



CIRAIG^{MC}

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



RAPPORT FINAL

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DÉCOULANT DE L'IMPLANTATION DE
MESURES D'ATTÉNUATION D'ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS

FÉVRIER 2011

Préparé pour

**Institut national de santé publique du Québec
Ouranos**

À l'attention de

Mélissa Giguère, M. Env.

Agente de planification, de programmation et de recherche
Direction de la santé environnementale et de la toxicologie
550, rue Sherbrooke Ouest, 19^e étage
Montréal (Québec) H3A 1B9

Soumis par

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

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

Par

Geneviève Martineau, ing., M. Sc. A.

Département de Génie chimique
École Polytechnique de Montréal

Pr Réjean Samson, ing., Ph. D

Directeur du projet



**Institut national
de santé publique**

Québec



Ce rapport a été préparé par le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits procédés et services (CIRAIG) et financé par le Fonds vert dans le cadre de l'Action 21 du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.

Fondé initialement par l'École Polytechnique de Montréal, en collaboration avec l'Université de Montréal et l'École des hautes études commerciales de Montréal, le CIRAIG a été mis sur pied afin d'offrir aux entreprises et aux gouvernements une expertise universitaire de pointe sur les outils du développement durable. Le CIRAIG est le seul centre de recherche universitaire sur le cycle de vie au Canada. Il est également un des plus importants sur le plan international.

AVERTISSEMENT

Toute utilisation du nom du CIRAIG ou de l'École Polytechnique de Montréal lors de communication destinée à une divulgation publique associée à ce projet et à ses résultats doit faire l'objet d'un consentement préalable écrit d'un représentant dûment mandaté du CIRAIG ou de l'École Polytechnique.

CIRAIG

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

www.ciraig.org

Équipe de travail

Réalisation

Geneviève Martineau, ing., M. Sc. A.
Analyste seniore, chargée de projet

Collaboration

Marie-Luc Arpin, ing. Jr, éco-conseillère
Analyste

Recherche et support technique

Renée Michaud, ing., M. Sc.
Coordonnatrice technique

Coordination du projet

Revue critique par un comité de parties prenantes

Gontran Bage, ing. Ph. D.
Chargé de projet, Géoenvironnement, LVM

Présidence du comité de révision

Marie Dugué, ing. M. Sc., PA LEED
Vinci Consultants

Révision externe

Patrice Godin
Centre d'écologie urbaine de Montréal

Révision externe

Marie-Claire Martineau
Architecte-paysager, La Vie en Vert

Révision externe

Avis au lecteur

Toutes les mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains (ICU) évaluées dans cette étude ont été identifiées comme pouvant réduire la température de l'air ambiant ou de surface à des degrés divers (Giguère, 2009). L'objectif de cette étude n'est pas de comparer ni de statuer sur l'efficacité des mesures. Il s'agit plutôt d'évaluer les autres impacts environnementaux qui découlent de leur implantation et de leur maintien durant une période donnée. Le lecteur ne trouvera donc pas dans ces pages une conclusion quant aux options présentant le meilleur potentiel de réduction de la température. Par contre, une personne ou un organisme désirant comparer deux projets de lutte aux ICU (impliquant des combinaisons de diverses mesures unitaires) pourra ici vérifier celui qui présente le moins d'impacts environnementaux potentiels, notamment grâce à une grille d'analyse qui permet de mettre les résultats à l'échelle des projets envisagés.

Ce rapport ne constitue pas non plus un guide technique pour la réalisation et l'implantation de mesures de lutte aux ICU. Si certaines données techniques y sont présentées, c'est uniquement à des fins de modélisation des impacts environnementaux potentiels. Les dimensionnements employés ne doivent donc pas être considérés comme des indications à suivre et ne remplacent pas la documentation spécialisée sur le sujet ou la consultation avec un professionnel du domaine.

Enfin, les mesures de lutte aux ICU analysées dans le cadre de cette étude ont été retenues parce qu'elles s'appliquent au secteur urbain résidentiel. Il existe un grand potentiel d'action sur les terrains et édifices commerciaux et institutionnels, mais les mesures modélisées dans la présente étude ne répondent pas aux critères de conception de grande envergure.

Résumé

L'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) a fait appel à l'expertise du CIRAIG afin qu'il réalise une analyse du cycle de vie (ACV) de dix mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains (ICU) applicables au secteur résidentiel. Le but n'était pas de comparer ni de statuer sur l'efficacité de ces mesures, mais d'évaluer les autres impacts environnementaux potentiels qui découlent de leur implantation et de leur maintien durant une période donnée. L'analyse des options a donc été effectuée sur une base unitaire (mise en place d'UNE mesure donnée), **sans tenir compte de leur potentiel de réduction de la température.**

Cette évaluation devait :

- permettre de comparer individuellement les mesures de lutte aux ICU s'appliquant au secteur résidentiel à une situation de référence, qui correspond au *statu quo* (c'est-à-dire, la situation qui consiste à ne pas implémenter de mesure).
- permettre de hiérarchiser, si possible, certaines mesures comparables selon leur performance environnementale globale potentielle.
- permettre la comparaison d'éventuels projets de lutte aux ICU (impliquant des combinaisons de diverses mesures unitaires).

L'étude a été réalisée en accord avec les exigences des normes ISO 14 040 et 14 044 pour une ACV rendue publique et incluant une affirmation comparative. Elle a notamment fait l'objet d'une revue critique par un comité composé d'un expert ACV et de spécialistes des domaines impliqués dans l'étude.

En tout, dix options ont été portées à l'analyse et comparées au scénario de référence. Afin de faciliter l'analyse des résultats, elles ont été divisées en quatre types d'applications ayant des fonctionnalités communes :

Protection de l'enveloppe du bâtiment

1. **Toit vert extensif** : toit végétal léger et requérant peu d'entretien. Il s'adapte aux maisons à toit plat existantes, mais n'est pas conçu pour être accessible pour les loisirs. Aux fins de l'étude, le toit vert comprend à la fois une membrane de bitume élastomère et le système de végétalisation.
2. **Toit réfléchissant** : toit à haut albédo (pâle), réfléchissant les rayons solaires et réduisant ainsi l'absorption de chaleur. Aux fins de l'étude, le toit réfléchissant comprend à la fois une membrane de bitume élastomère et les composantes réfléchissantes. Une membrane EPDM (terpolymère d'éthylène propylène diène ou *Ethylene Propylene Diene Monomer* en anglais) a également été testée en analyse de scénario.

Végétalisation du pourtour du bâtiment

3. **Mur végétalisé** : mur de façade recouvert de plantes grimpantes plantées directement au sol.
4. **Aménagement végétalisé** : plate-bande d'annuelles ou de vivaces, aménagée en pleine terre.

5. **Arbre** : plantation d'un arbre. Aux fins de l'étude, il est considéré qu'un arbre de grande taille (2 mètres) est transporté et planté en pleine terre. Cet arbre n'a pas la maturité, en termes de feuillage, pour permettre un ombrage significatif; cette mesure de lutte aux ICU n'est donc effective qu'à maturité de l'arbre.

Aire de stationnement

6. **Revêtement réfléchissant** : surface à haut albédo (pâle), réfléchissant les rayons solaires et réduisant ainsi l'absorption de chaleur. Pour l'analyse, une aire de stationnement « resurfacée » par une couche ultramince de ciment Portland renforcé de fibre de polyéthylène a été considérée.
7. **Revêtement perméable** : surface permettant aux eaux pluviales de percoler et de s'infiltrer dans le sol. Pour l'analyse, une aire de stationnement en pavés de béton comprenant des ouvertures pour le drainage rapide de la surface pavée a été considérée.

Humidification du sol (permettant de retenir ou de capter les eaux de ruissellement)

8. **Jardin pluvial** : dépression peu profonde dans la terre aménagée sur un sol perméable avec des plantes ou des arbustes locaux supportant à la fois une bonne humidité et des périodes de sécheresse occasionnelles. Aménagement conçu expressément pour capter les eaux pluviales et permettre au sol de les absorber lentement par infiltration. L'option considérée ici permet de drainer et filtrer les eaux de toiture et de l'aire de stationnement.
9. **Tranchée d'infiltration** : tranchée linéaire et peu profonde (environ 1 m), recouverte d'un revêtement perméable et permettant aux eaux de ruissellement d'être recueillies et absorbées par le sol. L'option considérée ici permet de drainer les eaux de toiture et de l'aire de stationnement et requiert que le sol soit suffisamment perméable.
10. **Puits d'infiltration** : ouvrage de profondeur variable (quelques mètres à une dizaine de mètres) visant le stockage temporaire des eaux pluviales et leur évacuation vers les couches perméables du sol par infiltration; utilisé pour les eaux de toiture et de l'aire de stationnement. L'option retenue ici consiste en un puits comblé, c'est-à-dire rempli de matériaux poreux.

La **fonction** principale des systèmes étudiés est de « Lutter contre les îlots de chaleur urbains par l'implantation d'une mesure, sans égard à sa performance de réduction de la température ».

La quantification de cette fonction est basée sur la mise en place et la conservation de cette mesure sur une période donnée. L'**unité fonctionnelle** choisie se définit comme suit :

« L'implantation, en 2010, et la conservation pendant 30 ans d'une mesure unitaire de lutte aux îlots de chaleur urbains sur un pâté de maisons d'un grand centre urbain du Québec ».

Les frontières incluses dans l'analyse comprennent l'implantation de la mesure, l'exploitation et l'entretien sur 30 ans et le démantèlement.

Comme cette étude a pour but de fournir des données environnementales quant à différentes mesures de lutte aux ICU de manière générale, elle a été réalisée à partir de **données secondaires** (c.-à-d. des données génériques ou théoriques issues de banques de données commerciales ou de la banque de données du CIRAIG, d'informations transmises par des entrepreneurs, de rapports d'études divers, ou d'autres sources publiées). Dans tous les cas, les données sélectionnées sont

représentatives de mesures de luttes aux ICU appliquées au Québec, sans pour autant couvrir toutes les options disponibles sur le territoire. La méthode européenne IMPACT 2002+ a été choisie pour effectuer l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) des scénarios comparés.

L'interprétation des résultats et les conclusions de l'étude sont basées sur une analyse complète et approfondie des données d'inventaire et de l'ÉICV. Cela comprend notamment :

- une évaluation de la qualité des données et analyse de contribution;
- une analyse de cohérence et de complétude;
- des analyses de sensibilité et des analyses de scénarios;
- des analyses d'incertitudes.

Dans la mesure du possible, les fonctions non quantifiables des options ont également été prises en considération. Les conclusions ont été axées sur les aspects pratiques, de manière à orienter les choix pour la mise en œuvre et de l'entretien d'une mesure de lutte aux ICU.

Comparaison des mesures de lutte aux ICU à la situation de référence

Globalement, sur la base des données et hypothèses employées et des analyses de sensibilité effectuées, des conclusions et recommandations peuvent être tirées pour chacun des types d'applications.

Pour les **toitures** :

- Le toit vert extensif et le toit réfléchissant en membrane de bitume élastomère sont généralement préférables au toit d'asphalte et gravier, dans la mesure où l'entretien est réduit (c.-à-d. sans fertilisation chimique ou enduit réfléchissant).
- Il convient de choisir une membrane ayant une durée de vie la plus longue possible, afin de diminuer les impacts potentiels liés à la production au transport et à l'enfouissement des matériaux.
- Dans le cas d'un toit vert extensif, il est préférable de ne pas employer de fertilisation chimique sur une base régulière. En particulier si les eaux du toit servent à alimenter un système de captage des eaux pluviales, pour éviter des émissions de métaux dans les eaux et les sols.
- Dans le cas des toits réfléchissants, il est préférable d'opter pour une membrane dont l'entretien peut se faire par simple lavage à l'eau et au savon. L'enduit réfléchissant à appliquer sur une base régulière a en effet des impacts potentiels importants sur l'environnement. Si une membrane de bitume élastomère blanche est installée, il vaut donc mieux la laisser perdre de sa réflectivité que de mettre des couches de produit réfléchissant.
- Les membranes EPDM blanches ont moins d'impacts potentiels que les toits asphalte et gravier de par leur durée de vie étendue, leur facilité d'entretien et du fait qu'elles soient entièrement recyclables en fin de vie.

En plus de ces éléments, il est à considérer que le toit vert extensif permet de retenir les faibles pluies et de retarder l'arrivée d'eau aux égouts lors de fortes pluies, ce qui contribue à réduire le stress sur le réseau d'égouts et les usines d'épuration. Les plantes qu'il accueille améliorent également la qualité de l'air, réduisent le bruit ambiant, en plus de créer un habitat pour les oiseaux.

Les toits verts ne peuvent cependant pas être installés partout. Les édifices plus âgés n'ont souvent pas une structure suffisante pour porter le poids supplémentaire que représente le substrat de culture imbibé d'eau.

Pour les **mesures de végétalisation**, il est préférable :

- Lorsque c'est possible, de garder la terre existante plutôt que d'en disposer hors site et de faire livrer de la nouvelle terre.
- De réduire la fertilisation chimique au maximum.

De plus, le fait de verdir des zones initialement pavées permet d'augmenter la quantité d'eau infiltrée au sol, ce qui assure la recharge naturelle des aquifères et réduit les problèmes de surcharge des égouts. Les plantes, elles, améliorent la qualité de l'air, réduisent le bruit ambiant, en plus de créer un habitat pour les oiseaux et d'embellir les quartiers urbains.

Il faut cependant noter qu'au moment de la plantation d'un arbre, son feuillage ne permet pas un ombrage significatif. Il deviendra une mesure effective de lutte aux ICU à sa maturité.

Pour les **aires de stationnement** :

- Les pavés de béton perméables représentent moins d'impacts potentiels qu'une aire de stationnement asphaltée.
- Les pavés de béton perméables montrent également un bénéfice par rapport au revêtement réfléchissant (« resurfaçage » avec du ciment Portland) pour l'indicateur *Changement climatique*.
- D'autres types de revêtements perméables et réfléchissants sont disponibles sur le marché. Bien qu'ils n'aient pas fait l'objet d'une analyse, il apparaît qu'il est généralement pertinent de remplacer une allée asphaltée par des options qui requièrent moins de matériaux et d'énergie.

L'installation d'un revêtement perméable sur une zone initialement pavée permet d'augmenter la quantité d'eau infiltrée au sol, ce qui permet la recharge naturelle des aquifères et réduit les problèmes de surcharge des égouts. Cette eau peut par contre contenir des polluants pouvant éventuellement contaminer les sols et des eaux souterraines par des huiles et graisses. L'impact potentiel associé à ces substances n'a cependant pas été évalué.

Pour les **jardins pluviaux**, il est préférable de :

- Garder la terre existante plutôt que d'en disposer hors site et de faire livrer de la nouvelle terre.
- Réduire la fertilisation chimique au maximum.

De plus, comme pour les aménagements végétalisés, les plantes améliorent la qualité de l'air, la filtration de l'eau, la réduction du bruit ambiant, en plus de créer un habitat pour les oiseaux et d'embellir les quartiers urbains.

Pour les mesures construites telles que le **puits ou la tranchée d'infiltration** :

- Les sols excavés lors de la mise en œuvre devraient si possible être réutilisés à même le site ou à proximité afin de réduire les impacts associés à leur transport et à leur enfouissement.
- Le démantèlement des installations en fin de vie contribue à près de la moitié de leurs impacts potentiels. Dans le cas où l'utilisation subséquente du terrain le permet, le fait de laisser le gravier en place et de le recouvrir par le revêtement choisi permettrait d'améliorer significativement la performance environnementale de ces mesures, en réduisant le transport et l'enfouissement de gravier et en évitant le transport de terre pour remblayer le trou.

Enfin, pour toutes les mesures visant l'humidification du sol, le fait de capter les eaux de ruissellement permet d'augmenter la quantité d'eau infiltrée au sol, ce qui assure la recharge naturelle des aquifères et réduit les problèmes de surcharge des égouts. L'eau de ruissellement de l'aire de stationnement peut cependant contenir des polluants, huiles et graisses, pouvant éventuellement contaminer les sols et les aquifères. Le substrat du jardin pluvial permet la filtration d'une partie de ces contaminants, mais la quantification de l'impact et du bénéfice potentiels associés à ces substances n'a pas été effectuée.

Hiérarchisation des mesures

Les fonctionnalités diverses des mesures de lutte aux ICU évaluées ne permettent pas la hiérarchisation de la totalité des options selon leurs performances environnementales. De plus, étant donné les résultats obtenus il n'est pas possible de hiérarchiser les mesures appartenant à un même type d'applications. En effet, selon les conditions spécifiques (durée de vie, type d'entretien, utilisation de fertilisants, etc.), les résultats peuvent amener un classement ou un autre. Une hiérarchisation des mesures sans considération de ces variabilités mènerait donc très certainement à des décisions erronées ou discutables.

Comparaison de projets de lutte aux ICU

Dans le cas où les hypothèses employées dans la modélisation ACV sont applicables, il est possible pour un décideur de comparer différents projets de lutte aux ICU (impliquant des combinaisons de diverses mesures) qu'il considère équivalents en termes de réduction de chaleur, puisque les résultats sont linéaires.

Une grille d'analyse présentant les résultats des indicateurs de dommage et d'impact évalués pour chacune des mesures est proposée. Ces résultats sont fournis en valeur absolue par rapport à la situation de référence (dont la mesure des impacts serait de zéro). Les options dont les indicateurs sont inférieurs à zéro indiquent un bénéfice environnemental par rapport au scénario de référence.

Se référer au rapport complet pour le détail des hypothèses et choix de modélisation effectués, pour les résultats d'analyse et pour la grille permettant la comparaison de projets de lutte aux ICU.

L'évaluation de mesures d'atténuation des îlots de chaleur urbains est une tâche complexe, vu le nombre d'aspects sociaux, environnementaux et économiques en jeu. Plusieurs paramètres comme la qualité de vie des résidents et l'intégration paysagère sont des éléments difficilement quantifiables qui doivent néanmoins être pris en compte. Dans ce contexte, l'ACV ne peut trancher à elle seule face à un choix de mesures, mais elle s'inscrit dans une meilleure compréhension des impacts propres aux options et permet, par conséquent, la prise de décisions plus éclairées.

Note : Cette ACV vise à informer le public et les organismes du domaine quant aux impacts et bénéfices environnementaux potentiels que représentent différentes mesures de lutte aux ICU sur tout leur cycle de vie. Elle vise également à permettre à l'INSPQ de compléter son évaluation des mesures d'atténuation des îlots de chaleur urbains, en y intégrant des aspects de performance environnementale basés sur la pensée « cycle de vie ». L'analyse a été effectuée dans une optique comparative par rapport à un scénario de référence n'impliquant aucune mesure de lutte aux ICU. Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent être évitées.

Table des matières

1	MISE EN CONTEXTE.....	1
2	MODÈLE D'ÉTUDE ACV.....	3
2.1	OBJECTIFS DE L'ÉTUDE ET APPLICATIONS ENVISAGÉES.....	3
2.2	DESCRIPTION GÉNÉRALE DES MESURES À L'ÉTUDE	4
2.2.1	<i>Scénario de référence</i>	4
2.2.2	<i>Mesures de lutte aux ICU évaluées</i>	5
2.2.3	<i>Mesures de mitigation exclues</i>	6
2.3	FONCTIONS ÉTUDIÉES ET UNITÉ FONCTIONNELLE.....	6
2.4	TRAITEMENT DES FONCTIONS SECONDAIRES ET RÈGLES D'IMPUTATION.....	8
2.5	FRONTIÈRES DES SYSTÈMES	9
2.5.1	<i>Description générale des systèmes</i>	9
2.5.2	<i>Frontières géographiques et temporelles</i>	12
2.6	SOURCES, HYPOTHÈSES ET DONNÉES D'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE (ICV)	12
2.7	ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	13
2.7.1	<i>IMPACT 2002+</i>	13
2.8	INTERPRÉTATION.....	15
2.8.1	<i>Analyse de l'inventaire.....</i>	16
2.8.2	<i>Évaluation de la qualité des données d'inventaire</i>	16
2.8.3	<i>Cohérence et complétude</i>	17
2.8.4	<i>Analyses de sensibilité et analyses de scénarios.....</i>	17
2.8.5	<i>Analyse d'incertitudes.....</i>	19
2.9	REVUE CRITIQUE	21
3	RÉSULTATS	22
3.1	ANALYSE QUALITATIVE DES FONCTIONS SECONDAIRES.....	22
3.1.1	<i>Problèmes de surcharge des égouts et recharge des aquifères.....</i>	23
3.1.2	<i>Création d'habitats fauniques et qualité de l'air</i>	24
3.1.3	<i>Qualité de l'eau.....</i>	24
3.1.4	<i>Réduction du bruit et embellissement des quartiers urbains.....</i>	24
3.2	PRÉSENTATION DES ANALYSES PAR RAPPORT AU SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE	24
3.3	MESURES VISANT LA PROTECTION DE L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT	25
3.4	MESURES VISANT LA VÉGÉTALISATION DU POURTOUR DU BÂTIMENT	29
3.5	MESURES VISANT À FOURNIR UNE AIRE DE STATIONNEMENT	32
3.6	MESURES VISANT L'HUMIDIFICATION DU SOL	35
3.7	QUALITÉ DES DONNÉES D'INVENTAIRE	40
3.8	ANALYSES DE SENSIBILITÉ.....	42
3.8.1	<i>Évaluation des impacts avec la méthode ReCiPe.....</i>	42
3.8.2	<i>Durée de vie d'un toit vert</i>	42
3.8.3	<i>Durée de vie d'un toit réfléchissant</i>	43
3.9	APPLICATIONS ET LIMITES DE L'ACV.....	43
3.10	UTILISATION DES RÉSULTATS.....	45
3.10.1	<i>Hiérarchisation des mesures</i>	45
3.10.2	<i>Comparaison de projets de lutte aux ICU</i>	45
4	CONCLUSION	48
5	RÉFÉRENCES	49

ANNEXE A : MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)	55
ANNEXE B : SOURCES DE DONNÉES D'INVENTAIRE ET HYPOTHÈSES	73
ANNEXE C : MÉTHODE D'ÉVALUATION DES IMPACTS (ÉICV)	87
ANNEXE D : ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES DONNÉES D'INVENTAIRE.....	95

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Études ACV sur les mesures de lutte aux ICU	2
Tableau 2-1 : Paramètres du scénario de référence	4
Tableau 2-2 : Caractéristiques et flux de référence	7
Tableau 2-3 : Processus inclus et exclus de l'ACV	10
Tableau 2-4 : Analyses de scénarios	19
Tableau 2-5 : Membres constituants du comité de revue critique	21
Tableau 3-1 : Profil fonctionnel des mesures de lutte aux ICU évaluées, par rapport au scénario de référence	23
Tableau 3-2 : Base de comparaison pour établir des scénarios d'implantation de mesures de lutte aux ICU	47

Liste des figures

Figure 2-1 : Frontières génériques des systèmes à l'étude	9
Figure 2-2 : Catégories de dommage et catégories d'impacts de la méthode IMPACT 2002+	14
Figure 3-1 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un toit vert et d'un toit réfléchissant par rapport au scénario de référence	26
Figure 3-2 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un mur végétalisé par rapport au scénario de référence	30
Figure 3-3 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un aménagement végétalisé par rapport au scénario de référence.....	30
Figure 3-4 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un arbre par rapport au scénario de référence	31
Figure 3-5 : Comparaison de scénarios d'implantation d'une aire de stationnement par rapport au scénario de référence.....	33
Figure 3-6 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un jardin pluvial par rapport au scénario de référence.	36
Figure 3-7 : Comparaison de scénarios d'implantation d'une tranchée d'infiltration par rapport au scénario de référence.....	38
Figure 3-8 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un puits d'infiltration par rapport au scénario de référence	38

Liste des abréviations et sigles

AA	Acidification aquatique (catégorie d'impact environnemental)
ACV	Analyse du cycle de vie
CC	Changement climatique (catégorie de dommage environnemental)
CIRAIG	Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CO ₂	Dioxyde de carbone
DALY	<i>Disabled Adjusted Life Years</i>
DMS	Dépôt de matériaux secs
EA	Eutrophisation aquatique (catégorie d'impact environnemental)
ÉICV	Évaluation des impacts du cycle de vie (appelé ACVI par ISO)
EPDM	Terpolymère d'éthylène propylène diène (<i>Ethylene Propylene Diene Monomer</i> en anglais)
ICU	Îlot de chaleur urbain
ICV	Inventaire du cycle de vie
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
ISO	Organisation internationale de normalisation
kg CO ₂ éq.	Kilogramme de dioxyde de carbone équivalent
kg PO ₄ éq.	Kilogramme de phosphate équivalent
kg SO ₂ éq.	Kilogramme de dioxyde de soufre équivalent
MJ primaire	Mégajoules d'énergie primaire
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux
OEE	Office de l'efficacité énergétique
ONG	Organisme non gouvernemental
PDF*m ² *an	« <i>Potentially Disappeared Fraction</i> » sur une certaine surface et sur une durée donnée
QE	Qualité des écosystèmes (catégorie de dommage environnemental)
R	Ressources (catégorie de dommage environnemental)
SCHL	Société canadienne d'habitation et de logement
SH	Santé humaine (catégorie de dommage environnemental)

1 Mise en contexte

Dans le cadre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec (2008), le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) a mandaté l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) afin qu'il gère l'instauration des mécanismes qui serviront à prévenir et à atténuer les impacts des changements climatiques sur la santé. Dans ce contexte, l'INSPQ est responsable d'évaluer les candidatures qui lui seront soumises par les municipalités et les organismes non gouvernementaux (ONG) en vue d'obtenir le financement des mesures proposées.

Pour compléter son processus d'évaluation de la performance environnementale des mesures d'atténuation des îlots de chaleur urbains (ICU), l'INSPQ a fait appel à l'expertise du CIRAIG. Son mandat était de réaliser une analyse du cycle de vie (ACV) de dix mesures de lutte aux ICU applicables au secteur résidentiel. Le but n'était pas de comparer ni de statuer sur l'efficacité de ces mesures, mais d'évaluer les autres impacts environnementaux potentiels qui découlent de leur implantation et de leur maintien durant une période donnée. L'analyse des options a donc été effectuée sur une base unitaire (mise en place d'UNE mesure donnée), **sans tenir compte de leur potentiel de réduction de la température.**

Une version préliminaire de l'étude a d'abord été réalisée à partir de données publiques facilement accessibles (Martineau, 2010). À la suite de cette étude, l'INSPQ a décidé de rendre les résultats publics. L'ACV a donc été détaillée afin de rendre l'étude conforme aux recommandations de l'Organisation internationale de normalisation.

Ce document constitue le rapport final du projet avant revue critique par un comité de parties prenantes. Il présente :

- Les objectifs de l'ACV et la méthodologie régissant sa réalisation (Chapitre 2).
- Les résultats de l'ACV, leur interprétation et les recommandations associées (Chapitre 3).

Cette étude a été réalisée en accord avec les exigences des normes ISO 14 040 et 14 044 (ISO, 2006a, b) pour une ACV rendue publique et incluant une affirmation comparative.

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

Une revue sommaire des publications pertinentes (études ACV ou autres) portant sur les mesures d'atténuation des îlots de chaleur urbains a aussi été effectuée. Très peu de recherches portant sur l'ACV de telles mesures sont publiées (Tableau 1-1) et la majorité d'entre elles ont porté sur les toits verts et les revêtements réfléchissants dans des contextes géographiques très différents du Québec. Les documents consultés sont répertoriés dans les références (Chapitre 5).

Tableau 1-1 : Études ACV sur les mesures de lutte aux ICU

Auteurs (année)	Contexte géographique	Titre	Mesure de lutte aux ICU évaluées
GENCHI, Y. (2006)	Japon	Life Cycle Impact Assessment of Urban Heat Island in Tokyo. « LIME : Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling »	Toits et parois réfléchissants
GENCHI, Y. et IHARA, T. (2009)	Japon	Environmental Impact Assessment of Urban Air Temperature Increase Based on Endpoint-Type Life Cycle Impact	Non spécifié
IHARA, T., KIKEGAWA, Y., OKA, K., YAMAGUCHI, K., ENDO, Y. et GENCHI, Y. (2007)	Japon	Urban Island Mitigation and Life Cycle CO2 Reduction by Installation of Urban Heat Island Countermeasures	Revêtements photovoltaïques et réfléchissants, toits verts et murs végétalisés
KOSAREO, L. et RIES, R. (2007)	États-Unis (PA)	Comparative environmental life cycle assessment of green roofs	Toits verts
SAIZ, S., KENNEDY, C., BASS, B. et PRESSNAIL, K. (2006)	Espagne	Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs	Toits verts

2 Modèle d'étude ACV

Ce chapitre présente le modèle d'étude définissant le cadre méthodologique auquel doivent se conformer les phases subséquentes de l'ACV.

2.1 Objectifs de l'étude et applications envisagées

Le **but de cette étude** était d'évaluer, sur la base d'une ACV, les impacts environnementaux potentiels liés à l'implantation et au maintien, durant une période donnée, de mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains (appelées ici « les mesures »).

Cette évaluation devait permettre de :

- Comparer individuellement les mesures de lutte aux ICU s'appliquant au secteur résidentiel à une situation de référence, qui correspond au *statu quo* (c'est-à-dire, la situation qui consiste à ne pas implémenter de mesure);
- Hiérarchiser, si possible, certaines mesures comparables selon leur performance environnementale globale potentielle;
- Permettre la comparaison de projets de lutte aux ICU (impliquant des combinaisons de diverses mesures unitaires).

Comme mentionné, l'analyse du cycle de vie qui suit n'a pas pour objectif d'évaluer l'efficacité des mesures. Ainsi, il n'a pas été jugé nécessaire que les mesures évaluées aient toutes le même potentiel de réduction de la température, puisque l'analyse a été effectuée dans un cadre comparatif par rapport au scénario de référence choisi. Les résultats fournissent une évaluation des mesures sur une base unitaire (plantation d'un arbre, installation d'un toit vert, etc.). Cependant, une personne ou un organisme désirant comparer deux projets de lutte aux ICU pourra vérifier celui qui présente le moins d'impacts environnementaux potentiels, grâce à une grille d'analyse fournie, qui permet de mettre les résultats à l'échelle des projets envisagés.

Les résultats de cette étude sont prévus à des fins de divulgation publique par l'INSPQ, afin de mieux informer le public et les organismes du domaine quant aux impacts et bénéfices environnementaux potentiels que représentent différentes mesures de lutte aux ICU sur tout leur cycle de vie. L'INSPQ pourra également se servir de cette étude comme complément lors de l'évaluation de projets de lutte aux ICU.

Conformément aux 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 importante et obligatoire pour assurer la validité complète des résultats avant certaines communications publiques telles que les déclarations environnementales de produits, suivant les normes ISO 14 020, ou les affirmations comparatives rendues publiques, suivant les normes ISO 14 040.

En ce qui a trait à cette étude, une revue critique a été réalisée par un expert ACV externe et un comité de parties intéressées. Se référer à la section 2.9 pour plus de détail sur le processus de revue critique.

2.2 Description générale des mesures à l'étude

L'îlot de chaleur est une manifestation climatique strictement urbaine, caractérisée par une augmentation substantielle de la température ambiante et surfacique par rapport au milieu naturel adjacent. Deux facteurs importants contribuent à sa formation, soit les activités anthropiques et la nature des surfaces¹.

Les mesures de prévention et de lutte aux îlots de chaleur urbains peuvent être de diverses natures, comprenant la végétalisation des espaces, la modification de l'architecture et de l'aménagement du territoire, la gestion des eaux pluviales, de même que la réduction de la chaleur anthropique.

Étant donné les multiples possibilités d'application de ces mesures, une définition précise des options portées à l'étude est présentée ici. Il s'agit de choix spécifiques effectués en collaboration avec l'INSPQ.

Notons que toutes les mesures retenues s'appliquent au secteur résidentiel et peuvent être mises en œuvre par des particuliers désirant effectuer des modifications sur leur habitation ou leur terrain privé.

2.2.1 Scénario de référence

Une base comparative a été établie, soit un scénario de référence n'impliquant aucune mesure de mitigation. Il ne s'agit pas ici de quantifier les impacts environnementaux associés au scénario de référence, car il serait complexe et peu pertinent de modéliser tous les éléments d'un tel décor. Par contre, ce scénario de référence doit permettre de quantifier les CHANGEMENTS apportés par les mesures de mitigation évaluées. Ainsi, tout ce qui reste inchangé entre la référence et les options à l'étude n'a pas été quantifié. Seuls les paramètres qui sont modifiés par l'implantation des mesures sont modélisés et quantifiés. Ultiment, cette façon de faire permet de dire que l'implantation de la mesure X présente une diminution/augmentation des impacts environnementaux potentiels par rapport au scénario de référence. Le Tableau 2-1 résume les paramètres du scénario de référence choisi.

Tableau 2-1 : Paramètres du scénario de référence

Paramètres
Un îlot d'habitation (pâté de maisons) typique des quartiers centraux de Montréal (mais pouvant également être représentatif de n'importe quel grand centre urbain du Québec), qui ne comprend aucune mesure de mitigation.
Maisons en rangées ou jumelées.
Toits plats multicouches d'asphalte et de gravier. Durée de vie posée de 15 ans. Note : bien que les membranes élastomères soient également considérées comme étant des membranes multicouches, elles ne font pas partie du scénario de référence.
Murs de brique, façade de 7,62 m (25 pi) de large, d'une hauteur totale d'environ 8 m (deux étages).
Cours arrière et pourtours de bâtiments comprenant un espace de stationnement asphalté (durée de vie posée de 20 ans), avec peu de végétation.
Toutes les précipitations tombant sur le toit et sur le terrain autour du bâtiment sont envoyées à l'égout municipal pour être traitées en usine d'épuration.

¹ Définition tirée d'un article intitulé « Vert urbain » de la revue Découvrir (Robichaud et Saint-Onge, vol. 30, n° 4, octobre 2009), p. 34.

2.2.2 Mesures de lutte aux ICU évaluées

En tout, dix options ont été portées à l'analyse et comparées au scénario de référence. Afin de faciliter l'analyse des résultats, elles ont été divisées en quatre types d'applications ayant des fonctionnalités communes :

Protection de l'enveloppe du bâtiment

1. **Toit vert extensif** : toit végétal léger et requérant peu d'entretien. Il s'adapte aux maisons à toit plat existantes, mais n'est pas conçu pour être accessible pour les loisirs. Aux fins de l'étude, le toit vert comprend à la fois une membrane de bitume élastomère et le système de végétalisation.
2. **Toit réfléchissant** : toit à haut albédo (pâle), réfléchissant les rayons solaires et réduisant ainsi l'absorption de chaleur. Aux fins de l'étude, le toit réfléchissant comprend à la fois une membrane de bitume élastomère et les composantes réfléchissantes. Un autre type de membrane a également été testé en analyse de scénario.

