E-03	3.78E-09	1.08E-03	5.58E-02	2.80E-05
Fabrication	1.63E+00	1.68E-06	3.64E-01	2.59E+01	2.93E-02
Total	1.75E+00	1.73E-06	3.81E-01	2.77E+01	3.00E-02

Tableau C- 7: Résultats bruts – Substitut pour scénario de projet de commercialisation : bouteille de verre (bouteille de verre vierge) (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Total	2.06E+00	1.86E-06	4.33E-01	3.03E+01	3.74E-02

Tableau C- 8: Résultats bruts – Scénario de projet de commercialisation : laine de verre fabriquée aux États Unis
(indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Transport vers conditionneur	3.45E-02	3.71E-08	1.06E-02	5.47E-01	2.75E-04
Conditionnement du verre	7.77E-02	1.28E-08	5.71E-03	1.25E+00	4.07E-04
Transport vers recycleur	5.23E-02	5.62E-08	1.61E-02	8.30E-01	4.17E-04
Fabrication	5.36E+00	2.65E-06	5.85E-01	9.65E+01	1.77E-01
Total	5.52E+00	2.76E-06	6.18E-01	9.91E+01	1.78E-01

Tableau C- 9: Résultats bruts – Substitut pour scénario de projet de commercialisation : laine de verre (laine de verre vierge fabriquée aux États-Unis) (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Total	6.03E+00	2.99E-06	6.70E-01	1.05E+02	2.03E-01

Tableau C- 10: Résultats bruts – Scénario de projet de commercialisation : laine de verre fabriquée au Québec
(indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Transport vers conditionneur	3.45E-02	3.71E-08	1.06E-02	5.47E-01	2.75E-04
Conditionnement du verre	7.77E-02	1.28E-08	5.71E-03	1.25E+00	4.07E-04
Transport vers recycleur	5.71E-03	6.13E-09	1.76E-03	9.06E-02	4.54E-05
Fabrication	2.49E+00	1.33E-06	6.46E-01	5.24E+01	7.09E-02
Total	2.61E+00	1.39E-06	6.64E-01	5.43E+01	7.16E-02

Tableau C- 11: Résultats bruts – Substitut pour scénario de projet de commercialisation : laine de verre (laine de verre vierge fabriquée au Québec) (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Total	2.66E+00	1.48E-06	7.39E-01	5.47E+01	8.15E-02

Tableau C- 12: Résultats bruts – Scénario de projet de commercialisation : poudre de verre (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Transport vers micronisation	5.92E-03	6.36E-09	1.82E-03	9.38E-02	4.71E-05
Micronisation du verre	2.03E-02	9.31E-09	2.45E-02	2.13E-01	6.03E-04
Transport vers lieu d'utilisation	1.46E-03	1.57E-09	4.49E-04	2.31E-02	1.16E-05
Total	2.76E-02	1.72E-08	2.68E-02	3.30E-01	6.61E-04

Tableau C- 13: Résultats bruts – Substitut pour scénario de projet de commercialisation : poudre de verre (ciment Portland) (indicateurs de dommages)

	Changement climatique	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Total	1.01E+00	2.38E-07	5.24E-02	3.63E+00	3.57E-03

Tableau C- 14: Résultats bruts – Scénario de projet de commercialisation : agrégat de verre (indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Transport vers le concassage	5.92E-03	6.36E-09	1.82E-03	9.38E-02	4.71E-05
concassage du verre	1.30E-02	5.62E-09	7.44E-03	7.22E-02	3.67E-04
Transport vers lieu d'utilisation	1.46E-03	1.57E-09	4.49E-04	2.31E-02	1.16E-05
Total	2.04E-02	1.35E-08	9.71E-03	1.89E-01	4.26E-04

Tableau C- 15: Résultats bruts – Substitut pour scénario de projet de commercialisation : agrégat de verre (pierre)
(indicateurs de dommages)

	Changements climatiques	Santé humaine	Qualité des écosystèmes	Ressources	Eau prélevée
	kg CO2-eq	DALY	PDF.m2.y	MJ	m3
Total	2.00E-02	2.42E-08	2.02E-02	3.04E-01	1.86E-04

Résultats bruts – catégories intermédiaires

Tableau C- 16: Résultats bruts - Scénario d'enfouissement du verre (catégories intermédiaires)

		Transport vers enfouissement	Enfouissement verre	Total
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	4.09E-05	7.92E-05	1.20E-04
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	6.72E-05	6.17E-05	1.29E-04
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	1.09E-05	1.32E-05	2.41E-05
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	2.30E-02	3.02E-02	5.33E-02
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	1.15E-09	2.13E-09	3.29E-09
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	6.23E-06	9.27E-06	1.55E-05
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	3.86E-01	4.00E-01	7.86E-01
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	2.31E-01	1.52E-01	3.83E-01
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	3.48E-04	3.55E-04	7.03E-04
Occupation des sols	m2 org ara.y	4.37E-05	3.71E-04	4.14E-04
Acidification aquatique	kg SO2-eq	5.08E-05	5.41E-05	1.05E-04
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	5.98E-07	6.85E-07	1.28E-06
Eau turbinée	m3	3.52E-03	4.19E-03	7.71E-03
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	1.17E-01	2.00E-01	3.17E-01
Extraction de minerai	MJ surplus	5.55E-05	6.27E-05	1.18E-04
Changements climatiques	kg CO2-eq	7.39E-03	7.60E-03	1.50E-02
Eau prélevée	m3	5.89E-05	2.20E-04	2.79E-04

Tableau C- 17: Résultats bruts - Scénario d'enfouissement du verre (catégories intermédiaires en score normalisé)

		Transport vers enfouissement	Enfouissement verre	Total
Toxicité humaine, cancérogènes	DALY	1.14E-10	2.22E-10	3.36E-10
Toxicité humaine, non cancérogènes	DALY	1.88E-10	1.73E-10	3.61E-10
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	7.62E-09	9.24E-09	1.69E-08
Radiations ionisantes	DALY	4.84E-12	6.35E-12	1.12E-11
Destruction de la couche d'ozone	DALY	1.21E-12	2.24E-12	3.45E-12
Effets respiratoires, organiques	DALY	1.33E-11	1.98E-11	3.30E-11
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	1.94E-05	2.01E-05	3.95E-05
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	1.83E-03	1.21E-03	3.03E-03
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	3.61E-04	3.69E-04	7.31E-04
Occupation des sols	PDF.m2.y	4.76E-05	4.04E-04	4.52E-04
Acidification aquatique	PDF.m2.y	4.48E-07	4.77E-07	9.26E-07
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	6.82E-06	7.81E-06	1.46E-05
Eau turbinée	PDF.m2.y	1.41E-05	1.68E-05	3.08E-05
Énergie primaire non renouvelable	MJ	1.17E-01	2.00E-01	3.17E-01
Extraction de minerai	MJ	5.55E-05	6.27E-05	1.18E-04
Changements climatiques	kg CO2-eq	7.39E-03	7.60E-03	1.50E-02
Eau prélevée	m3	5.89E-05	2.20E-04	2.79E-04

Tableau C- 18: Résultats bruts - Scénario d'utilisation du verre comme matériau de recouvrement (catégories intermédiaires)

		Transport vers enfouissement	Opérations de recouvrement	Total
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	4.09E-05	1.19E-06	4.21E-05
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	6.72E-05	7.54E-07	6.80E-05
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	1.09E-05	4.63E-07	1.14E-05
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	0.02303674	0.00029785	0.023334586
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	1.15E-09	2.13E-11	1.17E-09
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	6.23E-06	1.81E-07	6.41E-06
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	0.38611178	0.007070231	0.39318201
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	0.23099318	0.001651032	0.23264421
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	0.00034755	1.14E-05	0.000358902
Occupation des sols	m2 org ara.y	4.37E-05	2.43E-07	4.40E-05
Acidification aquatique	kg SO2-eq	5.08E-05	1.67E-06	5.25E-05
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	5.98E-07	1.70E-08	6.15E-07
Eau turbinée	m3	0.0035153	4.34E-05	0.003558718
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	0.11724935	0.002575624	0.11982498
Extraction de minerai	MJ surplus	5.55E-05	1.11E-06	5.66E-05
Changements climatiques	kg CO2-eq	0.0073939	0.00017377	0.007567669
Eau prélevée	m3	5.89E-05	7.86E-07	5.97E-05

Tableau C- 19: Résultats bruts - Scénario d'utilisation du verre comme matériau de recouvrement (catégories intermédiaires en score normalisé)

		Transport vers enfouissement	Opérations de recouvrement	Total
Toxicité humaine, cancérogènes	DALY	1.14E-10	3.75E-12	1.18E-10
Toxicité humaine, non cancérogènes	DALY	1.88E-10	2.37E-12	1.91E-10
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	7.62E-09	3.64E-10	7.99E-09
Radiations ionisantes	DALY	4.84E-12	7.03E-14	4.91E-12
Destruction de la couche d'ozone	DALY	1.21E-12	2.51E-14	1.24E-12
Effets respiratoires, organiques	DALY	1.33E-11	4.32E-13	1.37E-11
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	1.94E-05	3.99E-07	1.98E-05
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	1.83E-03	1.47E-05	1.84E-03
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	3.61E-04	1.33E-05	3.75E-04
Occupation des sols	PDF.m2.y	4.76E-05	2.98E-07	4.79E-05
Acidification aquatique	PDF.m2.y	4.48E-07	1.65E-08	4.65E-07
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	6.82E-06	2.18E-07	7.03E-06
Eau turbinée	PDF.m2.y	1.41E-05	1.95E-07	1.43E-05
Énergie primaire non renouvelable	MJ	1.17E-01	2.90E-03	1.20E-01
Extraction de minerai	MJ	5.55E-05	1.25E-06	5.67E-05
Changements climatiques	kg CO2-eq	7.39E-03	1.95E-04	7.59E-03
Eau prélevée	m3	5.89E-05	8.84E-07	5.97E-05

Tableau C- 20: Résultats bruts – Substitut pour le scénario d'utilisation du verre comme matériau de recouvrement (sable) (catégories intermédiaires)

		Production	Transport vers enfouissement	Opérations de recouvrement	Total
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	2.04E-05	2.35E-05	8.82E-07	4.47E-05
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	2.19E-05	3.86E-05	5.58E-07	6.11E-05
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	2.90E-06	6.25E-06	3.43E-07	9.50E-06
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	1.13E-02	1.32E-02	2.21E-04	2.47E-02
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	1.60E-10	6.62E-10	1.57E-11	8.38E-10
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	1.16E-06	3.58E-06	1.34E-07	4.87E-06
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	1.14E-01	2.22E-01	5.24E-03	3.41E-01
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	2.73E-02	1.33E-01	1.22E-03	1.61E-01
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	7.13E-05	2.00E-04	8.41E-06	2.79E-04
Occupation des sols	m2 org ara.y	8.00E-05	2.51E-05	1.80E-07	1.05E-04
Acidification aquatique	kg SO2-eq	1.13E-05	2.92E-05	1.23E-06	4.17E-05
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	2.34E-07	3.43E-07	1.26E-08	5.90E-07
Eau turbinée	m3	3.02E-02	2.02E-03	3.22E-05	3.22E-02
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	2.15E-02	6.73E-02	1.91E-03	9.08E-02
Extraction de minerai	MJ surplus	8.94E-05	3.19E-05	8.21E-07	1.22E-04
Changements climatiques	kg CO2-eq	1.46E-03	4.25E-03	1.29E-04	5.84E-03
Eau prélevée	m3	9.36E-04	3.38E-05	5.82E-07	9.71E-04

Tableau C- 21: Résultats bruts – Substitut pour le scénario d'utilisation du verre comme matériau de recouvrement (sable) (catégories intermédiaires en score normalisé)

		Production	Transport vers enfouissement	Opérations de recouvrement	Total
Toxicité humaine, cancérogènes	DALY	8.76E-11	1.01E-10	3.80E-12	1.92E-10
Toxicité humaine, non cancérogènes	DALY	9.43E-11	1.66E-10	2.40E-12	2.63E-10
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	3.12E-09	6.73E-09	3.69E-10	1.02E-08
Radiations ionisantes	DALY	3.64E-12	4.27E-12	7.12E-14	7.98E-12
Destruction de la couche d'ozone	DALY	2.59E-13	1.07E-12	2.54E-14	1.35E-12
Effets respiratoires, organiques	DALY	3.80E-12	1.17E-11	4.38E-13	1.60E-11
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	8.82E-06	1.71E-05	4.04E-07	2.63E-05
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	3.32E-04	1.61E-03	1.49E-05	1.96E-03
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	1.14E-04	3.19E-04	1.34E-05	4.46E-04
Occupation des sols	PDF.m2.y	1.34E-04	4.21E-05	3.02E-07	1.76E-04
Acidification aquatique	PDF.m2.y	1.53E-07	3.96E-07	1.67E-08	5.65E-07
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	4.10E-06	6.02E-06	2.21E-07	1.03E-05
Eau turbinée	PDF.m2.y	1.86E-04	1.24E-05	1.98E-07	1.98E-04
Énergie primaire non renouvelable	MJ	3.31E-02	1.03E-01	2.93E-03	1.40E-01
Extraction de minerai	MJ	1.37E-04	4.90E-05	1.26E-06	1.88E-04
Changements climatiques	kg CO2-eq	2.25E-03	6.53E-03	1.98E-04	8.98E-03
Eau prélevée	m3	1.44E-03	5.20E-05	8.95E-07	1.49E-03

Tableau C- 22: Résultats bruts - Scénario d'utilisation du verre comme matériau de sous-fondation de chemin
d'accès (catégories intermédiaires)

		Transport vers enfouissement	Opérations de remblayage	Total
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	4.09E-05	1.74E-06	4.26E-05
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	6.72E-05	1.10E-06	6.83E-05
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	1.09E-05	6.77E-07	1.16E-05
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	2.30E-02	4.35E-04	2.35E-02
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	1.15E-09	3.11E-11	1.18E-09
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	6.23E-06	2.64E-07	6.50E-06
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	3.86E-01	1.03E-02	3.96E-01
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	2.31E-01	2.41E-03	2.33E-01
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	3.48E-04	1.66E-05	3.64E-04
Occupation des sols	m2 org ara.y	4.37E-05	3.56E-07	4.41E-05
Acidification aquatique	kg SO2-eq	5.08E-05	2.44E-06	5.33E-05
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	5.98E-07	2.49E-08	6.23E-07
Eau turbinée	m3	3.52E-03	6.35E-05	3.58E-03
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	1.17E-01	3.77E-03	1.21E-01
Extraction de minerai	MJ surplus	5.55E-05	1.62E-06	5.71E-05
Changements climatiques	kg CO2-eq	7.39E-03	2.54E-04	7.65E-03
Eau prélevée	m3	5.89E-05	1.15E-06	6.00E-05

Tableau C- 23: Résultats bruts - Scénario d'utilisation du verre comme matériau de sous-fondation de chemin
d'accès (catégories intermédiaires en score normalisé)

		Transport vers enfouissement	Opérations de remblayage	Total
Toxicité humaine, cancérogènes	DALY	1.14E-10	6.11E-12	1.21E-10
Toxicité humaine, non cancérogènes	DALY	1.88E-10	3.87E-12	1.92E-10
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	7.62E-09	5.94E-10	8.22E-09
Radiations ionisantes	DALY	4.84E-12	1.15E-13	4.95E-12
Destruction de la couche d'ozone	DALY	1.21E-12	4.09E-14	1.25E-12
Effets respiratoires, organiques	DALY	1.33E-11	7.05E-13	1.40E-11
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	1.94E-05	6.51E-07	2.00E-05
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	1.83E-03	2.40E-05	1.85E-03
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	3.61E-04	2.16E-05	3.83E-04
Occupation des sols	PDF.m2.y	4.76E-05	4.86E-07	4.81E-05
Acidification aquatique	PDF.m2.y	4.48E-07	2.70E-08	4.75E-07
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	6.82E-06	3.56E-07	7.17E-06
Eau turbinée	PDF.m2.y	1.41E-05	3.19E-07	1.44E-05
Énergie primaire non renouvelable	MJ	1.17E-01	4.72E-03	1.22E-01
Extraction de minerai	MJ	5.55E-05	2.03E-06	5.75E-05
Changements climatiques	kg CO2-eq	1.14E-10	6.11E-12	1.21E-10
Eau prélevée	m3	1.88E-10	3.87E-12	1.92E-10