Végétalisation du pourtour du bâtiment

3. **Mur végétalisé** : mur de façade recouvert de plantes grimpantes plantées directement au sol.
4. **Aménagement végétalisé** : plate-bande d'annuelles ou de vivaces, aménagée en pleine terre.
5. **Arbre** : plantation d'un arbre. Aux fins de l'étude, il est considéré qu'un arbre de grande taille (2 mètres) est transporté et planté en pleine terre. Cet arbre n'a pas la maturité, en termes de feuillage, pour permettre un ombrage significatif; cette mesure de lutte aux ICU n'est donc effective qu'à maturité de l'arbre.

Aire de stationnement

6. **Revêtement réfléchissant** : surface à haut albédo (pâle), réfléchissant les rayons solaires et réduisant ainsi l'absorption de chaleur.
7. **Revêtement perméable** : surface permettant aux eaux pluviales de percoler et de s'infiltrer dans le sol.

Humidification du sol (permettant de retenir ou de capter les eaux de ruissellement)

8. **Jardin pluvial** : Dépression peu profonde dans la terre aménagée sur un sol perméable avec des plantes ou des arbustes locaux supportant à la fois une bonne humidité et des périodes de sécheresse occasionnelles. Aménagement conçu expressément pour capter les eaux pluviales et permettre au sol de les absorber lentement par infiltration. L'option considérée ici permet de drainer et filtrer les eaux de toiture et de l'aire de stationnement.
9. **Tranchée d'infiltration** : tranchée linéaire et peu profonde (environ 1 m), recouverte d'un revêtement perméable et permettant aux eaux de ruissellement d'être recueillies et absorbées par le sol. L'option considérée ici permet de drainer les eaux de toiture et de l'aire de stationnement et requiert que le sol soit suffisamment perméable.
10. **Puits d'infiltration** : ouvrage de profondeur variable (quelques mètres à une dizaine de mètres) visant le stockage temporaire des eaux pluviales et leur évacuation vers les couches perméables du sol par infiltration. Utilisé pour les eaux de toiture et de l'aire de stationnement. L'option retenue ici consiste en un puits comblé, c'est-à-dire rempli de matériaux poreux.

Cette division a été choisie de manière à permettre une certaine comparaison entre les mesures évaluées, malgré leurs différences fonctionnelles. En effet, un citoyen prendra généralement la décision d'implanter une mesure de lutte aux ICU au moment où il aura besoin de changer sa toiture, de faire/refaire son aire de stationnement privée ou lorsqu'il décidera de procéder à l'aménagement paysager de son terrain. Ainsi, bien que d'un point de vue ACV strict il ne soit pas possible de comparer des options ayant des fonctions secondaires différentes, d'un point de vue pratique, certaines mesures sont entièrement équivalentes et ont donc été comparées au bénéfice des lecteurs (Chapitre 3).

2.2.3 Mesures de mitigation exclues

Certaines mesures de lutte aux ICU répertoriées par Giguère (2009) ont également été exclues de l'analyse, du fait qu'elles ne s'appliquaient pas à des bâtiments résidentiels existants ou qu'elles étaient difficilement quantifiables de manière générique :

- parois réfléchissantes (murs à haut albédo (pâle), réfléchissant les rayons solaires et réduisant ainsi l'absorption de chaleur);
- mesures visant l'abaissement de la température intérieure (brumisateurs, ventilation, isolation/étanchéité/masse thermique, etc.);
- mesures de réduction de la chaleur anthropique (efficacité énergétique, transports actifs, etc.);
- ouvrage de rétention des eaux pluviales de grandes dimensions ou difficilement applicables par des particuliers dans un contexte résidentiel urbain (ex. : noues, bandes filtrantes, marais filtrant);
- albédo de la peinture des véhicules et arrosage des pavés avec de l'eau recyclée;
- toits verts intensifs;
- mesures simples telles que le remplacement de l'asphalte dans la cour arrière par du gazon ou l'utilisation d'un revêtement en criblure de pierre, parce que leur bénéfice dépend entièrement du contexte spécifique du lieu d'implantation (difficilement quantifiable de manière générique).

2.3 Fonctions étudiées et unité fonctionnelle

La **fonction** principale des systèmes étudiés est de « Lutter contre les îlots de chaleur urbains par l'implantation d'une mesure, sans égard à sa performance de réduction de la température ».

La quantification de cette fonction est basée sur la mise en place et la conservation de cette mesure sur une période donnée. L'**unité fonctionnelle** choisie se définit comme suit :

« L'implantation, en 2010, et la conservation pendant 30 ans d'une mesure unitaire de lutte aux îlots de chaleur urbains sur un pôté de maisons d'un grand centre urbain du Québec ».

Les **flux de référence** font appel à la quantité de produits nécessaires pour remplir la fonction étudiée. Dans le cas présent, les mesures unitaires de lutte aux ICU ont été choisies comme flux de référence (Tableau 2-2). Tous les besoins en matières et en énergie pour leur implantation et leur conservation sur la période d'étude y sont inclus.

Tableau 2-2 : Caractéristiques et flux de référence

Mesures de lutte aux ICU	Caractéristiques
Protection de l'enveloppe du bâtiment	
1. Toit vert extensif	Toit en membrane de bitume élastomère et système adapté. Dimension du toit : 7,6 m x 13,1 m (soit une maison de 100 m ² (1 076 pi ²)) comprenant 1200 plants de vivaces (calamagrostis ou sedum par exemple). Durée de vie posée de 45 ans. Remplace un toit asphalte et gravier.
2. Toit réfléchissant	Toit en membrane de bitume élastomère blanche et enduit réfléchissant. Mêmes dimensions que le toit vert. Durée de vie posée de 25 ans. Remplace un toit asphalte et gravier.
Végétalisation du pourtour du bâtiment	
3. Mur végétalisé	Vigne vierge plantée en pleine terre (découvert de 0,5 m), à la base d'un mur standard de 7,62 m (25 pi) de long par 8 m de haut (deux étages). Les plantes grimpent directement sur le mur de brique.
4. Aménagement végétalisé	Surface de 25 m ² correspondant à une plate-bande devant ou sur le côté d'une maison (250 plants). 5 % des plants sont renouvelés annuellement.
5. Arbre	Plantation d'un arbre de grande taille (2 m) et son entretien. Excavation de 1 m ³ (surface de 1 m ²).
Aire de stationnement	
6. Revêtement réfléchissant	Aire de stationnement « resurfagée » par une couche ultramince (75 mm) de ciment Portland renforcé de fibres de polypropylène. Surface de 5,5 m x 2,6 m (14,3 m ²)* Durée de vie posée de 20 ans. Remplace une aire de stationnement asphaltée.
7. Revêtement perméable	Aire de stationnement en pavés de béton comprenant des ouvertures pour drainage rapide de la surface pavée. Même surface que le revêtement réfléchissant. Durée de vie posée de 20 ans. Remplace une aire de stationnement asphaltée.
Humidification du sol Ouvrages permettant de drainer les eaux d'un toit de 100 m et les eaux de ruissellement d'une aire de stationnement privée (14,3 m ²).	
8. Jardin pluvial	Surface de 25 m ² ou 28,6 m ² (avec ou sans captage des eaux de ruissellement du stationnement). Option applicable pour les maisons disposant de gouttières et dont les sols sont assez perméables. 1 % des plants sont renouvelés annuellement.
9. Tranchée d'infiltration	Tranchée de 12 m x 1,2 m x 1,1 m de profond ou 13 m x 1,2 m x 1,15 m de profond (avec ou sans captage des eaux du stationnement). Option applicable pour les maisons disposant de gouttières et dont les sols sont assez perméables. Durée de vie posée de 30 ans.
10. Puits d'infiltration	Puits de 1,7 m Ø x 2,5 m de profond ou 1,8 m Ø x 2,75 m de profond (avec ou sans captage des eaux du stationnement). Option applicable pour les maisons disposant de gouttières et dont les sols sont assez perméables. Durée de vie posée de 30 ans.

* Voir Annexe B, Tableau B-1 pour le choix de la dimension d'une aire de stationnement.

Aux fins de l'analyse, les durées de vie des diverses mesures de lutte aux ICU ont été prises en compte afin de ramener leurs impacts potentiels à la période de 30 ans définie par l'unité fonctionnelle. Par exemple :

- 0,67 toit vert extensif (30 ans/45 ans de durée de vie)
- 1,2 toit réfléchissant – membrane de bitume élastomère (30 ans/25 ans de durée de vie)
- 1,5 aire de stationnement (30 ans/20 ans de durée de vie)

Ainsi, la quantité de matières et d'énergie consommées et les émissions générées lors de l'implantation, du maintien et du démantèlement des mesures ont été considérées au prorata de la durée de vie de chacune des options évaluées.

Plus de détails quant aux caractéristiques des mesures considérées lors de la modélisation sont présentés au Tableau B-2 (Annexe B).

2.4 Traitement des fonctions secondaires et règles d'imputation

L'ACV ne porte pas sur la comparaison de produits ou services spécifiques, mais bien sur une ou plusieurs fonctions remplies par ces produits ou services. En conséquence, les processus multifonctionnels doivent être considérés avec précaution.

Les mesures de lutte aux ICU évaluées comportent des fonctions intrinsèques très diverses. Outre l'abaissement de la température ambiante (qu'elles permettent à des degrés divers), certaines mesures visent la protection des habitants d'une maison contre les intempéries (toits), certaines visent l'humidification du sol (tranchées de rétention, jardins pluviaux...), d'autres fournissent un espace de stationnement (revêtements perméables ou réfléchissants) ou visent l'embellissement du paysage (arbres, végétalisation en général).

Ces fonctions « secondaires² » diverses peuvent difficilement être intégrées dans une même ACV. Certaines fonctions secondaires pouvant être quantifiées par rapport au scénario de référence ont cependant été modélisées de manière à prendre en considération les facteurs pouvant influencer le bilan environnemental des options considérées. C'est le cas des deux paramètres suivants :

- **Énergie évitée** : il s'agit de la réduction des besoins énergétiques d'un bâtiment (liés à la climatisation et au chauffage) à la suite de l'implantation d'un toit vert ou d'un toit réfléchissant.
- **Traitement d'eau évité** : pour les options menant à une infiltration accrue des précipitations dans les sols, il s'agit de la réduction du volume d'eau se rendant aux égouts municipaux et devant être traité.

Les autres fonctions secondaires ont été évaluées de manière qualitative, par une matrice ACV-fonctionnelle (voir section 3.1).

Il est à noter qu'aucune règle d'imputation n'a été employée. Dans tous les cas, les aspects de multifonctionnalité ont été traités par expansion des frontières, en cohérence avec les objectifs de l'étude. Le Tableau 2-3 présenté à la section suivante indique les processus pour lesquels une expansion des frontières a été effectuée.

² Bien que la fonction première d'un toit soit de protéger les habitants d'une maison, dans le cadre de cette analyse il s'agit d'une fonction secondaire.

2.5 Frontières des systèmes

Les frontières des systèmes servent à identifier les étapes, processus et flux qui sont considérés dans l'ACV. Elles incluent toutes les activités pertinentes à l'atteinte des objectifs de l'étude et donc, nécessaires à la réalisation de la fonction étudiée.

Les paragraphes qui suivent présentent une description générale des frontières des systèmes, ainsi que les considérations géographiques et temporelles associées.

2.5.1 Description générale des systèmes

La Figure 2-1 schématise les frontières génériques des systèmes étudiés. Pour chaque mesure de lutte aux ICU, les sous-systèmes incluent différentes activités définies au Tableau 2-3. Une documentation plus détaillée sur les étapes du cycle de vie évaluées est fournie à l'Annexe B (sous forme de chiffrier). Le document inclut une liste complète des flux de matières et d'énergie faisant partie de l'avant-plan de chacun des sous-systèmes.

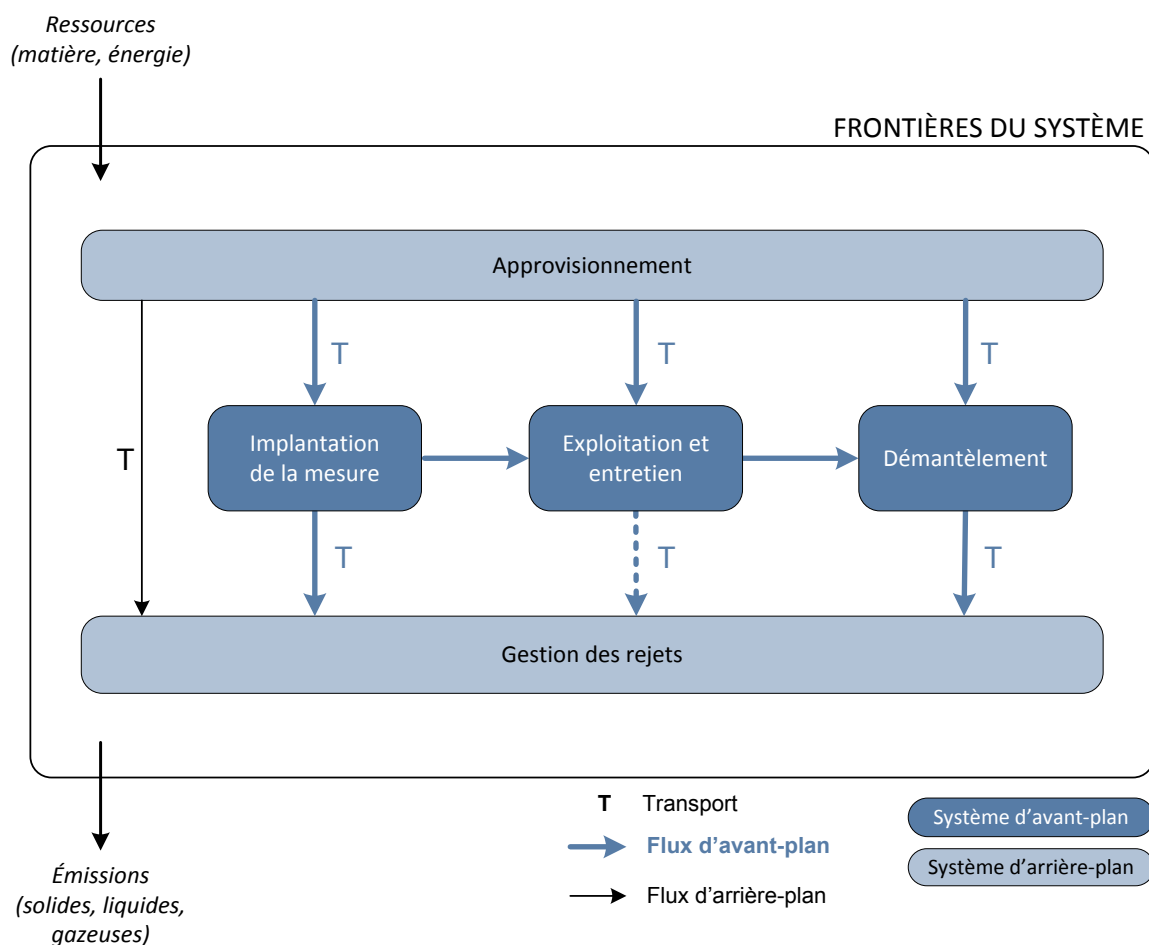


Figure 2-1 : Frontières génériques des systèmes à l'étude

Mentionnons également que les diverses étapes du cycle de vie des mesures à l'étude forment les **systèmes d'avant-plan**, tandis que tous les processus d'approvisionnement et de gestion des rejets impliqués à chacune de ces étapes constituent les **systèmes d'arrière-plan**.

Les sous-systèmes d'arrière-plan « **approvisionnement** » et « **gestion des rejets** » concernent respectivement, pour chacun des sous-systèmes d'avant-plan, toutes les activités reliées :

- à l'approvisionnement en ressources (eau, énergie, produits chimiques, matériaux), comprenant l'extraction, le traitement et la transformation des ressources naturelles, de même que les différents transports requis jusqu'à l'arrivée aux sites d'utilisation des ressources;
- au transport et au traitement des déchets générés à l'une ou l'autre de ces étapes du cycle de vie étudié.

Dans 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.

Le Tableau 2-3 présente les activités incluses et exclues dans l'analyse du cycle de vie des mesures de lutte aux ICU. L'approvisionnement et la gestion des rejets ont été répartis entre les étapes du cycle de vie afin de simplifier la lecture du tableau.

Tableau 2-3 : Processus inclus et exclus de l'ACV

Étapes du cycle de vie	Processus/Sous-processus	Descriptif
Implantation de la mesure	Production et transport des matériaux, plantes et énergie nécessaires à l'installation	Production et transport des principaux composants/matériaux inclus; carburant consommé par les équipements inclus. Les autres ressources et rejets ont été négligés.
	Fabrication des infrastructures et des équipements pour l'installation	Inclus (dans les modules de données génériques).
	<i>Production et gestion en fin de vie des emballages (sacs, pellicule plastique, boîtes...)</i>	<i>Négligées, sauf dans le cas des pots à fleurs, comptabilisés dans la production des plantes et des petites quantités de terre noire, considérée achetée en sac de plastique de 30 L (pour mur végétalisé et arbre).</i>
	Transport et enfouissement des sols excavés	Inclus.
	Option de référence remplacée (expansion des frontières)	Toit vert/réfléchissant : sur 30 ans, remplace 2 toitures d'asphalte et gravier de 15 ans (comprenant la production, le transport et l'enfouissement des matériaux). Revêtement perméable/réfléchissant : sur 30 ans, remplace 1,5 aire de stationnement asphaltée de 20 ans (production des matériaux, machinerie, transport et enfouissement).

Étapes du cycle de vie	Processus/Sous-processus	Descriptif
Exploitation et entretien sur 30 ans	Production et transport des matériaux et énergie nécessaires à l'entretien	Inclus.
	Énergie évitée (expansion des frontières)	Toit vert/réfléchissant : réduction de climatisation/chauffage par rapport au scénario de référence. Pour les autres mesures, aucune énergie évitée considérée (posée négligeable).
	Traitement d'eau évité (expansion des frontières)	Réduction de l'eau de pluie envoyée aux égouts municipaux par rapport au scénario de référence : pour toutes les options impliquant une infiltration accrue des précipitations dans les sols ou une rétention de l'eau (toit vert).
	<i>Changement d'albédo</i>	<i>Exclu. Peut avoir un effet sur le changement climatique (Schwaiger et Bird (2010); Bird et Woess-Gallasch (2008)). Par contre, la quantification en kg CO₂ éq. est complexe et dépend de facteurs variables dans le temps et l'espace.</i>
	<i>Capture du CO₂ par les plantes</i>	<i>Exclue. Le carbone biogénique sera retourné à l'atmosphère dans un horizon temporel relativement court. Le carbone biogénique n'est donc pas pris en compte.</i>
Démantèlement	Fabrication et opération des équipements nécessaires pour le démantèlement	Principaux équipements (excavatrices et camions) inclus.
	Transport et gestion des matières en fin de vie	Les principales matières (gravier, béton, substrat de culture, membranes, etc.) sont considérées enfouies.
	<i>Impacts évités par le recyclage/la valorisation des matériaux en fin de vie</i>	<i>Les métaux sont considérés recyclés à 100 %. Une coupure (cut off) a été effectuée – aucun impact attribué à la gestion de fin de vie des métaux.</i> <i>La valorisation du bois de l'arbre en fin de vie a également été exclue, car impossible à déterminer dans un cadre générique (compostage, incinération avec récupération de chaleur, production d'électricité ou de carburant alternatif...)</i>
	Remise en état du terrain	Pour les mesures construites telles que les puits et tranchées d'infiltration, une remise du terrain à l'état initial a été considérée (enlèvement du gravier et remblayage avec de la terre). <i>Dans le cas des mesures végétalisées (aménagement, arbre, mur végétal, jardin pluvial), aucune fin de vie n'a été considérée, puisqu'elle dépend entièrement de l'utilisation subséquente du terrain.</i>
Toutes les étapes	<i>Services auxiliaires (administration, publicité et autres services)</i>	<i>Exclus.</i>

Il est à noter qu'aucun critère d'inclusion n'a été appliqué pour la présente étude : toutes les données disponibles ont été utilisées.

Comme présenté au Tableau 2-3, certains processus, par exemple l'effet du changement d'albédo sur le changement climatique ou la fin de vie des mesures végétalisées, ont été exclus à cause d'un manque de données ou d'une impossibilité de modéliser un cas générique représentatif. Il n'est par ailleurs pas possible de connaître l'effet de l'inclusion de ces éléments sur les résultats.

2.5.2 Frontières géographiques et temporelles

Conformément à l'unité fonctionnelle sélectionnée, la présente étude constitue une ACV représentative du contexte québécois en 2010. Ainsi, les mesures de lutttes aux ICU ont été modélisées de manière à répondre à ce critère.

Il est à noter, cependant, que certains processus compris dans les frontières des systèmes peuvent avoir lieu n'importe où ou à n'importe quel moment s'ils sont nécessaires à la réalisation de l'unité fonctionnelle. Par exemple, les processus associés à l'approvisionnement en matières premières, ainsi qu'à la gestion des rejets générés peuvent avoir lieu au Québec ou ailleurs dans le monde. De plus, certains processus peuvent générer des émissions sur une plus longue période que l'année de référence. C'est le cas de l'enfouissement des déchets, qui engendre des émissions (biogaz et lixiviat) sur une période de temps dont la longueur (de quelques décennies à plus d'un siècle, voire des millénaires) dépend de la conception et des paramètres d'opération des cellules d'enfouissement et de la modélisation de leurs émissions dans l'environnement.

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

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

Comme cette étude a pour but de fournir des données environnementales quant à différentes mesures de lutte aux ICU de manière générale, elle a été réalisée à partir de **données secondaires** (c.-à-d. des données génériques ou théoriques issues de banques de données commerciales ou de la banque de données du CIRAIG, d'informations transmises par des entrepreneurs, de rapports d'études divers, ou d'autres sources publiées (voir Annexe B)). Dans tous les cas, les données sélectionnées sont représentatives de mesures de lutttes aux ICU appliquées au Québec, sans pour autant couvrir toutes les options disponibles sur le territoire.

Tous les systèmes ont été modélisés à l'aide des modules de données d'inventaire du cycle de vie (ICV) disponibles dans la banque *ecoinvent* version 2.0 (www.ecoinvent.ch/). Cette base de données européenne est particulièrement reconnue par la communauté scientifique internationale, car elle surpasse de loin les autres bases de données commerciales tant du point de vue quantitatif (nombre de processus inclus) que qualitatif (qualité des procédés de validation, complétude des données, etc.).

Les modules de données génériques employés dans le cadre de cette étude ont été, dans la mesure du possible, adaptés de manière à augmenter leur représentativité au contexte analysé. Plus particulièrement, pour toutes les activités ayant lieu au Québec, les modules génériques ont été adaptés en remplaçant les mélanges d'approvisionnement en énergie des réseaux électriques (*grid mix*) européens par :

- Le *grid mix* québécois pour les processus d'avant-plan, c'est-à-dire les processus directement liés au système étudié (par ex., la consommation d'électricité lors de la production de composantes fabriquées au Québec);
- Le *grid mix* nord-américain pour les processus d'arrière-plan, c'est-à-dire tous les processus directement et indirectement liés aux processus d'avant-plan (par ex., toutes les ressources consommées pour la production de plastique, d'acier, etc. nécessaires à la fabrication des composantes). Le *grid mix* nord-américain est ici plus approprié considérant que l'approvisionnement en matériaux ne s'effectue pas seulement au Québec.

Ainsi, tous les processus d'avant-plan ayant lieu au Québec (incluant les divers transports) font appel à des processus d'arrière-plan adaptés au contexte énergétique nord-américain.

Mentionnons aussi que toutes les données utilisées ont été :

- 1) évaluées quant à leur représentativité temporelle, géographique et technologique;
- 2) collectées de manière à ce qu'elles soient les moins agrégées possible;
- 3) documentées conformément aux meilleures pratiques disponibles.

Dans les cas où aucune source n'était disponible ou lorsqu'il s'agissait de paramètres variables, des **hypothèses** ont aussi été posées. La liste complète des hypothèses relatives aux systèmes est présentée à l'Annexe B.

Le logiciel SimaPro 7.2, développé par PRé Consultants (www.pre.nl), a été utilisé pour faire la modélisation des systèmes et le calcul de l'inventaire. Par ailleurs, aucun critère de coupure n'a été employé. Toutes les données disponibles ont été intégrées au modèle.

2.7 Évaluation des impacts environnementaux

2.7.1 IMPACT 2002+

La méthode européenne IMPACT 2002+ version 2.05 (Jolliet *et al.*, 2003), reconnue internationalement, a été choisie pour effectuer l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) des scénarios comparés. En plus de fournir les résultats pour quinze catégories d'impacts, IMPACT 2002+³ permet une agrégation en quatre catégories dommage (Figure 2-2).

³ La présentation des catégories d'impact de la méthode IMPACT2002+ est habituellement disponible sur le site Internet www.sph.umich.edu/riskcenter/jolliet/impact2002+.htm#form2. Le site étant présentement inaccessible [en date du 19 février 2011], un résumé tiré du site – en anglais uniquement – est fourni à l'Annexe C.

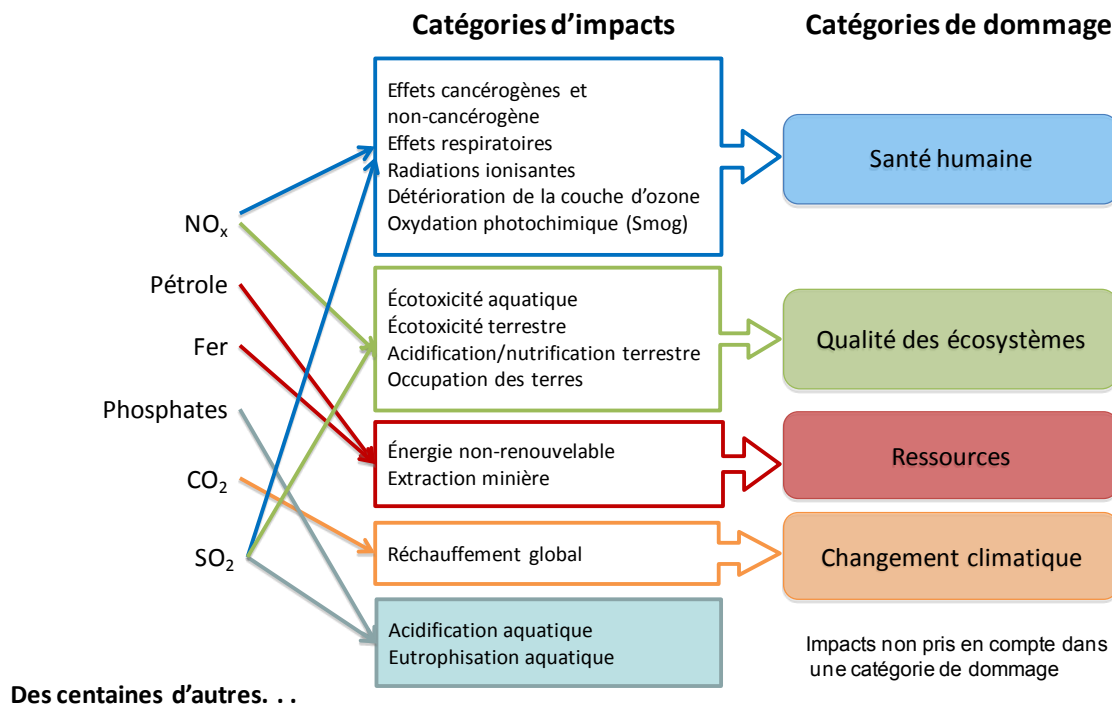


Figure 2-2 : Catégories de dommage et catégories d'impacts de la méthode IMPACT 2002+

L'agrégation des impacts environnementaux selon quatre catégories de dommage fournit des résultats d'analyse plus simples à comprendre et à interpréter pour les non-initiés à l'ACV, en plus de permettre une évaluation rapide des principaux enjeux environnementaux associés aux scénarios à l'étude. Les catégories de dommage peuvent se résumer ainsi :

- **Santé humaine :** cette catégorie prend en compte les substances ayant des effets toxiques (cancérogène et non cancérogène) et respiratoires, produisant des radiations ionisantes et qui contribuent à la destruction de la couche d'ozone. Afin d'évaluer le facteur de dommage, la gravité de la maladie est exprimée en DALY — *Disabled Adjusted Life Years*, unité reflétant le dommage à la santé humaine.
- **Qualité des écosystèmes :** cette catégorie regroupe les impacts liés à la toxicité aquatique et terrestre, à l'acidification et la nitrification terrestre et à l'occupation des terres. Elle est quantifiée en fraction d'habitats potentiellement disparus, sur une surface donnée et durant une certaine période de temps, par kilogramme de substance émise (PDF*m²*an/kg).
- **Changement climatique :** le potentiel de chaque gaz à effet de serre (GES) est calculé en kilogrammes de dioxyde de carbone équivalent (kg CO₂ eq.), basé sur les données sur le forçage radiatif infrarouge. Les effets potentiels des émissions sont quantifiés sur une période de 500 ans.
- **Ressources :** cette catégorie prend en compte l'utilisation de ressources non renouvelables et l'extraction de minéraux, quantifiés en mégajoules d'énergie (MJ).

Mentionnons que :

- Ces catégories ne couvrent pas tous les impacts environnementaux possibles associés aux activités humaines. Plusieurs types d'impacts, dont le bruit, les odeurs, et les champs électromagnétiques ne font pas partie de la présente analyse. De plus, l'utilisation de l'eau n'est pas considérée par les modèles de caractérisation actuels.
- **L'eutrophisation et l'acidification aquatiques** : elles ne sont pas prises en compte par les indicateurs de dommage de la méthode IMPACT 2002+ (dommages relatifs à la qualité des écosystèmes). Ces indicateurs d'impact sont donc évalués en conjonction avec les indicateurs de dommage pour compléter l'ÉICV.
- Aucune normalisation des résultats n'a été effectuée à l'exception des résultats présentés sous forme relative (en %), par rapport au système de référence. Aucune pondération des catégories de dommage n'a été réalisée. Les facteurs de conversion des impacts en dommages incluent toutefois une pondération implicite décrite dans la méthode IMPACT 2002+.
- Les résultats de l'ÉICV présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels. Il s'agit d'expressions relatives (à l'unité fonctionnelle notamment) qui ne permettent pas de prédire les impacts finaux ou le risque sur les milieux récepteurs et le dépassement des normes ou marges de sécurité.

Tout comme pour l'inventaire, le logiciel SimaPro 7.2 a été utilisé pour faire le calcul des impacts potentiels associés aux émissions inventoriées. C'est lui qui procède à la classification des flux élémentaires entre les diverses catégories d'impacts et au calcul des résultats d'indicateurs de dommage.

Une deuxième évaluation basée sur la méthode ReCiPe (Goedkoop *et al.*, 2009) a été réalisée en analyse de sensibilité afin de vérifier si la variabilité des modèles de caractérisation avait une influence significative sur les conclusions et donc, de tester la robustesse des résultats obtenus à partir d'IMPACT 2002+.

2.8 Interprétation

Cette dernière phase de l'ACV permet de discuter les résultats obtenus à la suite de l'ÉICV et de les mettre en perspective. Elle inclut une comparaison des mesures de lutte aux ICU au scénario de référence, sur la base des données environnementales ACV et d'une analyse qualitative des fonctions secondaires.

Étant donné l'objectif et le public visé par l'étude, la discussion des résultats est présentée au chapitre 3 de manière simplifiée. Les conclusions sont néanmoins appuyées sur une analyse complète et approfondie des données d'inventaire et de l'ÉICV. Cela comprend notamment :

- une évaluation de la qualité des données et analyse de contribution;
- une analyse de cohérence et de complétude;
- des analyses de sensibilité et des analyses de scénarios;
- des analyses d'incertitudes.

La méthodologie employée pour l'analyse et l'interprétation des données telles que l'évaluation de la qualité des données, la cohérence et la complétude, les analyses de sensibilité et l'analyse d'incertitudes sont résumées ici. Mais d'abord, une précision est donnée quant à l'analyse de l'inventaire.

2.8.1 Analyse de l'inventaire

Les résultats d'inventaire en termes de quantités de matières et d'énergie associées à chacun des systèmes à l'étude ne sont pas présentés dans le corps de ce rapport (en Annexe B, la liste des flux élémentaires agrégés pour chacun des cycles de vie est présentée à titre indicatif). L'analyse exhaustive des entrants et sortants n'améliore généralement pas la compréhension des enjeux. En effet, les résultats d'inventaire contiennent trop d'informations et ne permettent pas en soi de conclure. Pour que l'AICV soit pertinente, elle doit être faite en parallèle avec l'évaluation des impacts. Ainsi, en accord avec la norme ISO 14 044, l'ÉICV présentée et discutée au chapitre 3 constitue l'interprétation des résultats d'ICV, en ayant pour but de mieux en comprendre la portée environnementale. Une analyse de contribution permet également d'identifier les flux d'inventaire qui sont à la source des impacts prédominants.

2.8.2 Évaluation de la qualité des données d'inventaire

La fiabilité des résultats et des conclusions de l'ACV dépend de la qualité des données d'inventaire qui sont 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, les exigences relatives à la qualité des données devraient au minimum en assurer la **validité**, ce qui est équivalent ici à leur représentativité quant à l'âge, la provenance géographique et la performance technologique. Ainsi, les données utilisées devraient être représentatives :

- de la période définie par l'unité fonctionnelle, soit l'année 2010 et les 30 années suivantes (voir section 2.3);
- du contexte géographique dans lequel s'inscrivent les mesures à l'étude, soit les grands centres urbains du Québec (voir section 2.3);
- des caractéristiques technologiques des processus qu'elles décrivent.

Bien qu'aucune méthode particulière ne soit actuellement prescrite par l'ISO, deux critères ayant une influence sur la qualité de l'inventaire ont été choisis pour évaluer les données :

- **Fiabilité** : concerne 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 économiques.
- **Représentativité** : traite des corrélations géographique et technologique. Est-ce que l'ensemble des données reflète la réalité? Une donnée est jugée représentative lorsque la technologie est en relation directe avec le champ d'étude. Ce critère se rapporte principalement au choix des processus servant à modéliser le système.

Une description plus détaillée des critères et l'évaluation de la qualité des données sont présentées à l'Annexe D.

En parallèle à l'évaluation de la qualité des données utilisées, une estimation de la contribution des processus (c.-à-d. dans quelle mesure les processus modélisés avec ces données contribuent à l'impact global des systèmes à l'étude) a été effectuée. En effet, une donnée de qualité inférieure peut très bien convenir dans le cas d'un processus dont la contribution est minime. Par contre, des données de bonne qualité sont préférables pour les processus qui influencent grandement les conclusions de l'étude.

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 quatre catégories de dommage mentionnées à la section 2.7, ainsi que pour les deux catégories d'impacts non caractérisées en dommage.