Tableau C- 24: Résultats bruts - Substitut pour le scénario d'utilisation du verre comme matériau de sous-fondation de chemin d'accès (gravier) (catégories intermédiaires)

		Production	Transport vers enfouissement	Opérations de recouvrement	Total
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	7.54E-05	3.84E-05	1.82E-06	1.16E-04
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	9.08E-05	6.32E-05	1.15E-06	1.55E-04
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	6.23E-06	1.02E-05	7.07E-07	1.72E-05
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	5.34E-02	2.16E-02	4.55E-04	7.55E-02
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	3.84E-10	1.08E-09	3.25E-11	1.50E-09
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	2.51E-06	5.86E-06	2.76E-07	8.64E-06
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	3.36E-01	3.63E-01	1.08E-02	7.10E-01
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	1.08E-01	2.17E-01	2.52E-03	3.28E-01
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	1.63E-04	3.27E-04	1.73E-05	5.07E-04
Occupation des sols	m2 org ara.y	1.42E-04	4.11E-05	3.71E-07	1.83E-04
Acidification aquatique	kg SO2-eq	2.76E-05	4.78E-05	2.54E-06	7.79E-05
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	7.13E-07	5.62E-07	2.60E-08	1.30E-06
Eau turbinée	m3	1.62E-01	3.30E-03	6.63E-05	1.66E-01
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	5.80E-02	1.10E-01	3.93E-03	1.72E-01
Extraction de minerai	MJ surplus	3.99E-04	5.21E-05	1.69E-06	4.53E-04
Changements climatiques	kg CO2-eq	4.00E-03	6.95E-03	2.65E-04	1.12E-02
Eau prélevée	m3	1.54E-03	5.53E-05	1.20E-06	1.59E-03

Tableau C- 25: Résultats bruts - Substitut pour le scénario d'utilisation du verre comme matériau de sous-fondation de chemin d'accès (gravier) (catégories intermédiaires en score normalisé)

		Production	Transport vers enfouissement	Opérations de recouvrement	Total
Toxicité humaine, cancérogènes	DALY	1.98E-10	1.01E-10	6.16E-12	3.06E-10
Toxicité humaine, non cancérogènes	DALY	2.39E-10	1.66E-10	3.90E-12	4.09E-10
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	4.09E-09	6.73E-09	5.99E-10	1.14E-08
Radiations ionisantes	DALY	1.05E-11	4.27E-12	1.16E-13	1.49E-11
Destruction de la couche d'ozone	DALY	3.79E-13	1.07E-12	4.12E-14	1.49E-12
Effets respiratoires, organiques	DALY	5.03E-12	1.17E-11	7.11E-13	1.75E-11
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	1.59E-05	1.71E-05	6.56E-07	3.36E-05
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	8.03E-04	1.61E-03	2.41E-05	2.44E-03
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	1.59E-04	3.19E-04	2.18E-05	5.00E-04
Occupation des sols	PDF.m2.y	1.45E-04	4.21E-05	4.90E-07	1.87E-04
Acidification aquatique	PDF.m2.y	2.29E-07	3.96E-07	2.72E-08	6.52E-07
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	7.63E-06	6.02E-06	3.59E-07	1.40E-05
Eau turbinée	PDF.m2.y	6.10E-04	1.24E-05	3.21E-07	6.23E-04
Énergie primaire non renouvelable	MJ	5.45E-02	1.03E-01	4.76E-03	1.63E-01
Extraction de minerai	MJ	3.75E-04	4.90E-05	2.05E-06	4.26E-04
Changements climatiques	kg CO2-eq	3.76E-03	6.53E-03	3.21E-04	1.06E-02
Eau prélevée	m3	1.44E-03	5.20E-05	1.45E-06	1.50E-03

Tableau C- 26: Résultats bruts - Scénario de projet de commercialisation : bouteille de verre (catégories intermédiaires)

		Transport vers condition- neur	Condition- nement du verre	Transport vers recycleur	Fabrication
Toxicité humaine, cancérogènes	kg C2H3Cl-eq	1.91E-04	7.55E-04	1.95E-05	2.65E-02
Toxicité humaine, non cancérogènes	kg C2H3Cl-eq	3.14E-04	8.45E-04	3.20E-05	7.05E-02
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	5.08E-05	1.18E-05	5.18E-06	2.00E-03
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	1.08E-01	1.63E-01	1.10E-02	7.78E+00
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	5.38E-09	9.73E-09	5.49E-10	1.77E-07
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	2.91E-05	1.34E-05	2.97E-06	4.29E-04
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	1.80E+00	2.77E+01	1.84E-01	8.33E+01
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	1.08E+00	2.80E-01	1.10E-01	2.54E+01
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	1.62E-03	3.52E-04	1.65E-04	4.58E-02
Occupation des sols	m2 org ara.y	2.04E-04	1.13E-04	2.08E-05	6.55E-02
Acidification aquatique	kg SO2-eq	2.37E-04	7.17E-05	2.42E-05	1.27E-02
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	2.79E-06	7.44E-07	2.85E-07	1.53E-04
Eau turbinée	m3	1.64E-02	4.02E-01	1.67E-03	9.49E+00
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	5.47E-01	1.25E+00	5.58E-02	2.77E+01
Extraction de minerai	MJ surplus	2.59E-04	3.69E-04	2.64E-05	1.61E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	3.45E-02	7.77E-02	3.52E-03	1.75E+00
Eau prélevée	m3	2.75E-04	4.07E-04	2.80E-05	3.00E-02

Tableau C- 27: Résultats bruts - Scénario de projet de commercialisation : bouteille de verre (catégories intermédiaires)

		Transport vers conditionneur	Conditionnem ent du verre	Transport vers recycleur	Fabrication
Toxicité humaine, cancérigènes	DALY	5.34E-10	2.11E-09	5.45E-11	7.41E-08
Toxicité humaine, non cancérigènes	DALY	8.79E-10	2.37E-09	8.96E-11	1.97E-07
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	3.56E-08	8.23E-09	3.63E-09	1.40E-06
Radiations ionisantes	DALY	2.26E-11	3.42E-11	2.30E-12	1.63E-09
Destruction de la couche d'ozone	DALY	5.65E-12	1.02E-11	5.76E-13	1.86E-10
Effets respiratoires, organiques	DALY	6.19E-11	2.86E-11	6.32E-12	9.14E-10
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	9.05E-05	1.39E-03	9.23E-06	4.18E-03
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	8.53E-03	2.21E-03	8.70E-04	2.01E-01
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	1.69E-03	3.66E-04	1.72E-04	4.77E-02
Occupation des sols	PDF.m2.y	2.22E-04	1.23E-04	2.27E-05	7.13E-02
Acidification aquatique	PDF.m2.y	2.09E-06	6.33E-07	2.13E-07	1.12E-04
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	3.18E-05	8.48E-06	3.24E-06	1.75E-03
Eau turbinée	PDF.m2.y	6.56E-05	1.61E-03	6.69E-06	3.80E-02
Énergie primaire non renouvelable	MJ	5.47E-01	1.25E+00	5.58E-02	2.59E+01
Extraction de minerai	MJ	2.59E-04	3.69E-04	2.64E-05	1.54E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	3.45E-02	7.77E-02	3.52E-03	1.63E+00
Eau prélevée	m3	2.75E-04	4.07E-04	2.80E-05	2.93E-02

Tableau C- 28: Résultats bruts - Substitut pour scénario de projet de commercialisation : bouteille de verre
(bouteille de verre vierge) (catégories intermédiaires)

		Total
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	2.85E-02
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	7.39E-02
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	2.24E-03
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	9.40E+00
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	2.09E-07
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	5.30E-04
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	1.03E+02
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	3.20E+01
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	5.38E-02
Occupation des sols	m2 org ara.y	6.73E-02
Acidification aquatique	kg SO2-eq	1.41E-02
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	1.92E-04
Eau turbinée	m3	1.08E+01
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	3.03E+01
Extraction de minerai	MJ surplus	1.94E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	2.06E+00
Eau prélevée	m3	3.74E-02

Tableau C- 29: Résultats bruts - Substitut pour scénario de projet de commercialisation : bouteille de verre
(bouteille de verre vierge) (catégories intermédiaires en score)

		Total
Toxicité humaine, cancérigènes	DALY	7.98E-08
Toxicité humaine, non cancérigènes	DALY	2.07E-07
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	1.57E-06
Radiations ionisantes	DALY	1.97E-09
Destruction de la couche d'ozone	DALY	2.19E-10
Effets respiratoires, organiques	DALY	1.13E-09
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	5.15E-03
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	2.53E-01
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	5.59E-02
Occupation des sols	PDF.m2.y	7.34E-02
Acidification aquatique	PDF.m2.y	1.25E-04
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	2.19E-03
Eau turbinée	PDF.m2.y	4.34E-02
Énergie primaire non renouvelable	MJ	3.03E+01
Extraction de minerai	MJ	1.94E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	2.06E+00
Eau prélevée	m3	3.74E-02

Tableau C- 30: Résultats bruts - Scénario de projet de commercialisation : laine de verre fabriquée aux États-Unis
(catégories intermédiaires)

		Transport vers conditionneur	Conditionneme nt du verre	Transport vers recycleur	Fabrication
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl- eq	1.91E-04	7.55E-04	2.89E-04	3.98E-02
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl- eq	3.14E-04	8.45E-04	4.76E-04	1.00E-01
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5- eq	5.08E-05	1.18E-05	7.71E-05	3.19E-03
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	1.08E-01	1.63E-01	1.63E-01	1.19E+02
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11- eq	5.38E-09	9.73E-09	8.16E-09	5.17E-07
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	2.91E-05	1.34E-05	4.41E-05	1.64E-03
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	1.80E+00	2.77E+01	2.73E+00	2.75E+02
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	1.08E+00	2.80E-01	1.63E+00	4.40E+01
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	1.62E-03	3.52E-04	2.46E-03	1.16E-01
Occupation des sols	m2 org ara.y	2.04E-04	1.13E-04	3.09E-04	3.32E-02
Acidification aquatique	kg SO2-eq	2.37E-04	7.17E-05	3.60E-04	2.32E-02
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	2.79E-06	7.44E-07	4.23E-06	6.04E-04
Eau turbinée	m3	1.64E-02	4.02E-01	2.49E-02	1.47E+01
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	5.47E-01	1.25E+00	8.30E-01	9.64E+01
Extraction de minerai	MJ surplus	2.59E-04	3.69E-04	3.93E-04	5.05E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	3.45E-02	7.77E-02	5.23E-02	5.36E+00
Eau prélevée	m3	2.75E-04	4.07E-04	4.17E-04	1.77E-01

Tableau C- 31: Résultats bruts - Scénario de projet de commercialisation : laine de verre fabriquée aux États-Unis
(catégories intermédiaires en score normalisé)

		Transport vers conditionneur	Conditionnement du verre	Transport vers recycleur	Fabrication
Toxicité humaine, cancérogènes	DALY	5.34E-10	2.11E-09	8.10E-10	1.11E-07
Toxicité humaine, non cancérogènes	DALY	8.79E-10	2.37E-09	1.33E-09	2.81E-07
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	3.56E-08	8.23E-09	5.40E-08	2.23E-06
Radiations ionisantes	DALY	2.26E-11	3.42E-11	3.42E-11	2.50E-08
Destruction de la couche d'ozone	DALY	5.65E-12	1.02E-11	8.57E-12	5.43E-10
Effets respiratoires, organiques	DALY	6.19E-11	2.86E-11	9.39E-11	3.50E-09
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	9.05E-05	1.39E-03	1.37E-04	1.38E-02
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	8.53E-03	2.21E-03	1.29E-02	3.48E-01
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	1.69E-03	3.66E-04	2.56E-03	1.21E-01
Occupation des sols	PDF.m2.y	2.22E-04	1.23E-04	3.37E-04	3.62E-02
Acidification aquatique	PDF.m2.y	2.09E-06	6.33E-07	3.17E-06	2.04E-04
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	3.18E-05	8.48E-06	4.82E-05	6.89E-03
Eau turbinée	PDF.m2.y	6.56E-05	1.61E-03	9.95E-05	5.87E-02
Énergie primaire non renouvelable	MJ	5.47E-01	1.25E+00	8.30E-01	9.64E+01
Extraction de minerai	MJ	2.59E-04	3.69E-04	3.93E-04	5.05E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	3.45E-02	7.77E-02	5.23E-02	5.36E+00
Eau prélevée	m3	2.75E-04	4.07E-04	4.17E-04	1.77E-01

Tableau C- 32: Résultats bruts — Substitut pour scénario de projet de commercialisation : laine de verre (laine de verre vierge fabriquée aux États-Unis) (catégories intermédiaires)

		Total
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	4.19E-02
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	1.12E-01
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	3.61E-03
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	1.36E+02
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	5.41E-07
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	1.71E-03
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	3.10E+02
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	5.13E+01
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	1.28E-01
Occupation des sols	m2 org ara.y	3.66E-02
Acidification aquatique	kg SO2-eq	2.60E-02
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	6.83E-04
Eau turbinée	m3	1.66E+01
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	1.05E+02
Extraction de minerai	MJ surplus	5.56E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	6.03E+00
Eau prélevée	m3	2.03E-01

Tableau C- 33: Résultats bruts — Substitut pour scénario de projet de commercialisation : laine de verre (laine de verre vierge fabriquée aux États-Unis) (catégories intermédiaires en score normalisé)

		Total
Toxicité humaine, cancérigènes	DALY	1.17E-07
Toxicité humaine, non cancérigènes	DALY	3.13E-07
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	2.53E-06
Radiations ionisantes	DALY	2.85E-08
Destruction de la couche d'ozone	DALY	5.68E-10
Effets respiratoires, organiques	DALY	3.64E-09
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	1.55E-02
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	4.06E-01
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	1.34E-01
Occupation des sols	PDF.m2.y	3.99E-02
Acidification aquatique	PDF.m2.y	2.29E-04
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	7.78E-03
Eau turbinée	PDF.m2.y	6.65E-02
Énergie primaire non renouvelable	MJ	1.05E+02
Extraction de minerai	MJ	5.56E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	6.03E+00
Eau prélevée	m3	2.03E-01

Tableau C- 34: Résultats bruts - Scénario de projet de commercialisation : laine de verre fabriquée au Québec
(catégories intermédiaires)

		Transport vers conditionneur	Condition- nement du verre	Transport vers recycleur	Fabrication
Toxicité humaine, cancérogènes	kg C2H3Cl-eq	1.91E-04	7.55E-04	3.16E-05	3.23E-02
Toxicité humaine, non cancérogènes	kg C2H3Cl-eq	3.14E-04	8.45E-04	5.19E-05	4.42E-02
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	5.08E-05	1.18E-05	8.41E-06	1.58E-03
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	1.08E-01	1.63E-01	1.78E-02	2.78E+01
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	5.38E-09	9.73E-09	8.90E-10	4.15E-07
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	2.91E-05	1.34E-05	4.81E-06	1.43E-03
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	1.80E+00	2.77E+01	2.98E-01	1.94E+02
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	1.08E+00	2.80E-01	1.78E-01	3.24E+01
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	1.62E-03	3.52E-04	2.68E-04	7.36E-02
Occupation des sols	m2 org ara.y	2.04E-04	1.13E-04	3.37E-05	2.19E-02
Acidification aquatique	kg SO2-eq	2.37E-04	7.17E-05	3.92E-05	1.22E-02
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	2.79E-06	7.44E-07	4.62E-07	3.72E-04
Eau turbinée	m3	1.64E-02	4.02E-01	2.71E-03	6.88E+01
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	5.47E-01	1.25E+00	9.05E-02	5.24E+01
Extraction de minerai	MJ surplus	2.59E-04	3.69E-04	4.28E-05	4.99E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	3.45E-02	7.77E-02	5.71E-03	2.49E+00
Eau prélevée	m3	2.75E-04	4.07E-04	4.54E-05	7.09E-02

Tableau C- 35: Résultats bruts - Scénario de projet de commercialisation : laine de verre fabriquée au Québec
(catégories intermédiaires en score normalisé)

		Transport vers conditionneur	Conditionnement du verre	Transport vers recycleur	Fabrication
Toxicité humaine, cancérigènes	DALY	5.34E-10	2.11E-09	8.84E-11	9.04E-08
Toxicité humaine, non cancérigènes	DALY	8.79E-10	2.37E-09	1.45E-10	1.24E-07
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	3.56E-08	8.23E-09	5.89E-09	1.11E-06
Radiations ionisantes	DALY	2.26E-11	3.42E-11	3.73E-12	5.84E-09
Destruction de la couche d'ozone	DALY	5.65E-12	1.02E-11	9.35E-13	4.36E-10
Effets respiratoires, organiques	DALY	6.19E-11	2.86E-11	1.02E-11	3.05E-09
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	9.05E-05	1.39E-03	1.50E-05	9.75E-03
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	8.53E-03	2.21E-03	1.41E-03	2.56E-01
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	1.69E-03	3.66E-04	2.79E-04	7.65E-02
Occupation des sols	PDF.m2.y	2.22E-04	1.23E-04	3.68E-05	2.39E-02
Acidification aquatique	PDF.m2.y	2.09E-06	6.33E-07	3.46E-07	1.08E-04
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	3.18E-05	8.48E-06	5.26E-06	4.24E-03
Eau turbinée	PDF.m2.y	6.56E-05	1.61E-03	1.09E-05	2.75E-01
Énergie primaire non renouvelable	MJ	5.47E-01	1.25E+00	9.05E-02	5.24E+01
Extraction de minerai	MJ	2.59E-04	3.69E-04	4.28E-05	4.99E-02
Changements climatiques	kg CO2- eq	3.45E-02	7.77E-02	5.71E-03	2.49E+00
Eau prélevée	m3	2.75E-04	4.07E-04	4.54E-05	7.09E-02

Tableau C- 36: Résultats bruts — Substitut pour scénario de projet de commercialisation : laine de verre (laine de verre vierge fabriquée au Québec) (catégories intermédiaires)

		Total
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	3.33E-02
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	4.78E-02
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	1.78E-03
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	3.14E+01
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	4.23E-07
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	1.47E-03
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	2.17E+02
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	3.80E+01
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	7.94E-02
Occupation des sols	m2 org ara.y	2.38E-02
Acidification aquatique	kg SO2-eq	1.35E-02
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	4.17E-04
Eau turbinée	m3	7.85E+01
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	5.46E+01
Extraction de minerai	MJ surplus	5.48E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	2.66E+00
Eau prélevée	m3	8.15E-02

Tableau C- 37: Résultats bruts — Substitut pour scénario de projet de commercialisation : laine de verre (laine de verre vierge fabriquée au Québec) (catégories intermédiaires en score normalisé)

		Total
Toxicité humaine, cancérigènes	DALY	9.32E-08
Toxicité humaine, non cancérigènes	DALY	1.34E-07
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	1.24E-06
Radiations ionisantes	DALY	6.59E-09
Destruction de la couche d'ozone	DALY	4.45E-10
Effets respiratoires, organiques	DALY	3.13E-09
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	1.09E-02
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	3.01E-01
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	8.26E-02
Occupation des sols	PDF.m2.y	2.59E-02
Acidification aquatique	PDF.m2.y	1.19E-04
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	4.75E-03
Eau turbinée	PDF.m2.y	3.14E-01
Énergie primaire non renouvelable	MJ	5.46E+01
Extraction de minerai	MJ	5.48E-02
Changements climatiques	kg CO2-eq	2.66E+00
Eau prélevée	m3	8.15E-02

Tableau C- 38: Résultats bruts - Scénario de projet de commercialisation : poudre de verre (catégories intermédiaires)

		Transport vers micronisation	Micronisation du verre	Transport vers lieu d'utilisation
Toxicité humaine, cancérogènes	kg C2H3Cl-eq	3.27E-05	2.48E-04	8.05E-06
Toxicité humaine, non cancérogènes	kg C2H3Cl-eq	5.38E-05	9.57E-04	1.32E-05
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	8.71E-06	8.16E-06	2.15E-06
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	1.84E-02	1.02E+00	4.54E-03
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	9.23E-10	1.02E-09	2.27E-10
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	4.98E-06	3.42E-06	1.23E-06
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	3.09E-01	2.89E+01	7.61E-02
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	1.85E-01	5.68E-01	4.55E-02
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	2.78E-04	1.79E-04	6.85E-05
Occupation des sols	m2 org ara.y	3.50E-05	1.26E-04	8.61E-06
Acidification aquatique	kg SO2-eq	4.07E-05	3.85E-05	1.00E-05
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	4.78E-07	2.09E-06	1.18E-07
Eau turbinée	m3	2.81E-03	4.56E+00	6.93E-04
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	9.38E-02	2.13E-01	2.31E-02
Extraction de minerai	MJ surplus	4.44E-05	6.61E-04	1.09E-05
Changements climatiques	kg CO2-eq	5.92E-03	2.03E-02	1.46E-03
Eau prélevée	m3	4.71E-05	6.03E-04	1.16E-05

Tableau C- 39: Résultats bruts - Scénario de projet de commercialisation : poudre de verre (catégories intermédiaires en score normalisé)

		Transport vers micronisation	Micronisation du verre	Transport vers lieu d'utilisation
Toxicité humaine, cancérogènes	DALY	9.16E-11	6.94E-10	2.26E-11
Toxicité humaine, non cancérogènes	DALY	1.51E-10	2.68E-09	3.71E-11
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	6.10E-09	5.71E-09	1.50E-09
Radiations ionisantes	DALY	3.87E-12	2.15E-10	9.53E-13
Destruction de la couche d'ozone	DALY	9.69E-13	1.07E-12	2.39E-13
Effets respiratoires, organiques	DALY	1.06E-11	7.28E-12	2.61E-12
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	1.55E-05	1.45E-03	3.82E-06
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	1.46E-03	4.49E-03	3.60E-04
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	2.89E-04	1.86E-04	7.12E-05
Occupation des sols	PDF.m2.y	3.81E-05	1.37E-04	9.39E-06
Acidification aquatique	PDF.m2.y	3.59E-07	3.39E-07	8.83E-08
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	5.45E-06	2.38E-05	1.34E-06
Eau turbinée	PDF.m2.y	1.12E-05	1.83E-02	2.77E-06
Énergie primaire non renouvelable	MJ	9.38E-02	2.13E-01	2.31E-02
Extraction de minerai	MJ	4.44E-05	6.61E-04	1.09E-05
Changements climatiques	kg CO2-eq	5.92E-03	2.03E-02	1.46E-03
Eau prélevée	m3	4.71E-05	6.03E-04	1.16E-05

Tableau C- 40: Résultats bruts — Substitut pour scénario de projet de commercialisation : poudre de verre (ciment Portland) (catégories intermédiaires)

		Total
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	3.96E-03
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	1.74E-02
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	4.76E-04
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	1.72E+00
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	4.50E-08
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	1.94E-04
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	2.57E+01
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	6.24E+00
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	1.50E-02
Occupation des sols	m2 org ara.y	2.09E-03
Acidification aquatique	kg SO2-eq	2.67E-03
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	2.94E-05
Eau turbinée	m3	4.52E+00
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	6.02E+00
Extraction de minerai	MJ surplus	3.46E-03
Changements climatiques	kg CO2-eq	1.67E+00
Eau prélevée	m3	5.92E-03

Tableau C- 41: Résultats bruts — Substitut pour scénario de projet de commercialisation : poudre de verre (ciment Portland) (catégories intermédiaires en score normalisé)

		Total
Toxicité humaine, cancérigènes	DALY	1.11E-08
Toxicité humaine, non cancérigènes	DALY	4.86E-08
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	3.34E-07
Radiations ionisantes	DALY	3.61E-10
Destruction de la couche d'ozone	DALY	4.72E-11
Effets respiratoires, organiques	DALY	4.14E-10
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	1.29E-03
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	4.94E-02
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	1.56E-02
Occupation des sols	PDF.m2.y	2.28E-03
Acidification aquatique	PDF.m2.y	2.36E-05
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	3.35E-04
Eau turbinée	PDF.m2.y	1.81E-02
Énergie primaire non renouvelable	MJ	6.02E+00
Extraction de minerai	MJ	3.46E-03
Changements climatiques	kg CO2-eq	1.67E+00
Eau prélevée	m3	5.92E-03

Tableau C- 42: Résultats bruts - Scénario de projet de commercialisation : agrégat de verre (catégories intermédiaires)

		Transport vers micronisation	Concassage du verre	Transport vers lieu d'utilisation
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	3.27E-05	1.76E-04	8.05E-06
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	5.38E-05	8.20E-04	1.32E-05
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	8.71E-06	3.96E-06	2.15E-06
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	1.84E-02	2.59E-01	4.54E-03
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	9.23E-10	4.24E-10	2.27E-10
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	4.98E-06	1.92E-06	1.23E-06
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	3.09E-01	2.79E+01	7.61E-02
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	1.85E-01	2.00E-01	4.55E-02
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	2.78E-04	1.01E-04	6.85E-05
Occupation des sols	m2 org ara.y	3.50E-05	9.76E-05	8.61E-06
Acidification aquatique	kg SO2-eq	4.07E-05	1.86E-05	1.00E-05
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	4.78E-07	6.81E-07	1.18E-07
Eau turbinée	m3	2.81E-03	1.06E+00	6.93E-04
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	9.38E-02	7.18E-02	2.31E-02
Extraction de minerai	MJ surplus	4.44E-05	3.80E-04	1.09E-05
Changements climatiques	kg CO2-eq	5.92E-03	1.30E-02	1.46E-03
Eau prélevée	m3	4.71E-05	3.67E-04	1.16E-05

Tableau C- 43: Résultats bruts - Scénario de projet de commercialisation : agrégat de verre (catégories intermédiaires en score normalisé)

		Transport vers micronisation	Concassage du verre	Transport vers lieu d'utilisation
Toxicité humaine, cancérogènes	DALY	9.16E-11	4.92E-10	2.26E-11
Toxicité humaine, non cancérogènes	DALY	1.51E-10	2.30E-09	3.71E-11
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	6.10E-09	2.77E-09	1.50E-09
Radiations ionisantes	DALY	3.87E-12	5.43E-11	9.53E-13
Destruction de la couche d'ozone	DALY	9.69E-13	4.45E-13	2.39E-13
Effets respiratoires, organiques	DALY	1.06E-11	4.08E-12	2.61E-12
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	1.55E-05	1.40E-03	3.82E-06
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	1.46E-03	1.58E-03	3.60E-04
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	2.89E-04	1.05E-04	7.12E-05
Occupation des sols	PDF.m2.y	3.81E-05	1.06E-04	9.39E-06
Acidification aquatique	PDF.m2.y	3.59E-07	1.64E-07	8.83E-08
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	5.45E-06	7.76E-06	1.34E-06
Eau turbinée	PDF.m2.y	1.12E-05	4.24E-03	2.77E-06
Énergie primaire non renouvelable	MJ	9.38E-02	7.18E-02	2.31E-02
Extraction de minerai	MJ	4.44E-05	3.80E-04	1.09E-05
Changements climatiques	kg CO2-eq	5.92E-03	1.30E-02	1.46E-03
Eau prélevée	m3	4.71E-05	3.67E-04	1.16E-05

Tableau C- 44: Résultats bruts — Substitut pour scénario de projet de commercialisation : agrégat de verre (pierre)
(catégories intermédiaires)

		Total
Toxicité humaine, cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	1.31E-04
Toxicité humaine, non cancérigènes	kg C2H3Cl-eq	1.72E-04
Effets respiratoires, inorganiques	kg PM2.5-eq	3.33E-05
Radiations ionisantes	Bq C-14-eq	1.64E-01
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-eq	2.77E-09
Effets respiratoires, organiques	kg C2H4-eq	1.41E-05
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	7.35E+00
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	2.12E+00
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2-eq	7.63E-04
Occupation des sols	m2 org ara.y	6.83E-05
Acidification aquatique	kg SO2-eq	1.20E-04
Eutrophisation aquatique	kg PO4-eq	1.98E-06
Eau turbinée	m3	5.56E-01
Énergie primaire non renouvelable	MJ primary	3.03E-01
Extraction de minerai	MJ surplus	4.90E-04
Changements climatiques	kg CO2-eq	2.00E-02
Eau prélevée	m3	1.86E-04

Tableau C- 45: Résultats bruts — Substitut pour scénario de projet de commercialisation : agrégat de verre (pierre)
(catégories intermédiaires en score normalisé)

		Total
Toxicité humaine, cancérigènes	DALY	3.67E-10
Toxicité humaine, non cancérigènes	DALY	4.81E-10
Effets respiratoires, inorganiques	DALY	2.33E-08
Radiations ionisantes	DALY	3.44E-11
Destruction de la couche d'ozone	DALY	2.91E-12
Effets respiratoires, organiques	DALY	3.01E-11
Écotoxicité aquatique	PDF.m2.y	3.69E-04
Écotoxicité terrestre	PDF.m2.y	1.68E-02
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF.m2.y	7.94E-04
Occupation des sols	PDF.m2.y	7.44E-05
Acidification aquatique	PDF.m2.y	1.06E-06
Eutrophisation aquatique	PDF.m2.y	2.26E-05
Eau turbinée	PDF.m2.y	2.22E-03
Énergie primaire non renouvelable	MJ	3.03E-01
Extraction de minerai	MJ	4.90E-04
Changements climatiques	kg CO2-eq	2.00E-02
Eau prélevée	m3	1.86E-04

Analyse de contribution et comparaison avec le produit substitué - Système relatif à la bouteille de verre

Aux fins de comparaison cohérente avec le produit substitué équivalent, toutes les étapes nécessaires au conditionnement/traitement du verre pour en produire une matière première pouvant être utilisée dans les projets de commercialisation ou d'utilisation en LET sont comptabilisées dans le profil environnemental. Le profil environnemental associé à chacun des projets et celui pour son produit substitué sont présentés dans les figures suivantes et tiennent compte des paramètres d'équivalence. Il est à noter que les étapes de fabrication et de production des différents produits et matériaux représentés dans ces figures incluent l'approvisionnement en matière première, incluant leur transport, et les procédés de fabrication. Voir la section 2.5 et les figures de l'Annexe A pour une description plus détaillée de ces étapes.

L'interprétation de ces résultats doit se faire avec précaution puisque la comparaison n'est pas équivalente d'un point de vue fonctionnel. Il s'agit uniquement d'une comparaison entre les produits et leurs substituts.