2.8.3 Cohérence et complétude

Tout au long de l'étude, une attention a été portée afin que les systèmes soient représentés de manière conforme à la définition des objectifs et du champ de l'étude. De plus, lors de la collecte de données et de la modélisation, la définition des frontières, les hypothèses, les méthodes et les données ont été appliquées de manière similaire à tous les systèmes. Il y a donc **cohérence** entre les systèmes étudiés au regard des sources de données, de leur précision, de leur représentativité technologique, temporelle et géographique. La méthode d'expansion des frontières est également identique pour toutes les options évaluées.

Du fait que les mesures évaluées ne possèdent pas toutes les mêmes fonctions secondaires, il n'est pas possible de les comparer entre elles d'un point de vue ACV strict. C'est pourquoi elles sont comparées au scénario de référence. Par ailleurs, comme mentionné à la sous-section 2.2.2, d'un point de vue pratique (celui d'un citoyen qui désire apporter une modification à sa propriété par exemple), certaines mesures sont considérées équivalentes :

- toit vert et toit réfléchissant;
- revêtement réfléchissant et revêtement perméable pour une aire de stationnement privée.

Ces options ont donc été comparées entre elles au bénéfice des lecteurs (Chapitre 3).

La **complétude** a été assurée grâce à une définition attentive des frontières du système analysé et par une utilisation systématique des règles d'expansion. Lorsque des données étaient manquantes, une analyse de sensibilité a été effectuée pour vérifier l'effet des hypothèses et des approximations employées. Les résultats de l'évaluation des impacts ont également été validés par une seconde méthode ÉICV.

2.8.4 Analyses de sensibilité et analyses de scénarios

Plusieurs paramètres utilisés lors de la modélisation des systèmes présentent une certaine incertitude, plus particulièrement liée aux hypothèses et modules de données génériques employés. Les résultats obtenus sont liés à ces paramètres et leur incertitude est transférée aux conclusions tirées.

À partir des principaux processus/paramètres contributeurs identifiés par l'analyse de contribution, des analyses de sensibilité ont été effectuées sur les paramètres suivants :

- **Durée de vie du toit vert** : Certaines publications relatent que la mise en place d'un toit vert permet de doubler la durée de vie d'une membrane élastomère neuve (Dunnett et Kingsbury, 2005). Cependant, les toits verts n'existent pas sous leur forme actuelle depuis suffisamment longtemps pour que ces affirmations aient été corroborées par l'expérience. Une analyse de sensibilité comparant plusieurs durées de vie (10, 20, 25, 30, 40 et 50 ans) a été effectuée pour déterminer à partir de quand les impacts potentiels du toit vert deviennent « équivalents » à ceux du toit de référence. Une analyse de scénario comparant une durée de vie de 25 ans (équivalente à la membrane de bitume élastomère sans couverture végétale) est également présentée avec les résultats.

- **Durée de vie des toits réfléchissants** : Les toits couverts de membranes de bitume élastomère ont une durée de vie moyenne de 21 ans au Québec (Perrier, 2010). Cependant, les toits blancs, du fait qu'ils ne surchauffent pas, ont une durée de vie plus grande que leur équivalent noir (Perrier, 2011). Aucune référence précise n'ayant été trouvée, une durée de vie de 25 ans a été posée. Une analyse de sensibilité comparant plusieurs durées de vie (10, 15, 20, 25 et 30 ans) a été effectuée pour déterminer à partir de quand les impacts potentiels du toit réfléchissant deviennent « équivalents » à ceux du toit de référence.

Des analyses de scénarios, où les paramètres variables sont fonction des choix du propriétaire mettant en place la mesure, ont également été effectuées :

- **Utilisation de fertilisants chimiques** : ces derniers contiennent des métaux qui sont émis au sol et à l'eau souterraine lors de leur utilisation. De ce fait, leur impact potentiel évalué par les modèles de caractérisation (et particulièrement ceux de la méthode IMPACT 2002+ pour la catégorie « Qualité des écosystèmes ») est souvent très élevé. L'utilisation de fertilisants biologiques (poudre d'os et mycorhize par exemple) pourrait vraisemblablement réduire ces impacts potentiels, mais les données génériques pour modéliser leur utilisation n'étaient pas disponibles. Par conséquent, des scénarios comparant l'utilisation de fertilisants chimiques à une implantation et un entretien SANS aucun fertilisant ont été comparés pour toutes les mesures concernées.
- **Quantité d'eau captée par les mesures visant l'humidification du sol** : le jardin pluvial, la tranchée d'infiltration et le puits d'infiltration peuvent servir à la fois à capter les eaux de toitures et les eaux de ruissellement provenant du stationnement. Pour ces trois mesures, deux scénarios ont donc été comparés, en considérant l'eau du toit uniquement et l'eau du toit combinée à celle de l'aire de stationnement.
- **Entretien de la toiture réfléchissante** : Pour conserver sa réflectivité, une toiture blanche doit être entretenue régulièrement, sans quoi la saleté affecte sensiblement son albédo. Selon la recommandation du fabricant, une nouvelle couche d'enduit réfléchissant doit être appliquée aux cinq ans sur les membranes de bitume élastomère (comme modélisé dans le cas de base). Un scénario sans entretien a également été effectué pour mesurer l'importance de l'enduit réfléchissant sur les impacts potentiels de ce type de toiture.
- **Type de toiture réfléchissante** : Les membranes de bitume élastomère se partagent le marché avec les membranes EPDM (terpolymère d'éthylène propylène diène ou *Ethylene Propylene Diene Monomer* en anglais), qui sont passablement différentes dans la mesure où elles s'installent à froid, sont lisses (donc, peuvent être entretenue par un lavage/brossage annuel) sont entièrement recyclables en fin de vie et ont des durées de vie pouvant aller jusqu'à 50 ans selon certains. Deux scénarios impliquant une membrane EPDM avec lavage annuel et des durées de vie de 40 et 25 ans ont été analysés.

La liste des analyses de scénarios effectués pour chacune des mesures est présentée au Tableau 2-4.

Tableau 2-4 : Analyses de scénarios

Mesure	Cas de base	Analyse de scénario
1. Toit vert	A. Durée de vie de 45 ans Avec fertilisation chimique initiale et au besoin	B. 45 ans, sans fertilisation
		C. 25 ans, fertilisation chimique initiale et au besoin (pire cas)
2. Toit réfléchissant	A. Membrane bitume élastomère blanche Durée de vie de 25 ans Enduit réfléchissant appliqué initialement et aux 5 ans	B. Membrane bitume élastomère blanche, aucun entretien
		C. Membrane EPDM blanche, durée de vie de 40 ans
		D. Membrane EPDM blanche, durée de vie de 25 ans
3. Mur végétalisé	A. Fertilisation chimique la 1 ^{re} année	B. Sans fertilisation
4. Aménagement végétalisé	A. Fertilisation chimique la 1 ^{re} année	B. Sans fertilisation
		C. Fertilisation chimique annuelle
5. Arbre	A. Fertilisation chimique la 1 ^{re} année	B. Sans fertilisation
6. Revêtement réfléchissant	A. Durée de vie 20 ans	S. O.
7. Revêtement perméable	A. Durée de vie 20 ans	S. O.
8. Jardin pluvial	A. Captage de l'eau de toiture seulement Fertilisation chimique la 1 ^{re} année	B. Captage de l'eau de toiture ET de l'eau de ruissellement du stationnement Fertilisation chimique la 1^{re} année
		c. Captage de l'eau de toiture Fertilisation chimique annuelle
		D. Captage de l'eau de toiture ET de l'eau de ruissellement du stationnement Fertilisation chimique annuelle
9. Tranchée d'infiltration	A. Captage de l'eau de toiture seulement	B. Captage de l'eau de toiture ET de l'eau de ruissellement du stationnement
10. Puits d'infiltration	A. Captage de l'eau de toiture seulement	B. Captage de l'eau de toiture ET de l'eau de ruissellement du stationnement

Les analyses de scénario et de sensibilité sont présentées au chapitre 3, en combinaison avec les résultats de chacune des mesures.

2.8.5 Analyse d'incertitudes

L'incertitude inhérente au modèle ACV est de deux ordres :

- l'incertitude sur les données d'inventaire, évaluée à l'aide d'une analyse de type Monte-Carlo;
- l'incertitude sur les modèles de caractérisation, qui traduisent l'inventaire en indicateurs environnementaux.

Analyse Monte-Carlo

Une analyse d'incertitudes de type Monte-Carlo a été réalisée à l'aide du logiciel SimaPro 7.2 afin de tester la robustesse des résultats. Elle constitue une étude de propagation de la variabilité des données d'inventaire lors des calculs, avec un nombre d'itérations fixé à 750.

Sur les milliers de flux élémentaires individuels inventoriés dans les processus élémentaires des scénarios étudiés, la très grande majorité provient de la banque de données *ecoinvent*. Ceux-ci présentent pour la plupart une variabilité qui prend la forme d'une distribution *lognormale* autour de la valeur centrale spécifiée (et utilisée dans les calculs déterministes), caractérisée par son écart-type. Ces variabilités ne sont toutefois pas déterminées statistiquement à l'aide de mesures concrètes, mais estimées par l'application d'une *matrice pedigree* décrivant la qualité d'une donnée selon son origine, son mode de collecte et sa représentativité géographique, temporelle et technologique (Weidema et Suhr Wesnæs, 1996).

De la même manière, la variabilité de la plupart des données collectées ont été représentées par une distribution lognormale, dont l'écart-type a été estimé à l'aide de cette même matrice pedigree. Certaines données ont en outre été associées à une distribution statistique uniforme ou triangulaire, bornée par des valeurs minimales et maximales obtenues de la littérature. Au total, 69 % des données ont une distribution statistique associée.

La simulation Monte-Carlo procède à la soustraction de deux systèmes que l'on souhaite comparer. Ainsi, les résultats indiquent la probabilité qu'une option ait des indicateurs plus élevés que l'autre.

Pour la présente étude, chaque mesure ayant plusieurs scénarios d'implantation a vu ses variantes être comparées. Dans le cas des toitures et des stationnements, les mesures évaluées ont été comparées aux scénarios de référence. Enfin, pour les options jugées comparables, l'analyse d'incertitudes a également été effectuée sur la différence entre le toit vert et le toit réfléchissant et entre le revêtement perméable et le revêtement réfléchissant.

Les résultats de l'analyse d'incertitudes ont été considérés lors de l'analyse des résultats de chacune des mesures, bien qu'il n'en soit pas fait mention dans le corps du texte.

Incertitude sur les modèles de caractérisation

Cette seconde forme d'incertitude ne pouvant être quantifiée à l'aide d'une analyse statistique, les lignes directrices proposées par les auteurs de la méthode IMPACT 2002+ ont été suivies (Humbert *et al.*, 2009). Elles établissent des seuils de significativité pour différentes catégories d'impacts, en deçà desquels il n'est pas possible de conclure quant à la meilleure performance environnementale d'une option sur une autre :

- 10 % en termes de changement climatique, d'énergie non-renouvelable et d'utilisation des ressources;
- 30 % en termes d'effets respiratoires dus aux substances inorganiques (santé humaine), d'acidification et d'eutrophisation;
- Un ordre de magnitude en termes d'effets toxicologiques et écotoxicologiques.

Ces lignes directrices dépendent toutefois de la corrélation entre les systèmes comparés; deux systèmes similaires ayant des seuils de significativité inférieurs à ceux exposés ci-dessus. L'interprétation proposée au chapitre 3 prend donc en compte ces différents aspects. Une

différence de 30 % a été considérée significative pour l'indicateur *Santé humaine* lorsque les systèmes comparés ne sont pas corrélés.

2.9 Revue critique

Parce que les résultats de cette étude doivent être divulgués publiquement et sont destinés à supporter une affirmation comparative, une revue critique a été réalisée par un comité de parties intéressées, c'est-à-dire composé d'un expert ACV et d'autres spécialistes des domaines impliqués dans l'étude.

Le comité de revue critique ayant été formé est composé de quatre membres (Tableau 2-5).

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

Nom	Organisme d'attache	Implication/Champ d'expertise
Gontran Bage	LVM	Président du comité de revue, expert ACV
Marie Dugué	Vinci Consultants	Spécialiste, gestion des eaux pluviales
Patrice Godin	Centre d'écologie urbaine	Spécialiste, toitures végétalisées
Marie-Claire Martineau	La Vie en Vert	Spécialiste, options de verdissement

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

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

Le processus de revue critique a été effectué en cinq temps, au cours des mois de janvier et février 2011 :

1. Révision de l'étude ACV préliminaire (Martineau, 2010) par tous les membres du comité de revue.
2. Correction du rapport et précision des éléments soulevés par les réviseurs à l'étape 1;
3. Révision du rapport final de l'étude par tous les membres du comité de revue;
4. Correction et précision des éléments soulevés par les réviseurs;
5. Dépôt du rapport final révisé au mandataire.

Les commentaires des réviseurs après la révision de l'étude préliminaire (étape 1) et du rapport final (étape 3) ont été fournis au CIRAIG sous forme de rapports de revue.

3 Résultats

Du fait que les mesures évaluées n'ont pas toutes des fonctions équivalentes il n'est pas possible, au sens strict, de comparer les options entre elles. En effet, elles ne possèdent pas nécessairement la même efficacité d'abaissement de la température et ne comportent pas toutes les mêmes fonctions secondaires. De plus, certaines options prennent en compte des impacts évités liés au scénario de référence. Par exemple, il est considéré que l'option d'implanter un toit vert ou un toit réfléchissant n'est envisagée par un propriétaire résidentiel que lorsqu'il doit refaire son toit. Dans ces cas précis, le toit vert ou réfléchissant remplace donc le nouveau toit d'asphalte et gravier qui aurait autrement été installé (évitant ainsi la production, le transport et l'enfouissement des matériaux qui le constituent). Les autres options évaluées ne considèrent pas cet évitement. Il en est de même avec l'implantation de pavés perméables ou réfléchissants pour un espace de stationnement privé, qui évite la mise en œuvre d'un stationnement en enrobés bitumineux.

Pour permettre de mieux situer les mesures évaluées, une première analyse qualitative de leur profil fonctionnel a été effectuée. Par la suite, l'analyse environnementale des options est présentée selon les quatre types d'applications définis à la section 2.2.

3.1 Analyse qualitative des fonctions secondaires

À la suite de la revue bibliographique, une liste de fonctions remplies par les différentes mesures de lutte aux ICU a été répertoriée. La grille du Tableau 3-1 présente ces fonctions, en association aux mesures évaluées. Notons que les deux facteurs qui sont la consommation d'énergie évitée et le traitement d'eau évité (décrits à la section 2.4) font également partie des fonctions secondaires des mesures évaluées, mais ne sont pas présentés dans le Tableau 3-1 puisqu'ils sont quantifiés dans l'évaluation environnementale qui suit.

Par rapport à la situation de référence, l'implantation de mesures de lutte aux ICU peut donc avoir plusieurs effets intéressants, discutés plus bas.

Tableau 3-1 : Profil fonctionnel des mesures de lutte aux ICU évaluées, par rapport au scénario de référence

"Implantation, en 2010, et conservation pendant 30 ans d'une mesure de lutte aux ICU sur un pâté de maison d'un grand centre urbain du Québec"		Mesures de lutte aux ICU									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Profil fonctionnel	Réduction de la température ambiante	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Réduction des problèmes de drainage et d'inondation liés à la surcharge des égouts	++		+	+	+		+	++	++	++
	Recharge des aquifères			+	+	+		+	++	++	++
	Création d'habitat pour la faune	+		+	+	+			+		
	Amélioration de la qualité de l'air	+		+	+	+			+		
	Amélioration de la qualité de l'eau	+							+		
	Réduction du bruit ambiant	+		+	+	+			+		
	Embellissement des quartiers urbains			+	+	+			+		

Légende

1	Toit vert
2	Toit réfléchissant
3	Mur végétalisé
4	Aménagement végétalisé (plate-bande)
5	Arbre
6	Pavés/revêtement réfléchissant
7	Pavés/revêtement perméable
8	Jardin pluvial
9	Tranchée de rétention
10	Puits d'infiltration

++	Lien fort entre une fonction et un composant
+	Lien entre une fonction et un composant
	Pas de lien significatif

Il est possible de constater que, si toutes les mesures évaluées servent à la réduction de la température ambiante (à des degrés divers qu'il est difficile de quantifier), d'autres fonctions ne sont partagées que par quelques options.

3.1.1 Problèmes de surcharge des égouts et recharge des aquifères

Le toit vert, du fait qu'il se sature en eau au début de l'intempérie, permet en temps de fortes précipitations de réduire le stress sur le réseau d'égouts qui, dans bien des municipalités, combine encore les eaux sanitaires et pluviales. Les mesures de végétalisation, le revêtement perméable et les mesures visant l'humidification du sol sont toutes des options qui réduisent également le volume d'eau de pluie qui transite par les égouts municipaux.

Or, lors de précipitations violentes, les débits d'eau à traiter augmentent aux stations d'épuration, ce qui en réduit l'efficacité de traitement. Quand le volume d'eau entrant à l'usine d'épuration est trop élevé, il arrive également que les eaux combinées soient rejetées directement au fleuve sans traitement préalable. La rétention d'eau par le toit vert ou l'infiltration d'eau de ruissellement par des zones perméables peut donc réduire le stress sur l'usine de filtration et ainsi réduire la contamination des cours d'eau. Pour qu'un tel effet se produise, il est cependant nécessaire qu'un nombre suffisant de systèmes aient été mis en place dans une municipalité donnée.

Toutes ces options, à l'exception du toit vert, permettent également la recharge des aquifères, en favorisant l'infiltration des précipitations dans le sol naturel.

3.1.2 Création d'habitats fauniques et qualité de l'air

Toutes les mesures impliquant l'ajout de végétaux au paysage urbain sont appréciées par les petits animaux. Les toits verts et les arbres constituent notamment des habitats pour les oiseaux. Les plantes assurent également une filtration de l'air ambiant, ce qui a pour effet d'en améliorer la qualité.

3.1.3 Qualité de l'eau

Le toit vert et le jardin pluvial sont deux mesures qui ont pour effet d'assurer une certaine filtration de l'eau des précipitations par les plantes. Dans le cas du toit vert, l'eau non retenue est envoyée au réseau d'égout. Le jardin pluvial permet pour sa part le drainage des eaux de toiture et des eaux de ruissellement provenant de l'aire de stationnement. Il offre notamment un traitement intéressant sur les huiles, les graisses et les nutriments entraînés par les eaux de ruissellement.

3.1.4 Réduction du bruit et embellissement des quartiers urbains

Enfin, la mise en place de mesures végétalisées a pour effet de réduire le bruit de la ville et de rendre les quartiers plus agréables à vivre. Même le toit vert, souvent invisible de la rue, peut constituer un paysage intéressant pour les voisins habitant en hauteur.

Il faut donc garder ces distinctions en tête lors de la comparaison des impacts environnementaux évalués par l'ACV. Car, bien qu'une mesure puisse présenter plus d'impacts potentiels en ce qui a trait aux indicateurs quantifiables, elle peut aussi offrir des services que les autres n'offrent pas.

3.2 Présentation des analyses par rapport au scénario de référence

Le premier objectif de l'étude était de comparer individuellement les mesures de lutte aux ICU à une situation de référence, qui correspond au *statu quo* (ne pas implanter de mesure). Pour ce faire, les résultats d'indicateurs (*Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Changement climatique, Ressources* et les deux catégories d'impacts *Acidification aquatique* et *Eutrophisation aquatique*) sont présentés pour chacune des mesures à l'étude.

Ces résultats comprennent :

- une **charge environnementale**, constituée des impacts potentiellement générés par l'implantation et l'entretien des mesures, et par le transport et l'enfouissement des matériaux après leur démantèlement. Elle est illustrée comme des impacts potentiels positifs.
- un **bénéfice environnemental**, associé aux processus potentiellement évités par la mesure par rapport à la situation de référence. Il peut s'agir de traitement d'eau évité, de consommation énergétique évitée ou même de la toiture ou du stationnement de référence qui auraient été mis en œuvre, mais qui sont remplacés par les mesures évaluées. Le bénéfice est présenté sous la forme d'impacts potentiels négatifs.

La différence entre le total des charges environnementales et les impacts évités constitue l'**impact potentiel net (ou dommage net)**, illustré sur les graphiques par des boîtes en pointillé. Un résultat net négatif indique ainsi que la mise en place de la mesure présente une amélioration par rapport à la situation de référence. Au contraire, un résultat positif indique que la mesure présente plus d'impacts/dommages potentiels que le *statu quo*.

Il est important de souligner que les bénéfices environnementaux tels que l'économie de chauffage liée à l'implantation d'un toit vert ou le traitement d'eau évité par les mesures qui captent les eaux de pluie sont des évaluations incertaines d'impacts potentiellement évités. Les incertitudes liées à ces bénéfices sont parfois importantes, du fait qu'il s'agit d'estimations moyennes de facteurs qui sont très influencés par les spécificités de chaque installation (voir section 3.7).

Pour cette raison, les résultats environnementaux présentés dans les sections qui suivent sont discutés en excluant et en incluant les bénéfices potentiels. L'implication des différents scénarios évalués est également discutée et les principaux processus contribuant aux indicateurs sont décrits de manière simplifiée. Notons que les valeurs sont présentées sur une base relative par rapport au scénario de référence, qui correspond à 0 % d'impact potentiel (le 100 % correspondant au score de la première mesure comparée).

3.3 Mesures visant la protection de l'enveloppe du bâtiment

Puisque les toits verts et les toitures réfléchissantes ont la même fonction de protection de l'enveloppe et que les deux options se présentent de manière équivalente à un citoyen qui désire faire refaire la toiture de sa maison, ces mesures ont été considérées comparables sur le plan pratique. La Figure 3-1 présente donc, pour chaque indicateur évalué, les résultats associés au toit vert et au toit réfléchissant. Pour chacun d'eux, divers scénarios de durées de vie et d'entretien ont été analysés. Un second type de membrane réfléchissante, simple couche EPDM, a également été comparé au modèle de base (membrane de bitume élastomère multicouche).

L'étape d'« entretien » comprend : la fertilisation dans le cas d'un toit vert, l'ajout d'une couche d'enduit réfléchissant tous les cinq ans pour la membrane de bitume élastomère et le lavage annuel à l'eau et au savon pour la membrane EPDM. Cette dernière étant très lisse, il est en effet possible de la laver facilement pour enlever la saleté qui réduit son pouvoir réfléchissant.

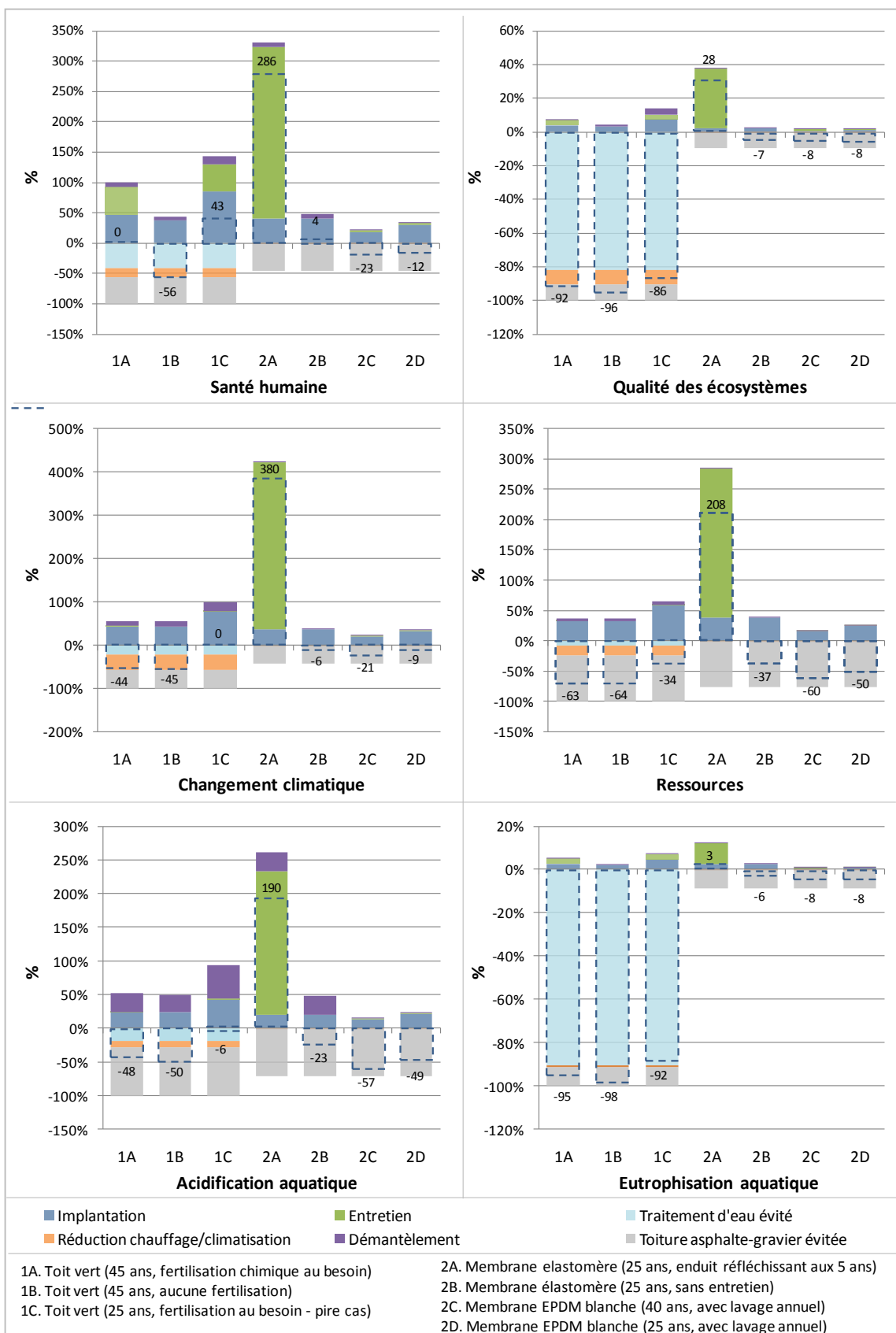


Figure 3-1 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un toit vert et d'un toit réfléchissant par rapport au scénario de référence

À partir de ces figures, on observe du côté des **charges environnementales** que :

- Le fait de ne pas mettre de fertilisant chimique sur un **toit vert** améliore le score de l'indicateur *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* (1A et 1B), à cause des émissions de fertilisants évitées à l'eau. Dans le cas où l'eau de toiture serait captée par un système visant l'humidification des sols, l'indicateur *Qualité des écosystèmes* serait affecté davantage, du fait des métaux évités dans les sols.
- Les membranes installées sous la végétation et le substrat de culture servant à faire croître les plantes se partagent la majeure partie des charges environnementales liées à l'**implantation d'un toit vert** (1A, 1B, 1C), les plantes elles-mêmes ayant un impact modéré. Lorsque la durée de vie du toit passe de 45 ans à 25 ans, les impacts potentiels liés à la production, au transport et à l'enfouissement de ces matériaux en fin de vie augmente proportionnellement.
- L'**enfouissement des matériaux** contribue de façon notable à l'indicateur *Acidification aquatique*, ce qui peut être perçu pour les toits verts (1A, 1B, 1C) et les membranes de bitume élastomère réfléchissantes (2A et 2B). Les membranes EPDM (2C, 2D) n'ont pas cet impact potentiel du fait qu'elles sont entièrement recyclables et ont été considérées recyclées.
- L'**entretien du toit réfléchissant en membrane de bitume élastomère** contribue de façon très marquée aux scores de la majorité des indicateurs (*Santé humaine*, *Changement climatique*, *Ressources*, *Acidification aquatique*). C'est la production de l'enduit réfléchissant, contenant de l'acrylique et du dioxyde de titane, qui amène ces impacts potentiels.
- L'**entretien du toit réfléchissant en membrane EPDM** (2C, 2D) par lavage annuel à l'eau et au savon a une contribution négligeable aux charges environnementales de ce type de toiture.
- Pour la **toiture réfléchissante**, la production et l'installation des deux types de membranes comparées, soit de bitume élastomère (2A, 2B) et EPDM (2C, 2D) présentent des scores similaires pour tous les indicateurs. La durée de vie supérieure de la membrane EPDM (2C) réduit cependant sa charge environnementale de manière proportionnelle.

Concernant les **bénéfices environnementaux** :

- Ils sont constitués du traitement d'eau évité (potentiel maximal pour le toit vert), de la réduction de consommation énergétique liée au chauffage (pour le toit vert) et à la climatisation (pour tous les toits) et de la toiture asphalte et gravier évitée (scénario de référence), comprenant son implantation et son démantèlement.
- S'il s'avérait, le bénéfice lié au **traitement d'eau évité** pourrait compenser entièrement pour les charges environnementales liées à l'implantation et au démantèlement du toit vert selon les indicateurs *Qualité des écosystèmes* et *Eutrophisation aquatique* et, dans une moindre mesure, *Santé humaine* (à cause des produits chimiques utilisés pour traiter l'eau, notamment l'hydroxyde de sodium).
- Le fait de substituer un **toit multicouche asphalte et gravier** permet d'éviter des impacts potentiels dans toutes les catégories évaluées, tant à cause des matériaux et de l'énergie pour l'implanter, qu'à cause du transport et de l'enfouissement des matériaux en fin de vie.

- Selon les hypothèses et données employées, **l'énergie de climatisation évitée par le toit blanc (peu importe le type) et le toit vert** est négligeable sur leurs cycles de vie. Notamment, il est considéré que la réduction de la climatisation évite la consommation d'électricité québécoise, majoritairement constituée d'hydroélectricité ayant peu d'impacts potentiels sur les indicateurs évalués.
- La réduction de **consommation énergétique liée au chauffage** grâce à l'implantation d'un toit vert est difficile à estimer. Elle dépend entre autres de l'isolation initiale du toit et de l'enveloppe de la maison en général ainsi que de la localisation du bâtiment. D'après les données recueillies et hypothèses effectuées, le chauffage évité par le toit vert amène notamment des bénéfices potentiels aux catégories *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes*, *Changement climatique* et *Ressources*. Ceci est dû au fait que le chauffage résidentiel est souvent assuré par du gaz naturel ou du mazout, des combustibles fossiles dont la production et la combustion sont évitées.

Lorsqu'on regarde plutôt les **impacts potentiels nets**, il peut être constaté que :

- En considérant tous les bénéfices potentiels, la mise en place d'un toit vert est préférable à l'implantation d'un toit standard asphalté et gravier dans tous les indicateurs, sauf *Santé humaine* (à cause de la production de la membrane d'étanchéité, du substrat de culture et de l'utilisation des fertilisants chimiques).
- Lorsqu'on exclut la fertilisation et les bénéfices liés au traitement d'eau évité et à la réduction de consommation énergétique, le toit vert est préférable au toit standard asphalté et gravier pour les indicateurs *Ressources* et *Qualité des écosystèmes*, mais devient désavantageux au regard du *Changement climatique* et de *Santé humaine*, les impacts potentiels de la production du substrat de culture et des membranes dépassant celles du toit de référence.
- L'ajout d'enduit réfléchissant aux cinq ans rend le toit réfléchissant moins intéressant que le toit standard dans toutes les catégories évaluées.
- La membrane EPDM a moins d'impacts potentiels que la membrane de bitume élastomère dans toutes les catégories évaluées.
- La mise en place d'un toit réfléchissant sans entretien (ou avec un lavage annuel à l'eau et au savon seulement) est préférable à l'implantation d'un toit standard asphalté et gravier dans cinq indicateurs sur six. La catégorie *Santé humaine* montre quant à elle une très légère augmentation (liée à la production des membranes).

Il faut souligner que les toits verts ne peuvent pas être installés sur tous les bâtiments. Les édifices plus âgés n'ont souvent pas une structure suffisante pour porter le poids supplémentaire que représente le substrat de culture imbibé d'eau.

Globalement, on retient que...

Pour les **toitures** :

- Le toit vert extensif et le toit réfléchissant en membrane de bitume élastomère sont généralement préférables au toit d'asphalte et gravier, dans la mesure où l'entretien est réduit (c.-à-d. sans fertilisation chimique ou enduit réfléchissant).
- Il convient de choisir une membrane ayant une durée de vie la plus longue possible, afin de diminuer les impacts potentiels liés à la production au transport et à l'enfouissement des matériaux.
- Dans le cas d'un toit vert extensif, il est préférable de ne pas employer de fertilisation chimique sur une base régulière. En particulier si les eaux du toit servent à alimenter un système de captage des eaux pluviales, pour éviter des émissions de métaux dans les eaux et les sols.
- Dans le cas des toits réfléchissants, il est préférable d'opter pour une membrane dont l'entretien peut se faire par simple lavage à l'eau et au savon. L'enduit réfléchissant à appliquer sur une base régulière a en effet des impacts potentiels importants sur l'environnement. Si une membrane de bitume élastomère blanche est installée, il vaut donc mieux la laisser perdre de sa réflectivité que de mettre des couches de produit réfléchissant.
- Les membranes EPDM blanches ont moins d'impacts potentiels que les toits asphalte et gravier de par leur durée de vie étendue, leur facilité d'entretien et du fait qu'elles soient entièrement recyclables en fin de vie.

En plus de ces éléments, il est à considérer que le toit vert extensif permet de retenir les faibles pluies et de retarder l'arrivée d'eau aux égouts lors de fortes pluies, ce qui contribue à réduire le stress sur le réseau d'égouts et les usines d'épuration. Les plantes qu'il accueille améliorent également la qualité de l'air, réduisent le bruit ambiant, en plus de créer un habitat pour les oiseaux.

Les toits verts ne peuvent cependant pas être installés partout. Les édifices plus âgés n'ont souvent pas une structure suffisante pour porter le poids supplémentaire que représente le substrat de culture imbibé d'eau.

3.4 Mesures visant la végétalisation du pourtour du bâtiment

La Figure 3-2, la Figure 3-3 et la Figure 3-4 présentent respectivement les résultats pour le mur végétalisé, pour l'aménagement végétalisé et pour l'arbre, selon plusieurs scénarios de fertilisation. Rappelons que les résultats ne peuvent pas être comparés entre eux, car ils sont calculés de manière relative par rapport au premier scénario (A) de chacun.