Filière de fin de vie		Produit contenant le verre valorisé	Produit évité	Paramètre d'équivalence
N°2	L'utilisation du verre comme matériau de recouvrement journalier dans les lieux d'enfouissement	Matériau de recouvrement journalier : 1kg verre	Sable : masse équivalente de 1,02 kg	Unité surfacique : $6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 1 \text{ m}$
N°3	L'utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès	Matériau de remblai pour la sous-fondation d'un chemin d'accès : 1kg verre	Gravier : masse équivalente de 1,02 kg	Unité volumique: $6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
N°4.1	L'utilisation du verre comme matière première dans la fabrication d'une bouteille	Bouteille de verre à contenu recyclé 45 % : 0,965 kg verre	Bouteille de verre 100 % vierge de masse équivalente	Unité massique : 2,14 kg
N°4.2	L'utilisation du verre comme matière première dans la fabrication d'une laine de verre	Laine de verre à contenu moyen recyclé 50 % : 0,965 kg verre	Laine de verre 100 % vierge de masse équivalente	Unité massique : 1,93 kg
N°4.3	L'utilisation du verre comme ajout cimentaire dans du béton	Poudre de verre, utilisé comme ajout cimentaire : 0,985 kg verre	Ciment Portland : masse équivalente de 1,22 kg	Unité volumique : $3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
N°4.4	L'utilisation du verre comme agrégat dans du béton	Agrégat de verre, utilisé comme agrégat cimentaire : 0,985 kg verre	Granulat (pierre) : masse équivalente de 1,07 kg	Unité volumique : $4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

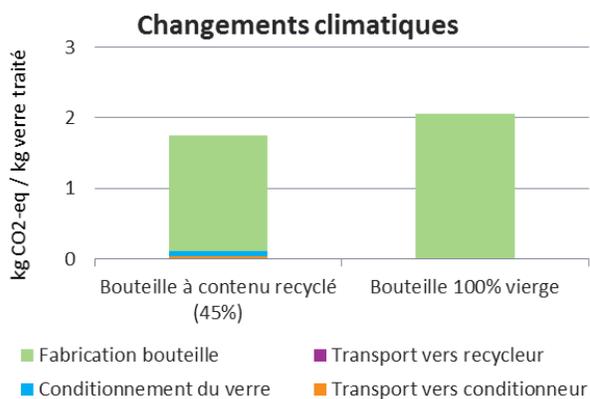


Figure C- 1: Comparaison entre la bouteille à contenu recyclé et son substitut (changements climatiques).

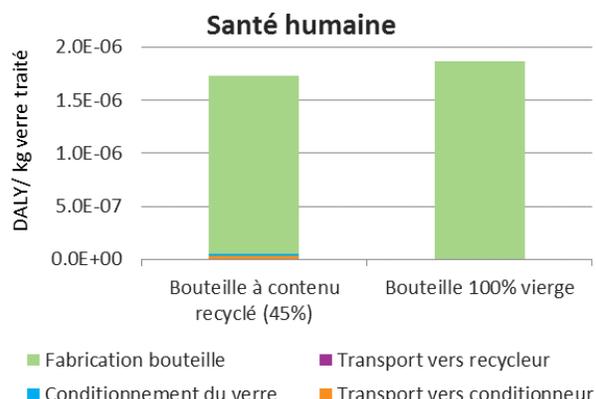


Figure C- 2: Comparaison entre la bouteille à contenu recyclé et son substitut (santé humaine).

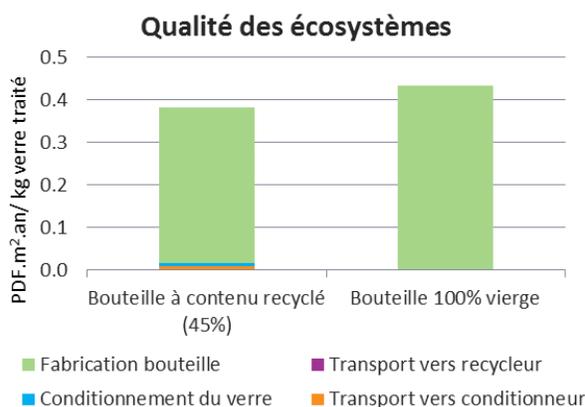


Figure C- 3: Comparaison entre la bouteille à contenu recyclé et son substitut (qualité des écosystèmes).

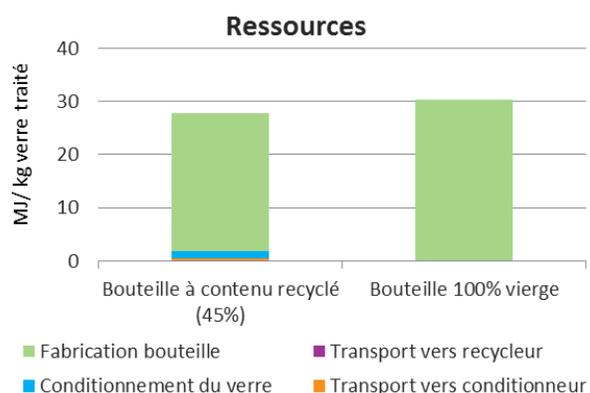


Figure C- 4: Comparaison entre la bouteille à contenu recyclé et son substitut (ressources).

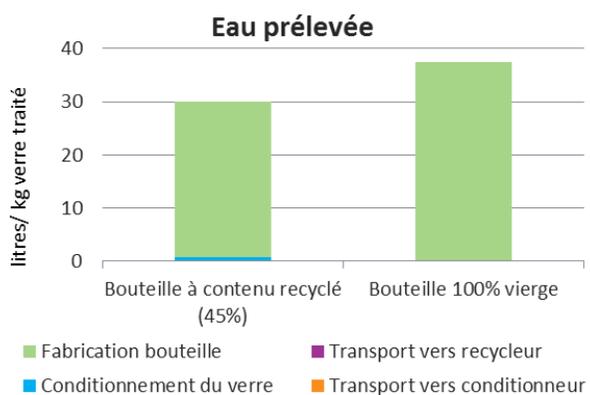


Figure C- 5: Comparaison entre la bouteille à contenu recyclé et son substitut (eau prélevée).

Analyse de contribution et comparaison avec le produit substitué - Système relatif à la laine de verre

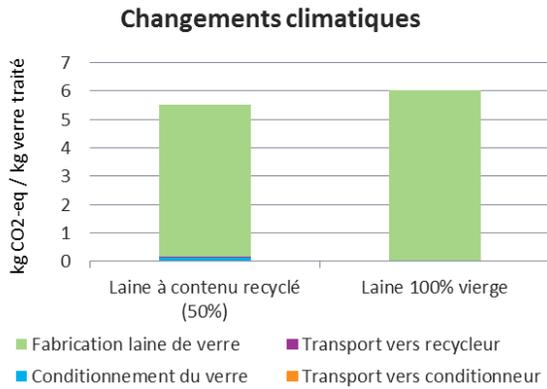


Figure C- 6: Comparaison entre la laine de verre à contenu recyclé et son substitut (changements climatiques).

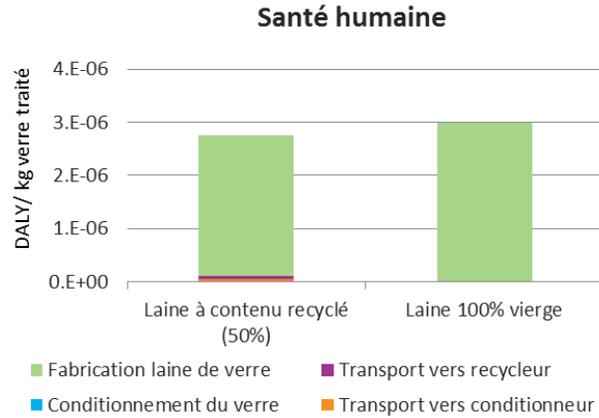


Figure C- 7: Comparaison entre la laine de verre à contenu recyclé et son substitut (santé humaine).

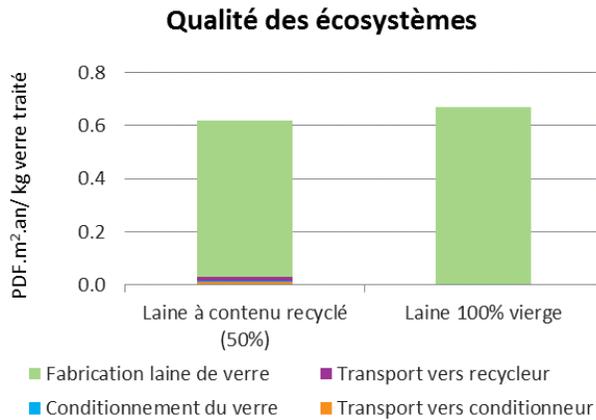


Figure C- 8: Comparaison entre la laine de verre à contenu recyclé et son substitut (qualité des écosystèmes).

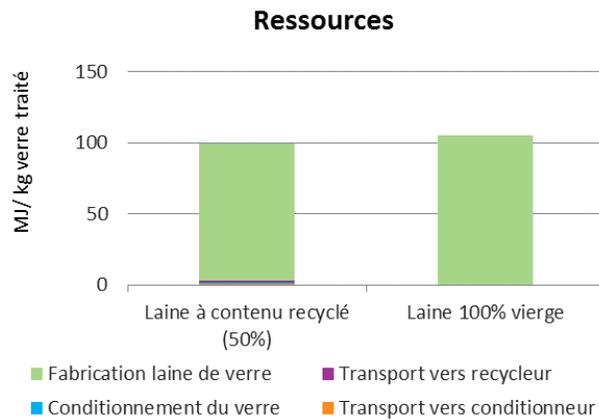


Figure C- 9: Comparaison entre la laine de verre à contenu recyclé et son substitut (ressources).

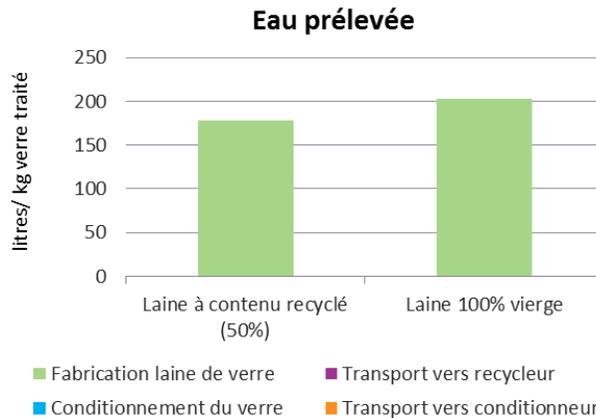


Figure C- 10: Comparaison entre la laine de verre à contenu recyclé et son substitut (eau prélevée).

Analyse de contribution et comparaison avec le produit substitué - Système relatif à la poudre de verre

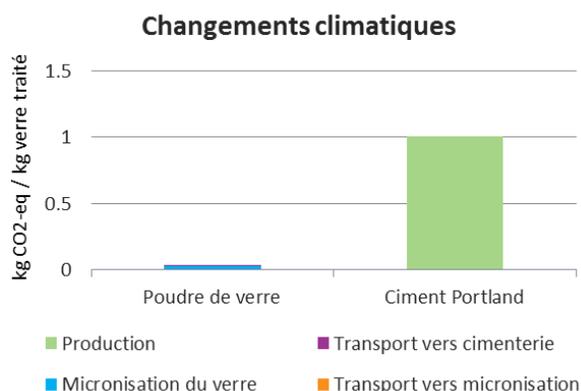


Figure C- 11: Comparaison entre la poudre de verre et son substitut (changements climatiques).

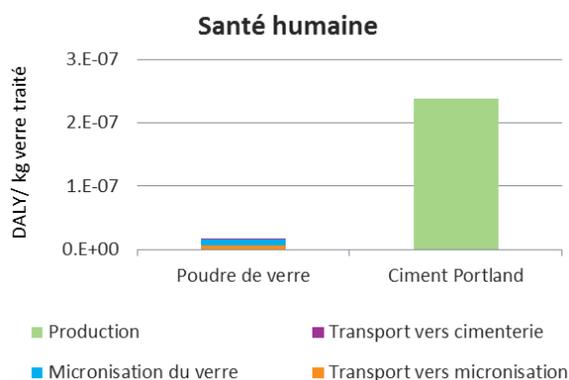


Figure C- 12: Comparaison entre la poudre de verre et son substitut (santé humaine).

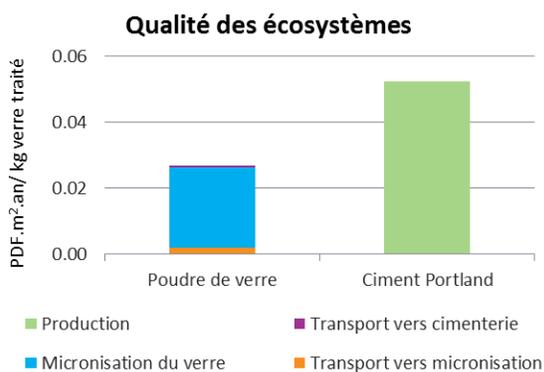


Figure C- 13: Comparaison entre la poudre de verre et son substitut (qualité des écosystèmes).

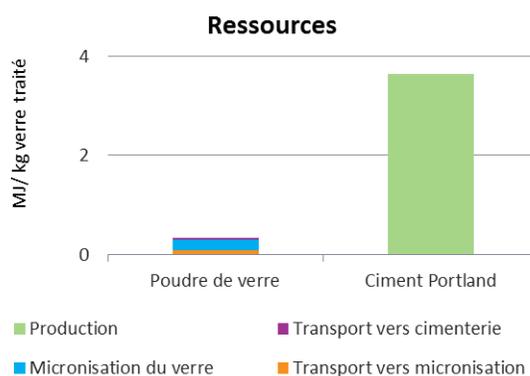


Figure C- 14: Comparaison entre la poudre de verre et son substitut (ressources).

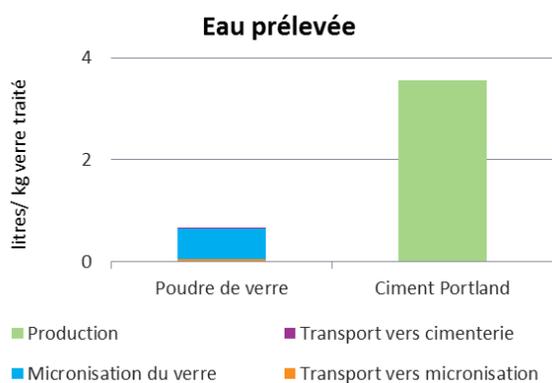


Figure C- 15: Comparaison entre la poudre de verre et son substitut (eau prélevée).

Analyse de contribution et comparaison avec le produit substitué - Système relatif à l'agrégat de verre

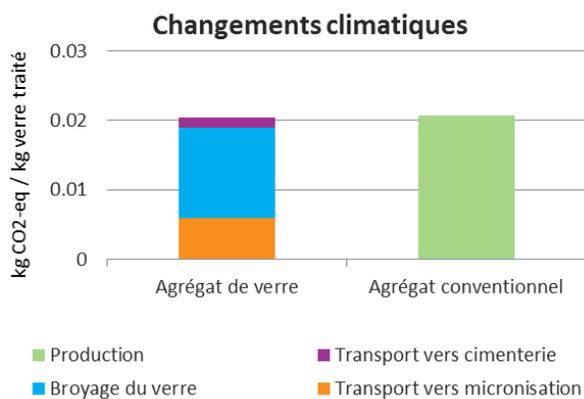


Figure C- 16: Comparaison entre l'agrégat de verre et son substitut (changements climatiques).

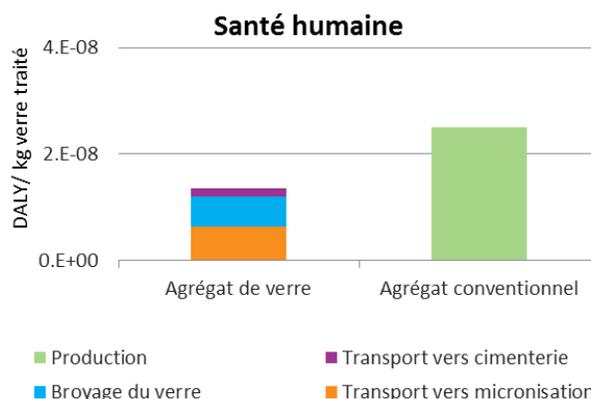


Figure C- 17: Comparaison entre l'agrégat de verre et son substitut (santé humaine).

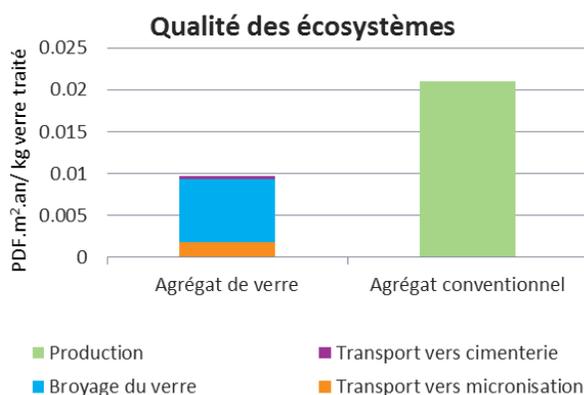


Figure C- 18: Comparaison entre l'agrégat de verre et son substitut (qualité des écosystèmes).

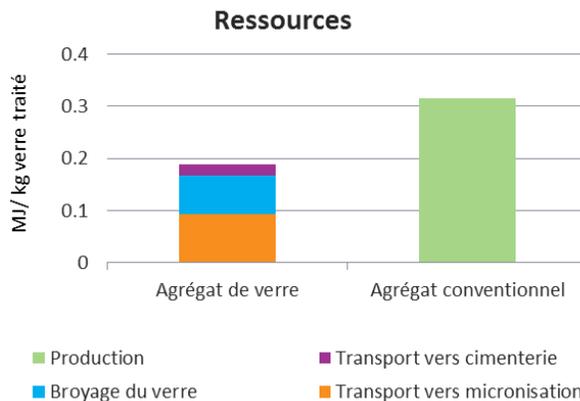


Figure C- 19: Comparaison entre l'agrégat de verre et son substitut (ressources).

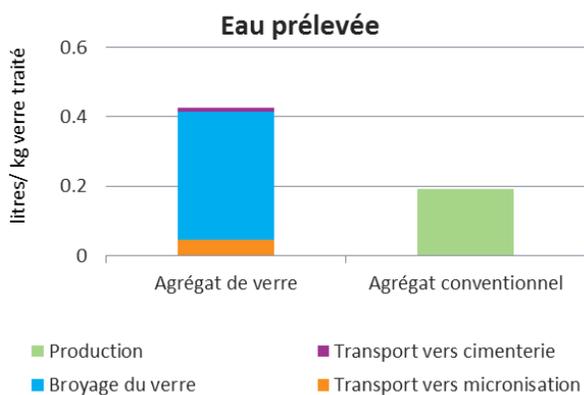


Figure C- 20: Comparaison entre l'agrégat de verre et son substitut (eau prélevée).

**Analyse de contribution et comparaison avec le produit substitué - Système relatif au projet
d'utilisation en LET (matériau de recouvrement)**

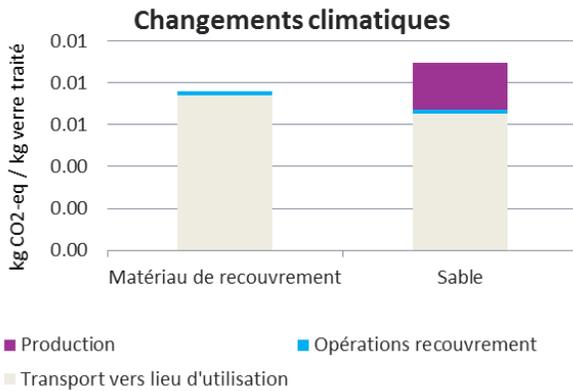


Figure C- 21: Comparaison entre le matériau de recouvrement et son substitut (changements climatiques).

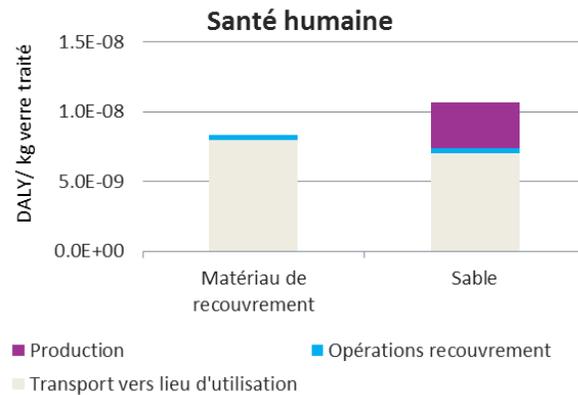


Figure C- 22: Comparaison entre le matériau de recouvrement et son substitut (santé humaine).

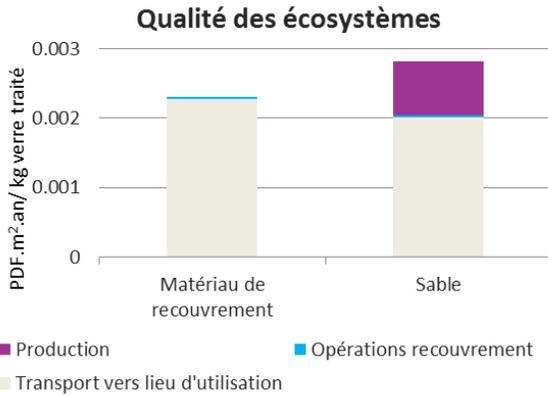


Figure C- 23: Comparaison entre le matériau de recouvrement et son substitut (qualité des écosystèmes).

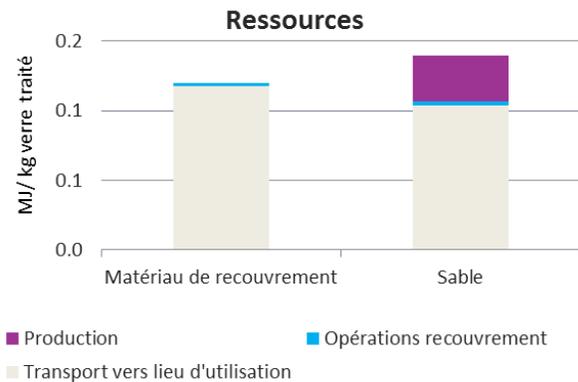


Figure C- 24: Comparaison entre le matériau de recouvrement et son substitut (ressources).

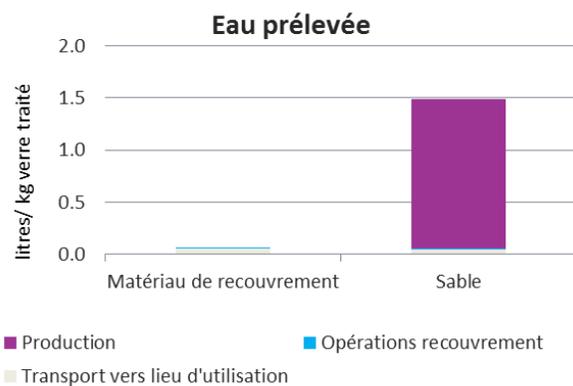


Figure C- 25: Comparaison entre le matériau de recouvrement et son substitut (eau prélevée).

**Analyse de contribution et comparaison avec le produit substitué - Système relatif au projet
d'utilisation en LET (matériau de recouvrement)**

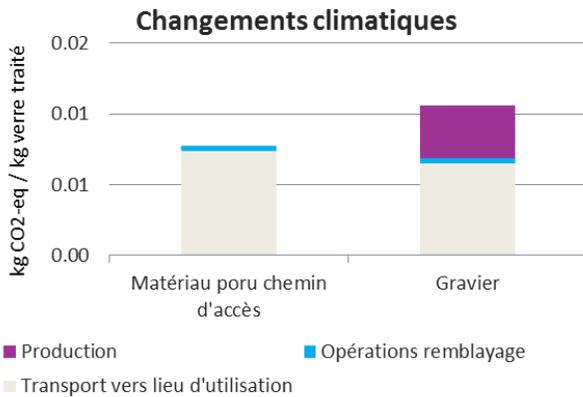


Figure C- 26: Comparaison entre le matériau pour chemin d'accès et son substitut (changements climatiques).

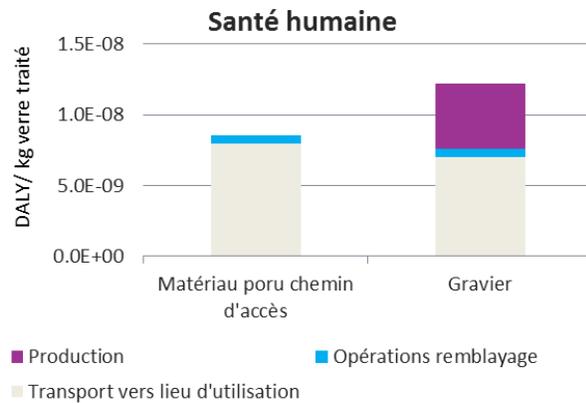


Figure C- 27: Comparaison entre le matériau pour chemin d'accès et son substitut (santé humaine).

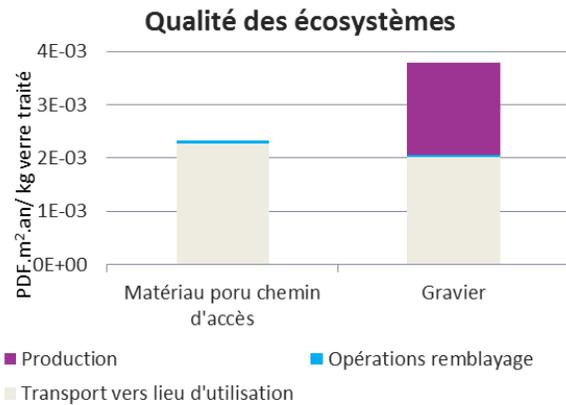


Figure C- 28: Comparaison entre le matériau pour chemin d'accès et son substitut (qualité des écosystèmes).

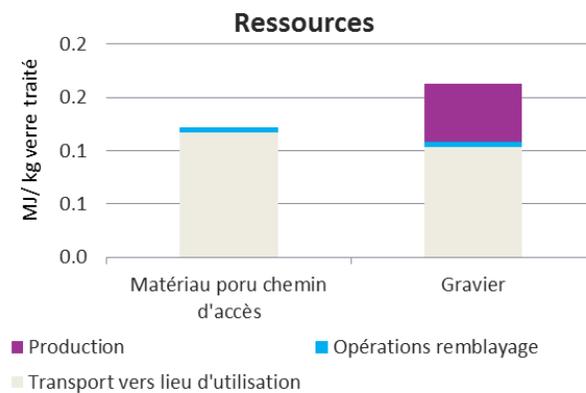


Figure C- 29: Comparaison entre le matériau pour chemin d'accès et son substitut (ressources).

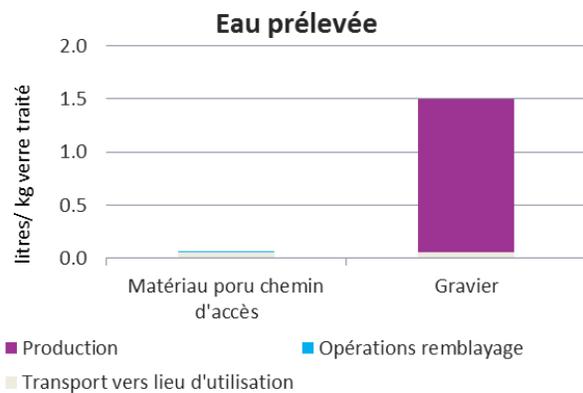


Figure C- 30: Comparaison entre le matériau pour chemin d'accès et son substitut (eau prélevée).

Analyse d'incertitude

Étant donné que les scénarios contiennent plusieurs processus identiques, ces derniers ont été retirés des systèmes afin de prendre en compte seulement l'incertitude des processus non corrélés. C'est pourquoi les écarts relatifs entre les scénarios de cette section sont différents de ceux présentés dans la section résultats. Cependant, l'écart absolu demeure identique.

En terme d'interprétation, les différences minimales requises entre deux scores finaux pour que ceux-ci soient considérés significativement différents sont de :

- Changements climatiques: 10 %
- Santé humaine (effets respiratoires): 30 %
- Santé humaine (toxicité): un ordre de grandeur (facteur 10)
- Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation) : 30 %
- Qualité des écosystèmes (toxicité): un ordre de grandeur (facteur 10)
- Ressources: 10 %
- Eau prélevée : il n'existe pas d'intervalle d'incertitude pour ce flux d'inventaire

Pour chacun des indicateurs évalués, trois niveaux de différences sont définis :

- différence très significative : l'écart minimal est respecté (les barres d'incertitude ne se chevauchent pas)
- différence légèrement significative : au maximum 50 % de l'écart minimal est respecté (les barres d'incertitude se chevauchent au plus de 50 %)
- résultat non concluant : l'écart minimal n'est pas respecté (les barres d'incertitude se chevauchent au moins de 50 %)

Ces niveaux de différences s'appliquent lors de la comparaison entre deux scénarios afin de déterminer si le résultat d'un score d'impact d'un scénario donné est favorable ou défavorable par rapport à l'autre scénario.

Analyse d'incertitude – Projets d'utilisation en LET

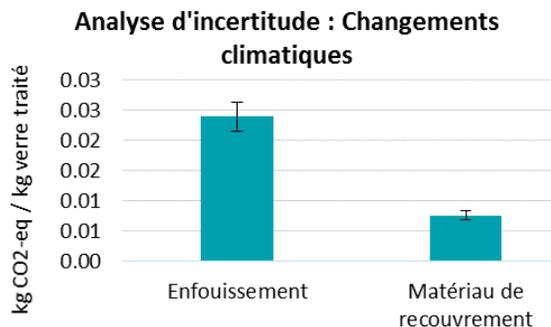


Figure C- 31: Analyse d'incertitude –Changements climatiques (matériau de recouvrement).

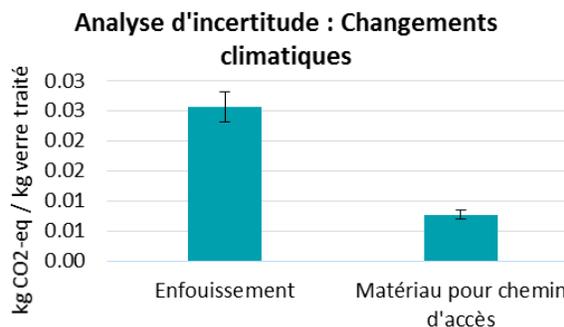


Figure C- 32: Analyse d'incertitude –Changements climatiques (matériau pour chemin d'accès).

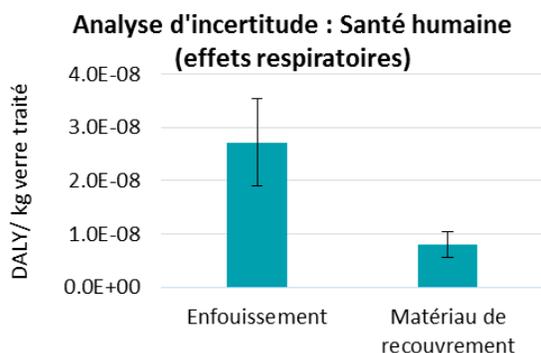


Figure C- 33: Analyse d'incertitude –Santé humaine (effets respiratoires) (matériau de recouvrement).

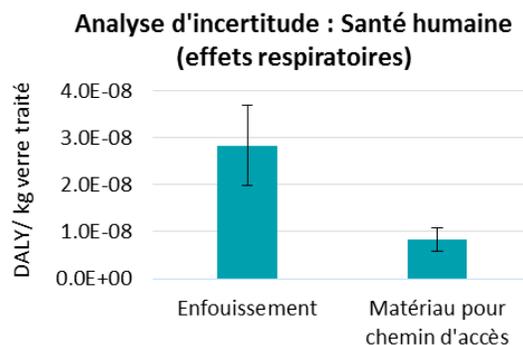


Figure C- 34: Analyse d'incertitude –Santé humaine (effets respiratoires) (matériau pour chemin d'accès).