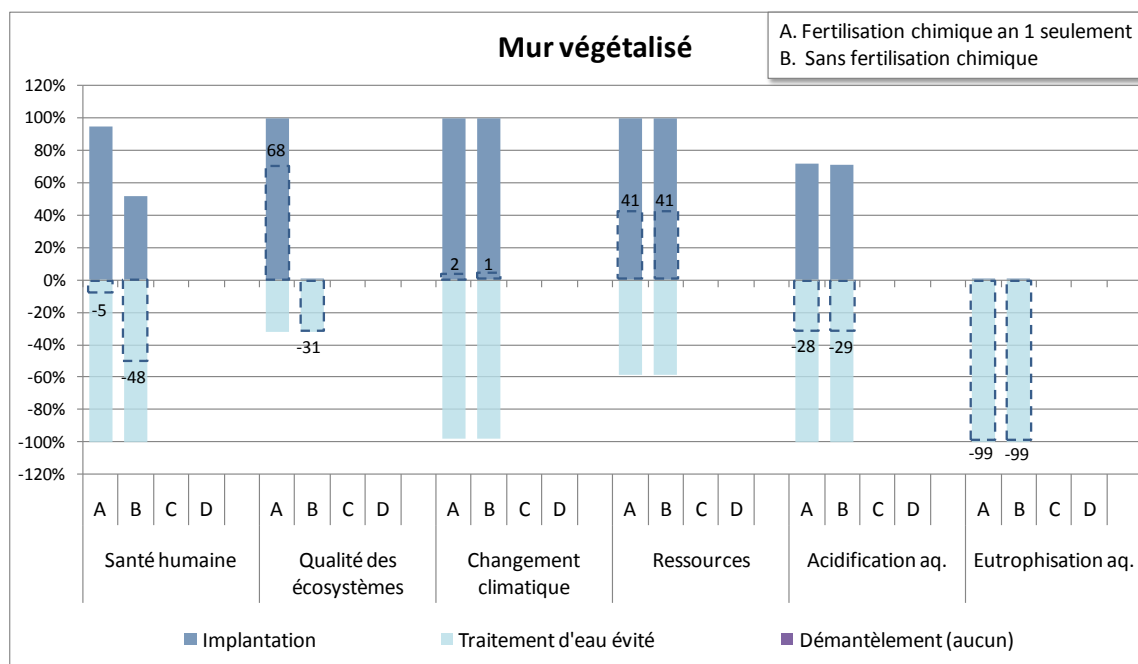


Figure 3-2 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un mur végétalisé par rapport au scénario de référence

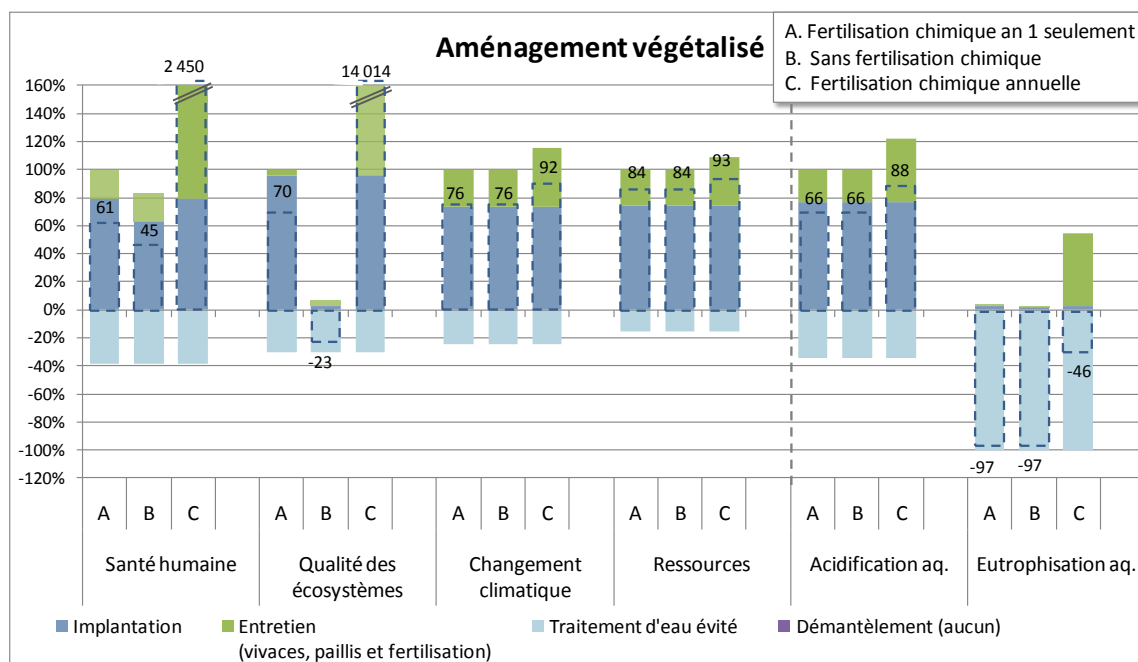


Figure 3-3 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un aménagement végétalisé par rapport au scénario de référence

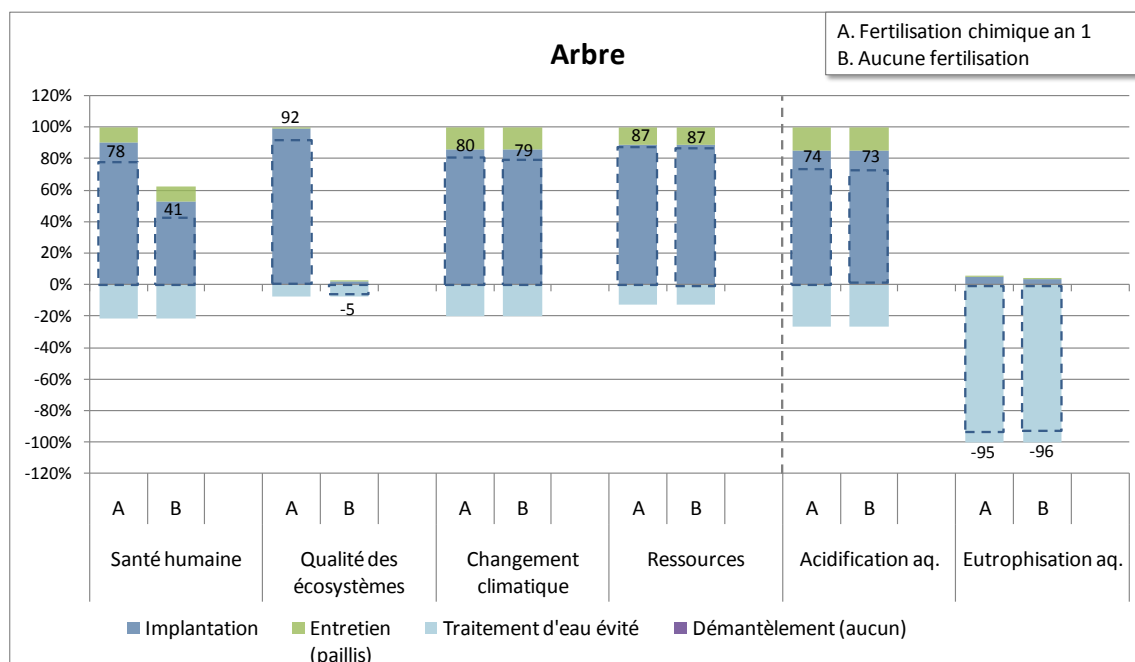


Figure 3-4 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un arbre par rapport au scénario de référence

À partir de ces figures, on observe du côté des **charges environnementales** que :

- Le fait de ne pas mettre de fertilisant chimique (uniquement lors de l'implantation ou sur une base régulière) améliore les indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*, à cause des métaux qui sont évités dans les sols. La méthode de caractérisation IMPACT 2002+ employée est extrêmement sensible à ce type d'émission et a tendance à surestimer leur impact potentiel. Néanmoins, la validation des résultats par une autre méthode d'évaluation, ReCiPe, confirme que la fertilisation chimique régulière (plusieurs fois par an) génère des impacts potentiels significatifs.
- La terre noire ajoutée, le transport et l'enfouissement des sols excavés comptent également dans les impacts potentiels de ces mesures. La réutilisation de la terre sur place, lorsque possible, permettrait de réduire encore davantage les indicateurs *Changement climatique*, *Ressource* et *Santé humaine* liés à la combustion de carburant pour le transport.
- Le paillis et l'eau ont une contribution négligeable aux indicateurs.

Concernant les **bénéfices environnementaux**, le traitement d'eau évité indiqué constitue le bénéfice potentiel maximal. S'il s'avérait, il pourrait compenser entièrement pour les charges environnementales selon plusieurs indicateurs dans le cas du mur végétalisé. Pour l'aménagement végétalisé et l'arbre, le traitement d'eau évité réduit particulièrement les indicateurs *Qualité des écosystèmes* et *Eutrophisation aquatique* (à cause des produits chimiques utilisés pour traiter l'eau, notamment l'hydroxyde de sodium).

L'**impact potentiel net** des indicateurs considérés montre que les mesures de végétalisation ne se traduisent pas, dans l'ensemble, par une réduction des impacts environnementaux potentiels

par rapport à la situation de référence. En effet, le fait d'implanter et d'entretenir des végétaux exige une consommation de matières et d'énergie qui n'est pas entièrement compensée par les bénéfices mesurables. Il importe cependant de rappeler que ce type de mesures offre plusieurs fonctions secondaires non quantifiées, comme l'amélioration de la qualité de l'air, la réduction du bruit de la ville et l'embellissement des quartiers, pour n'en nommer que quelques-unes.

Par ailleurs, les impacts et bénéfices potentiels associés à la fin de vie des mesures de végétalisation n'ont pas été pris en compte dans l'analyse. Dans le cas des murs et aménagements végétalisés, il n'existe pas vraiment une fin de vie attribuable à la mesure. Les plants peuvent simplement être retirés et réemployés, compostés ou jetés, ce qui n'implique pas d'impact étant donné la nature « biogénique » des matières.

Le cas de l'arbre est plus complexe. Sa durée de vie est extrêmement contextuelle et sa fin de vie également. Une fois coupé, le bois de l'arbre peut être valorisé d'une multitude de manières, allant du foyer résidentiel à l'usine du biocarburant, en passant par le compostage et la production de paillis. En fonction du mode de valorisation posé en fin de vie, les bénéfices potentiels associés au cycle de vie de l'arbre seraient très différents. L'objectif de l'étude n'étant pas de comparer les options de valorisation du bois, le démantèlement a donc été exclu, mais il faut garder en tête qu'aux charges environnementales indiquées se soustraient certains bénéfices liés à la valorisation de l'arbre à la fin de son existence.

Globalement, on retient que...

Pour les **mesures de végétalisation**, il est préférable :

- Lorsque c'est possible, de garder la terre existante plutôt que d'en disposer hors site et de faire livrer de la nouvelle terre.
- De réduire la fertilisation chimique au maximum.

De plus, le fait de verdir des zones initialement pavées permet d'augmenter la quantité d'eau infiltrée au sol, ce qui assure la recharge naturelle des aquifères et réduit les problèmes de surcharge des égouts. Les plantes, elles, améliorent la qualité de l'air, réduisent le bruit ambiant, en plus de créer un habitat pour les oiseaux et d'embellir les quartiers urbains.

Il faut cependant noter qu'au moment de la plantation d'un arbre, son feuillage ne permet pas un ombrage significatif. Il deviendra une mesure effective de lutte aux ICU à sa maturité.

3.5 Mesures visant à fournir une aire de stationnement

La Figure 3-5 présente les résultats pour les deux types de revêtements de stationnement évalués, réfléchissant et perméable.

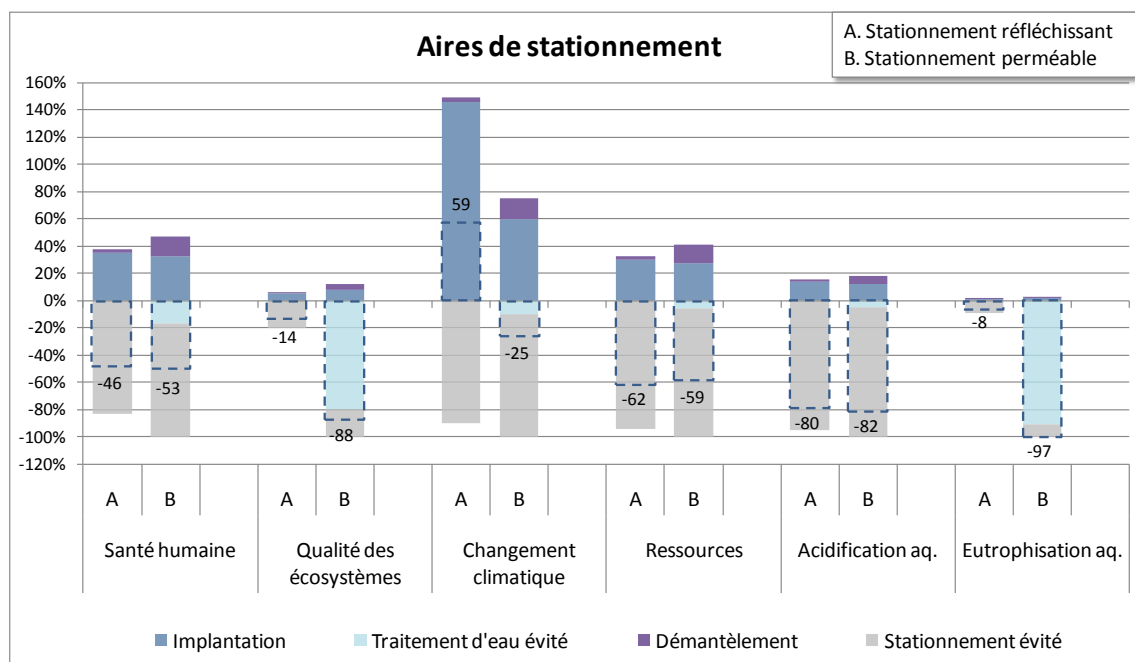


Figure 3-5 : Comparaison de scénarios d'implantation d'une aire de stationnement par rapport au scénario de référence

À partir de cette figure, on observe du côté des **charges environnementales** que :

- L'implantation d'une aire de stationnement réfléchissante est majoritairement influencée par la production de ciment servant à « resurfer » l'asphalte usagé. Son effet est particulièrement notable avec l'indicateur *Changement climatique* à cause des émissions de CO₂ à la cimenterie, mais également sur *Santé humaine* et *Ressources*.
- Pour le revêtement perméable, le ciment compte également parmi les ingrédients servant à fabriquer les pavés et les mêmes indicateurs sont affectés, mais la production et le transport du gravier servant aux diverses couches de fondation comptent également à plus du tiers au score des indicateurs évalués.
- Le démantèlement, incluant la machinerie pour excaver le revêtement, le transport et l'enfouissement dans un dépôt de matériaux secs (DMS) a une contribution modérée aux cycles de vie des deux options.

Concernant les **bénéfices environnementaux** :

- Ils sont constitués du traitement d'eau évité (potentiel maximal pour le revêtement perméable) et du stationnement en asphalte évité (scénario de référence), comprenant son implantation et son démantèlement.
- S'il s'avérait, le bénéfice lié au traitement d'eau évité pourrait compenser entièrement pour les charges environnementales liées à l'implantation et au démantèlement du revêtement perméable selon les indicateurs *Qualité des écosystèmes* et *Eutrophisation aquatique* (à cause des produits chimiques utilisés pour traiter l'eau, notamment l'hydroxyde de sodium).

- Le fait de substituer un stationnement en enrobés bitumineux permet d'éviter des impacts potentiels dans toutes les catégories évaluées, tant à cause des matériaux et de l'énergie pour l'implanter, qu'à cause du transport et de l'enfouissement des débris à sa fin de vie.

Lorsqu'on considère les **impacts potentiels nets**, il peut être constaté que :

- Du fait que le **revêtement réfléchissant** implique généralement moins de charges environnementales que le scénario de référence, il est préférable à un stationnement en enrobés bitumineux dans tous les indicateurs, sauf le *Changement climatique* (la production de ciment Portland s'avérant plus impactant que l'asphalte).
- Le **revêtement perméable** est préférable à un stationnement en enrobés bitumineux dans toutes les catégories d'impacts/dommages évaluées, car l'implantation et la fin de vie de pavés perméables présentent moins de charges environnementales que le stationnement asphalté et ce, que le traitement d'eau évité soit considéré ou non.
- Selon les indicateurs considérés, le revêtement perméable est préférable au revêtement réfléchissant pour l'indicateur *Changement climatique*. Si le bénéfice maximal lié au traitement d'eau évité est appliqué, les indicateurs *Qualité des écosystèmes* et *Eutrophisation aquatique* favorisent également le revêtement perméable. Pour les autres catégories, les incertitudes font qu'il n'est pas possible de trancher en faveur d'une ou l'autre des options.

Par ailleurs, les eaux de stationnement qui pénètrent dans le sol peuvent contenir des polluants comme des huiles et graisses qui peuvent contaminer les sols et la nappe phréatique. L'impact potentiel associé à ces substances n'a pas été évalué.

Il doit être noté qu'il existe d'autres types de stationnement perméables et de stationnement réfléchissant (entrées de poussière de pierre, dalles de plastiques permettant de faire pousser du gazon, pavés réfléchissants, etc.). Ces options n'ont pas été évaluées, mais il apparaît par les résultats obtenus qu'il est généralement pertinent de remplacer une allée asphaltée par des options exigeant moins de matériaux (à produire, à transporter et à enfouir en fin de vie) et d'énergie pour l'implantation et le démantèlement.

Globalement, on retient que...

Pour les **aires de stationnement** :

- Les pavés de béton perméables représentent moins d'impacts potentiels qu'une aire de stationnement asphaltée.
- Les pavés de béton perméables montrent également un bénéfice par rapport au revêtement réfléchissant (« resurfacing » avec du ciment Portland) pour l'indicateur *Changement climatique*.
- D'autres types de revêtements perméables et réfléchissants sont disponibles sur le marché. Bien qu'ils n'aient pas fait l'objet d'une analyse, il apparaît qu'il est généralement pertinent de remplacer une allée asphaltée par des options qui requièrent moins de matériaux et d'énergie.

L'installation d'un revêtement perméable sur une zone initialement pavée permet d'augmenter la quantité d'eau infiltrée au sol, ce qui permet la recharge naturelle des aquifères et réduit les problèmes de surcharge des égouts. Cette eau peut par contre contenir des polluants pouvant éventuellement contaminer les sols et des eaux souterraines par des huiles et graisses. L'impact potentiel associé à ces substances n'a cependant pas été évalué.

3.6 Mesures visant l'humidification du sol

Parce qu'elles ne sont pas entièrement équivalentes, les mesures visant l'humidification du sol ne sont pas comparées entre elles. Chacune d'elles a cependant été évaluée selon deux scénarios d'implantation : le premier permettant de capter les eaux de toiture seules et le second combinées aux eaux de ruissellement d'une aire de stationnement.

La Figure 3-6, présente les résultats pour le jardin pluvial, selon plusieurs scénarios de fertilisation et de quantité d'eau captée.

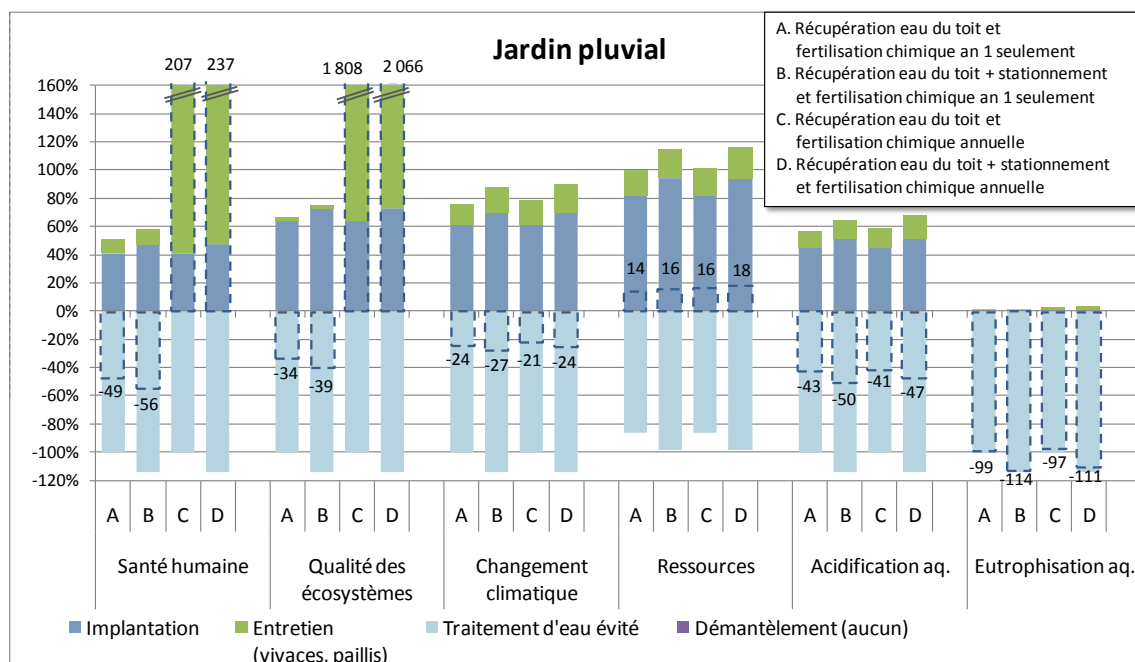


Figure 3-6 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un jardin pluvial par rapport au scénario de référence.

À partir de cette figure, on observe du côté des **charges environnementales** que :

- Le fait de ne pas mettre de fertilisant chimique sur une base annuelle dans le **jardin pluvial** réduit significativement les scores des indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*, à cause des métaux qui sont évités dans les sols. Comme mentionné précédemment, la méthode de caractérisation IMPACT 2002+ employée est extrêmement sensible à ce type d'émission et a tendance à surestimer leur impact potentiel. Néanmoins, la validation des résultats par une autre méthode d'évaluation, ReCiPe, confirme que la fertilisation chimique régulière génère des impacts potentiels significatifs.
- La terre noire, le transport et l'enfouissement des sols excavés comptent également dans les impacts potentiels de cette mesure. La réutilisation de la terre sur place, lorsque possible, permettrait de réduire davantage les indicateurs *Changement climatique*, *Ressource* et *Santé humaine* liés à la combustion de carburant pour le transport.
- Le paillis et l'eau ont une contribution négligeable aux indicateurs, alors que la production de vivaces représente un impact assez limité.
- Le fait de capter l'eau de ruissellement en provenance de l'aire de stationnement en plus de l'eau de toiture exige que le jardin ait une plus grande dimension, ce qui augmente proportionnellement la quantité de terre excavée, terre noire transportée, etc.

- Les impacts potentiels associés à la fin de vie du jardin pluvial n'ont pas été pris en compte, puisqu'il n'existe pas vraiment une fin de vie attribuable à la mesure. Les plants peuvent simplement être retirés et réemployés, compostés ou jetés, ce qui n'implique pas d'impact étant donné la nature « biogénique » des matières. Il est posé que les plantes n'ont pas concentré de contaminants en provenance des eaux de ruissellement dans leurs tissus.

Concernant les **bénéfices environnementaux**, le traitement d'eau évité présente un bénéfice potentiel maximal. Il est proportionnel à l'augmentation de la quantité d'eau captée par le jardin pluvial.

En considérant les impacts potentiels nets, il peut être constaté que :

- Le fait d'opter pour un jardin pluvial qui permet le captage des eaux du stationnement en plus de celles de la toiture n'apparaît pas comme un élément majeur. En effet, les charges environnementales et les bénéfices liés au traitement d'eau évité sont en lien avec le volume d'eau capté. Il n'est donc pas possible de statuer de manière générale sur l'intérêt de capter un plus ou moins grand volume d'eau.
- En excluant les scénarios impliquant une fertilisation annuelle et en considérant les bénéfices potentiels maximums du traitement d'eau évité, la mise en place d'un jardin pluvial représente un avantage par rapport au *statu quo* dans presque tous les indicateurs. L'incertitude associée au traitement d'eau évité ne permet cependant pas de conclure que les charges environnementales attribuables à l'implantation et à l'entretien du jardin pluvial seraient effectivement compensées.

Comme pour les mesures de végétalisation discutées plus haut, le fait d'implanter et d'entretenir des végétaux exige une consommation de matières et d'énergie qui n'est pas entièrement compensée par les bénéfices mesurables. Il importe cependant de rappeler que ce type de mesures offre plusieurs fonctions secondaires non quantifiées, comme l'amélioration de la qualité de l'air, la filtration de l'eau, la réduction du bruit de la ville et l'embellissement des quartiers, pour n'en nommer que quelques-unes.

La Figure 3-7 et la Figure 3-8 présentent respectivement les résultats pour la tranchée d'infiltration et pour le puits d'infiltration, selon deux scénarios de quantité d'eau captée. Rappelons que les résultats ne peuvent pas être comparés entre eux, car ils sont calculés de manière relative par rapport au premier scénario (A) de chacun.

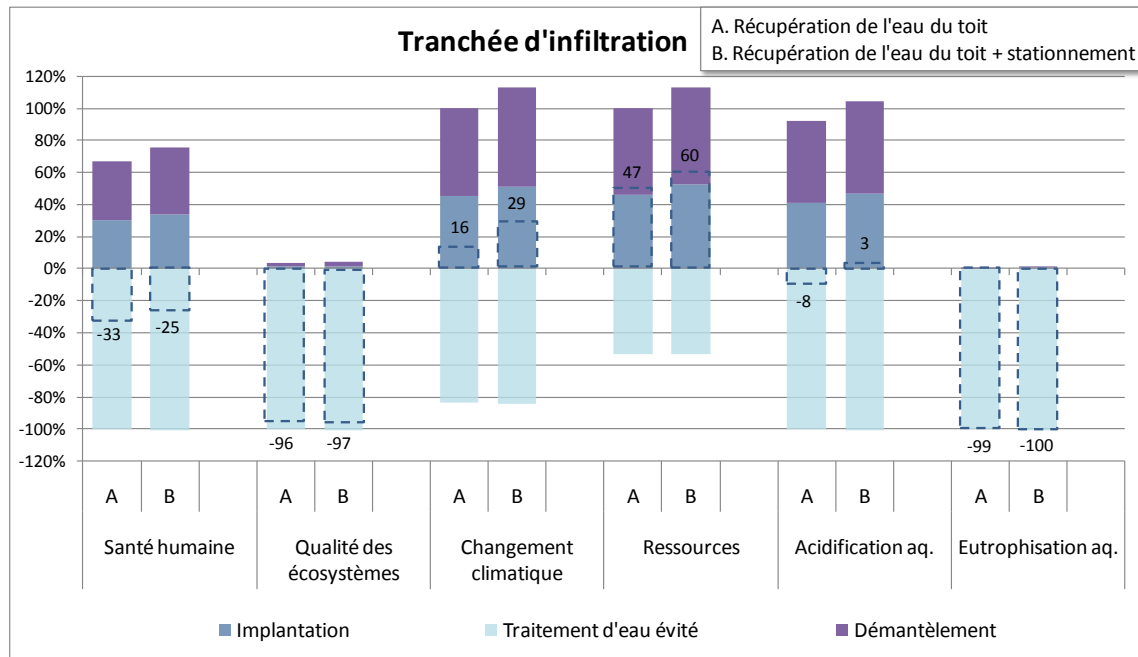


Figure 3-7 : Comparaison de scénarios d'implantation d'une tranchée d'infiltration par rapport au scénario de référence

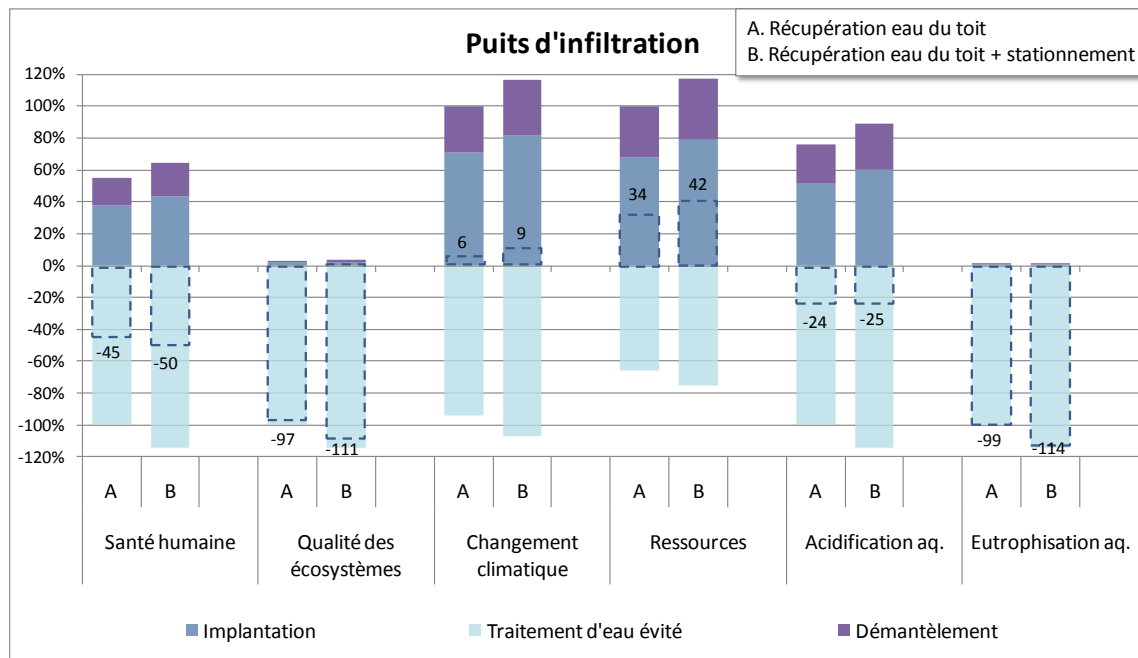


Figure 3-8 : Comparaison de scénarios d'implantation d'un puits d'infiltration par rapport au scénario de référence

À partir de ces figures, on observe du côté des **charges environnementales** que :

- Le gravier utilisé, le transport et l'enfouissement des sols excavés comptent pour les impacts potentiels de ces deux mesures.
- Dans le cas du puits d'infiltration, le couvercle d'aluminium contribue également à toutes les catégories de dommage et d'impacts évalués.
- Le transport et l'enfouissement du gravier dans un DMS comptent pour environ la moitié de tous les dommages/impacts attribuables au démantèlement de ces mesures construites. L'autre moitié est due au transport de la terre noire pour remplir les trous. Dans le cas où l'utilisation subséquente du terrain le permet, le fait de laisser le gravier en place et de le recouvrir par le revêtement choisi permettrait de réduire significativement le score de tous les indicateurs évalués.

Concernant les **bénéfices environnementaux**, le volume d'eau détourné du réseau d'égouts, qui autrement aurait été envoyé à l'usine de traitement municipale des eaux usées présente un bénéfice potentiel maximal. Il est proportionnel à l'augmentation de la quantité d'eau captée par la tranchée et le puits d'infiltration et s'applique à tous les indicateurs évalués.

En considérant les impacts potentiels nets, il peut être constaté que :

- Si le bénéfice maximal lié au traitement d'eau évité est appliqué, les indicateurs *Santé humaine, Qualité des écosystèmes et Eutrophisation aquatique* sont favorables à l'implantation d'une tranchée ou d'un puits d'infiltration par rapport au *statu quo*.
- Le fait d'opter pour un puits d'infiltration qui permet la rétention et le captage des eaux du stationnement en plus de celles de la toiture n'apparaît pas comme un élément majeur. En effet, la différence entre les deux scénarios d'implantation n'est pas suffisante pour préférer une option à l'autre compte tenu des incertitudes. Il n'y a donc pas lieu de préférer le captage de plus grands volumes d'eau sur la base de ces résultats.
- Dans le cas de la tranchée d'infiltration, il apparaît préférable de réduire sa taille et de capter moins d'eau, puisque les charges liées à son implantation et à son démantèlement dépassent le bénéfice potentiel attribuable au traitement d'eau évité. Seul le volume est un paramètre. La provenance de l'eau (du toit ou du stationnement) n'influence pas les résultats puisque la charge polluante de l'eau n'a pas été prise en considération lors de la modélisation.

Le fait d'implanter une mesure construite de rétention et de captage des eaux de pluie exige donc une consommation de matières et d'énergie qui n'est pas entièrement compensée par les bénéfices mesurables. Il importe cependant de rappeler que ce type de mesures offre des fonctions secondaires non quantifiées, comme la recharge de la nappe phréatique et la réduction des problèmes de surcharge des égouts.

Un dernier élément non quantifié est à considérer lors du captage des eaux en provenance d'une aire de stationnement. Ces eaux de ruissellement peuvent en effet contenir des polluants, huiles et graisses pouvant éventuellement contaminer les sols et les aquifères. Les plantes du jardin pluvial permettent la filtration d'une partie de ces contaminants, mais la quantification de l'impact et du bénéfice potentiels associés à ces substances n'ont pas été évalués.

Globalement, on retient que...

Pour les **jardins pluviaux**, il est préférable de :

- Garder la terre existante plutôt que d'en disposer hors site et de faire livrer de la nouvelle terre.
- Réduire la fertilisation chimique au maximum.

De plus, comme pour les aménagements végétalisés, les plantes améliorent la qualité de l'air, la filtration de l'eau, la réduction du bruit ambiant, en plus de créer un habitat pour les oiseaux et d'embellir les quartiers urbains.

Pour les mesures construites telles que le **puits ou la tranchée d'infiltration** :

- Les sols excavés lors de la mise en œuvre devraient si possible être réutilisés à même le site ou à proximité afin de réduire les impacts associés à leur transport et à leur enfouissement.
- Le démantèlement des installations en fin de vie contribue à près de la moitié de leurs impacts potentiels. Dans le cas où l'utilisation subséquente du terrain le permet, le fait de laisser le gravier en place et de le recouvrir par le revêtement choisi permettrait d'améliorer significativement la performance environnementale de ces mesures, en réduisant le transport et l'enfouissement de gravier et en évitant le transport de terre pour remblayer le trou.

Enfin, pour toutes les mesures visant l'humidification du sol, le fait de capter les eaux de ruissellement permet d'augmenter la quantité d'eau infiltrée au sol, ce qui assure la recharge naturelle des aquifères et réduit les problèmes de surcharge des égouts. L'eau de ruissellement de l'aire de stationnement peut cependant contenir des polluants, huiles et graisses, pouvant éventuellement contaminer les sols et les aquifères. Le substrat du jardin pluvial permet la filtration d'une partie de ces contaminants, mais la quantification de l'impact et du bénéfice potentiels associés à ces substances n'ont pas été évalués.

3.7 Qualité des données d'inventaire

Les résultats de la qualité des données d'inventaire sont résumés à l'Annexe D du présent rapport.

Il ressort de cette analyse que la majorité des étapes et processus modélisés emploient des données de bonne qualité (jugées suffisamment représentatives pour le cas à l'étude). Aucune donnée n'a été jugée de très bonne qualité, car elles n'ont pas fait l'objet de vérification détaillée par des experts du milieu. Les sources d'information utilisées ont cependant été choisies en fonction de leur représentativité du contexte québécois et de leur âge.

Certaines données jugées comme étant de qualité moyenne ou faible sont correctes, puisque leur influence sur le système est faible et qu'un affinement de leur valeur ne modifierait pas les résultats. C'est le cas des processus liés à la culture de plantes en serre, à l'énergie de climatisation évitée par les toits vert et réfléchissant, au propane pour la mise en place des membranes de bitume élastomère, au paillis, à l'eau potable pour irriguer les plantes, ainsi qu'à la machinerie servant à la mise en place de certaines mesures.