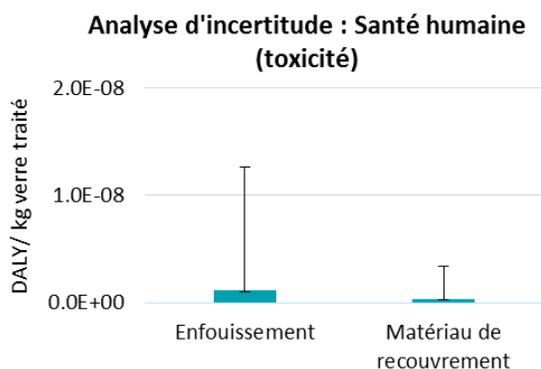


Figure C- 35: Analyse d'incertitude –Santé humaine (toxicité) (matériau de recouvrement).

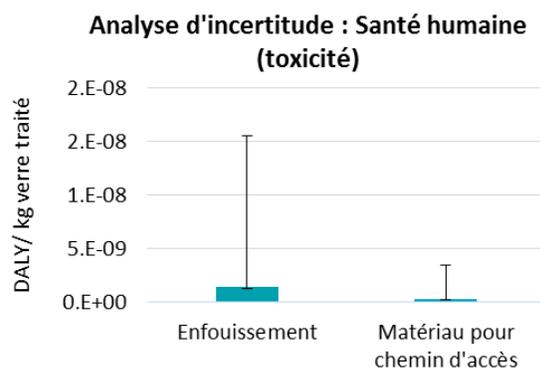


Figure C- 36: Analyse d'incertitude –Santé humaine (toxicité) (matériau pour chemin d'accès).

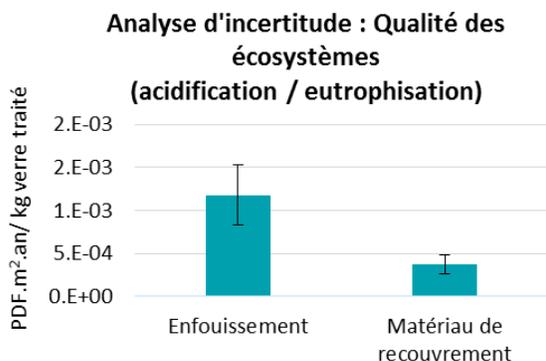


Figure C- 37: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation) (matériau de recouvrement).

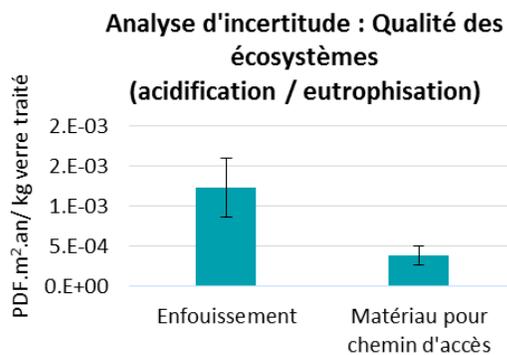


Figure C- 38: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation) (matériau pour chemin d'accès).

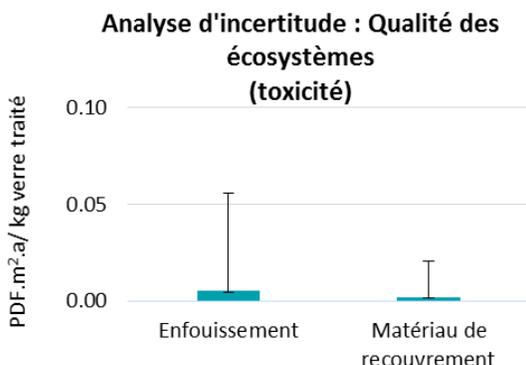


Figure C- 39: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (toxicité) (matériau de recouvrement).

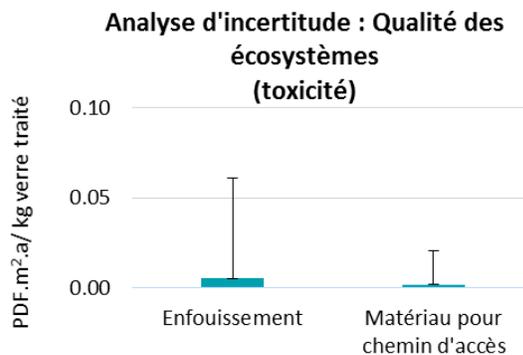


Figure C- 40: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (toxicité) (matériau pour chemin d'accès).

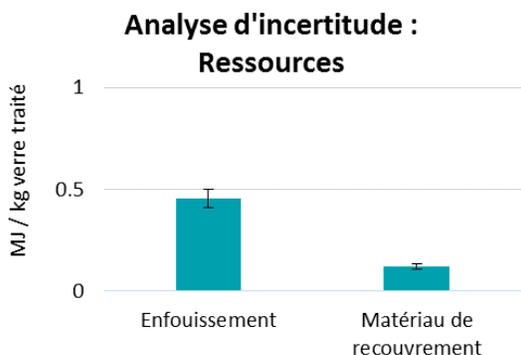


Figure C- 41: Analyse d'incertitude –Ressources (matériau de recouvrement).

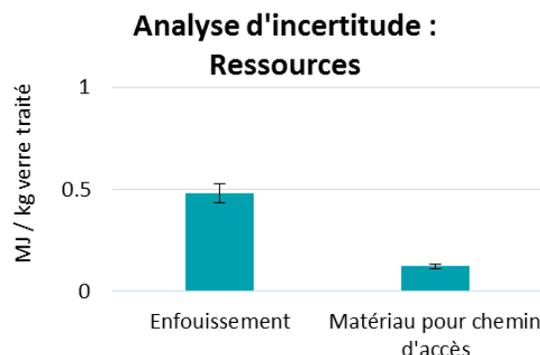


Figure C- 42: Analyse d'incertitude –Ressources (matériau pour chemin d'accès).

Analyse d'incertitude – Projets de commercialisation (bouteille de verre)

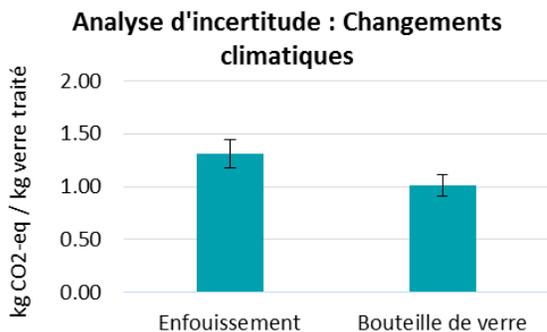


Figure C- 43: Analyse d'incertitude –Changements climatiques.

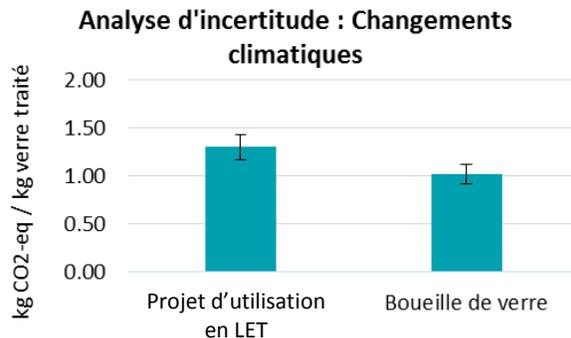


Figure C- 44: Analyse d'incertitude –Changements climatiques.

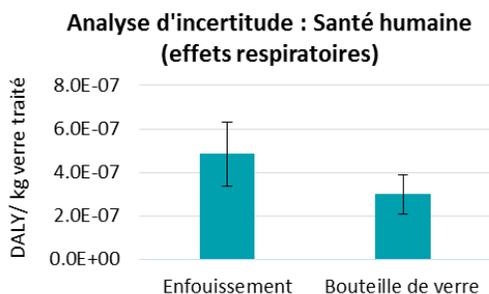


Figure C- 45: Analyse d'incertitude –Santé humaine (effets respiratoires).

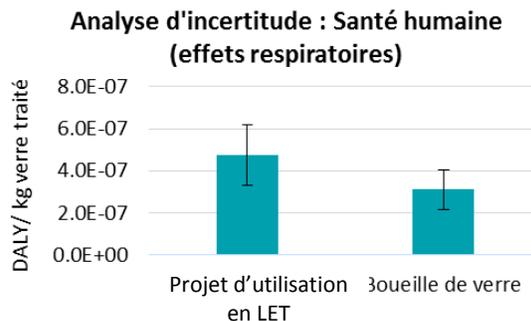


Figure C- 46: Analyse d'incertitude –Santé humaine (effets respiratoires).

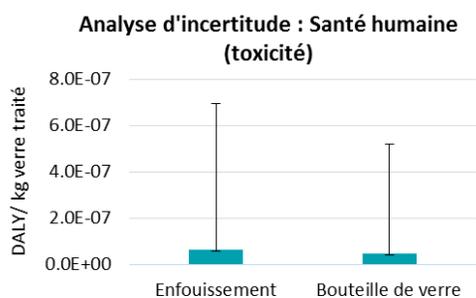


Figure C- 47: Analyse d'incertitude –Santé humaine (toxicité).

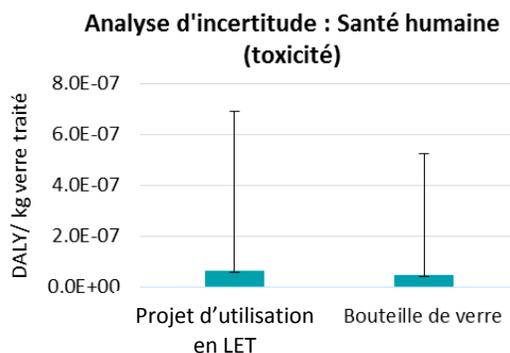


Figure C- 48: Analyse d'incertitude –Santé humaine (toxicité).

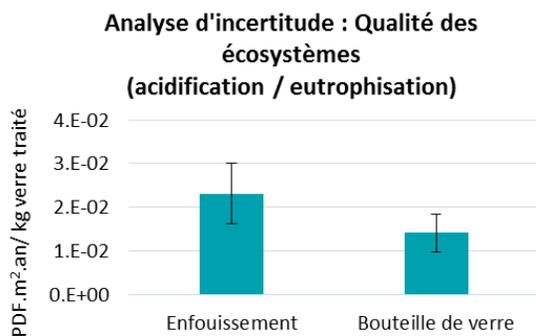


Figure C- 49: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation).

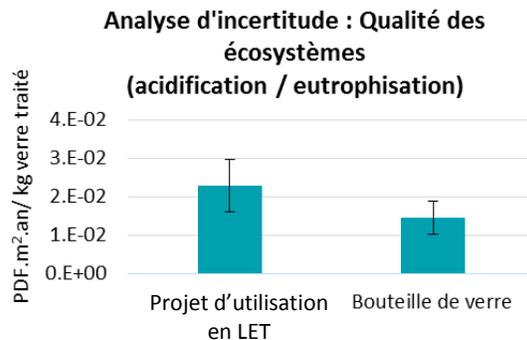


Figure C- 50: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation).

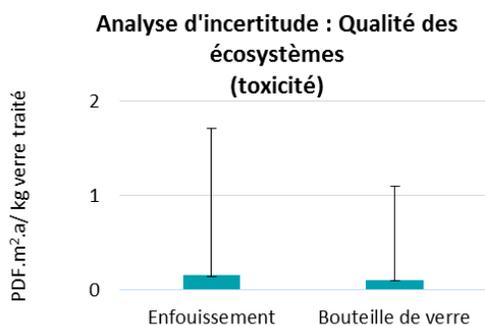


Figure C- 51: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (toxicité).

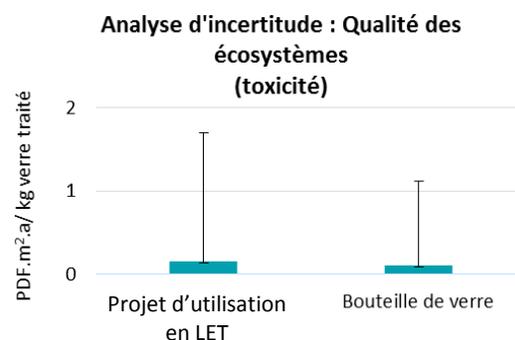


Figure C- 52: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (toxicité).

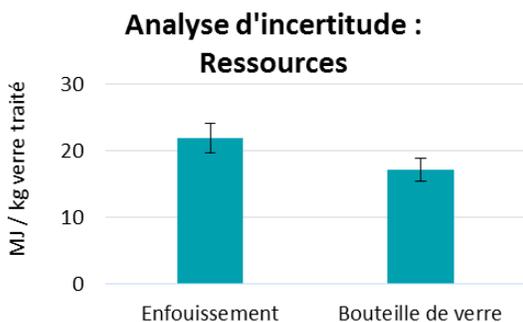


Figure C- 53: Analyse d'incertitude –Ressources).

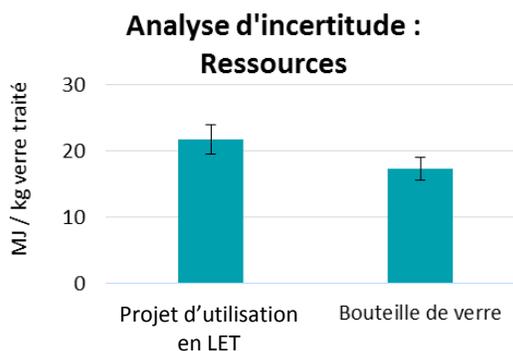


Figure C- 54: Analyse d'incertitude –Ressources.

Analyse d'incertitude – Projets de commercialisation (laine de verre)

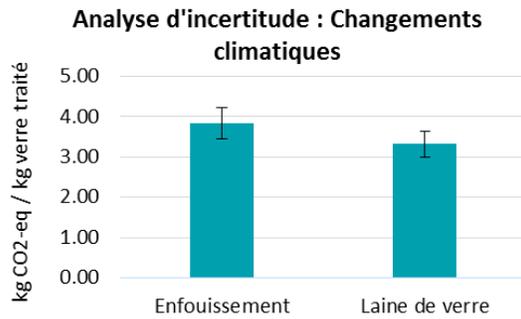


Figure C- 55: Analyse d'incertitude –Changements climatiques.

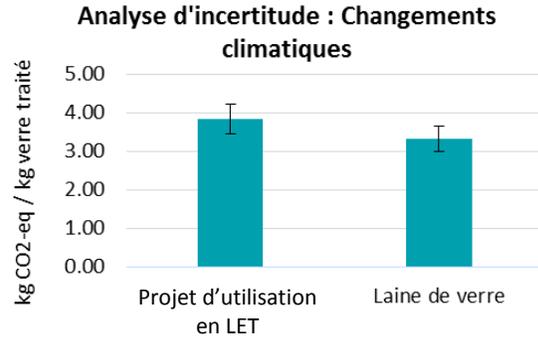


Figure C- 56: Analyse d'incertitude –Changements climatiques.

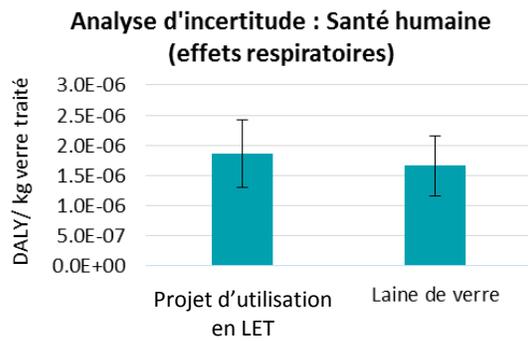


Figure C- 57: Analyse d'incertitude –Santé humaine (effets respiratoires).