Les processus présentant cependant une forte/très forte contribution potentielle aux systèmes ont en grande partie été modélisés à l'aide de données de bonne qualité – un effort ayant été consenti pour obtenir les données requises. Certains de ces processus ont néanmoins dû être modélisés par des données génériques européennes puisque les données québécoises n'existent pas ou n'ont pas été trouvées; ils représentent par le fait même une limite et diminuent la certitude avec laquelle les conclusions peuvent être tirées.

Les principales données présentant une limite sont liées aux processus/paramètres suivants :

- **Fertilisation** : la modélisation des émissions réelles à l'environnement (sol et eau) est complexe car les impacts potentiels des fertilisants sont en grande partie liés au devenir des métaux dans les sols, et donc fonction des spécificités du site où il est épandu. Les modèles de caractérisation actuels surestiment les dommages potentiels aux indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*. Pour toutes les mesures impliquant de la fertilisation, des analyses de scénarios avec et sans utilisation de fertilisants chimiques ont donc été effectuées.
- **Réduction du chauffage liée à l'implantation d'un toit vert** : l'estimation des économies énergétiques sur une base moyenne pour les bâtiments résidentiels du Québec urbain est difficile, car elles sont fonction de plusieurs paramètres spécifiques (l'isolation du toit et du reste de l'enveloppe du bâtiment et la localisation géographique par exemple). Plusieurs hypothèses, jugées toutefois conservatrices, ont donc servi à calculer la réduction de consommation d'énergie des bâtiments après l'installation d'un toit vert. Afin d'en mesurer l'effet, l'analyse des résultats est discutée en comptant et en excluant ce bénéfice potentiel.
- Dans le cas du **traitement d'eau évité** par les mesures qui captent les eaux de pluie, tous les éléments suivants affectent l'évaluation de l'impact évité :
 - les réseaux d'égouts sanitaires et pluviaux doivent être combinés. Dans les zones où les précipitations empruntent un réseau distinct, l'eau n'est pas envoyée à l'usine de traitement, mais rejetée directement au fleuve (donc pas de traitement évité);
 - sous l'effet des débits d'eau pluviale captés lors de pluies exceptionnelles, le réseau d'égout n'a pas la capacité suffisante pour laisser toutes les eaux s'écouler vers la station d'épuration. Une partie des eaux combinant des eaux de pluie et des eaux usées s'écoule alors vers le cours d'eau récepteur durant une courte période (ce qui réduit le traitement d'eau évité);
 - la situation de référence considère que la surface est initialement asphaltée (ou imperméable à l'infiltration naturelle des eaux de pluie). Dans le cas où une mesure de verdissement ou de captage des eaux de précipitations est implantée à un endroit qui permet déjà à l'eau de percoler vers la nappe phréatique, le traitement d'eau évité est réduit ou même annulé.
 - la donnée employée pour représenter le traitement d'eau est de source suisse. Le procédé de traitement n'est donc possiblement pas représentatif du traitement qui a lieu dans les grandes villes du Québec.

Afin d'en mesurer l'effet, l'analyse des résultats est discutée en comptant et en excluant ce bénéfice potentiel.

- **Enfouissement des sols et matériaux en dépôt de matériaux secs (DMS) ou en site d'enfouissement** : des données génériques européennes ont été employées, vu l'inaccessibilité à des données québécoises et la grande complexité de modélisation des émissions et impacts potentiels attribuables à l'enfouissement de matières. Les résultats concernant l'enfouissement sont donc à considérer avec discernement.

3.8 Analyses de sensibilité

En plus des analyses de scénarios effectuées sur chaque mesure de lutte aux ICU évaluée, trois analyses de sensibilité distinctes ont été effectuées.

3.8.1 Évaluation des impacts avec la méthode ReCiPe

Comme mentionné précédemment, l'ÉICV a été réalisée avec une seconde méthode, ReCiPe (Goedkoop *et al.*, 2009) afin de vérifier si la variabilité des modèles de caractérisation avait une influence significative sur les conclusions et donc, de tester la robustesse des résultats obtenus à partir d'IMPACT 2002+.

En ce qui concerne les principaux contributeurs, les résultats obtenus par la méthode ReCiPe (H) confirment généralement ceux obtenus avec la méthode IMPACT 2002+, les tendances étant les mêmes pour les différents indicateurs évalués.

Les résultats de la méthode ReCiPe (H) apportent cependant certaines nuances en raison de sa façon différente de modéliser les impacts potentiels. Il en ressort que :

- Le bénéfice potentiel provenant du traitement d'eau évitée est moins important selon cette méthode.
- L'impact potentiel de la fertilisation sur les indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* est moins marqué.
- La culture des arbres en pépinière amène un bénéfice sur le plan de la *Qualité des écosystèmes*, car il permet de créer et de garder une zone boisée. Cet avantage, non considéré par IMPACT 2002+, fait en sorte que la plantation d'un arbre devient plus favorable que le scénario de référence pour cet indicateur et ce, qu'il y ait fertilisation ou non.

Les résultats obtenus par la méthode ReCiPe en termes de *Changement climatique* et de *Ressources* sont similaires aux résultats obtenus par la méthode IMPACT 2002+. De plus, lorsque plusieurs scénarios sont comparés, il n'y a pas d'inversion dans les conclusions.

Globalement, l'analyse de sensibilité avec la méthode ÉICV ReCiPe (H) confirme donc les résultats de l'étude et atteste de leur robustesse.

3.8.2 Durée de vie d'un toit vert

Une analyse de sensibilité comparant plusieurs durées de vie (10, 20, 25, 30 40 et 50 ans) a été effectuée pour déterminer à partir de quand les impacts potentiels du toit vert deviennent « équivalents » à ceux du toit de référence.

Il en ressort que le toit vert est préférable au toit standard asphalté et gravier dès que sa durée de vie dépasse 25 ans, et ce, pour tous les indicateurs, sauf lorsqu'il y a fertilisation régulière. La catégorie de dommage *Santé humaine* (évalué selon IMPACT 2002+) indique alors qu'il faudrait

45 ans pour que le toit vert devienne préférable au toit standard. Rappelons que cet indicateur de la méthode IMPACT 2002+ est particulièrement sensible aux émissions de fertilisants.

Puisque la durée de vie d'une membrane de bitume élastomère est d'environ 25 ans et que la couche végétalisée a pour effet de prolonger sa longévité, il apparaît que les toits verts présentent toujours moins d'impact que les toits standard. Pour que les conclusions obtenues dans cette étude soient inversées, il faudrait que la durée de vie du toit vert soit inférieure à celle d'une membrane de bitume élastomère non protégée, ce qui paraît peu réaliste.

3.8.3 Durée de vie d'un toit réfléchissant

Une analyse de sensibilité comparant plusieurs durées de vie (10, 15, 20, 25 et 30 ans) a été effectuée pour déterminer à partir de quand les impacts potentiels du toit réfléchissant en membrane de bitume élastomère deviennent « équivalents » à ceux du toit de référence.

Lorsqu'on considère un entretien impliquant l'ajout d'une couche de revêtement réfléchissant à chaque 5 ans, le toit réfléchissant a toujours plus d'impacts potentiels que le toit de référence, peu importe sa durée de vie.

Sans entretien, le toit en membrane de bitume élastomère est préférable lorsque sa durée de vie dépasse :

- 28 ans pour l'indicateur *Santé humaine*
- < 10 ans pour l'indicateur *Qualité des écosystèmes*
- 22 ans pour l'indicateur *Changement climatique*
- 14 ans pour l'indicateur *Ressources*
- 17 ans pour l'indicateur *Acidification aquatique*, et
- < 10 ans pour l'indicateur *Eutrophisation aquatique*.

Ainsi, si le toit blanc en membrane de bitume élastomère a une durée de vie de 21 ans (moyenne des membranes élastomères de couleur), plutôt que les 25 ans posés, l'indicateur *Changement climatique* serait favorable au toit standard plutôt qu'au toit réfléchissant. Les conclusions concernant les autres catégories évaluées resteraient inchangées.

Le même exercice a été effectué avec la membrane EPDM. Il en ressort que dès que ce type de toit a une durée de vie dépassant 20 ans, il implique moins d'impacts potentiels que le toit de référence, tous indicateurs confondus. Le fait d'avoir posé une durée de vie de 40 ans (jugée réaliste étant donné les observations de toitures existantes) ou de 25 ans (hypothèse conservatrice) ne modifie donc pas les conclusions de l'analyse.

3.9 Applications et limites de l'ACV

Cette ACV vise à informer le public et les organismes du domaine quant aux impacts et bénéfices environnementaux potentiels que représentent différentes mesures de lutte aux ICU sur tout leur cycle de vie. Elle vise également à permettre à l'INSPQ de compléter son évaluation des mesures d'atténuation des îlots de chaleur urbains, en y intégrant des aspects de performance environnementale basés sur la pensée « cycle de vie ». L'analyse a été effectuée dans une optique comparative par rapport à un scénario de référence n'impliquant aucune mesure de lutte aux ICU. Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent être évitées.

Ses résultats pourront être utilisés pour :

- Comparer individuellement les mesures de lutte aux ICU par rapport à une situation de référence, qui correspond au *statu quo* (c'est-à-dire, la situation qui consiste à ne pas implémenter de mesure);
- Identifier les paramètres clés permettant de réduire les impacts ou d'augmenter les bénéfices potentiels des mesures évaluées;
- Grâce à la grille de calcul, classer, de manière préliminaire, des scénarios de lutte aux ICU (impliquant des combinaisons de diverses mesures unitaires) selon leurs performances environnementales globales potentielles.

Les principales limites pouvant cependant être soulevées concernent :

- Le fait que les mesures évaluées n'ont pas des fonctions équivalentes. Il n'est donc pas possible, au sens strict, de comparer les options entre elles. En effet, elles ne possèdent pas nécessairement la même efficacité d'abaissement de la température et ne comportent pas toutes les mêmes fonctions secondaires.
- Il existe parfois plusieurs variantes ou modèles d'une même mesure. L'évaluation a été faite en sélectionnant une option pour chaque mesure (sauf dans le cas du toit réfléchissant où une seconde variante a été analysée). Les modélisations ne sont donc pas nécessairement représentatives de l'ensemble des cas.
- Les résultats et conclusions sont uniquement applicables à des mesures de lutte aux ICU de taille résidentielle. Les projets commerciaux et institutionnels requièrent des critères de conception différents qui demanderaient une adaptation des systèmes analysés.
- Toutes les options ne prennent pas en compte les mêmes impacts évités liés au scénario de référence.
- La complétude et la validité des données d'inventaire employées, comme illustré par l'évaluation de la qualité des données (section 3.7); en particulier, le nombre important d'estimations et d'hypothèses quant au dimensionnement et aux choix effectués pour modéliser les options. Pour plusieurs des options évaluées, il existe une variabilité quant aux conditions spécifiques liées au lieu d'implantation.
- La complétude et la validité de la méthode d'évaluation des impacts utilisée, entre autres parce qu'elle ne couvre pas toutes les substances inventoriées, ni tous les impacts environnementaux associés aux activités humaines. Notamment :
 - Les catégories d'impacts « cancer », « non-cancer » et « écotoxicité » ne sont pas des mesures du risque associé aux systèmes évalués. En effet, les différentes émissions sont agrégées dans le temps et l'espace afin de constituer un inventaire dans lequel un seul flux est associé à chacune des substances répertoriées (c.-à-d. la masse totale émise par l'ensemble des processus qui la produisent). Il n'est donc pas possible de connaître le lieu, ni le moment où ont lieu les émissions et donc, d'identifier la quantité à laquelle est exposée une région donnée, l'information sur laquelle repose l'appréciation du risque pour une population donnée.
 - Les impacts potentiels de l'épandage de fertilisants sont en grande partie liés au devenir des métaux dans les sols. Or, les modèles d'évaluation des émissions toxiques employés pour caractériser les métaux ont été « adaptés » de modèles développés pour la caractérisation des composés organiques. Ils ne tiennent pas compte de la spéciation des composés, fonction des conditions

environnementales spécifiques du lieu d'émission (tous les métaux sont considérés comme 100 % biodisponibles). De ce fait, l'impact potentiel des métaux émis au sol est actuellement surestimé pour les catégories « écotoxicité terrestre/aquatique » et « toxicité humaine cancer/non-cancer ».

- L'interprétation des résultats de la caractérisation ne peut se baser que sur les résultats obtenus, c'est-à-dire sur les substances pour lesquelles il existe, dans la banque de données des méthodes, des facteurs de caractérisation qui convertissent les flux élémentaires inventoriés en indicateurs d'impact et de dommage. Or, plusieurs flux élémentaires n'ont pu être convertis en impacts puisqu'aucun facteur de caractérisation n'était disponible. Ils n'ont donc pas été considérés lors de l'évaluation des impacts et des dommages.
- Contrairement à l'analyse de risque environnemental conduite dans un contexte réglementaire et qui utilise une approche conservatrice, l'ACV tente de fournir la meilleure estimation possible (Udo-de-Haes *et al.*, 2002). En effet, l'ÉICV tente de représenter le cas le plus probable, c'est-à-dire que les modèles utilisés, soit les modèles de transport et de devenir des contaminants dans l'environnement et d'effet toxique sur les récepteurs biologiques, ne tentent pas de maximiser l'exposition et le dommage environnemental (approche du pire scénario) mais bien d'en représenter un cas moyen.

Il convient enfin de préciser que les résultats de l'ACV présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels.

3.10 Utilisation des résultats

Cette étude visait également à hiérarchiser, si possible, certaines mesures comparables selon leur performance environnementale globale potentielle et à permettre la comparaison de projets de lutte aux ICU (impliquant des combinaisons de diverses mesures unitaires).

3.10.1 Hiérarchisation des mesures

Les fonctionnalités diverses des mesures évaluées ne permettent pas la hiérarchisation de la totalité des options selon leurs performances environnementales. De plus, étant donné les résultats obtenus il n'est pas possible de hiérarchiser les mesures de lutte aux ICU appartenant à un même type d'applications. En effet, selon les conditions spécifiques (durée de vie, type d'entretien, utilisation de fertilisants, etc.), les résultats peuvent amener un classement ou un autre. Une hiérarchisation des mesures sans considération de ces variabilités mènerait donc très certainement à des décisions erronées ou discutables.

3.10.2 Comparaison de projets de lutte aux ICU

Dans le cas où les hypothèses formulées sont applicables (voir la liste à l'Annexe B), il est possible pour un décideur de comparer différents scénarios d'implantation de mesures qu'il considère équivalents en termes de réduction de chaleur, puisque les résultats sont linéaires.

Le Tableau 3-2 présente les résultats des indicateurs de dommage et d'impact obtenus avec la méthode ÉICV IMPACT 2002+ pour chacune des mesures sur une base unitaire. Ces résultats sont fournis en valeur absolue par rapport à la situation de référence (dont la mesure des impacts serait de zéro). Les options dont les indicateurs sont inférieurs à zéro (cases grisées) indiquent un bénéfice environnemental par rapport au scénario de référence.

Étant donné l'incertitude importante associée au traitement d'eau évité par les mesures qui favorisent l'infiltration des précipitations dans le sol, il a été choisi de considérer 50 % du bénéfice potentiel estimé dans la grille de calcul qui suit. Pour le reste, les hypothèses présentées à l'Annexe B ont été respectées.

Utilisation de la grille de calcul

Par exemple, pour comparer la plantation de cinq arbres à un mur végétalisé (de 7,6 m de long), il suffit de multiplier les résultats d'indicateurs d'un arbre par cinq. Si le mur est plus ou moins long, il est possible d'ajuster ses résultats par une règle de trois. Il en va de même pour toutes les mesures de végétalisation, dont la base d'évaluation est la superficie.

Les toits et aires de stationnement dont les superficies diffèrent des valeurs de base (100 m² et 14,3 m² respectivement) verront aussi leurs impacts potentiels être modifiés de manière proportionnelle. Seules les mesures visant l'humidification du sol sont un peu plus difficiles à ajuster. En effet, elles ont été modélisées pour recueillir les eaux d'une toiture de 100 m² avec ou sans les eaux de ruissellement en provenance d'une aire de stationnement. Or, la quantité d'eau absorbée n'est pas directement proportionnelle à la taille de l'installation ou à la quantité de matériaux de construction employée. Dans le cas où il serait souhaité de comparer des mesures d'humidification (jardin pluvial, tranchée ou puits d'infiltration) de dimensions très différentes à celles modélisées ici, il pourrait être nécessaire de recalculer les impacts potentiels à l'aide des données spécifiées.

Enfin, il est essentiel de garder en tête le fait que toutes les mesures n'ont pas les mêmes fonctions et que dans certains cas, des impacts évités ont été considérés (toit standard asphalte et gravier, stationnement asphalté...).

Tableau 3-2 : Base de comparaison pour établir des scénarios d'implantation de mesures de lutte aux ICU

Mesures de lutte aux ICU	Scores d'indicateurs - Méthode IMPACT 2002+					
	SH	QE	CC	R	AA	EA
	(DALY)	(PDF.m ² .an)	(kg CO ₂ éq.)	(MJ)	(kg SO ₂ éq.)	(kg PO ₄ éq.)
1. Toit vert extensif, 100 m²						
Avec fertilisation chimique aux 2 ans	6,36E-04	-4,58E+03	-1,14E+03	-7,31E+04	-1,21E+01	-3,22E+00
Sans fertilisation chimique	-1,12E-03	-4,91E+03	-1,18E+03	-7,36E+04	-1,28E+01	-3,43E+00
2. Toit réfléchissant, 100 m²						
Membrane de bitume élastomère, enduit aux 5 ans	9,02E-03	2,51E+03	1,29E+04	2,55E+05	6,00E+01	2,22E-01
Membrane de bitume élastomère, sans entretien	1,26E-04	-6,03E+02	-1,82E+02	-4,50E+04	-7,28E+00	-3,93E-01
Membrane EPDM, lavage annuel au savon	-7,38E-04	-7,31E+02	-7,20E+02	-7,30E+04	-1,80E+01	-5,25E-01
3. Mur végétalisé						
Avec fertilisation chimique initiale	3,14E-05	1,03E+03	2,00E+01	5,71E+02	2,30E-01	3,39E-03
Sans fertilisation chimique	1,43E-06	-1,84E+02	1,98E+01	5,69E+02	2,28E-01	2,29E-03
4. Aménagement végétalisé						
Avec fertilisation chimique initiale	9,63E-04	7,32E+03	9,24E+02	1,83E+04	5,11E+00	-9,86E-01
Avec fertilisation chimique annuelle	3,06E-02	1,21E+06	1,09E+03	2,01E+04	6,46E+00	9,47E-02
Sans fertilisation chimique	7,66E-04	-6,99E+02	9,23E+02	1,83E+04	5,10E+00	-9,93E-01
5. Arbre						
Avec fertilisation chimique initiale	7,50E-05	1,27E+03	4,50E+01	9,30E+02	2,77E-01	-3,79E-02
Sans fertilisation chimique	4,34E-05	-1,78E+01	4,48E+01	9,28E+02	2,75E-01	-3,90E-02
6. Revêtement réfléchissant						
	-7,23E-04	-2,70E+02	8,25E+02	-2,03E+04	-2,14E+01	-1,09E-01
7. Revêtement perméable						
	-7,02E-04	-9,03E+02	-2,76E+02	-1,84E+04	-2,13E+01	-6,89E-01
8. Jardin pluvial, sans fertilisation chimique						
Récupération eau du toit (100 m ²)	-1,83E-04	-5,94E+03	3,32E+02	1,03E+04	6,96E-01	-5,21E+00
Récupération eau du toit + stationnement (115 m ²)	1,59E-05	9,47E+03	8,83E+02	1,70E+04	5,43E+00	6,05E-02
9. Tranchée d'infiltration						
Récupération eau du toit (100 m ²)	4,00E-04	-6,24E+03	9,05E+02	2,22E+04	4,57E+00	-5,33E+00
Récupération eau du toit + stationnement (115 m ²)	6,00E-04	-6,24E+03	1,11E+03	2,61E+04	5,85E+00	-5,37E+00
10. Puits d'infiltration						
Récupération eau du toit (100 m ²)	9,49E-05	-4,89E+03	5,71E+02	1,27E+04	2,20E+00	-4,15E+00
Récupération eau du toit + stationnement (115 m ²)	1,36E-04	-5,58E+03	6,80E+02	1,50E+04	2,70E+00	-4,75E+00

4 Conclusion

Le but de cette étude consiste à mieux informer le public et les organismes du domaine quant aux impacts et bénéfices environnementaux potentiels que représentent différentes mesures de lutte aux ICU sur tout leur cycle de vie.

En tout, dix options ont été portées à l'analyse. Toutes s'adressent à des particuliers désirant effectuer des modifications sur leur habitation ou leur terrain privé. Elles ont été modélisées en documentant leur consommation de matières et d'énergie et en quantifiant leurs rejets à l'environnement par rapport à un scénario de référence qui consiste à ne pas implanter de mesure de lutte aux ICU.

Rappelons que l'analyse n'avait pas pour objectif d'évaluer l'efficacité des mesures. Leur potentiel de réduction de la température n'a donc pas été considéré. Les résultats fournissent une première évaluation des mesures sur une base unitaire (plantation d'un arbre, installation d'un toit vert, etc.).

À la suite de l'évaluation des mesures à partir des hypothèses de base et à la réalisation d'analyses de sensibilité, certaines conclusions et recommandations ont été formulées pour les quatre types d'applications ayant des fonctionnalités communes, c'est-à-dire les mesures visant 1) la protection de l'enveloppe du bâtiment (toitures); 2) la végétalisation du pourtour du bâtiment; 3) l'aire de stationnement et 4) l'humidification du sol par la rétention et le captage des eaux de pluie. Dans la mesure du possible, les fonctions non quantifiables des options ont également été prises en considération. Les conclusions ont été axées sur les aspects pratiques, de manière à orienter les choix pour la mise en œuvre et de l'entretien d'une mesure de lutte aux ICU.

En terminant, il faut mentionner que l'évaluation de mesures d'atténuation des îlots de chaleur urbains est une tâche complexe, vu le nombre d'aspects sociaux, environnementaux et économiques en jeu. Plusieurs paramètres comme la qualité de vie des résidents et l'intégration paysagère sont des éléments difficilement quantifiables qui doivent néanmoins être pris en compte. Dans ce contexte, l'ACV ne peut trancher à elle seule face à un choix de mesures, mais elle s'inscrit dans une meilleure compréhension des impacts propres aux options et permet, par conséquent, la prise de décisions plus éclairées.

5 Références

- GIGUÈRE, M. (2009). Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. Revue de littérature. Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut national de santé publique, Gouvernement du Québec. Juillet 2009. En ligne : http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/988_MesuresIlotsChaleur.pdf [Page consultée le 16 décembre 2009].
- GOEDKOOP, M.J., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., DE SCHRYVER, A., STRUIJS, J. et 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 I: Characterisation; 6 January 2009, 126 p. [en ligne]. Disponible: <http://www.lcia-recipe.net>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC (2008). Plan d'action 2006-2012. Le Québec et les changements climatiques, un défi pour l'avenir, 50 pages. En ligne : http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/2006-2012_fr.pdf [Page consultée le 16 décembre 2009].
- HUMBERT, S., ROSSI, V., MARGNI, M., JOLLIET, O. et LOERINCIK, Y. (2009). Life cycle assessment of two baby food packaging alternatives: glass jars vs. plastic pots. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14(2) p. 95-106.
- ISO (2006a). ISO 14040: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre, Organisation internationale de normalisation, 24 p.
- ISO (2006b). ISO 14044: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices, Organisation internationale de normalisation, 56 p.
- JOLLIET, O., MARGNI, M., CHARLES, R., HUMBERT, S., PAYET, J., REBITZER, G. et ROSENBAUM, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment* 8(6) p. 324-330.
- MARTINEAU, G. (2010). Analyse du cycle de vie préliminaire de mesures d'atténuation d'îlots de chaleur urbains. Rapport d'analyse préliminaire – pour usage interne. Mai 2010. Rapport réalisé par le CIRAIG pour le compte de l'INSPQ. 42 pages, 5 annexes.
- PARSHALL, L. et CORBURN, J. (2009). Urban Climate Modeling, Heat Island Mitigation and Local Knowledge: Co-Producing Science for Urban Policy. Extended Abstract from the Eighth Symposium on the Urban Environment, January 2009 En ligne : <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/144572.pdf> et http://ams.confex.com/ams/89annual/techprogram/paper_144572.htm [Page consultée le 7 janvier 2010].
- THOMPSON, M. ELLIS, R. et WILDAVSKY, A. (1990). *Cultural Theory*. Boulder Colo., Westview Press: Westport, Conn., Praeger, 296 p.
- UDO-DE-HAES, H.A., FINNVEDEN, G. et GOEDKOOP, M. (2002). Life-Cycle Impact Assessment: Striving towards Best Practice, *Society of Environmental Toxicology & Chemistry*, 272 p.

WEIDEMA, B.P. et SUHR WESNÆS, M. (1996). Data quality management for life cycle inventories - an example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production* 4(3-4) p. 167-174.

Documents ACV et îlots de chaleur

GENCHI, Y. (2006). Life Cycle Impact Assessment of Urban Heat Island in Tokyo. « LIME : Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling ». Presentation by the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Japan. En ligne : http://www.iea.org/work/2006/heat/8_Genchi.pdf [Page consultée le 7 janvier 2010].

GENCHI, Y. et IHARA, T. (2009). Environmental Impact Assessment of Urban Air Temperature Increase Based on Endpoint-Type Life Cycle Impact (Part 1) – Its Framework. The seventh International Conference on Urban Climate. 29 June – 3 July 2009, Yokohama, Japan. En ligne : http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended_abstracts/pdf/376181-1-081215233824-002.pdf [Page consultée le 7 janvier 2010].

GENCHI, Y. et IHARA, T. (2009). Environmental Impact Assessment of Urban Air Temperature Increase Based on Endpoint-Type Life Cycle Impact (Part 2) – Quantification of environmental impact in Tokyo. The seventh International Conference on Urban Climate. 29 June – 3 July 2009, Yokohama, Japan.

IHARA, T., KIKEGAWA, Y., OKA, K., YAMAGUCHI, K., ENDO, Y. et GENCHI, Y. (2007). Urban Island Mitigation and Life Cycle CO₂ Reduction by Installation of Urban Heat Island Countermeasures. Extended abstract from the Seventh Symposium on the Urban Environment, September 2007 En ligne : <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/126646.pdf> [Page consultée le 7 janvier 2010].

KOSAREO, L. et RIES, R. (2007). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 42, p. 2606-2613.

SAIZ, S., KENNEDY, C., BASS, B. et PRESSNAIL, K. (2006). Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs. *Environmental Science & Technology*, 40(13), p. 4312-4316.

Albedo

BIRD, N. et WOESS-GALLASCH, S. (2008). Incorporating changes in albedo in estimating the climate mitigating benefits of bioenergy projects. Technology Report. Task 38, Greenhouse Gas Balances of Biomass and Bioenergy Systems. ExCo62, Cavtat, Croatia. October 2008, 7 pages. En ligne : http://www.ieabioenergy-task38.org/publications/ExCo62_Doc_0709b_Task_38_Technology_Report.pdf [Page consultée le 11 février 2010].

SCHWAIGER, H.P. et BIRD, D.N. (2010). Integration of albedo effects caused by land use change into the climate balance : Should we still account in greenhouse gas units? *Forest Ecology and Management*, DOI : 10.1016/j.foreco.2009.12.002.

Données ICV

- ANONYME. Comment réguler et traiter les eaux pluviales. Comité du bassin hydrographique de la Mauldre et de ses affluents (CO.BA.H.M.A./C.L.L.) Bassin Versant de la Mauldre, Cahier d'application du 1l/s/ha. En ligne : <http://www.siarnc.fr/filemanager/download/20> [Page consultée le 13 avril 2010].
- ARIST Champagne-Ardenne (2004). Géotextiles et géomembranes. Fiche technique Textiles techniques. En ligne : http://veillestrategique.champagne-ardenne.cci.fr/AutoIndex_v1/veilles/fiches-techniques/Textiles%20Techniques%20Info/2004/09geotextile.pdf [Page consultée le 13 avril 2010].
- AEE (AGENCE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE) (Internet). Isolation. Agence de l'efficacité énergétique Québec, En ligne : <http://www.aee.gouv.qc.ca/mon-habitation/conseils-pratiques/isolation/> [Page consultée le 1^{er} février 2011].
- BANNERMAN, R. et CONSIDINE, E. (2003). Rain Gardens – A how-to manual for homeowners. Published by Wisconsin Department of Natural Resources and University of Wisconsin-Extension, 32 pages. En ligne: <http://learningstore.uwex.edu/assets/pdfs/GWQ037.pdf> [Page consultée le 8 avril 2010].
- BITUME QUÉBEC (2009). Stationnement résidentiel en enrobes bitumineux. Techno-Bitume, bulletin technique, numéro 01 publié par Bitume Québec, 8 pages. En ligne : http://www.bitumequebec.ca/assets/application/publications/a1f4892cbb97c94_file.pdf [Page consultée le 8 avril 2010].
- COUILLARD, S, BAGE, G., TRUDEL, J.-S. (2009). Comparative Life Cycle Assessment of artificial vs natural Christmas tree. Rapport ellipsos, 55 pages, 4 annexes. En ligne : www.ellipsos.ca/.../Christmas%20Tree%20LCA%20-%20ellipsos.pdf [Page consultée le 5 mars 2010].
- CLEARY, J., ROULET, N.T. et MOORE, T.R. (2005). Greenhouse Gas Emissions from Canadian Peat extraction, 1990-2000: A Life-cycle Analysis. Ambio. vol. 34. n° 6. p. 456-461.
- CPTP (2007). Thin Whitetopping – the Colorado Experience. Technical brief publié par Concrete Pavement Technology Program (CPTP), U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 8 page. En ligne : <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/07025/07025.pdf> [Page consultée le 20 avril 2010].
- DUNNETT, N. et KINGSBURY, N. (2005). Toits et murs végétaux: Éditions du Rouergue, Rodez, 254 pages.
- ENVIRONNEMENT CANADA (Internet). Normales climatiques au Canada 1971-2000. En ligne : http://www.climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_f.html?Province=ALL&StationName=montr%C3%A9al&SearchType=BeginsWith&LocateBy=Province&Proximity=25&ProximityFrom=City&StationNumber=&IDType=MSC&CityName=&ParkName=&LatitudeDegrees=&LatitudeMinutes=&LongitudeDegrees=&LongitudeMinutes=&NormalsClass=A&SelNormals=&StnId=5418& [Page consultée le 6 avril 2010].

- GRAND LYON (2008a). Fiche n°00 : Méthode pour le dimensionnement des ouvrages de stockage⁴. Site économique du Grand Lyon. 4 pages. En ligne : http://www.economie.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/fichiers/site_eco/200806_gl_eaux_pluviales_pro_fiche_00_methode_dimensionnement_ouvrages_stockage.pdf [Page consultée le 13 avril 2010].
- GRAND LYON (2008b). Fiche n°03 : Tranchée de rétention et/ou infiltration. Site économique du Grand Lyon. 4 pages. En ligne : http://www.economie.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/fichiers/site_eco/200806_gl_eaux_pluviales_pro_fiche_03_tranchee_retention_infiltration.pdf [Page consultée le 13 avril 2010].
- INSPQ (2008). Vagues de chaleur au Québec méridional : adaptations actuelles et suggestions d'adaptations futures. Résumé d'une étude de l'Institut national de santé publique du Québec. 12 pages. En ligne : http://www.ouranos.ca/media/publication/38_resume_inspq_vagues_chaleur-quebec_adaptations_juin_2008.pdf [Page consultée le 15 avril 2010].
- JARDIN BOTANIQUE DE MONTRÉAL (Internet, 2008). Carnet horticole et botanique. La fertilisation au jardin ornemental. En ligne : http://www2.ville.montreal.qc.ca/jardin/info_verte/fertilisation/fertili_arbres.htm [Page consultée le 6 avril 2010].
- JANKOVIĆ, K., BOJOVIĆ, D., NIKOLIĆ, D., LONČAR, L, et Romakov, Z. (2010). Frost resistance of concrete with cushioned brick as aggregate. *Facta Universitatis, Architecture and Civil Engineering*, 8(2), p. 155-162. En ligne: <http://facta.junis.ni.ac.rs/aace/aace201002/aace201002-04.pdf> [Page consultée le 27 janvier 2011].
- LIU, K. et BASKARAN, B. (2003). Thermal performance of green roofs through field evaluation, National Research Council Canada. Proceedings of the First North American Green Roof Infrastructure Conference, Chicago, Illinois. En ligne: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc46412/nrcc46412.pdf> [Page consultée le 27 janvier 2011].
- LIU, K. et BASKARAN, B. (2005). Thermal performance of extensive green roofs in cold climates. National Research Council Canada. Proceedings of the World Sustainable Building Conference, Tokyo, Japan. En ligne: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc48202/nrcc48202.pdf> [Page consultée le 27 janvier 2011].
- MENTENS, J, Raes, D, et Hermy, M. (2006). Carnet Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?, *Landscape and Urban Planning*, 77, p. 217-226.

⁴ Les fiches utilisées dans le cadre de cette étude sont associées à un guide : GRAND LYON (2008). Aménagement et eaux pluviales. Guide à l'usage des professionnels. Site économique du Grand Lyon. 53 pages. La totalité des fiches et le guide sont disponibles à l'adresse : <http://www.economie.grandlyon.com/cleantech-gestion-eau-proprete-dechets-lyon.76.0.html> [Page consultée le 13 avril 2010].

- OEE (2009a, page web). Secteur résidentiel – Québec – Tableau 8 : Consommation d'énergie secondaire pour le chauffage des locaux par type de système⁵, Ressources naturelles Canada, Office de l'efficacité énergétique. En ligne : http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/tableaux evolution2/res_qc_8_f_4.cfm?attr=0 [Page consultée le 14 avril 2010].
- OEE (2009 b, page web). Secteur résidentiel – Québec – Tableau 4 : Consommation d'énergie secondaire et émissions de GES pour la climatisation par type de climatiseur, Ressources naturelles Canada, Office de l'efficacité énergétique. En ligne : http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/tableaux evolution2/res_qc_4_f_4.cfm?attr=0 [Page consultée le 14 avril 2010].
- PAROLI, R.M. et GALLAGHER, J. (2008). Les toits verts, les toits blancs et les toits haute performance : distinguer les faits de la fiction. Document NRCC-50444F publié par le Conseil national de recherches du Canada (CNRS), Institut de recherche en construction, 5 pages. En ligne : <http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/npsi/ctrl?action=rtdoc&an=5757146&article=4&lang=en> [Page consultée le 15 avril 2010].
- PERRIER, Y. (2010). Durée de vie des membranes élastomères/Toitures/Inspection du toit. Guide Perrier. En ligne : <http://www.guideperrier.com/article3137/inspecteur-preachat-batiment> [Page consultée le 15 février 2011].
- PERRIER, Y. (2011). Toits blancs au Québec : un choix "vert", durable et écologique. Guide Perrier. En ligne : <http://www.guideperrier.com/article1220/Toits-blancs-au-Quebec-un-choix-vert-durable-et-ecologique> [Page consultée le 15 février 2011].
- PRADO, R.T.A. et FERREIRA, F.L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence on the surface temperature of building roof materials, Energy and Buildings, n° 37, p. 295-300.
- SCHL (Page web). Les tranchées d'infiltration. Société canadienne d'hypothèque et de logement. En ligne : http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/prin/dedu/ealo/ealo_013.cfm [Page consultée le 13 avril 2010].
- SCHL (2006). Performance de toits verts sur la côte Ouest dans les installations de recherche sur les toits vers de la BCIT. Le point en recherche, Série technique 06-106, Novembre 2006, Société canadienne d'hypothèque et de logement, 4 pages. En ligne : <https://www03.cmhc-schl.gc.ca/catalog/productDetail.cfm?csid=1&cat=46&itm=26&lang=fr&fr=1271273236718> [Page consultée le 14 avril 2010].
- SCHL (2001). Des toitures vertes et des billets verts: Un nouveau secteur d'activité au Canada. En ligne. Société Canadienne de l'Habitation et du Logement (SCHL). <http://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/62666.pdf?lang=fr> [Page consultée le 26 janvier 2011].