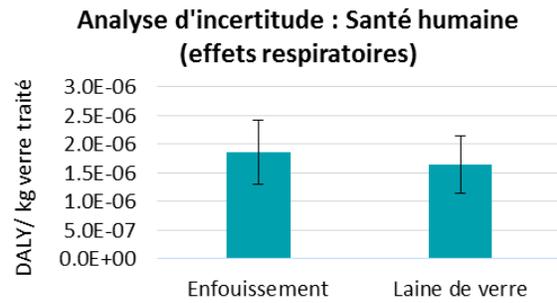


Figure C- 58: Analyse d'incertitude –Santé humaine (effets respiratoires).

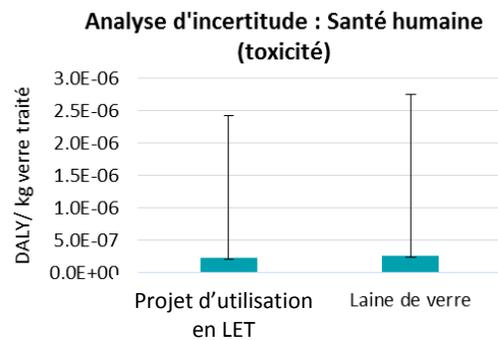


Figure C- 59: Analyse d'incertitude –Santé humaine (toxicité).

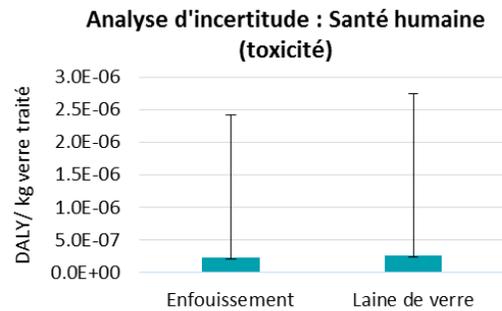


Figure C- 60: Analyse d'incertitude –Santé humaine (toxicité).

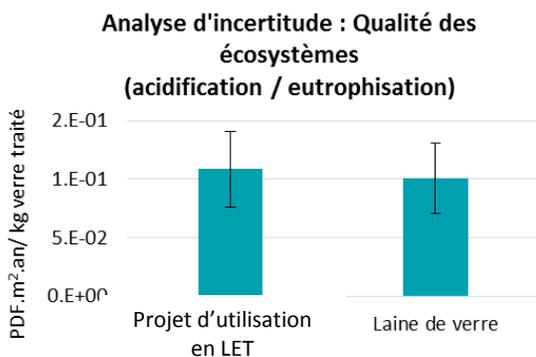


Figure C- 61: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation).

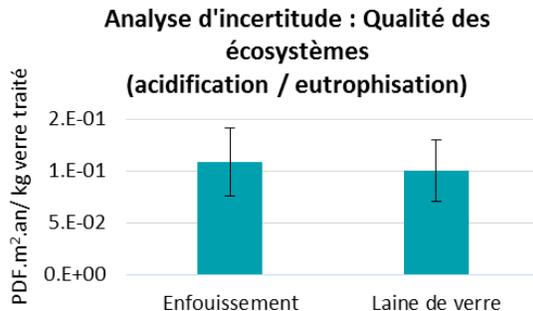


Figure C- 62: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation).

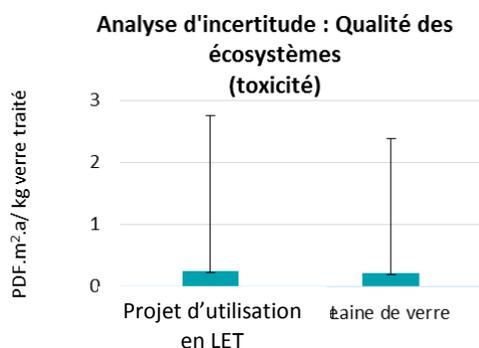


Figure C- 63: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (toxicité).

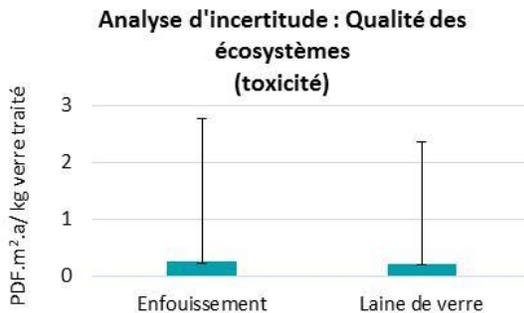


Figure C- 64: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (toxicité).

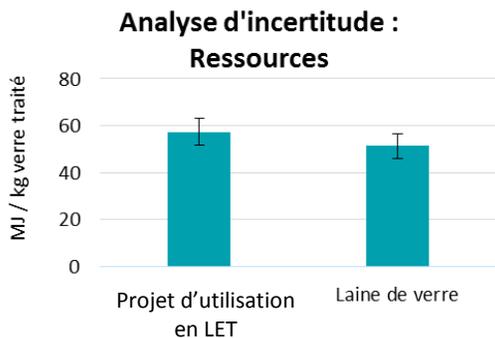


Figure C- 65: Analyse d'incertitude –Ressources).

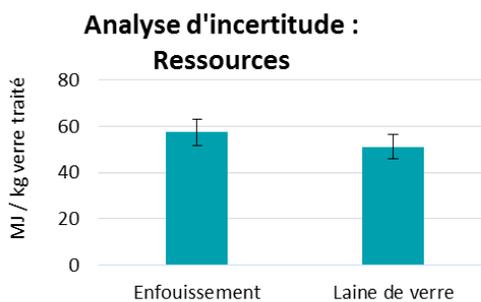


Figure C- 66: Analyse d'incertitude –Ressources.

Analyse d'incertitude – Projets de commercialisation (poudre de verre)

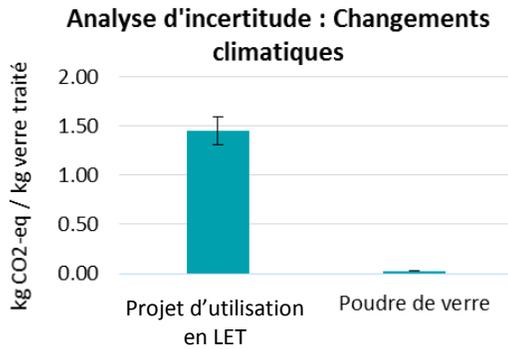


Figure C- 67: Analyse d'incertitude –Changements climatiques.

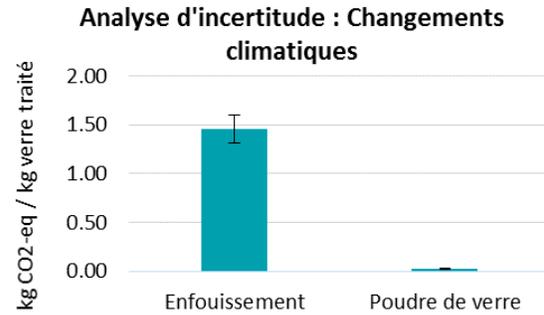


Figure C- 68: Analyse d'incertitude – Changements climatiques.

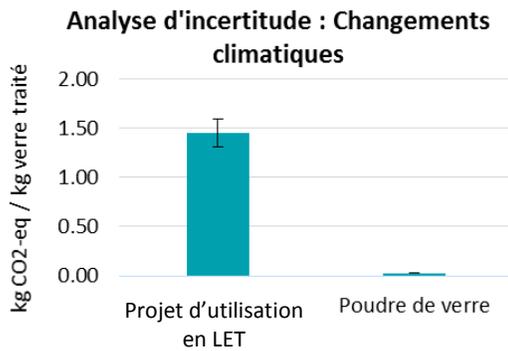


Figure C- 69: Analyse d'incertitude –Santé humaine (effets respiratoires).

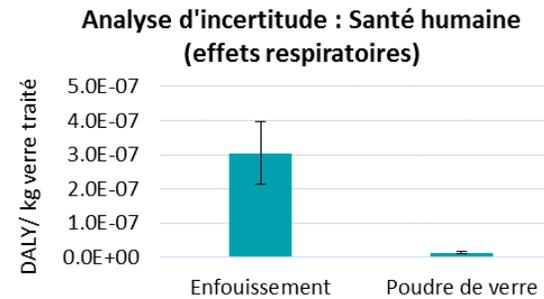


Figure C- 70: Analyse d'incertitude –Santé humaine (effets respiratoires).

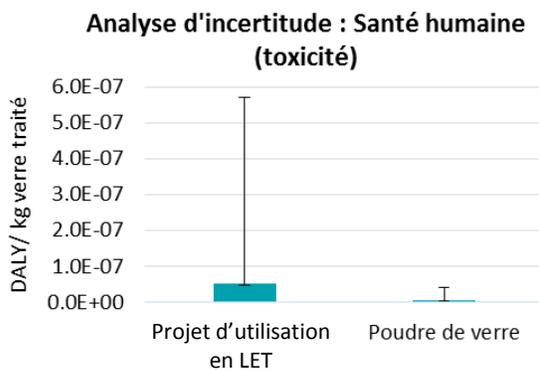


Figure C- 71: Analyse d'incertitude –Santé humaine (toxicité).

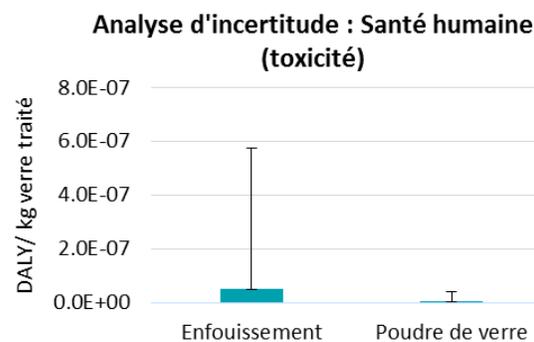


Figure C- 72: Analyse d'incertitude –Santé humaine (toxicité).

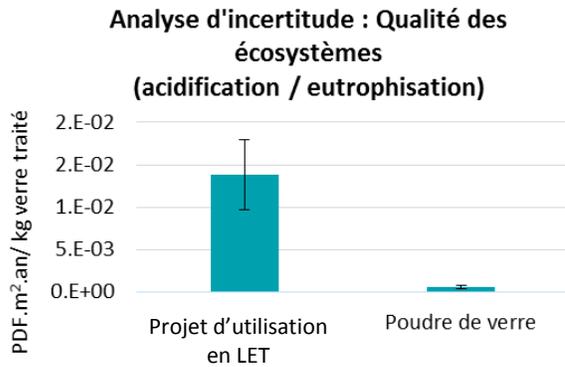


Figure C- 73: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation).

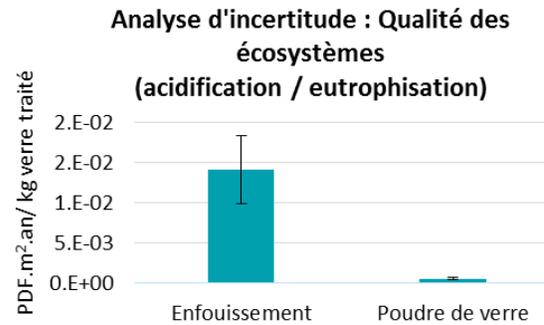


Figure C- 74: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation).

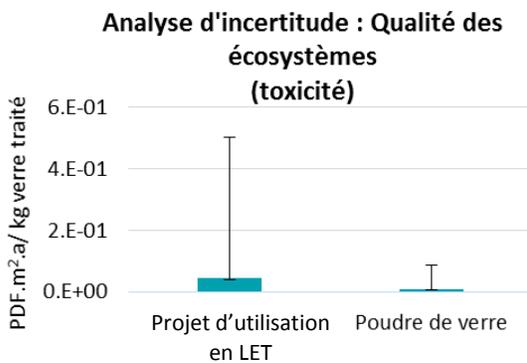


Figure C- 75: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (toxicité).

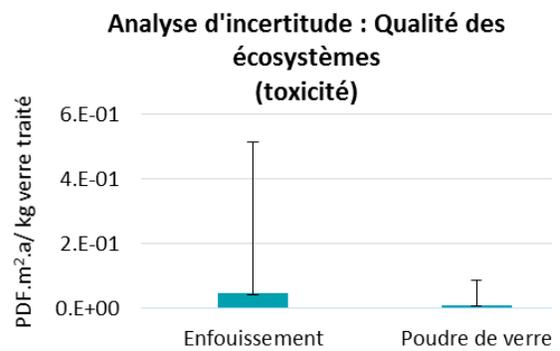


Figure C- 76: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (toxicité)).

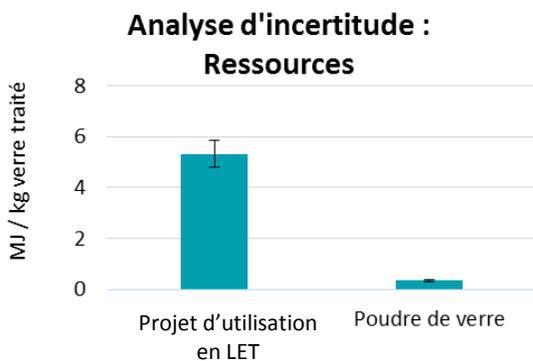


Figure C- 77: Analyse d'incertitude –Ressources).

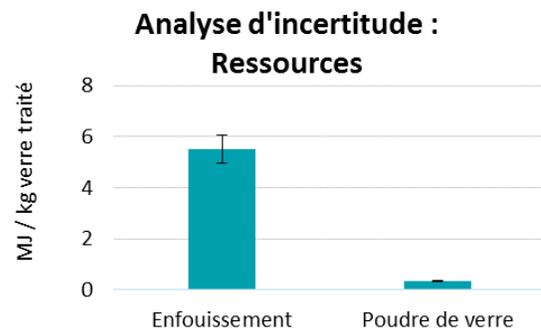


Figure C- 78: Analyse d'incertitude –Ressources.

Analyse d'incertitude – Projets de commercialisation (agrégat de verre)

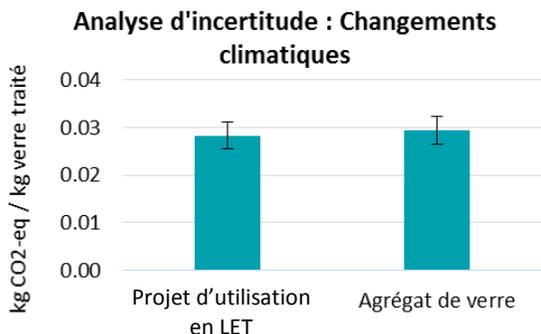


Figure C- 79: Analyse d'incertitude –Changements climatiques.

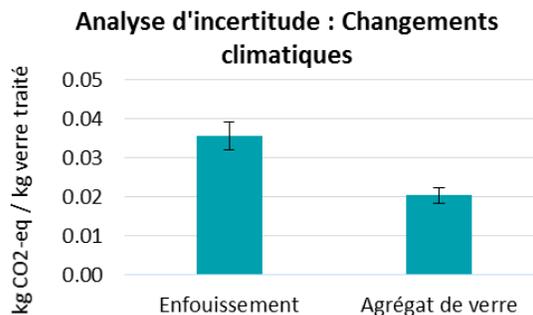


Figure C- 80: Analyse d'incertitude – Changements climatiques.

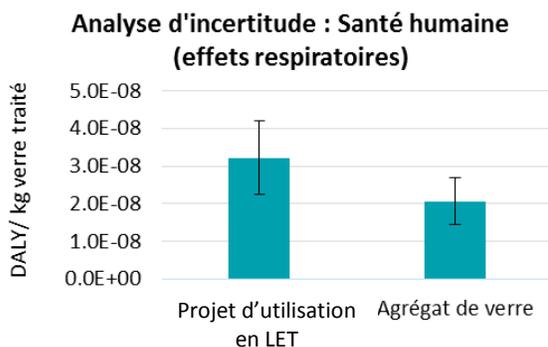


Figure C- 81: Analyse d'incertitude –Santé humaine (effets respiratoires).