⁵ Les tableaux de données employés dans le cadre de cette étude sont tous disponibles via le site Internet de l'Office de l'efficacité énergétique (OEE) à l'adresse : http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/evolution_res_qc.cfm [Page consultée le 14 avril 2010].

- SUEHRCKE, H., PETERSON, E.L. et SELBY, N. (2008). Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in hot climate. *Energy and Buildings* 40, p. 2224-2235.
- SYNNEFA, A., SANTAMOURIS, M., et AKBARI, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings* 39, p. 1167-1174.
- TEEMUSK, A. et MANDER, U. (2007). Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events, *Ecological Engineering*, 30, p. 271-277.
- WINKELMAN, T.J. (2005). Whitopping Performance in Illinois. Final Report. Physical Research report No 148. Illinois Department of Transportation, Bureau of Materials and Physical Research, January 2005, 61 pages. En ligne : <http://www.dot.state.il.us/materials/research/pdf/148.pdf> [Page consultée le 20 avril 2010].

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

ANNEXE A :

MÉTHODOLOGIE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

TABLE DES MATIÈRES

A.1	TERMES ET DÉFINITIONS.....	2
A.2	PHASE I DE L'ACV : DÉFINITION DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE.....	4
A.3	PHASE II DE L'ACV : ANALYSE DE L'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE.....	5
A.3.1	DESCRIPTION DES CATÉGORIES DE DONNÉES	6
A.3.1.1	CLASSIFICATION SELON LA SOURCE	6
A.3.1.2	CLASSIFICATION SELON LE TYPE	7
A.3.1.3	CLASSIFICATION SELON LA NATURE.....	7
A.3.1.4	CLASSIFICATION SELON LE NIVEAU D'AGRÉGATION.....	7
A.3.2	RECUEIL DES DONNÉES	8
A.3.3	VALIDATION DES DONNÉES.....	8
A.3.4	MISE EN RAPPORT DES DONNÉES AVEC LE PROCESSUS ÉLÉMENTAIRE.....	8
A.3.5	MISE EN RAPPORT DES DONNÉES AVEC L'UNITÉ FONCTIONNELLE.....	9
A.4	PHASE III DE L'ACV : ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE	9
A.4.1	SÉLECTION DES CATÉGORIES D'IMPACTS ET DES MODÈLES DE CARACTÉRISATION	10
A.4.2	CLASSIFICATION ET CARACTÉRISATION DES RÉSULTATS D'INVENTAIRE	12
A.4.3	ÉLÉMENTS OPTIONNELS.....	13
A.5	PHASE IV DE L'ACV : INTERPRÉTATION	14
A.6	RÉFÉRENCES	15

La méthodologie ACV est régie par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), en particulier la série de normes ISO 14 040. Les sections suivantes présentent quelques termes et définitions, de même que les principaux aspects méthodologiques de chacune des quatre phases de l'ACV.

A.1 TERMES ET DÉFINITIONS

Analyse de sensibilité : procédure systématique pour estimer les effets sur les résultats d'une étude des choix concernant les méthodes et les données.

Analyse d'incertitude : procédure systématique permettant de rechercher, puis de quantifier, l'incertitude introduite dans les résultats d'un inventaire du cycle de vie par les effets cumulés de l'imprécision du modèle, de l'incertitude sur les intrants et de la variabilité des données.

Analyse du cycle de vie (ACV) : compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie.

Analyse du cycle de vie axée sur les attributs (ACV-A) : analyse visant à attribuer à un système de produits la juste part des impacts dont il est responsable.

Analyse du cycle de vie axée sur les conséquences (ACV-C) : analyse visant à évaluer les conséquences d'un système de produits (ou d'une décision affectant ce système) sur d'autres systèmes.

Catégorie d'impact : classe représentant les points environnementaux étudiés à laquelle les résultats de l'inventaire du cycle de vie peuvent être affectés.

Contrôle de cohérence : procédé, mis en œuvre avant d'arriver aux conclusions, permettant de vérifier que les hypothèses, les méthodes et les données sont appliquées de manière cohérente tout au long de l'étude, et conformément à la définition des objectifs et du champ de l'étude.

Contrôle de complétude : procédé permettant de vérifier si les informations des phases précédentes d'une analyse du cycle de vie suffisent pour arriver à des conclusions conformément à la définition des objectifs et du champ de l'étude.

Contrôle de sensibilité : procédé permettant de vérifier que les informations obtenues à partir d'une analyse de sensibilité sont pertinentes pour établir des conclusions et donner des recommandations.

Émissions : émissions dans l'air et rejets dans l'eau et le sol.

Entrant : voir « Intrant »

Évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) : phase de l'analyse du cycle de vie destinée à comprendre et évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels d'un système de produits sur l'environnement au cours de son cycle de vie.

Extrant : flux de produit, de matière ou d'énergie sortant d'un processus élémentaire (NOTE Les produits et les matières comprennent des matières premières, des produits intermédiaires, des coproduits et des émissions).

Facteur de caractérisation : facteur établi à partir d'un modèle de caractérisation qui est utilisé pour convertir les résultats de l'inventaire du cycle de vie en unité commune d'indicateur de catégorie.

Flux de produits : produits entrant ou sortant d'un système de produits en direction d'un autre.

Flux de référence : mesure des extrants des processus, dans un système de produits donné, nécessaire pour remplir la fonction telle qu'elle est exprimée par l'unité fonctionnelle.

Flux élémentaire : matière ou énergie entrant dans le système étudié, qui a été puisée dans l'environnement sans transformation humaine préalable, ou matière ou énergie sortant du système étudié, qui est rejetée dans l'environnement sans transformation humaine ultérieure.

Flux énergétique : intrant ou extrant d'un processus élémentaire ou d'un système de produits, exprimé en unités d'énergie (NOTE Le flux énergétique entrant peut être appelé intrant, et le flux énergétique sortant, extrant).

Flux intermédiaire : flux de produit, de matière ou d'énergie intervenant entre des processus élémentaires du système de produits étudié.

Frontière du système : ensemble de critères qui spécifient quels processus élémentaires font partie d'un système de produits.

Indicateur de catégorie d'impact : représentation quantifiable d'une catégorie d'impact (NOTE L'expression condensée «indicateur de catégorie» est parfois utilisée).

Interprétation du cycle de vie : phase de l'analyse du cycle de vie au cours de laquelle les résultats de l'analyse de l'inventaire ou de l'évaluation de l'impact, ou des deux, sont évalués en relation avec les objectifs et le champ définis pour l'étude afin de dégager des conclusions et des recommandations.

Intrant : flux de produit, de matière ou d'énergie entrant dans un processus élémentaire (NOTE Les produits et les matières comprennent des matières premières, des produits intermédiaires et des coproduits).

Inventaire du cycle de vie (ICV) : phase de l'analyse du cycle de vie impliquant la compilation et la quantification des intrants et des extrants, pour un système de produits donné au cours de son cycle de vie.

Matière première : matière première ou secondaire utilisée pour réaliser un produit.

Processus élémentaire : plus petite partie prise en compte dans l'inventaire du cycle de vie pour laquelle les données d'entrée et de sortie sont quantifiées.

Processus : ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des intrants en extrants

Revue critique : processus destiné à s'assurer de la cohérence entre une analyse du cycle de vie et les principes et exigences spécifiés par les Normes internationales traitant de l'analyse du cycle de vie.

Sortant : voir « Extrant »

Système de produits : ensemble de processus élémentaires comportant des flux de produits et des flux élémentaires, remplissant une ou plusieurs fonctions définies, qui sert de modèle au cycle de vie d'un produit.

Unité fonctionnelle : performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie.

Vérification des résultats : élément de la phase d'interprétation du cycle de vie permettant d'établir la confiance dans les résultats de l'étude de l'analyse du cycle de vie (NOTE La vérification comprend le contrôle de complétude, de sensibilité, de cohérence et toute autre validation pouvant être requise conformément à la définition des objectifs et du champ de l'étude).

A.2 PHASE I DE L'ACV : 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 essentiellement la raison de l'étude et la façon dont celle-ci sera conduite afin d'atteindre cette fin (c.-à-d. le modèle d'étude définissant le cadre méthodologique auquel doivent se conformer les phases subséquentes de l'ACV).

L'application envisagée et le public cible doivent d'abord être clairement définis puisqu'ils vont fixer la profondeur et l'ampleur de l'étude.

Selon l'ISO, les ACV s'effectuent en mettant au point des modèles qui décrivent les éléments clés des systèmes physiques. Le système de produits¹ représente les activités humaines considérées dans l'étude et l'évaluation des impacts est basée sur des modèles (mécanismes environnementaux) qui lient les interventions environnementales de ces activités et leurs effets potentiels sur l'environnement.

L'ISO définit un **système de produits** comme un ensemble de processus élémentaires liés par des flux de matière et d'énergie qui remplissent une ou plusieurs fonctions. Dans ce sens, le sujet 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 Styromousse 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 2 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. Plus la définition de l'unité fonctionnelle est précise, plus les frontières du système sont restrictives.

Un **processus élémentaire**, tel que défini par l'ISO, est la plus petite partie d'un système de produits pour laquelle sont recueillies des données (c.-à-d. il peut représenter un procédé chimique spécifique ou une usine complète incluant de nombreux sous-procédés). Un processus élémentaire est caractérisé par ses entrants et sortants, si le processus élémentaire représente plus d'un sous-procédé, leurs entrants et sortants sont alors agrégés ensemble.

Selon l'ISO, les processus élémentaires sont liés aux écosystèmes naturels (ou écosphère) par des **flux élémentaires** et aux systèmes économiques (ou technosphère, c.-à-d. la part de l'écosphère qui a été transformée par les activités humaines) par des **flux de produits** (Figure A-1). On distingue également les **flux de produits intermédiaires**, entre les processus du système de produits étudié. Ainsi, les flux élémentaires sont puisés directement de ou émis directement dans l'environnement et donc, contribuent aux catégories d'impacts, tandis que les flux de produits (matière, énergie ou service, incluant les coproduits, sous-produits et déchets) sont plutôt utilisés pour déterminer l'intensité des processus modélisés.

¹ Le terme « produits » utilisé seul peut comprendre non seulement des systèmes de produits mais aussi des systèmes de services.

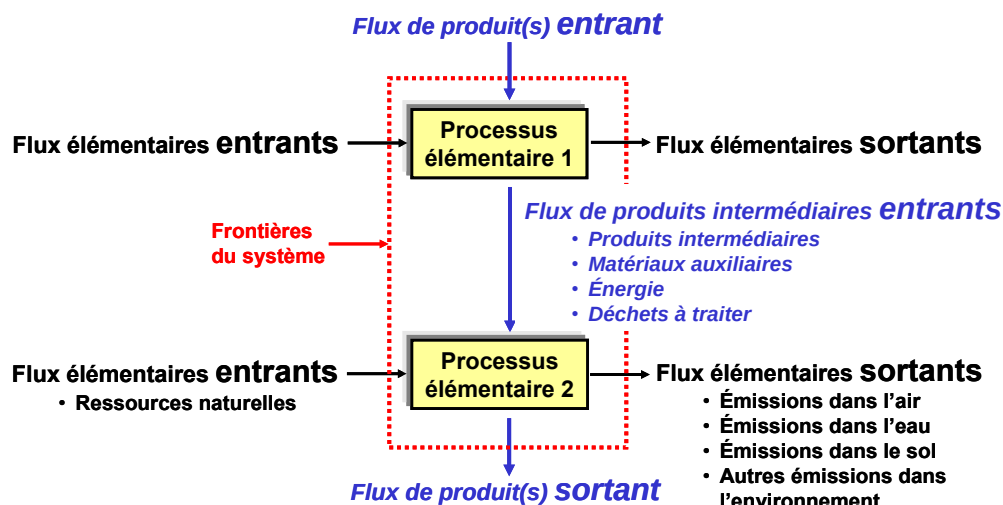


Figure A-1 : Frontières et processus élémentaires d'un système de produits.

L'utilisation d'un diagramme de procédés illustrant les processus élémentaires et leurs interrelations (flux de matières et d'énergie) permet le suivi des frontières du système de produits.

Selon l'ISO, dans l'idéal il convient de modéliser le système de produits de telle sorte que les entrants et les sortants à ses frontières soient des flux élémentaires. Dans de nombreux cas, il n'y a cependant ni assez de temps, ni assez de données, ni assez de ressources pour effectuer une étude aussi complète. Des décisions doivent être prises concernant les processus élémentaires et les flux élémentaires² qui doivent être initialement inclus dans l'étude. L'ISO stipule également qu'il n'est pas nécessaire de quantifier des entrants et des sortants qui ne changeront pas de façon significative les conclusions globales de l'étude, elle suggère aussi des critères pour l'inclusion des flux (p. ex. contribution au-dessus d'un certain seuil aux bilans de masse ou d'énergie ou pertinence environnementale).

La liste de tous les processus élémentaires et flux élémentaires à modéliser peut être corrigée avec l'acquisition de nouvelles informations, les décisions menant à ce raffinement des frontières du système devant être clairement présentées.

Une fois que la liste des processus élémentaires inclus dans le système de produits est complétée et afin de construire l'inventaire du système et de poursuivre avec l'évaluation des impacts potentiels, les données pertinentes concernant ces processus (c.-à-d. les entrants et les sortants) doivent être collectées. Cependant, avant de faire cette collecte, les exigences relatives à leur qualité (couverture temporelle, géographique et technologique, précision et complétude), leurs sources (spécifiques ou génériques), leur type (mesurées, calculées ou estimées), leur nature (déterministe ou probabiliste), et leur niveau d'agrégation doivent être déterminées afin de respecter les objectifs de l'étude.

A.3 PHASE II DE L'ACV : ANALYSE DE L'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE

La seconde phase de l'ACV, appelée l'analyse de l'inventaire du cycle de vie (AICV), est la quantification des flux élémentaires pertinents qui traversent les frontières du système de produits.

La procédure de calcul utilisée pour compléter l'inventaire est présentée à la Figure A-2.

² Puisque les flux élémentaires quantifiés sont les données d'entrée de l'évaluation des impacts, le choix des impacts à évaluer va affecter le choix des flux élémentaires à suivre.

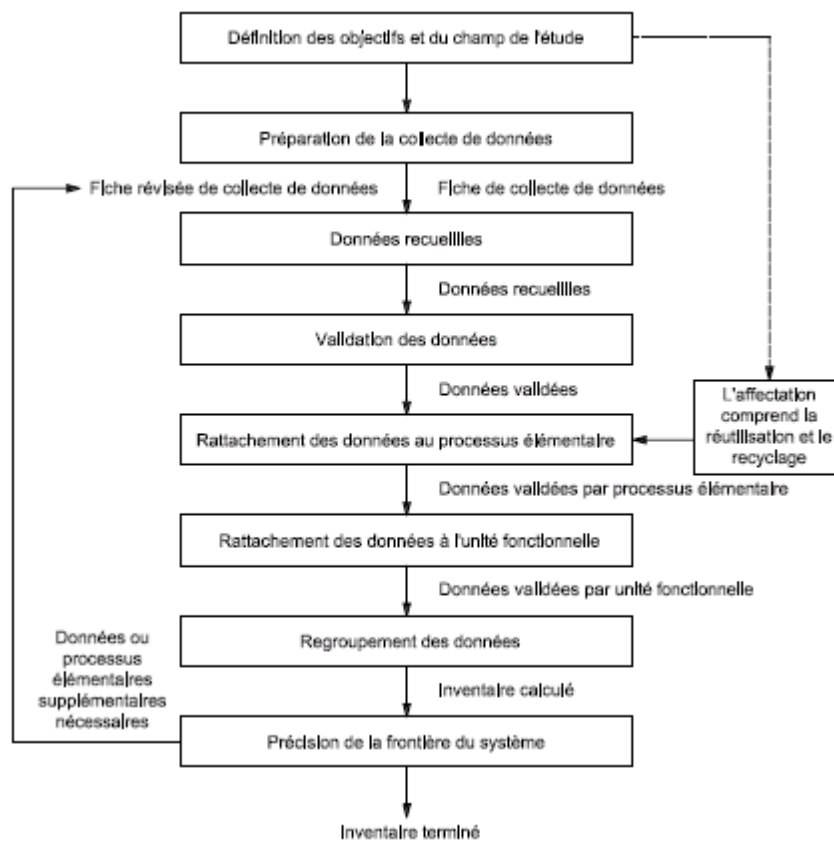


Figure A-2: Procédure de calcul de l'inventaire.
(tiré de ISO 14 044, 2006)

A.3.1 Description des catégories de données

Les données utilisées dans le cadre de l'AICV vie peuvent être classifiées selon leur source (spécifique ou générique), leur type (mesurées, calculées ou estimées), leur nature (déterministe ou probabiliste) et leur niveau d'agrégation.

A.3.1.1 Classification selon la source

Données spécifiques ou primaires

Les données spécifiques sont collectées à partir des installations associées aux processus élémentaires inclus dans les frontières du système. L'analyste responsable de leur collecte a un accès direct aux données lors de leur collecte ou a un contrôle direct sur le processus de collecte (c.-à-d. la méthodologie employée). Autrement que pour caractériser les installations incluses dans l'étude, ce type de données n'est pas recommandé à cause de son manque de représentativité, à moins que 1) aucune autre source de données ne soit disponible ou 2) un nombre suffisant d'installations du même secteur industriel fournissent des données afin de calculer des moyennes industrielles représentatives (ces dernières peuvent ainsi devenir des données génériques pour d'autres études).

Données génériques ou secondaires

Les données génériques sont obtenues de sources publiées (c.-à-d. bases de données commerciales, littérature spécialisée). L'analyste n'a pas accès aux données lors de leur collecte. Ces données ne sont

généralement pas accompagnées de métadonnées³ suffisantes pour obtenir de l'information sur la méthodologie de collecte et sur la variabilité des données.

A.3.1.2 Classification selon le type

Données mesurées

Les données mesurées proviennent d'installations réelles et sont issues d'un programme de surveillance continue (c.-à-d. monitoring) ou d'un programme d'échantillonnage ponctuel. Il est donc potentiellement possible d'obtenir des informations sur leur variabilité et leur distribution.

Données calculées

Les données calculées résultent de l'utilisation de modèles afin de représenter des procédés ou des phénomènes. Leur qualité dépend donc de la validité des modèles. Ces données peuvent être validées et/ou suppléées par des données mesurées.

Données estimées

Les données estimées incluent celles basées sur le jugement professionnel ou les règles du pouce. Elles ne sont utilisées que lorsqu'aucun autre type de données n'est disponible.

A.3.1.3 Classification selon la nature

Données déterministes

Les données déterministes sont représentées par des valeurs uniques (c.-à-d. mesure, résultat de calcul ou estimation) pour chacun des paramètres caractérisés (c.-à-d. flux). Il n'est donc pas possible de connaître la précision et la variabilité des valeurs rapportées.

Données probabilistes

Les données probabilistes sont représentées par des plages de valeurs ou des fonctions de distribution de probabilités (p. ex. triangulaire, normale, log-normale) pour chacun des paramètres caractérisés (c.-à-d. flux). Elles rendent ainsi compte de l'imprécision et de la variabilité de la valeur d'un paramètre et permettent éventuellement d'analyser, lors de la phase d'interprétation, l'incertitude des résultats obtenus lors des phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation des impacts.

A.3.1.4 Classification selon le niveau d'agrégation

Le niveau d'agrégation des données fait référence au nombre de processus élémentaires qui sont représentés par une même donnée. Lorsque complètement désagrégées, les données décrivant une étape spécifique du cycle de vie ou un système de produits sont disponibles pour chaque processus individuel inclus dans l'étape ou le système. À l'inverse, ces mêmes données peuvent être complètement agrégées en une seule donnée, qui à elle seule décrit l'étape ou le système considéré (tous les flux élémentaires d'une même substance sont sommés en un seul flux). Il y a donc une perte d'information avec l'augmentation du niveau d'agrégation puisqu'il n'est plus possible de connaître la contribution individuelle de chacun des processus élémentaires agrégés. Il est parfois difficile d'établir le niveau d'agrégation (et la liste des processus agrégés) des données génériques disponibles dans les bases de données commerciales.

³ Informations accompagnant la donnée d'inventaire et qui donne des renseignements à propos de la donnée (par ex. son origine, la méthodologie utilisée lors de sa collecte, les frontières du processus élémentaire décrit).

A.3.2 Recueil des données

Selon la complexité du système de produits étudié (c.-à-d. le nombre et la nature des processus élémentaires inclus dans ses frontières), la quantité de données qui doivent être recueillies est souvent considérable. Le recours à des bases de données d'inventaire commerciales facilite ce processus, en fournissant des données sur plusieurs processus élémentaires (p. ex. production de matériaux et d'énergie, transports). Ces bases de données sont majoritairement européennes et donc, ne sont pas vraiment représentatives du contexte canadien. Elles peuvent toutefois être adaptées à celui-ci si les données qu'elles contiennent sont suffisamment désagrégées et si les informations nécessaires pour le faire sont disponibles⁴. La méthodologie utilisée pour faire la collecte des données doit être clairement présentée.

A.3.3 Validation des données

Les données recueillies pour chaque processus élémentaire peuvent être validées en 1) les évaluant en relation avec les exigences déterminées durant la définition de l'objectif et du champ de l'étude quant à leur qualité, et 2) réalisant des bilans de masse ou d'énergie ou des analyses comparatives des facteurs d'émission. Si des anomalies évidentes sont identifiées, des données alternatives conformes aux exigences préalablement établies sont nécessaires.

La disponibilité et la qualité des données pertinentes (p. ex. lacunes dans les données, moyennes génériques au lieu de données spécifiques) vont limiter l'exactitude de l'ACV. Il y présentement un manque de données d'inventaire spécifiques nord américaines, ce qui va affecter les résultats d'études faites au Canada.

L'absence d'un format de documentation unique⁵, pouvant parfois résulter en une très faible documentation accompagnant les données provenant des bases de données d'inventaire commerciales, peut aussi entraver la collecte et la validation des données en rendant difficile l'évaluation de leur qualité et leur capacité à satisfaire aux exigences établies.

Selon l'ISO, le traitement des données manquantes et des oublis entraîne en règle générale : une valeur de donnée « non zéro » qui est justifiée; une valeur de donnée « zéro » si elle se justifie; ou une valeur calculée sur la base des valeurs communiquées provenant des processus élémentaires faisant appel à une technologie similaire.

A.3.4 Mise en rapport des données avec le processus élémentaire

Une fois que les entrants et les sortants de chaque processus élémentaire ont été identifiés, ils sont quantifiés par rapport à un flux de référence déterminé pour chacun des processus (p. ex. 1 kg de matière ou 1 MJ d'énergie). L'ISO stipule que si un processus élémentaire a plus d'un produit (p. ex. une raffinerie pétrolière produit un mélange d'hydrocarbures pétroliers commerciaux) ou entrant (p. ex. un site d'enfouissement sanitaire reçoit des déchets municipaux qui sont un mélange de différents produits), ou s'il recycle des produits intermédiaires ou des déchets en matières premières, les flux de

⁴ Des données décrivant la production de certains matériaux en Europe peuvent faire référence à d'autres processus de production de matériaux (par ex. pour des produits intermédiaires ou auxiliaires) ou d'énergie ou des processus de transport. Les données décrivant ces autres processus élémentaires peuvent être remplacés avec des données décrivant les mêmes processus, si disponibles, provenant d'une source plus spécifique au contexte canadien ou nord américain, augmentant ainsi la représentativité géographique des données européennes.

⁵ Un tel format permettrait un niveau de documentation suffisant et uniforme pour les données génériques provenant des bases de données d'inventaire commerciales. La norme ISO 14 048 (2002), traitant de cette question, est un pas dans la bonne direction.

matières et d'énergie ainsi que les émissions dans l'environnement qui leur sont associés, doivent être imputés aux différents co-produits ou co-entrants selon des règles clairement présentées lors de la définition de l'objectif et du champ de l'étude. L'ISO suggère également une série de principes et de procédures afin réaliser cette imputation.

Les règles d'imputation prescrites par l'ISO sont données ci-après en ordre de priorité.

1. Il convient, dans la mesure du possible, d'éviter l'imputation en :
 - subdivisant les processus multifonctionnels en deux ou plusieurs sous-processus (lorsque certains sous-processus sont spécifiques à un seul des coproduits) ;
 - élargissant les frontières, de manière à inclure les fonctions de d'autres systèmes (potentiellement) substituées par les coproduits (et en attribuant au système étudié un crédit environnemental correspondant à l'impact évité des fonctions substituées).
2. Lorsque l'imputation ne peut être évitée, il convient de diviser les flux entrants et sortants des processus multifonctionnels entre les différents coproduits de manière à refléter des relations physiques sous-jacentes entre eux (p. ex. masse ou énergie).
3. Lorsqu'une relation physique ne peut être établie, il convient de répartir les flux entrants et sortants de manière à refléter d'autres relations entre eux (p. ex. la valeur économique des coproduits).

A.3.5 Mise en rapport des données avec l'unité fonctionnelle

Les entrants et les sortants de tous les processus élémentaires inclus dans le système de produits sont alors normalisés par rapport à l'unité fonctionnelle et agrégés. Selon l'ISO, le niveau d'agrégation doit être suffisant pour répondre aux objectifs de l'étude, et les catégories de données (c.-à-d. substances individuelles ou groupes de ressources naturelles ou d'émissions dans l'environnement) ne devraient être agrégées seulement si elles concernent des substances équivalentes et des impacts similaires sur l'environnement.

A.4 PHASE III DE L'ACV : ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE

La troisième phase de l'ACV, appelée l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV), est l'interprétation des résultats de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie du système de produits étudié afin d'en comprendre la signification environnementale.

L'analyse de l'inventaire permet la quantification des échanges entre le système de produits et l'environnement. Selon le champ d'étude, l'information obtenue sera plus ou moins importante (c.-à-d. des centaines de flux de ressources naturelles et d'émissions dans l'environnement peuvent être quantifiés) et son utilisation pratique peut s'avérer difficile. Durant la phase d'ÉICV, certains enjeux environnementaux, appelés catégories d'impacts, sont modélisés et des indicateurs de catégories sont utilisés pour condenser et expliquer les résultats de la phase d'inventaire.

Selon l'ISO, le cadre méthodologique de l'ÉICV présente des éléments obligatoires et des éléments optionnels (Figure A-3).

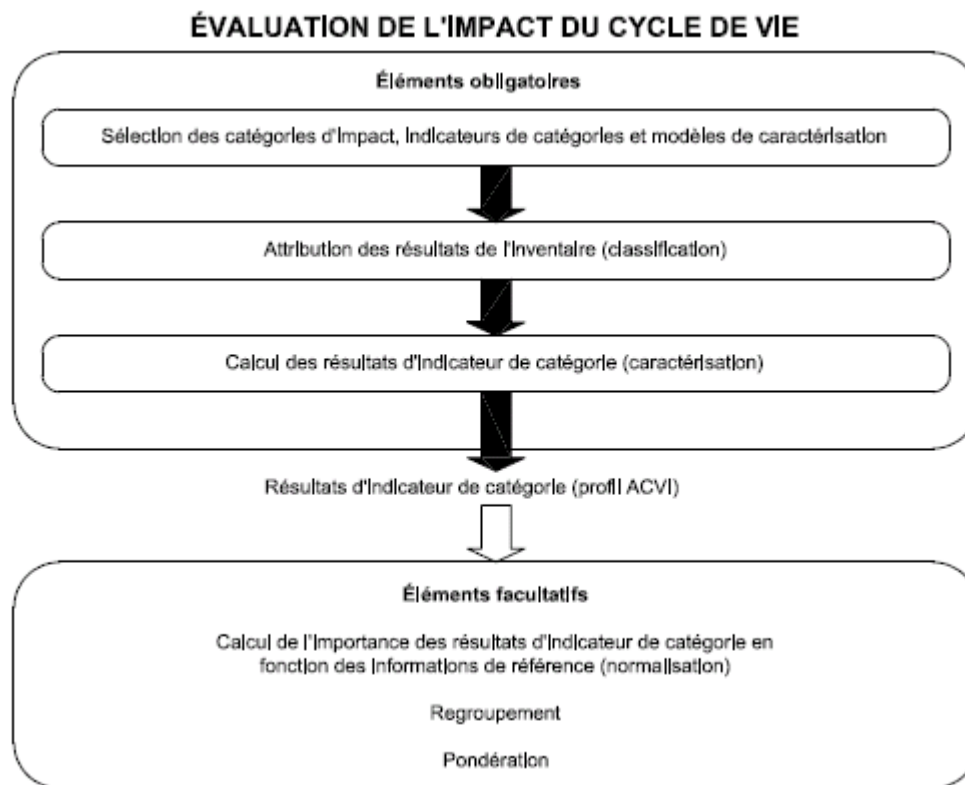
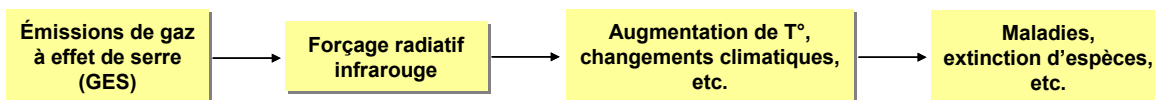


Figure A-3: Éléments de la phase d'ÉICV.
(Tiré de ISO 14 040, 2006)

A.4.1 Sélection des catégories d'impacts et des modèles de caractérisation

La première étape est la sélection de **catégories d'impacts** représentant les points environnementaux à problème considérés durant l'étude. Chaque catégorie est identifiée par un **impact final** (c.-à-d. un attribut ou aspect de l'environnement naturel, de la santé humaine ou des ressources naturelles). Un **mécanisme environnemental** (c.-à-d. chaîne de causalité) est alors établi pour relier les résultats d'inventaire aux impacts finaux et un **indicateur de catégorie** est choisi à un endroit quelconque du mécanisme pour agir comme une représentation quantifiable de la catégorie. Par exemple, la Figure A-4 illustre le mécanisme environnemental pour la catégorie d'impact « Réchauffement global ».



**Figure A-4 : Mécanisme environnemental pour la catégorie d'impact
« Réchauffement global ».**

Un **modèle de caractérisation** est alors développé afin d'en tirer des **facteurs de caractérisation**, qui seront ensuite utilisés pour convertir les résultats d'inventaire pertinents en résultats d'indicateur de catégorie selon leur contribution relative à la catégorie d'impact. Par exemple, pour la catégorie « Réchauffement global », les facteurs de caractérisation représentent le potentiel de réchauffement global de chacun des gaz à effet de serre (en kg de CO₂-équivalents/kg de gaz) et peuvent être calculés à partir du modèle de l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Les résultats d'inventaire convertis en une unité commune peuvent alors être agrégés en un seul **résultat d'indicateur de**

catégorie pour chaque catégorie d'impact. Un exemple des termes utilisés dans le cadre de l'ÉICV pour la catégorie « Réchauffement global » est présenté au Tableau A-1.

Tableau A-1 : Exemple des termes utilisés dans le cadre de l'ÉICV

Terme	Exemple	Unité
Catégorie d'impact	Réchauffement global	--
Résultats de l'inventaire	Quantité de gaz à effet de serre (GES) par unité fonctionnelle	kg de gaz
Modèle de caractérisation	Modèle de base sur 100 ans élaboré par l' <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (IPCC)	--
Indicateur de catégorie	Forçage radiatif infrarouge	W/m ²
Facteurs de caractérisation	Potentiel de réchauffement global (GWP ₁₀₀) pour chaque GES	kg d'équivalents CO ₂ / kg de gaz
Résultat d'indicateur de catégorie	Somme des résultats d'inventaire caractérisés (c.-à-d. multipliés par leur facteur de caractérisation respectif)	kg d'équivalents CO ₂ / unité fonctionnelle
Impacts finaux par catégorie	Maladies, extinction d'espèces, etc.	--
Pertinence environnementale	Le forçage radiatif infrarouge est une donnée indirecte pour des effets potentiels sur le climat, dépendant de l'absorption de chaleur atmosphérique intégrée engendrée par les émissions de la répartition dans le temps de l'absorption de chaleur.	--

(adapté de ISO 14 044, 2006)

Selon l'ISO, il convient que :

- Les catégories d'impacts, les indicateurs de catégorie et les modèles de caractérisation soient acceptés à l'échelle internationale, c'est-à-dire qu'ils soient basés sur un accord international ou approuvés par un organisme international compétent ;
- Le choix des catégories d'impacts reflète un ensemble complet de points environnementaux en rapport avec le système de produits étudié, tout en tenant compte de l'objectif et du champ de l'étude ;
- Le modèle de caractérisation pour chaque indicateur de catégorie soit scientifiquement et techniquement valable, et fondé sur un mécanisme environnemental distinct, identifiable et/ou une observation empirique reproductible ;
- Les choix de valeurs et les hypothèses faites lors du choix des catégories d'impacts, des indicateurs de catégorie et des modèles de caractérisation soient minimisés.

Les catégories d'impacts souvent considérées en ACV sont les suivantes :

- Réchauffement global
- Appauvrissement de la couche d'ozone

- Acidification
- Eutrophisation
- Smog photochimique
- Toxicité humaine
- Écotoxicité
- Utilisation des ressources abiotiques
- Utilisation des terres
- Utilisation de l'eau

Cependant, puisqu'il n'y a pas encore une seule méthode ÉICV qui est généralement acceptée, il n'existe pas une liste de catégories d'impacts unique, généralement reconnue et utilisée (Udo de Haes *et al.*, 2002). Couramment, un compromis doit être atteint entre les applications envisagées des résultats et l'applicabilité et la praticabilité du choix des catégories et des modèles associés.

Comme pour les banques de données d'inventaire, la plupart des méthodes ÉICV sont européennes et introduisent un biais lorsque le contexte canadien est considéré. Ceci est particulièrement important pour les catégories d'impacts régionales (smog photochimique, eutrophisation, acidification) et locales (toxicité humaine, écotoxicité, utilisation des terres). Ces catégories étant en effet influencées par les conditions environnementales du milieu récepteur, les modèles de caractérisation utilisés devraient normalement prendre en compte ces caractéristiques⁶. Pour ces catégories d'impacts, le CIRAIG a développé une méthode ÉICV canadienne, LUCAS (Toffoletto *et al.*, 2007), basée sur la méthode américaine TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*) (Bare *et al.*, 2003). Cette méthode a l'avantage d'utiliser des modèles de caractérisation adaptés au contexte nord-américain.

Il est par ailleurs à noter que la méthode IMPACT 2002+ (Jolliet *et al.*, 2003) propose des facteurs de caractérisation de la toxicité humaine pour chaque continent. Et, comme présenté par Rochat *et al.* (2006), bien que les substances émises dans différents continents soient associées à des impacts pouvant différer jusqu'à deux ordres de grandeurs, l'impact relatif (c.-à-d. le « *ranking* ») des substances demeure le même pour la plupart. Les auteurs concluent donc que :

- Des facteurs de caractérisation génériques calculés à l'échelle d'un continent, tels que proposés par la plupart des méthodes ÉICV, sont normalement valables, sur une base comparative, pour d'autres continents ;
- Des facteurs de caractérisation spécifiques aux milieux récepteurs doivent être utilisés lorsque l'étude s'intéresse aux résultats absolus ou lorsque la comparaison vise des scénarios impliquant des émissions dans des milieux récepteurs très différents.

A.4.2 Classification et caractérisation des résultats d'inventaire

Une fois que les catégories d'impacts ont été sélectionnées, les flux élémentaires inventoriés sont affectés (c.-à-d. classés) à ces catégories selon leurs effets prédits. Certains peuvent être exclusivement affectés à une seule catégorie alors que d'autres peuvent être affectés à plus d'une catégorie lorsque sont considérés des mécanismes d'effets parallèles ou en série.

⁶ Les modèles de caractérisation utilisés pour les impacts ayant des répercussions à l'échelle globale (c.-à-d. le réchauffement global, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'utilisation des ressources abiotiques et de l'eau) sont les mêmes quel que soit le lieu d'émission ou d'extraction des ressources.

Les résultats d'inventaire affectés sont ensuite convertis grâce aux facteurs de caractérisation appropriés et aux unités communes des indicateurs de catégorie, et les résultats convertis pour chaque catégorie sont agrégés pour obtenir un résultat d'indicateur sous forme numérique. L'ensemble des résultats d'indicateur forme le **profil d'ÉICV**.

Concernant ce profil, deux éléments doivent être spécialement notés :

1. L'amplitude calculée des impacts considérés ne représente qu'une potentialité puisqu'elle est basée sur des modèles décrivant les mécanismes environnementaux et donc une simplification de la réalité⁷.
2. Les substances non définies (c.-à-d. celles qui n'ont pas de facteur de caractérisation dû à un manque d'information, comme les données (éco)toxicologiques par exemple) qui ne sont pas incluses dans les calculs augmentent l'incertitude des résultats.

A.4.3 Éléments optionnels

Selon l'ISO, l'objectif du calcul de l'amplitude des résultats d'indicateur de catégorie par rapport à une information de référence (c.-à-d. **normalisation**) est de mieux comprendre l'amplitude relative de chaque résultat d'indicateur du système de produits étudié. L'information de référence peut être :

1. les émissions ou utilisations de ressources totales pour une zone géographique donnée qui peut être mondiale, régionale, nationale ou locale;
2. les émissions ou utilisation de ressources totales pour une zone donnée (mondiale, régionale ou locale) par habitant ou mesure similaire;
3. un scénario de référence, tel un autre système de produits donné.

Cette étape optionnelle peut s'avérer utile pour un contrôle de cohérence par exemple. Elle présente également l'avantage de convertir tous les résultats d'indicateur de catégorie dans une même unité (p. ex. équivalent personne), un pré requis pour les éléments optionnels suivants.

Selon l'ISO :

1. le **groupement** consiste à affecter les catégories d'impacts en une ou plusieurs séries telles que prédéfinies dans la définition de l'objectif et du champ de l'étude, et il peut impliquer un tri sur une base nominale (p. ex. par caractéristiques telles que les émissions et ressources ou échelles spatiales mondiales, régionales et locales) et/ou un classement par rapport à une hiérarchie donnée (p. ex. priorité élevée, moyenne et basse);
2. la **pondération** est le processus de conversion des résultats d'indicateur des différentes catégories d'impacts en utilisant des facteurs numériques. Elle peut inclure l'agrégation de résultats d'indicateurs pondérés en un score unique.

Ces éléments optionnels impliquent des choix de valeurs et ainsi, différents individus, organismes et sociétés peuvent avoir des préférences différentes et peuvent, par conséquent, obtenir des résultats de groupement et de pondération différents à partir des mêmes résultats d'indicateurs caractérisés.

⁷ La divergence entre les prédictions des modèles et la réalité est accrue pour la plupart du fait qu'ils sont basés sur le contexte européen. Ceci est particulièrement important pour les impacts régionaux et locaux tels l'acidification et l'écotoxicité.

La méthodologie (c.-à-d. sélection des catégories d'impacts, des indicateurs de catégories, des modèles de caractérisation et des éléments optionnels) utilisée pour réaliser l'évaluation des impacts potentiels doit être clairement présentée durant la définition de l'objectif et du champ de l'étude.

A.5 PHASE IV DE L'ACV : INTERPRÉTATION

Les objectifs de la quatrième phase de l'ACV, appelée interprétation, sont 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 et de rapporter les résultats de l'interprétation du cycle de vie de manière transparente de façon à respecter les exigences de l'application telles que décrites dans l'objectif et le champ de l'étude.

Idéalement, l'interprétation se fait de façon interactive avec les trois autres phases de l'ACV, avec les phases de définition de l'objectif et du champ de l'étude et d'interprétation du cycle de vie formant le cadre de l'étude et les phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation des impacts fournissant les informations relatives au système de produits.

Selon l'ISO, l'interprétation du cycle de vie comporte trois éléments :

1. l'identification des points significatifs à partir des résultats des phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation des impacts en liaison avec les objectifs et le champ de l'étude;
2. la vérification, qui prend en compte les contrôles de complétude, de sensibilité et de cohérence;
3. les conclusions, les recommandations et la rédaction d'un rapport.

La vérification a pour objectifs d'établir et de renforcer la confiance dans les résultats de l'étude, ainsi que leur fiabilité. Le **contrôle de complétude** a pour objectif de garantir que toutes les informations et données pertinentes nécessaires à l'interprétation sont disponibles et complètes. Le **contrôle de sensibilité** a pour objectif de vérifier la fiabilité des résultats et des conclusions en déterminant s'ils sont affectés par des incertitudes dans les données et les divers choix méthodologiques (p. ex. les critères d'inclusion, les méthodes d'imputation ou les indicateurs de catégorie). Le **contrôle de cohérence** a pour objectif de déterminer si les hypothèses, les méthodes et les données sont cohérentes avec l'objectif et le champ de l'étude et si elles ont été appliquées de façon constante durant toute l'étude, et dans le cas d'une comparaison entre diverses alternatives, aux systèmes de produits comparés.

L'interprétation des résultats est également entravée par la nature déterministe des données d'inventaire et d'évaluation des impacts généralement disponibles, puisque celle-ci empêche l'analyse statistique et quantitative de l'incertitude des résultats associée à l'utilisation de telles données. Ceci affecte le niveau de confiance que l'on peut avoir en ces résultats déterministes; les conclusions et recommandation qui en seront tirées pourraient manquer de nuance, voire être erronées, du fait qu'il est impossible de quantifier la variabilité de ces résultats ou de déterminer s'il y a une différence significative d'impacts entre deux alternatives. La méthodologie (c.-à-d. les types de contrôles) qui sera utilisée pour conduire l'interprétation des résultats doit être clairement présentée durant la définition de l'objectif et du champ de l'étude.

A.6 RÉFÉRENCES

- BARE, J., NORRIS, G.B., PENNINGTON, D.W., MCKONE, T. (2003). TRACI – The tool for the Reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. Journal of Industrial Ecology, 6(3-4), pp. 49-78.
- ISO 14 040 (2006). « Management environnemental – Analyse du cycle de vie - Principes et cadre », Organisation internationale de normalisation, 24 p.
- ISO 14 044 (2006). Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Interprétation du cycle de vie, Organisation internationale de normalisation, 19 p.
- ISO 14 048 (2002). « Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Format de documentation de données », Organisation internationale de normalisation, 45 p.
- Joliet, O., MARGNI, M., CHARLES, R., HUMBERT, S., PAYET, J., REBITZER, G., ROSENBAUM, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology, International Journal of Life Cycle Assessment 8(6), pp. 324-330.
- ROCHAT, D., MARGNI, M., *et al.* (2006). Continent-specific intake fractions and characterization factors for toxic emissions: Does it make a difference? International Journal of Life Cycle Assessment 11 pp. 55-63.
- TOFFOLETTO, L., BULLE, C., GODIN, J., REID, C. et DESCHÊNES, L. (2007). LUCAS - A new LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context. International Journal of LCA, 12(2), pp. 93-102.
- UDO DE HAES, H., JOLLIET, O., FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M., KREWITT, W., MÜLLER-WENK, R. (1999). "Best Available Practice Regarding Impact Categories and Category Indicators in Life Cycle Impact Assessment – Part II" Background document for the Second Working Group on Life Cycle Impact Assessment of SETAC-Europe, International Journal of LCA, 4 (3), pp. 167-174.
- UDO DE HAES, H., JOLLIET, O., FINNVEDEN, G., GOEDKOOP, M., HAUSCHILD, M., HERTWICH, E., HOFSTETTER, P., KLÖPFFER, W., KREWITT, W., LINDEIJER, E., MUELLER-WENK, R., OLSON, S., PENNINGTON, D., POTTING, J. et STEEN, B. (2002). "Life Cycle Impact Assessment: Striving Towards Best Practice" Published by the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Pensacola, FL, USB. 272 p.

Annexe B :
Sources de données d'inventaire et hypothèses

**Tableau B-1 : Principales sources de données utilisées dans l'établissement
de l'ICV d'avant-plan**

Mesures de lutte aux ICU	Sources de données
Protection de l'enveloppe du bâtiment	
1. Toit vert extensif	Système Soprema Nature. Données Soprema. • Membrane d'étanchéité Sopralène FLAM 250 : Fiche 040206CAN1F • Composante des membranes à base de bitume SBS modifié : www.soprema.ca/openFile.aspx?ID=283 • Colle Coltack : Fiche 070627CAN1F • Membrane de drainage Sopradrain ECO-5 : Fiche LEED + Fiche 080208CAN2F • Membrane antiracine Microfab : Fiche LEED + Fiche 040907CAN3F • Substrat de culture Sopraflor X (besoin en eau faible). • Culture des plantes en serre : voir mur végétalisé. Durée de vie de toits verts : Kosareo et Ries (2006); Dunnett et Kingsbury (2005) Nombre de plants/m² : Avis d'expert (réviseur) Capacité de rétention des eaux pluviales : SCHL (2001), Mentens (2005), Teemusk (2007) Consommation énergétique évitée : OEE (2009a et 2009 b), SCHL(2006), Liu et Baskaran (2003, 2005). Taux de perte de chaleur par le toit d'une maison du Québec : AEE (Internet) Modélisation du substrat de culture : voir Annexe C.
2. Toit réfléchissant	Système Soprema Soprastar^{MC}. Données Soprema. • Membrane d'étanchéité Soprafix : Fiche 06-05/2.6-fr (Soprafix HP) • Composante des membranes à base de bitume SBS modifié : www.soprema.ca/openFile.aspx?ID=283 • Membrane de finition blanche Soprastar : Fiche 080311CAN2F • Enduit réfléchissant Soprastar RNOVA : Fiche technique 090716SCAN1F (www.soprema.ca/FR/openfile/665/f-mam29a.aspx), composantes : Fiche signalétique Soprastar R'Nova, distance transport : fiche LEED. Durée de vie moyenne des membranes de bitume élastomère : Perrier (2010), Perrier (2011). Pour les données sur les membranes EPDM, voir l'Annexe C. Consommation énergétique évitée : http://www.coolroofs.org/coolroofing.html, Synnefa <i>et al.</i> (2007); Suehrcke <i>et al.</i> (2008).
Végétalisation du pourtour du bâtiment	
3. Mur végétalisé	Culture de plantes en serre Consommation énergétique (chauffage, ventilation, éclairage...) : • Superficies et dépenses d'exploitation des producteurs spécialisés de fleurs et plantes, Québec 2008 : www.statcan.gc.ca/pub/22-202-x/2008000/t005-fra.htm et www.statcan.gc.ca/pub/22-202-x/2008000/t015-fra.htm • Importance relative des sources d'énergie utilisées pour chauffer les serres au Québec (2008) : www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/L%27efficacit%C3%A9%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20dans%20le%20secteur%20serricole.pdf

Mesures de lutte aux ICU	Sources de données
	- Prix de l'électricité, secteur industriel, Québec 2008 : www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-energie-prix-electricite.jsp - Prix du mazout léger, Québec 2008 : www.regie-energie.qc.ca/energie/prodpetro/Mazout_Ens_Qc_2008.pdf - Prix du gaz naturel, Québec 2008 : www.nrcan.gc.ca/eneene/pdf/janjan2008-fra.pdf Fertigation en serre, composantes du substrat de culture : données CIRAIG 2010. Type de contenants posé : pots polypropylène de 8cmx8cmx8cm (500 cm³ env.). Masse et volume mesurés. Plantation finale Terre noire vrac (estimé par : excavation et transport) Nombre de plants : http://fr.noistop.be/files/noistop/Brochure/Noistop%20Green%20BE%28FR%29%20Vers%201-5_noSpread.pdf
4. Aménagement végétalisé	Culture de plantes en serre : voir Mur végétalisé. Plantation finale Terre noire vrac (estimé par : excavation et transport) Processus ecoinvent: Excavation, hydraulic digger/RER
5. Arbre	Culture d'un arbre en pépinière : Culture en pépinière et au champ tiré de Couillard <i>et al.</i> (2009). Tous les emballages (production et fin de vie) ont été négligés. Enlèvement des racines; captation du CO₂ biogénique; entreposage en chambre froide et enlèvement de la tourbe de sphagne exclus. Modélisation de la récolte très approximative, vu que les arbres de Noël sont coupés plutôt que déterrés pour la transplantation.
Aires de stationnement	
6. Revêtement réfléchissant	Conditions de resurfaçage: "Guidelines for Portland Concrete Inlay or Overlay" dans, Winkelman (2005). Épaisseur de ciment : http://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/07025/07025.pdf Quantité de polypropylène dans ciment renforcé : http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5360/is_201001/ai_n52370365/ Scarification de l'asphalte : http://www.decovan.be/downloads/Brochure%20FR-200.pdf Densité du ciment Portland : http://wiki.answers.com/Q/What_is_the_density_of_Ordinary_Portland_Cement Durée de vie d'un resurfaçage : http://www.concreteparking.org/Whitetopping/
7. Revêtement perméable	Système de pavés Subterra^{MC} - Guide technique Permacon : http://www.permaconpro.ca/uimages/pro_support/Permacon_GT09_f.pdf Densité du gravier : http://www.simetric.co.uk/si_materials.htm
Humidification du sol (permettant de retenir ou de capter les eaux de ruissellement)	
8. Jardin pluvial	Dimensionnement et composantes d'un jardin pluvial : Bannerman et Considine (2003)
9. Tranchée d'infiltration	Dimensionnement sommaire de la tranchée, porosité du gravier : Grand Lyon (2008a). Matériaux requis et configuration : Grand Lyon (2008b). Pas de géotextile utilisé au Québec : Information donnée par réviseur.
10. Puits d'infiltration	Dimensionnement sommaire du puits d'infiltration, porosité du gravier : Grand Lyon (2008a). Pas de géotextile utilisé au Québec : Information donnée par réviseur.

Systèmes de référence	
Toit asphalte et gravier standard	- Composantes d'une toiture multicouche asphalte et gravier : www.guideperrier.com/article1306-1755/Refaire-une-membrane-multicouches-d-asphalte-et-gravier - Propriété des feutres : www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-95.html et www.emcobp.com/upload/products/Publications/res/green/ORGANIC_FELT_%28fr%29.pdf
Traitement d'eau de pluie évité	- Pluviométrie moyenne à Montréal: Environnement Canada, Normales climatiques 1971-2000, Station Montréal Lafontaine : http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals/index_f.html - Processus ecoinvent: Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 1/CH
Stationnement résidentiel en enrobés bitumineux	Bitume Québec (2009) Modélisation enrobé bitumineux : données CIRAIG. Durée de vie d'un asphaltage : http://www.guideperrier.com/article1437-1745/Realisation-d-un-stationnement-d-asphalte-residentiel
Dimensions d'un stationnement résidentiel	Dimensions retenues : 5,5 m x 2,6 m (14,3 m²). Valeur moyenne obtenue des sources suivantes : - Ville de Toronto : Dimension de 5,6 m x 2,6 m (14,56 m²). Tiré de http://www.toronto.ca/zoning/parking.htm. - Ville de Montréal, Arrondissement Ville-Marie : Dimension de 5,5 m x 2,75 m (15,13 m²). Tiré de http://www11.ville.montreal.qc.ca/sherlock2/servlet/template/sherlock%2CAfficherDocumentInternet.vm/nodocument/24484;jsessionid=33F75E3DEACB3D95B8C679C22298162C - Association canadienne du stationnement (ACS) : Dimensions de 5,4 m x 2,5 m (13,5 m²). Tiré de http://www.canadianparking.ca/publications/theparker/archive/2010/Q2/ParkingDimensions_fre.pdf

Tableau B-2 : Hypothèses et valeurs définissant les mesures évaluées

Hypothèses et détails des caractéristiques considérées

* Les hypothèses indiquées en italiques ont fait l'objet d'analyses de sensibilité ou de scénario.

1. Toit vert extensif

- Modélisé à partir du système SopraNature (Soprema™).
- Aucun changement majeur à la structure du bâtiment n'est nécessaire. Il est considéré que le toit vert extensif peut être implanté sur un bâtiment existant. Note : Il se peut que les vieilles maisons de Montréal ou d'autres centres urbains du Québec doivent subir un renforcement de structure avant de recevoir un toit vert. Ces cas ne sont pas considérés dans la présente analyse.

Membrane de bitume élastomère :

- Toutes les matières composant la membrane de bitume élastomère sont vierges (information fournie par Soprema).
- Soudures au chalumeau : il a été posé qu'une bombonne de 10 kg de propane est nécessaire.

Système végétalisé :

- Boitier de protection du drain de toit en aluminium (15 cm x 45 cm x 45 cm, épaisseur posée de 2 mm).
- Composition du substrat de culture modélisé (fait à 66 % de matières recyclées) :
 - Brique concassée (pas compressible, matière recyclée post consommation) : 60 % v/v. La brique concassée est présumée être un résidu de démolition. Seule l'énergie de concassage est considérée.
 - Tourbe blonde : 10 % v/v
 - Perlite expansée (pas compressible) : 10 % v/v
 - Sable : 15 % v/v
 - Compost végétal (matière recyclée) 5 % v/v. Les ingrédients du compost sont présumés être des résidus d'égavage, des feuilles mortes, etc.
- Plants de vivaces cultivés en serre : 12 plants/m² (moyenne entre 9 et 14 plants/m² selon le type de plante)
- *Durée de vie de 45 ans (Kosareo et Ries, 2006). Selon Dunnett et Kingsbury (2005), la durée de vie d'un toit standard équipé de toit vert est doublée au minimum.**
- L'implantation comprend une fertilisation à relâchement lent, approximée par une fertilisation standard avec engrais chimique tout usage de type 20-20-20 pour les 2 premières années d'implantation des végétaux.
- *Après la période d'implantation, la fertilisation est faite au besoin. Il est posé qu'une fertilisation a lieu tous les 5 ans. Fertilisation à relâchement lent, approximée par une fertilisation standard avec engrais chimique tout usage de type 20-20-20**

Traitement d'eau évité (maximum) :

- Basé sur la pluviométrie moyenne à Montréal de 830 mm/an (Environnement Canada)
- Selon la littérature consultée, entre 50 et 85 % des précipitations saisonnières tombant sur le toit vert extensif sont retenues sur place et auraient autrement été captées par les égouts municipaux (SCHL, 2001; Mentens *et al.*, 2005; Teemusk *et al.*, 2007). Il a donc été posé que le toit vert évite le traitement de 70 % (valeur moyenne) des précipitations saisonnières.
- Le fait que le toit vert retarde l'arrivée des précipitations au réseau d'égouts municipaux lors d'orages violents, et ainsi évite la surcharge de l'usine d'épuration et l'ouverture des valves d'évacuation (menant au déversement d'eau non traitée directement au fleuve) n'a pas été quantifié dans cette analyse. Cet avantage exige qu'un nombre important de mesures de gestion des eaux pluviales soient mises en place dans un même secteur, ce qui dépasse le cadre de la présente étude.

Énergie évitée :

- Aucune donnée québécoise publiée n'a été répertoriée. Plusieurs études (notamment celles du CNRC –Liu et Baskaran (2003, 2005)) montrent que les toits verts améliorent la performance thermique des toitures (réduction des gains de chaleur l'été et des pertes de chaleur l'hiver). Une étude réalisée dans l'Ouest canadien indique une réduction de la demande énergétique due aux transferts de chaleur de 83-85 % durant l'été et le printemps et de 40-44 % durant l'automne et l'hiver, pour une moyenne annuelle

Hypothèses et détails des caractéristiques considérées

* Les hypothèses indiquées en italiques ont fait l'objet d'analyses de sensibilité ou de scénario.

globale de 66 %. Par ailleurs, les résultats des travaux de Liu et Baskaran (2003, 2005) montrent qu'à Toronto et à Ottawa, le toit vert extensif permet de réduire globalement (sur plus d'une année) de 47 à 50 % les échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, à raison de 70 à 90 % pour l'été et entre 10 à 30 % pour l'hiver (Liu et Baskaran, 2003). Vu la similarité entre les climats nord-ontariens et des grands centres urbains québécois, ces conclusions semblent exploitables dans le cadre de la présente modélisation. Il n'existe toutefois pas de corrélation chiffrable entre une réduction des échanges de chaleur et les économies résultantes en énergie soit de chauffage ou de climatisation. Cet élément a été très clairement spécifié par les représentants des toitures Soprema contactés pour l'étude. En effet, les échanges de chaleur mesurés ne s'appliquent qu'au toit. La réduction de la consommation énergétique est pour sa part dépendante d'un ensemble de facteurs, tels que l'isolation des murs, la fenestration, etc. Pour faire le lien entre réduction de la perte de chaleur par le toit et l'économie d'énergie, la fraction de la chaleur perdue par le toit a été utilisée (AEE, Internet).

À la lumière de ces considérations, l'énergie évitée grâce au toit vert a été estimée de la manière suivante :

- Répartition des sources énergétiques de chauffage résidentiel au Québec : 16 % mazout; 12 % gaz naturel; 72 % électricité. (données 2007, estimées en excluant les systèmes bivalents, les thermopompes, le bois, le charbon et le propane (OEE, 2009a)). Intensité énergétique moyenne : 0,58 GJ/m².an.
- 11 % des pertes de chaleur d'une maison québécoise moyenne sont attribuables au toit (AEE, Internet). Il est posé que le même taux de perte s'applique à la climatisation.
- Climatisation de source électrique seulement (par hypothèse). Intensité énergétique moyenne pour la climatisation résidentielle : 30,9 MJ/m².an (OEE, 2009a).
- 35 % des habitations sont pourvues d'un climatiseur (INSPQ, 2008).
- L'énergie évitée (chauffage et climatisation) ne s'applique qu'à un seul étage, directement sous le toit.
- Au Québec en période froide, la mise en place d'un toit vert permet approximativement 2 % de réduction de la consommation énergétique liée au chauffage d'une résidence moyenne (soit 11 % de 20 %). En période estivale, la mise en place d'un toit vert permet approximativement 9 % de réduction de la consommation énergétique liée à la climatisation d'une résidence moyenne (soit 11 % de 80 %).

Lors du démantèlement, il est considéré que toutes les composantes sont enlevées manuellement et jetées dans un conteneur au moyen d'un tube (aucune utilisation de grue ou de machinerie). Les matériaux enlevés sont transportés (50 km) vers un lieu d'enfouissement technique (LET).

2. Toit réfléchissant

- Modélisé à partir du système Soprarstar (Soprema™) comprenant une membrane d'étanchéité Soprafix™, une membrane de finition Soprarstar HD™ blanche (revêtement de paillettes d'ardoise blanche) et un enduit réfléchissant RNOVA™ (enduit élastomère acrylique latex blanc). Il existe d'autres types de membranes réfléchissantes, mais elles n'ont pas été soumises à l'analyse.
- Un scénario impliquant une membrane EPDM blanche a également été réalisé. Voir Annexe C pour les détails.

Membrane de bitume élastomère :

- Toutes les matières composant la membrane de bitume élastomère sont vierges (selon représentant de la compagnie Soprema).
- Soudures au chalumeau : il a été posé qu'une bombonne de 10 kg de propane est nécessaire.

Système réfléchissant :

- Enduit réfléchissant (RNOVA™) appliqué à la totalité de la surface du toit (Solar Reflectance Index (SRI) initial : 112).
- Toutes les matières composant le système réfléchissant sont posées être vierges, comme pour la membrane de bitume élastomère (information fournie par Soprema).
- Pour maintenir le SRI du toit, il est recommandé que l'enduit réfléchissant soit réappliqué au besoin (à tous les 5 ans environ selon le représentant de Soprema). L'entretien modélisé comprend donc une application d'enduit RNOVA™ tous les 5 ans.
- Durée de vie de 21 ans (moyenne pour une membrane de bitume élastomère).

Entretien : Prado et Ferreira (2005) ont démontré qu'une toiture réfléchissante perd 15 % de son efficacité dès la première année d'installation. Il faut donc l'entretenir, la brosser ou l'arroser pour qu'elle conserve ses propriétés. Dans le cas de la membrane Soprarstar, l'application d'une couche d'enduit réfléchissant RNOVA à chaque 5 ans est suggérée par la compagnie Soprema.

Hypothèses et détails des caractéristiques considérées

* Les hypothèses indiquées en italiques ont fait l'objet d'analyses de sensibilité ou de scénario.

Énergie évitée :

- Aucune donnée québécoise n'a été répertoriée. Paroli et Gallagher (2008) mentionnent que les toits blancs réduisent la demande en énergie en été, mais peuvent être désavantageux en hiver, puisque la chaleur solaire est alors dissipée dans l'atmosphère. Ils ajoutent que « Néanmoins, étant donné que le soleil est bas dans le ciel, la perte thermique par réflexivité peut avoir peu d'influence. De plus, les journées étant plus courtes en hiver, le toit reçoit moins d'énergie; la perte due à la réflexivité s'en trouve donc réduite. Enfin, l'accumulation de neige sur la couverture élimine totalement la réflexivité de la membrane. » Par ailleurs, Synnefra *et al.* (2007) montrent qu'un toit dont la réflectance solaire est de 0,85 engendre une réduction de 46 % de la charge de climatisation par rapport à un toit conventionnel « noir » (réflectance de 0.2), en été à New-York. Vu la similarité entre le climat estival new-yorkais et montréalais, ces conclusions auraient pu s'appliquer dans le cadre de la présente modélisation. Cependant, le maintien de la cohérence entre les méthodes de calcul et de modélisation du toit vert et du toit blanc rend l'utilisation de cette donnée inadéquate. Par conséquent, une donnée concernant les flux de chaleur dans le toit blanc a été recherchée. Suehrcke *et al.* (2008) parlent d'un gain de chaleur net évité par les toits blancs dans un contexte australien. Selon ces auteurs, environ 30 % de la chaleur qui le traverse le toit en période estivale est réduit par la mise en place d'un toit blanc. **Il est certain que ce résultat est fonction de l'isolation du toit.** Par contre, cette donnée permet de calculer l'énergie évitée de manière cohérente avec le toit vert.
- À la lumière de ces considérations, l'énergie évitée grâce au toit réfléchissant a été estimée de la manière suivante :
 - Aucune économie ni augmentation de la consommation énergétique liée au chauffage.
 - Climatisation de source électrique seulement (par hypothèse). Intensité énergétique moyenne pour la climatisation résidentielle : 30,9 MJ/m².an (OEE, 2009a)
 - 35 % des habitations sont pourvues d'un climatiseur (INSPQ, 2008).
 - L'énergie de climatisation évitée ne s'applique qu'à un seul étage, directement sous le toit.
 - Au Québec en période estivale, la mise en place d'un toit réfléchissant permet approximativement 3 % de réduction de la consommation énergétique liée à la climatisation d'une résidence moyenne (soit 11 % de 30 %).

Lors du démantèlement, il est considéré que toutes les composantes sont enlevées manuellement et jetées dans un conteneur ou un tube (aucune utilisation de grue ou de machinerie). Les matériaux enlevés sont transportés (50 km) vers un lieu d'enfouissement technique (LET).

3. Mur végétalisé

- Culture des plants en serre : infrastructures négligées.
- Plants de vigne vierge à tous les 0,5 m.
- Excavation effectuée manuellement.
- Le sol d'origine n'est pas utilisable pour la culture de végétaux. Il est envoyé à l'enfouissement, dans un dépôt de matériaux secs. Il est remplacé par de la terre noire sur 15 cm de profond (0,57 m³).
- *Une fertilisation (engrais chimique tout usage de type 20-20-20) est effectuée lors de la plantation*.*
- Arrosage (0,5 L/plant) 10 fois durant la première année uniquement.
- L'entretien n'implique aucune consommation d'énergie ou de matériaux (tiges coupées au sécateur, aucune utilisation de paillis ou d'engrais).
- Durée de vie non considérée, car les tiges peuvent servir à renouveler la plantation, sans avoir recours à de nouveaux plants cultivés en serre.
- **Traitement d'eau évité (maximum)** : toutes les précipitations absorbées par le sol à la base du mur végétalisé auraient autrement été captées par les égouts municipaux.
- **Énergie évitée** : aucune donnée n'ayant été trouvée sur la quantité d'énergie de climatisation potentiellement évitée par la présence de végétation sur les murs extérieurs d'une maison, ce paramètre a été négligé.
- Le démantèlement n'implique pas de consommation de matière ou d'énergie (travail manuel) et les plants sont réutilisés. Aucun impact associé au réaménagement du terrain, car entièrement fonction de l'utilisation subséquente.

Hypothèses et détails des caractéristiques considérées

* Les hypothèses indiquées en italiques ont fait l'objet d'analyses de sensibilité ou de scénario.

4. Aménagement végétalisé

- Culture des plants en serre : infrastructures négligées.
- Plants installés à tous les 0,10 m². Composés à majorité de plantes vivaces adaptées au climat québécois.
- Excavatrice requise pour préparer la plate-bande sur une profondeur de 0,5 m (excavation de 12,5 m³).
- Le sol d'origine n'est pas utilisable pour la culture de végétaux. Il est envoyé à l'enfouissement, dans un dépôt de matériaux secs. Il est remplacé par de la terre noire sur 50 cm de profond (12,5 m³).
- *L'implantation inclut une fertilisation de départ (approximée par un engrais chimique tout usage de type 20-20-20)*, un arrosage de 0,5L/plant et un ajout de 1,25 m³ (25 m² x 5 cm) de paillis de cèdre.*
- Chaque année, 5 % des plants sont remplacés (annuelles ou plantes mortes)
- L'entretien inclut l'arrosage (0,25 L/plant, 10 fois par année et l'ajout de 1,25 m³ (25 m² x 5 cm) de paillis de cèdre aux deux ans. *La fertilisation (engrais chimiques tout usage de type 20-20-20, cinq fois par année) a également été évaluée**
- **Traitement d'eau évité (maximum)** : toutes les précipitations absorbées par la zone végétalisée auraient autrement été captées par les égouts municipaux.
- **Énergie évitée** : aucune donnée n'ayant été trouvée sur la quantité d'énergie de climatisation potentiellement évitée par la présence d'aménagements végétalisés au pourtour d'une maison, ce paramètre a été négligé.
- Le démantèlement n'implique pas de consommation de matière ou d'énergie (travail manuel) et les plants sont réutilisés. Aucun impact associé au réaménagement du terrain, car entièrement fonction de l'utilisation subséquente.

5. Arbre

- Culture en pépinière estimée équivalente à celle d'un arbre de Noël (Couillard *et al.*, 2009). Comprend 4 ans de culture en pépinière et 10 ans en champ.
- Arbre de grande taille (2 m) livré en motte.
- Excavatrice requise pour préparer le terrain (1 m³).
- Le sol d'origine (1 m³) n'est pas utilisable pour la culture de végétaux. Il est envoyé à l'enfouissement, dans un dépôt de matériaux secs.
- 25 % du trou est rempli par de la terre noire (0,25 m³)
- *Une fertilisation de départ (approximée par un engrais chimique tout usage de type 20-20-20)* et un arrosage important (20 L) sont effectués lors de la plantation. Un arrosage sans engrais (10 L, 25 fois par an durant les deux premières années) est aussi imputé à l'étape d'implantation.*
- L'entretien n'inclut que l'ajout de 0,05 m³ de paillis de cèdre (1 m² x 5 cm) aux deux ans. Aucune fertilisation n'est nécessaire une fois l'arbre établi (Jardin Botanique de Montréal, 2008). Il est posé que l'émondage se fait manuellement. Le transport et la fin de vie des branches coupées sont exclus.
- Durée de vie de l'arbre non spécifiée. Posée à plus de 30 ans
- **Traitement d'eau évité (partiel)** : toutes les précipitations absorbées par le sol à la base de l'arbre (1 m) auraient autrement été captées par les égouts municipaux. Les arbres apportent également un effet de rétention d'eau (lors de faibles pluies) par une interception des précipitations dans le feuillage. Cet aspect n'a cependant pas été modélisé vu la nature spécifique des volumes d'eau retenus (type d'arbre, maturité, période de l'année, intensité des pluies...)
- **Énergie évitée** : aucune donnée n'ayant été trouvée sur la quantité d'énergie de climatisation potentiellement évitée par la présence d'un arbre près d'une maison, ce paramètre a été négligé.
- La fin de vie d'un arbre est complexe à modéliser dans un cadre générique. D'abord, sa durée de vie peut s'étendre bien au-delà des 30 ans couverts par l'étude. Et dans la mesure où il doit être abattu, l'énergie requise pour son transport est extrêmement variable, dépendant de la taille et de la densité de l'arbre (fonction des essences et des caractéristiques du terrain). Enfin, il existe plusieurs avenues de valorisation du bois : il peut être déchiqueté et employé comme paillis, composté, brûlé dans un foyer domestique ou encore dans un incinérateur/gazéificateur avec récupération de chaleur, production d'électricité ou même production de carburant alternatif. Toutes ces possibilités présentent des charges et des bénéfices environnementaux bien différents qui, s'ils étaient quantifiés, ne seraient pas représentatifs de la moyenne des arbres coupés en territoire urbain au Québec. Devant toutes ces incertitudes, il a été jugé préférable de ne pas modéliser la fin de vie.