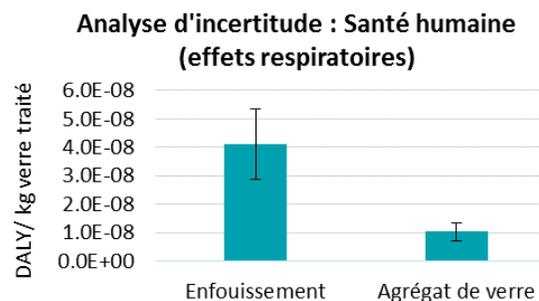


Figure C- 82: Analyse d'incertitude –Santé humaine (effets respiratoires).

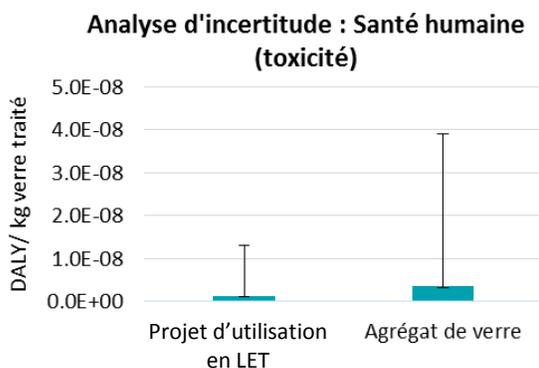


Figure C- 83: Analyse d'incertitude –Santé humaine (toxicité).

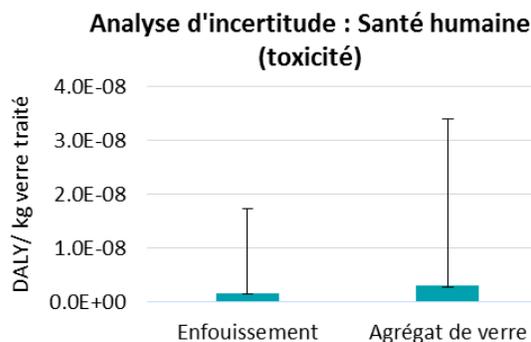


Figure C- 84: Analyse d'incertitude –Santé humaine (toxicité).

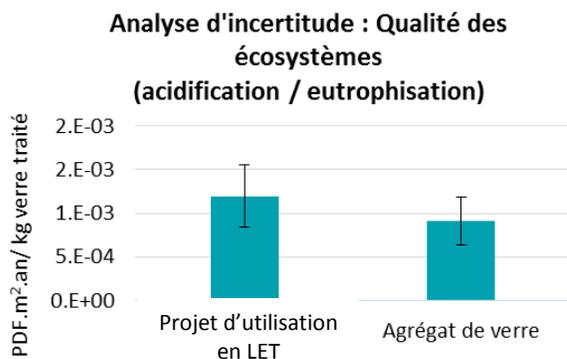


Figure C- 85: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation).

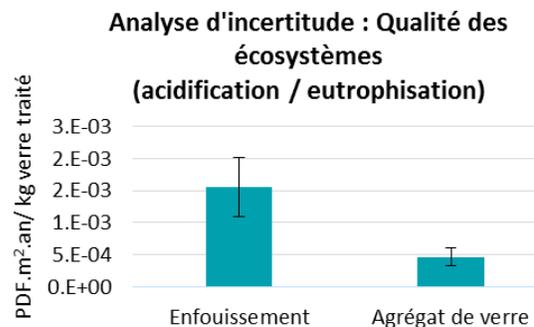


Figure C- 86: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (acidification/eutrophisation).

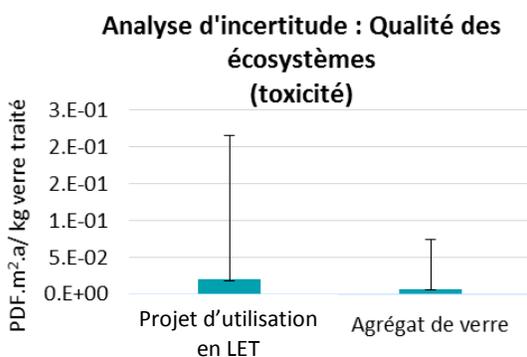


Figure C- 87: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (toxicité).

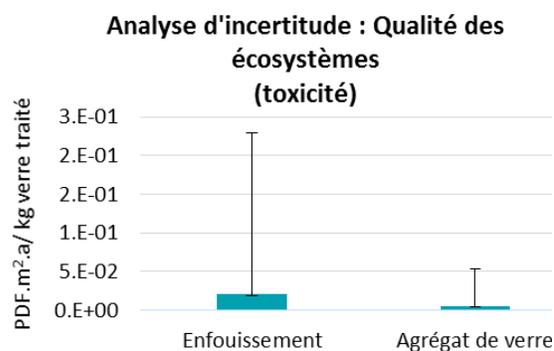


Figure C- 88: Analyse d'incertitude –Qualité des écosystèmes (toxicité)).

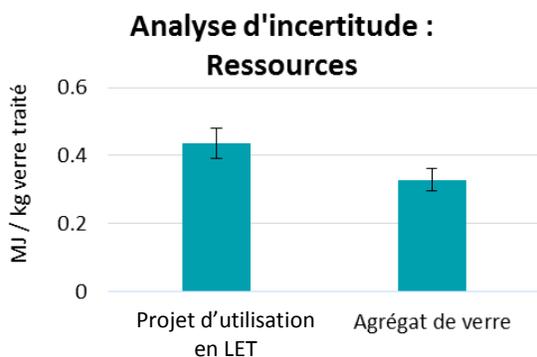


Figure C- 89: Analyse d'incertitude –Ressources).

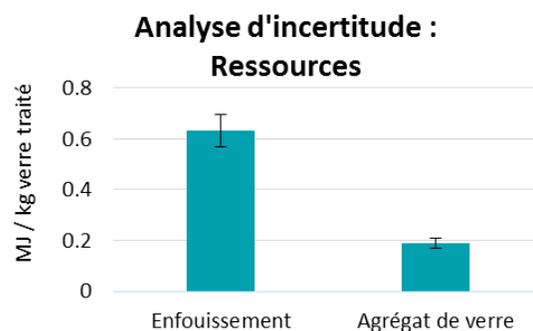


Figure C- 90: Analyse d'incertitude –Ressources.

Analyse de sensibilité

Tableau C- 46 : Analyse de sensibilité – méthode ReCiPe (système bouteille de verre)

	Santé humaine (DALY)	Qualité des écosystèmes (espèces * an)	Ressources (\$)
Enfouissement	4.29E-06	2.43E-08	1.06E-01
Matériau de recouvrement	4.26E-06	2.42E-08	1.05E-01
Matériau de sous-fondation	4.25E-06	2.41E-08	1.05E-01
Bouteille de verre	3.71E-06	2.15E-08	9.58E-02
Différence par rapport à l'enfouissement	13 %	11 %	10 %
Différence par rapport au projet d'utilisation en LET (matériau de recouvrement)	13 %	11 %	9 %
Différence par rapport au projet d'utilisation en LET (matériau de sous-fondation)	13 %	11 %	9 %

Tableau C- 47: Analyse de sensibilité – méthode ReCiPe (système laine de verre)

	Santé humaine (DALY)	Qualité des écosystèmes (espèces * an)	Ressources (\$)
Enfouissement	1.11E-05	5.37E-08	4.00E-01
Matériau de recouvrement	1.11E-05	5.36E-08	3.99E-01
Matériau de sous-fondation	1.11E-05	5.36E-08	3.99E-01
Laine de verre	1.01E-05	4.92E-08	3.82E-01
Différence par rapport à l'enfouissement	9 %	8 %	4 %
Différence par rapport au projet d'utilisation en LET (matériau de recouvrement)	9 %	8 %	4 %
Différence par rapport au projet d'utilisation en LET (matériau de sous-fondation)	9 %	8 %	4 %

Tableau C- 48: méthode ReCiPe (système poudre de verre)

	Santé humaine (DALY)	Qualité des écosystèmes (espèces * an)	Ressources (\$)
Enfouissement	1.66E-06	8.42E-09	1.57E-02
Matériau de recouvrement	1.63E-06	8.35E-09	1.46E-02
Matériau de sous-fondation	1.62E-06	8.28E-09	1.43E-02
Poudre de verre	8.86E-08	4.40E-10	1.88E-03
Différence par rapport à l'enfouissement	95 %	95 %	88 %
Différence par rapport au projet d'utilisation en LET (matériau de recouvrement)	95 %	95 %	87 %
Différence par rapport au projet d'utilisation en LET (matériau de sous-fondation)	95 %	95 %	87 %

Tableau C- 49: méthode ReCiPe (système agrégat de verre)

	Santé humaine (DALY)	Qualité des écosystèmes (espèces * an)	Ressources (\$)
Enfouissement	1.25E-07	4.49E-10	3.37E-03
Matériau de recouvrement	8.41E-08	3.08E-10	1.95E-03
Matériau de sous-fondation	8.43E-08	3.08E-10	1.96E-03
Agrégat de verre	7.45E-08	3.72E-10	1.66E-03
Différence par rapport à l'enfouissement	40 %	17 %	51 %
Différence par rapport au projet d'utilisation en LET (matériau de recouvrement)	11 %	-21 %	15 %
Différence par rapport au projet d'utilisation en LET (matériau de sous-fondation)	12 %	-21 %	15 %

Tableau C- 50: Contribution de la catégorie Changements climatiques aux indicateurs Santé humaine et Qualité des écosystèmes (méthode ReCiPe)

Projets		Contribution de la catégorie changements climatiques aux indicateurs:	
		Santé humaine (%)	Qualité des écosystèmes (%)
Bouteille de verre	Enfouissement	68 %	68 %
	Matériau de recouvrement	68 %	68 %
	Matériau de sous-fondation	68 %	68 %
	Bouteille de verre	66 %	64 %
Laine de verre	Enfouissement	76 %	89 %
	Matériau de recouvrement	76 %	89 %
	Matériau de sous-fondation	76 %	89 %
	Laine de verre	76 %	89 %
Poudre de verre	Enfouissement	73 %	97 %
	Matériau de recouvrement	88 %	97 %
	Matériau de sous-fondation	88 %	97 %
	Poudre de verre	70 %	80 %
Agrégat de verre	Enfouissement	68 %	78 %
	Matériau de recouvrement	56 %	80 %
	Matériau de sous-fondation	55 %	85 %
	Agrégat de verre	70 %	79 %

Annexe D :
Évaluation de la qualité des données d'inventaire

Le Tableau D-1 résume les critères d'évaluation employés pour l'analyse de la qualité des données d'inventaire.

Quatre niveaux de qualité sont définis :

- Une donnée de haute qualité est définie comme une donnée représentative du contexte (année et géographie) de l'étude. La technologie modélisée est la même que celle utilisée par le processus à l'étude.
- Une donnée de qualité moyenne est représentative du contexte des cinq dernières années et a été adaptée partiellement pour le contexte géographique de l'étude. La technologie modélisée est similaire à celle à l'étude.
- Une donnée de qualité minimum est représentative du contexte des 10 dernières années, ou elle est issue d'une base de données ACV reconnue. Elle a été adaptée partiellement pour le contexte géographique de l'étude et la technologie modélisée s'apparente à celle à l'étude.
- Une donnée de basse qualité n'est pas nécessairement documentée par rapport à son âge, son contexte géographique ou la technologie modélisée.

Tableau D-1: Critères d'évaluation de la qualité des données

Qualité	Fiabilité		Représentativité		Comment
Haute qualité	1	Donnée spécifique calculée ou validée	1	Bonne représentativité géographique et technologique	Satisfait à des standards de haute qualité
Qualité acceptable	2	Donnée calculée ou validée d'une autre source	2	Représentativité géographique ou technologique raisonnable	Satisfait à des standards de qualité moyenne
Qualité minimale	3	Estimation qualifiée	3	Manque de représentativité géographique et technologique	Satisfait à des standards de qualité minimum
Basse qualité	4	Estimation grossière	4	Approximation	Nécessiterait une amélioration

Le Tableau D- 2 présente les résultats de l'analyse de la qualité des données d'inventaire.

Selon les objectifs de l'étude, il est supposé qu'une qualité minimale de niveau 2 est requise en matière de fiabilité et de représentativité pour les données d'importance élevée et moyenne. De plus, pour les données de faible importance, une qualité de niveau 3 est acceptable. Toutefois, les données de niveau 4 ne rencontrent pas les standards de qualité et nécessitent des recherches plus approfondies en vue d'en améliorer la qualité.

Tableau D- 2: Évaluation de la qualité des données

Étape du cycle de vie	Donnée	Fiabilité	Représentativité	Paramètre variable
Toutes les filières de gestion de fin de vie (scénarios 1, 2, 3, 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4)				
Collecte	Distance moyenne de collecte	1	1	Oui
Filière de gestion de fin de vie par enfouissement (scénario 1)				
Gestion de fin de vie	Distance jusqu'au lieu d'enfouissement	1	1	Oui
Filières de gestion de fin de vie: projets d'utilisation en LET (scénarios 2 et 3)				
Utilisation du verre	Distance jusqu'au lieu d'enfouissement	1	1	Oui
	Propriété du verre concassé	2	1	
	Opération de recouvrement	2	2	
	Opération de remblayage	2	2	
Production de matériaux substitués	Propriété du matériau de recouvrement (sable)	2	2	
	Propriété du matériau de remblayage (pierre)	2	2	
Filières de gestion de fin de vie: bouteille de verre (scénario 4.1)				
Conditionnement	Distance jusqu'à l'usine de conditionnement du verre	1	1	Oui
	Consommation de gaz naturel	1	1	
	Consommation d'électricité	2	1	
	Taux de rejets	2	2	
Production de la bouteille de verre à contenu recyclé	Distance jusqu'à l'usine de production	1	1	Oui
	Quantité de matières premières	1	1	
	Consommation énergétique (fusion et hors fusion)	1	1	
	Économie d'énergie due à l'utilisation de calcin	1	1	
Production de la bouteille de verre vierge substituée	Consommation énergétique (fusion et hors fusion)	1	1	
Filières de gestion de fin de vie: laine de verre (scénario 4.2)				
Conditionnement	Distance jusqu'à l'usine de conditionnement du verre	1	1	Oui
	Consommation de gaz naturel	1	1	
	Consommation d'électricité	2	1	
	Taux de rejets	2	2	
Production de la laine de verre à contenu recyclé	Distance jusqu'à l'usine de production	1	2	Oui
	Quantité de matières premières	2	2	
	Consommation énergétique (fusion et hors fusion)	2	2	

Étape du cycle de vie	Donnée	Fiabilité	Représentativité	Paramètre variable
	Économie d'énergie due à l'utilisation de calcin	1	1	
Production de la laine de verre vierge substituée	Consommation énergétique (fusion et hors fusion)	2	2	
Filières de gestion de fin de vie: poudre (scénarios 4.3)				
Production de la poudre de verre	Distance jusqu'à l'usine de micronisation du verre	1	1	Oui
	Consommation d'électricité	1	1	
	Consommation de gaz naturel	1	1	
	Taux de rejets	1	2	
	Distance jusqu'à la cimenterie	1	1	Oui
Production de ciment substitué	Consommation énergétique	1	2	
Filières de gestion de fin de vie: agrégat de verre (scénarios 4.4)				
Production des agrégats de verre	Distance jusqu'à l'usine de micronisation du verre	1	1	Oui
	Consommation d'électricité	1	1	
	Consommation de gaz naturel	1	1	
	Taux de rejets	1	2	
	Distance jusqu'à la cimenterie	1	1	Oui
Production de granulats conventionnels substitués (pierre)	Consommation énergétique	1	2	

Annexe E : Rapport de revue critique

La lettre et le rapport complet de revue critique sont disponibles dans les deux documents suivants :

ACVVerre_Lettre Finale_03Mars2015.pdf

ACVerre_Rapport Final_03mars.pdf