Hypothèses et détails des caractéristiques considérées

* Les hypothèses indiquées en italiques ont fait l'objet d'analyses de sensibilité ou de scénario.

6. Revêtement réfléchissant

- Le type de revêtement réfléchissant étudié implique un resurfaçage d'une aire de stationnement asphaltée existante par une couche « mince » (75 mm) de ciment Portland blanc (*Whitetopping*). Il existe de plus en plus d'autres types de revêtements réfléchissants (agrégats pâles ou pavés ayant un albédo élevé), mais ils n'ont pas été soumis à l'analyse
- La technologie comprend la scarification de l'ancienne surface, le ciment Portland renforcé de fibres de polypropylène (3 kg/m³).
- La scarification de l'asphalte se fait avec une fraiseuse manuelle qui consomme 5 litres de diesel pour couvrir l'aire de stationnement.
- Il a été estimé que l'énergie nécessaire pour mettre en place la couche de ciment est considérée équivalente à celle requise pour la finition d'asphalte (0,190 MJ/m²).
- Pas d'armature métallique. La réalisation des traits de scie a été négligée.
- Densité du ciment Portland : 1,44 t/m³
- L'entretien n'implique aucune consommation de matière ou d'énergie.
- Durée de vie de 20 ans.
- **Traitement d'eau évité** : le revêtement réfléchissant ne change pas la quantité d'eau captée par les égouts municipaux.
- **Énergie évitée** : aucune énergie de climatisation n'est évitée par la présence de pavés réfléchissants près d'une maison.
- Lors du démantèlement, seule la couche superficielle de ciment est enlevée et envoyée en DMS. Il est considéré que la couche asphaltée sous-jacente est apte à recevoir un autre resurfaçage.

7. Revêtement perméable

- Modélisation basée sur les pavés Subterra (PermaconTM), supposant une installation permettant une infiltration complète. Il existe d'autres types de revêtement perméables, mais ils n'ont pas été soumis à l'analyse.
- Le système implanté n'implique pas l'installation de bordures de béton, de géotextile ou de drain. Toute l'eau infiltrée est considérée absorbée par le sol (impliquant que le sol sous-jacent ait une perméabilité de 15 mm/h).
- Pavés de béton 80 mm épais avec 6 % d'ouverture (pour le drainage de la surface pavée).
- Matériel de remplissage des joints : agrégats (1-10 mm); Lit de pose : couche de 50 mm d'agrégats (1-10 mm); Fondation : couche de 100 mm d'agrégats (3-25 mm); Sous-fondation : 100 mm d'agrégats grossiers. Tous les agrégats ont été modélisés par le processus ecoinvent « Gravel, crushed, at mine/CH »
- Densité des pavés de béton : 2 300 kg/m³
- La compaction de la fondation et du lit de pose est équivalente à la préparation de la fondation granulaire pour les stationnements en enrobés bitumineux de référence.
- La pose des blocs se fait manuellement.
- L'entretien n'implique aucune consommation d'énergie ou de matériaux (pas de remplacement de pavés).
- Durée de vie de 20 ans.
- **Traitement d'eau évité (maximum)** : toutes les précipitations tombant sur la surface du stationnement sont absorbées par le sol et auraient autrement été captées par les égouts municipaux. Note : les eaux de stationnement qui pénètrent dans le sol peuvent contenir des polluants et ainsi contaminer les sols et la nappe phréatique. Cet aspect n'a pas été quantifié, mais a été pris en compte dans l'interprétation.
- **Énergie évitée** : aucune énergie de climatisation n'est évitée par la présence de pavés perméables près d'une maison.
- Lors du démantèlement, les pavés de béton et les couches d'agrégat sont excavés et envoyés à un DMS.

8. Jardin pluvial

- Culture des plants en serre : infrastructures négligées.
- Jardin pluvial conçu pour collecter les eaux du toit et, s'il y a lieu, les eaux de ruissellement d'une aire de stationnement privée. Dimensions dépendantes des conditions spécifiques du terrain. Pour la modélisation, les dimensions ont été calculées à partir des considérations suivantes :
 - Terrain avec 5 % de pente, sol limoneux (ni sableux, ni argileux).

Hypothèses et détails des caractéristiques considérées

* Les hypothèses indiquées en italiques ont fait l'objet d'analyses de sensibilité ou de scénario.

- Toit disposant de gouttières : toute l'eau recueillie par la toiture de 100 m² est dirigée vers le jardin pluvial + l'eau tombant sur l'espace de stationnement de 14,3 m².
- Le stationnement (s'il y en a un) est conçu de manière à ce que les précipitations ruissellent en totalité dans la tranchée.
- Dimensions obtenues :
 - 25 m² pour collecter les eaux du toit seulement;
 - 28,6 m² pour collecter les eaux du toit et du stationnement.
- Excavatrice requise pour préparer le jardin pluvial. Bien que l'installation finie soit de 0,15 cm de profondeur par rapport au niveau initial du terrain, il a été estimé qu'une excavation de 0,65 m était nécessaire pour remplacer le sol d'origine sur une profondeur de 0,5 m par de la terre noire.
- Une partie du sol d'origine sert à créer la berme (soit 4,3 m³ ou 3,75 m³ selon avec ou sans stationnement), le reste n'est pas utilisable pour la culture de végétaux. Il est envoyé à l'enfouissement, dans un dépôt de matériaux secs.
- Plants installés à tous les 0,10 m². Composés à majorité de plantes vivaces adaptées au climat québécois.
- *L'implantation inclut une fertilisation de départ (approximée par un engrais chimique tout usage de type 20-20-20)**, un arrosage de 0,5L/plant et un ajout de 5 cm de paillis de cèdre sur toute la surface du jardin.
- Étant donné qu'il s'agit de plantes vivaces, il est posé que seulement 1 % des plants est remplacé annuellement (plantes mortes).
- L'entretien inclut *la fertilisation (engrais chimiques tout usage de type 20-20-20, une seule fois par année)** et l'ajout de 5 cm de paillis de cèdre sur toute la surface du jardin aux deux ans.
- **Traitement d'eau évité (maximum) :**
 - Toutes les précipitations du toit alimentées au jardin pluvial sont absorbées par le sol. Inversement, si le jardin pluvial n'existait pas, toute l'eau aurait été dirigée vers les égouts municipaux.
 - Toutes les précipitations tombant directement sur la zone végétalisée ou provenant de l'aire de stationnement (s'il y a lieu) sont absorbées et auraient autrement été captées par les égouts municipaux.
 - Le fait que le jardin pluvial retarde l'arrivée des précipitations au réseau d'égouts municipaux lors d'orages violents, et ainsi évite la surcharge de l'usine d'épuration et l'ouverture des valves d'évacuation (menant au déversement d'eau non traitée directement au fleuve) n'a pas été quantifié dans cette analyse. Cet avantage exige qu'un nombre important de mesures de gestion des eaux pluviales soient mises en place dans un même secteur, ce qui dépasse le cadre de la présente étude.
- **Énergie évitée :** aucune donnée n'ayant été trouvée sur la quantité d'énergie de climatisation potentiellement évitée par la présence d'aménagements végétalisés (tel qu'un jardin pluvial) au pourtour d'une maison, ce paramètre a été négligé.
- Le démantèlement n'implique pas de consommation de matière ou d'énergie (travail manuel) et les plants sont réutilisés. Aucun impact associé au réaménagement du terrain, car entièrement fonction de l'utilisation subséquente.
- Les plantes n'ont pas concentré de contaminants en provenance des eaux de ruissellement dans leurs tissus.

9. Tranchée d'infiltration

- Tranchée conçue pour collecter les eaux du toit et, s'il y a lieu, les eaux de ruissellement d'une aire de stationnement privée. Dimensions dépendantes des conditions spécifiques du terrain. Pour la modélisation, un dimensionnement sommaire a été effectué à partir des considérations suivantes :
 - Le stationnement (s'il y en a un) est conçu de manière à ce que les précipitations ruissellent en totalité dans la tranchée.
 - Conductivité hydraulique de 10⁻⁵ m/s (ex. : sol composé de sable grossier à fin). Note : cette conductivité est la limite nécessaire pour permettre l'infiltration des eaux dans le sol selon le dimensionnement effectué.
 - Tranchée remplie de gravier moyen à grossier, porosité de 0,4
 - Nappe phréatique à plus de 2-3 m de profondeur (pour respecter l'épaisseur minimale de 1-2 m entre le toit de la nappe et le fond de la structure d'infiltration).
 - Extrême quotidien de pluie de 60mm (basé sur les données de pluviométrie à Montréal, Environnement Canada), tombant en 3 heures.
 - Toit disposant de gouttières : toute l'eau recueillie par la toiture de 100 m² est dirigée vers la tranchée + l'eau tombant sur l'espace de stationnement de 14,3 m²
- Dimensions obtenues (à partir du volume de stockage nécessaire dans la tranchée (Grand Lyon, 2008a) :

Hypothèses et détails des caractéristiques considérées

* Les hypothèses indiquées en italiques ont fait l'objet d'analyses de sensibilité ou de scénario.

- Pour collecter les eaux du toit seulement : Longueur : 12 m, profondeur : 1,1 m; largeur : 1,2 m
- Pour collecter les eaux du toit et du stationnement : Longueur : 13 m, profondeur : 1,15 m; largeur : 1,2 m
- Excavatrice requise pour préparer la tranchée (15,8 m³ ou 17,9 m³).
- Le sol d'origine (15,8 m³ ou 17,9 m³) est envoyé à l'enfouissement, dans un dépôt de matériaux secs.
- Tranchée non recouverte (sans revêtement végétal ni pavés).
- L'entretien n'implique aucune consommation de matière ou d'énergie.
- Durée de vie posée à 30 ans (c.-à-d. que sur la période d'étude considérée, il n'est pas nécessaire d'effectuer des modifications majeures aux installations)
- **Traitement d'eau évité (maximum) :**
 - Toutes les précipitations du toit alimentées à la tranchée d'infiltration sont stockées et absorbées par le sol. Inversement, si la tranchée n'existait pas, toute l'eau aurait été dirigée vers les égouts municipaux.
 - Toutes les précipitations tombant directement sur la surface de la tranchée ou provenant de l'aire de stationnement (s'il y a lieu) sont absorbées et auraient autrement été captées par les égouts municipaux.
 - Le fait que la tranchée d'infiltration retarde l'arrivée des précipitations au réseau d'égouts municipaux lors d'orages violents, et ainsi évite la surcharge de l'usine d'épuration et l'ouverture des valves d'évacuation (menant au déversement d'eau non traitée directement au fleuve) n'a pas été quantifié dans cette analyse. Cet avantage exige qu'un nombre important de mesures de gestion des eaux pluviales soient mises en place dans un même secteur, ce qui dépasse le cadre de la présente étude.
- **Énergie évitée :** aucune énergie de climatisation n'est évitée par la présence d'une tranchée d'infiltration près d'une maison.
- Lors du démantèlement, le gravier est excavé et envoyé à un DMS. De la terre est transportée pour remplir le trou et redonner au terrain son état « initial ».

10. Puits d'infiltration

- Puits conçu pour collecter les eaux du toit et, s'il y a lieu, les eaux de ruissellement d'une aire de stationnement privée. Dimensions dépendantes des conditions spécifiques du terrain. Pour la modélisation, un dimensionnement sommaire a été effectué à partir des considérations suivantes :
 - Conductivité hydraulique de 5×10^{-5} m/s (ex. : sol composé de sable grossier à fin). Note : cette conductivité est la limite nécessaire pour permettre l'infiltration des eaux dans le sol selon le dimensionnement effectué.
 - Puits rempli de gravier moyen à grossier, porosité de 0,4.
 - Nappe phréatique à plus de 2-3 m de profondeur (pour respecter l'épaisseur minimale de 1-2 m entre le toit de la nappe et le fond de la structure d'infiltration).
 - Extrême quotidien de pluie de 60 mm (basé sur les données de pluviométrie à Montréal, Environnement Canada), tombant en 3 heures.
 - Toit disposant de gouttières : toute l'eau recueillie par la toiture de 100 m² est dirigée vers le jardin pluvial + l'eau tombant sur l'espace de stationnement de 14,3 m².
- Dimensions obtenues (déterminées à partir du volume de stockage nécessaire dans le puits, Grand Lyon (2008a)) :
 - Pour collecter les eaux du toit seulement : Diamètre : 1,7 m, profondeur : 2,5 m
 - Pour collecter les eaux du toit et du stationnement : Diamètre : 1,8 m, profondeur : 2,75 m
- Excavatrice requise pour préparer le puits (5,9 m³ ou 7 m³).
- Le sol d'origine (5,9 m³ ou 7 m³) est envoyé à l'enfouissement, dans un dépôt de matériaux secs.
- Couvercle en aluminium (diamètre du puits, posé à 5 mm d'épaisseur).
- L'entretien n'implique aucune consommation de matière ou d'énergie.
- Durée de vie posée à 30 ans (c.-à-d. que sur la période d'étude considérée, il n'est pas nécessaire d'effectuer des modifications majeures aux installations)
- **Traitement d'eau évité (maximum) :** toutes les précipitations du toit alimentées au puits sont stockées et absorbées par le sol. Inversement, si le puits n'existait pas, toute l'eau aurait été dirigée vers les égouts municipaux.
- Le fait que le puits d'infiltration retarde l'arrivée des précipitations au réseau d'égouts municipaux lors d'orages violents, et ainsi évite la surcharge de l'usine d'épuration et l'ouverture des valves d'évacuation (menant au déversement d'eau non traitée directement au fleuve) n'a pas été quantifié dans cette analyse. Cet avantage exige qu'un nombre important de mesures de gestion des eaux pluviales soient mises en place dans un même secteur, ce qui dépasse le cadre de la présente étude.

Hypothèses et détails des caractéristiques considérées

* Les hypothèses indiquées en italiques ont fait l'objet d'analyses de sensibilité ou de scénario.

- **Énergie évitée** : aucune énergie de climatisation n'est évitée par la présence d'un puits d'infiltration près d'une maison.
- Lors du démantèlement, le gravier est excavé et envoyé à un DMS. De la terre est transportée pour remplir le trou et redonner au terrain son état « initial ».

Hypothèses générales

- Densité du sol : 1,8 t/m³ (aucun facteur de foisonnement n'a été employé entre le sol en place et excavé).
- Densité gravier (toutes dimensions confondues) : 1 700 kg/m³
- Densité du diesel : 0,847 kg/l
- Densité de la terre : 1250 kg/m³ (http://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique)
- Lorsque les distances de transport sont inconnues, des distances moyennes ont été posées :
 - 100 km pour le transport des composantes et matières premières vers les usines de production. (Processus ecoinvent « Transport, Lorry >32 t, EURO3/RER »)
 - 50 km pour le transport des équipements et la livraison des matériaux jusqu'au lieu d'implantation de la mesure. (Processus ecoinvent « Transport, Lorry 16-32t, EURO3/RER »)
- Le mélange d'approvisionnement énergétique québécois actuel restera inchangé sur toute la période temporelle couverte par l'étude (30 ans).

Toit de référence (multicouche asphalte et gravier)

- Durée de vie : 15 ans.
- Aucun entretien considéré (pas d'ajout de gravier ou de bitume).
- Lors du démantèlement, toutes les composantes du toit multicouche asphalte et gravier sont transportées (50 km) à un lieu d'enfouissement technique (LET).

Stationnement de référence (enrobés bitumineux)

- Densité enrobés bitumineux : 2 350 kg/m³
- Enrobé bitumineux comprenant 68 % granulats, 23 % sable, 3 % calcaire et 6 % bitume.
- Durée de vie : 20 ans.
- Aucun entretien considéré (pas d'usage de scellant ou de nettoyeur).
- Lors du démantèlement, le gravier de fondation et l'enrobé bitumineux usagé sont transportés (50 km) à un lieu d'enfouissement technique (LET).

Annexe C :
Méthode d'évaluation des impacts (ÉICV)

IMPACT 2002+

The LCIA methodology IMPACT 2002+ (Joliet et al. 2003) proposes a combined midpoint/damage-oriented approach. Figure A shows the overall scheme of the IMPACT 2002+ framework, linking all types of LCI results via 14 midpoint categories (human toxicity, respiratory effects, ionizing radiation, ozone layer depletion, photochemical oxidation, aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, terrestrial acidification/nutritation, aquatic acidification, aquatic eutrophication, land occupation, global warming, non-renewable energy, mineral extraction) to four damage categories (human health, ecosystem quality, climate change, resources). An arrow symbolizes that a relevant impact pathway is known and quantitatively modelled based on natural science. Impact pathways between midpoint and damage levels that are assumed to exist, but that are not modeled quantitatively due to missing knowledge are represented by dotted arrows.

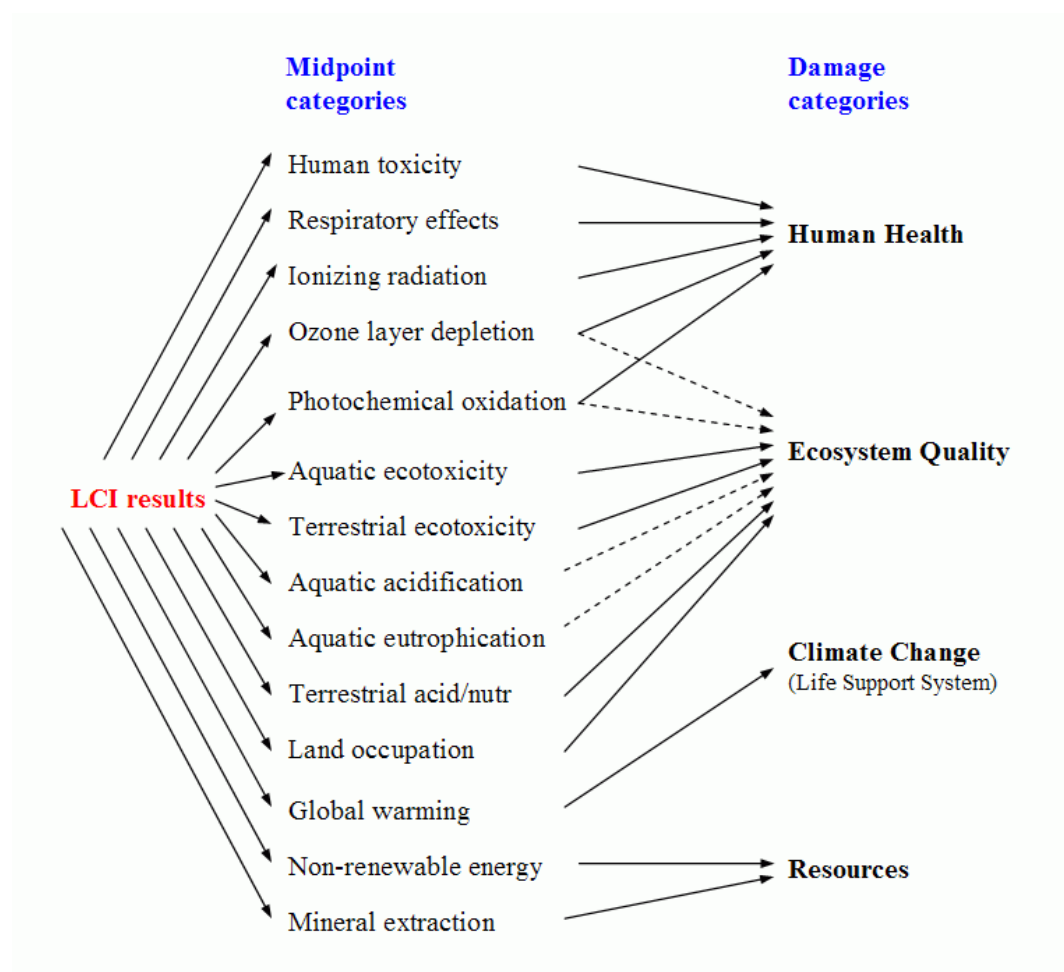


Figure A: Overall scheme of IMPACT 2002+, linking the life cycle inventory results (LCI) and the damage categories, via the midpoint categories.

New concepts and methods for the comparative assessment of human toxicity and ecotoxicity were developed for the IMPACT 2002+ methodology. For other categories, methods have been transferred or adapted mainly from the Eco-indicator 99 (Goedkoop et al. 2000) and the CML 2002 (Guinée et al. 2002) methods, from the IPCC list (IPCC 2001), the USEPA ODP list (EPA) and ecoinvent database (ecoinvent Centre, 2005).

By the following we shortly describe the main assessment characteristics for midpoint and damage categories, as well as related normalization factors.

Midpoint categories are:

1. Human Toxicity measures the impact on human life related to carcinogen and non-carcinogens toxic effects caused by pollutants emitted into the environment and eventually reaching the humans through air inhalation, drinking water and food ingestion. Carcinogen and non-carcinogens are separated in two indicators in the analysis realised in the present study.
2. Respiratory Inorganics are air pollutants such as fine particles that affect human lungs. These pollutants are massively released by heavy industries and road traffic.
3. Ionizing Radiation measures the impact on human life caused by substances emitting ionizing radiations. These substances are mainly released by the nuclear energy sector.
4. Ozone Layer Depletion measures the potential in reducing the stratospheric ozone layer and thus the increase in UV light reaching the earth. It can therefore generate impact on human life such as skin cancer and cataract, and damage terrestrial life and aquatic ecosystems. The pollutants destroying the ozone layer, such as CFCs are emitted by some specific industrial processes, in need, for example, for strong cooling systems.
5. Photochemical Oxidation measures the effects on human health (and eventually on crop growth) associated with tropospheric ozone formation (also called summer smog formation). Pollutants responsible for tropospheric ozone such as NO_x and Volatiles Organic Carbons (VOCs) are mainly emitted by road traffic and industrial activities.
6. Aquatic Ecotoxicity measures the effects on fresh water ecosystems in term of loss in biodiversity caused by toxic emissions emitted into the environment.
7. Terrestrial Ecotoxicity measures the effects on terrestrial ecosystems in term of loss in biodiversity caused by toxic emissions emitted into the environment.
8. Aquatic Acidification literally refers to processes increasing the acidity in aquatic systems that may lead to declines in fish populations and disappearances of species. These substances such as airborne nitrogen (NO_x and NH₃) and sulfur oxides (SO_x) are mainly emitted by heavy oil and coal combustion for electricity production, and by road traffic.
9. Aquatic Eutrophication measures the potential of nutrient enrichment of the aquatic environment, which generates a growth of biomass that pushes this ecosystem population out of balance: decrease of oxygen leads to further fish kills and disappearance of bottom fauna. These nutrients are mainly associated with phosphorus and nitrogen compounds in detergents and fertilizers.
10. Terrestrial Acidification and Nutrification measure the potential change in nutrient level and acidity in the soil leading to a change of the natural condition for plant growth and competition. A reduction of species are observed with an excess of nutrients and a decrease in forest health by soil acidification (effect on biodiversity). Acidifying and nutrifying substances such as NO_x, SO_x and NH₃ are massively released by heavy industries and road traffic.
11. Land Occupation measures the reduction of biodiversity caused by the use of land. Agriculture (farming) is the main contributor to this category.
12. Global Warming covers a range of potential impacts resulting from a change in the global climate. It is the measured heat-trapping effect of a greenhouse gas (GHG) released in the atmosphere. CO₂ emitted by fossil fuel combustion is the main GHG.

13. Primary Non-Renewable Energy measures the amount of energy extracted from the earth contained in the fossil energy carrier (coal, oil and natural gas) or uranium ore. These resources are subject to depletion. Electricity, heat and fuel production and consumption are the main consumer of fossil fuels and uranium ore.
14. Mineral Extraction measures the surplus of energy associated with the additional effort required to extract minerals from lower concentration ore mines.

The indicators of each midpoint impact category have units expressed in kg of substance equivalent that are linked to the following 4 damage indicators (Table A2 and A3):

- human health (DALY). Human toxicity (carcinogenic and non-carcinogenic effects), respiratory effects (inorganics and organics), ionizing radiation, and ozone layer depletion all contribute to human health damages.
- ecosystems quality ($\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$), measure how far the anthropogenic processes affect the natural development of the occurrence of species within their habitats. Their impact can directly be determined as a Potentially Disappeared Fraction over a certain area and during a certain time per kg of emitted substance, expressed in $[\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{year} / \text{kg emitted}]$. It includes the contribution of terrestrial acidification/nitrification, land occupation and terrestrial + aquatic ecotoxicity.
- resources depletion (MJ primary non-renewable energy) and. The two midpoint categories contributing to this endpoint are mineral extraction and non-renewable energy consumption. Damages due to mineral resource extraction are specified according to Eco-indicator 99, with the concept of surplus energy (in [MJ]). This is based on the assumption that a certain extraction leads to an additional energy requirement for further mining of this resource in the future, caused by lower resource concentrations or other unfavorable characteristics of the remaining reserves (Goedkoop et al. 2000).
- climate change (kg CO_2 equivalent into air). From the authors' point of view, the modeling up to the damage of the impact of climate change on ecosystem quality and human health is not accurate enough to derive reliable damage characterization factors. The interpretation, therefore, directly takes place at midpoint level, which can be interpreted as damage on life support systems that deserve protection for their own sake. The global warming is considered as a stand-alone endpoint category with units of $[\text{kg-eq CO}_2]$, which is normalized in the next step. The assumed time horizon is also 500 years to account for both short-term and long-term effects as there is little evidence that global warming effects will decrease in the future

Table A2: Number of substances covered, source and units of IMPACT 2002+ (v2.1).

LCI coverage	Midpoint category	Reference	Midpoint reference substance	Damage unit	Damage unit	Normalized damage unit
769	Human toxicity (carcinogens + non-carcinogens)	IMPACT 2002	kg chloroethylene _{-eq}	Human Health	DALY	point
12	Respiratory (inorganics)	Ecoindicator 99	kg chloroethylene _{-eq}			
25	Ionizing radiations	Ecoindicator 99	kg PM2.5 _{-eq}			
95	Ozone layer depletion	USEPA and Ecoindicator 99	Bq Carbon-14 _{-eq}			
130	Photochemical oxidation	Ecoindicator 99	kg CFC-11 _{-eq}			
393	Aquatic ecotoxicity	IMPACT 2002	kg ethylene _{-eq}	Ecosystem Quality	PDF·m ² ·yr	point
393	Terrestrial ecotoxicity	IMPACT 2002	kg triethylene glycol _{eq} into water			
5	Terrestrial acidification/nutrfication	Ecoindicator 99	kg triethylene glycol _{eq} into soil			
15	Land occupation	Ecoindicator 99	m ² organic arable land			
10	Aquatic acidification	CML 2002	kg SO ₂ - _{eq}	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>
10	Aquatic eutrophicatio n	CML 2002	kg SO ₂ - _{eq}	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>
77	Global warming	IPCC 2001 (500 yr)	kg CO ₂ - _{eq}	Climate Change (life supporting functions)	kg CO ₂ - _{eq} into air	
9	Non-renewable energy	Ecoinvent	MJ/kg crude oil _{-eq}	Ressource depletion	MJ primary non-renewable energy	
20	Mineral extraction	Ecoindicator 99	MJ/kg iron _{-eq}			

Table A3: Units of midpoint impact categories and conversion factors between the midpoint categories and the damage categories of IMPACT 2002+ (v2.1).

Midpoint category	Damage factor	Unit
Carcinogens	2.80 ^E -6	DALY/kg chloroethylene _{-eq}
Non-carcinogens	2.80 ^E -6	DALY/kg chloroethylene _{-eq}
Respiratory (inorganics)	7.00E-4	DALY/kg PM2.5 _{-eq}
Ionizing radiations	2.10E-10	DALY/Bq Carbon-14 _{-eq}
Ozone layer depletion	1.05E-3	DALY/kg CFC-11 _{-eq}
Photochemical oxidation	2.13E-6	DALY/kg ethylene _{-eq}
Aquatic ecotoxicity	5.02E-5	PDF·m ² ·yr/kg triethylene glycol _{-eq} into water
Terrestrial ecotoxicity	7.91E-3	PDF·m ² ·yr/kg triethylene glycol _{-eq} into soil
Terrestrial acidification/nitrification	1.04	PDF·m ² ·yr/kg SO ₂ - _{eq}
Aquatic acidification	1	kg SO ₂ - _{eq} /kg SO ₂ - _{eq}
Aquatic eutrophication	1	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ - _{eq} /kg PO ₄ ⁻⁻⁻ - _{eq}
Land occupation	1.09	PDF·m ² ·yr/m ² organic arable land
Global warming	1	kg CO ₂ - _{eq} /kg CO ₂ - _{eq}
Non-renewable energy	45.8	MJ/kg crude oil _{-eq}
Mineral extraction	5.10E-2	MJ/kg iron _{-eq}

The normalization is performed by dividing the impact scores by the respective normalization factors (cf. Table A4). A normalization factor represents the total impact of the specific category divided by the total European population. The total impact of the specific category is the sum of the products between all European emissions and the respective damage factors.

The normalized characterization factor is therefore determined by the ratio of the impact per unit of emission divided by the total impact of all substances of the specific category, per person per year. The unit of all normalized characterization factors is therefore $[\text{point}/\text{unit}_{\text{emission}}] = [\text{pers}\cdot\text{yr}/\text{unit}_{\text{emission}}]$, i.e. it is the impact caused by a unitarian emission, which is equivalent to the impact generated by the given number of persons during 1 year. Additional details are provided by Humbert et al. (2005).

Table A4: Normalization factors relative to the four damage categories for Western Europe

Damage categories	Normalization factors	Units
Human Health	0.0071 ⁴⁸	DALY/point
Ecosystem Quality	13'700	PDF.m ² .yr/point
Climate Change	9'950	kg CO ₂ into air/point
Resources	152'000	MJ/point

Bibliography

ecoinvent Centre (2005). ecoinvent data v1.2, Final reports ecoinvent 2000 No. 1-16. ISBN 3-905594-38-2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.

Goedkoop M., Effting S., et al. (2000). The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Amersfoort, The Netherlands, PRé Consultants B.V.: 22.

Guinée J.B., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., Koning A. d., Oers L. v., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., Bruijn H. d., Duin R. v., Huijbregts M.A.J. (2002), Handbook on Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002.

Humbert, S., M. Margni and O. Jolliet (2005). IMPACT 2002+ User Guide: Draft for version 2.1. Lausanne, Switzerland, EPFL: 33.

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 Journal of LCA, 8 (6) p. 324-330

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

D.1 Critères d'évaluation de la qualité des données

Le Tableau D-1 présente les critères de qualification des données utilisés. Ces critères concernent la fiabilité et la représentativité des données. Il est à noter que cette étude est simplifiée dans l'objectif de ne pas alourdir le processus d'évaluation des impacts du cycle de vie, mais représente une excellente vue d'ensemble du type de données d'inventaire collectées.

Tableau D-1 : Critères de qualification des données (quantités et processus)

Pointages	Critères de qualification de la <u>fiabilité</u> des données (quantités)
1	Données vérifiées mesurées ou calculées sur le terrain - Cette donnée remplit le critère « fiabilité/précision » requis pour le cas à l'étude
2	Données vérifiées, en partie issues d'hypothèses ou Données non vérifiées issues de mesures (documents fournis par le mandataire ou littérature) – cette donnée est jugée suffisamment précise/fiable par l'équipe d'analystes pour le cas à l'étude
3	Données non vérifiées, en partie issues d'hypothèses ou Estimation de qualité (effectuée par un expert) – cette donnée est jugée utilisable par l'équipe d'analystes, mais sa fiabilité/précision pourrait être améliorée
4	Données estimées de façon grossière - Cette donnée ne remplit pas le critère « fiabilité/précision » requis pour le cas à l'étude
Pointages	Critères de qualification de la <u>représentativité</u> des données (processus)
1	Données de terrain (du cadre à l'étude), de laboratoire - Cette donnée remplit le critère « représentativité » requis pour le cas à l'étude
2	Bonne représentativité géographique et/ou technologique du processus sélectionné – cette donnée est jugée suffisamment représentative par l'équipe d'analystes pour le cas à l'étude
3	Données relatives au même procédé ou matériau, mais se référant à une technologie différente (ex. : processus représentatif disponible dans la banqueecoinvent) – Cette donnée est jugée utilisable par l'équipe d'analystes, mais sa représentativité pourrait être améliorée
4	Représentativité géographique et/ou technologique inadéquate. La donnée recherchée n'est pas facilement accessible, utilisation d'un autre processus comme approximation - Cette donnée ne remplit pas le critère « représentativité » requis pour le cas à l'étude

D.2 Résultats –contribution et qualité des données

Le Tableau D-3 présente un résumé de l'évaluation de la qualité des données.

La qualité des données « fiabilité » fait référence à la quantification des flux (matière et énergie, distances de transport, quantités de rejets). La qualité des données « représentativité » fait plutôt référence à la validité géographique et technologique et la complétude des modules de données (processus) génériques sélectionnés. Enfin, la contribution potentielle à l'impact réfère à l'influence du processus ou du paramètre évalué sur les résultats (établi sur sa contribution moyenne aux différentes catégories de dommage à l'étude). Pour simplifier la lecture, un code de couleur a été ajouté et présenté au Tableau D-2.

Tableau D-2 : Critères de contribution et de qualité des données

Contribution		Qualité	
0-5 %	Contribution potentiellement faible ou négligeable	1	Remplit le critère pour le cas à l'étude
6-10 %	Contribution potentiellement influente	2	Jugée suffisamment représentative
11-50 %	Forte contribution potentielle	3	Jugée utilisable, mais pouvant être améliorée
51-100 %	Très forte contribution potentielle	4	Ne remplit pas le critère pour le cas à l'étude

Rappelons que de manière générale, une note de « 1 » correspond à une très bonne évaluation, alors qu'une note de « 4 » correspond à une donnée qui devrait être améliorée afin de remplir les différents critères de qualité. Ainsi, les processus pour lesquels la qualité des données est considérée comme étant limitée ou insuffisante sont surlignés en rouge (note « 4 ») et les processus pouvant être améliorés sont en orangé (note « 3 »).

En ce qui a trait à la contribution, une plage de valeurs est présentée. Elle indique la contribution minimale et maximale du processus évalué en fonction des six indicateurs considérés (c.-à-d. *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes*, *Changement climatique*, *Ressources*, *Acidification aquatique* et *Eutrophisation aquatique*). La contribution globale du processus évalué (couleur de la case) a été établie en fonction de sa contribution maximale, tous indicateurs confondus.

Tableau D-3 : Contribution des processus et qualité des données

Étape du cycle de vie / Processus	Contribution à l'impact global de la mesure	Qualité	
		Fiabilité	Représentativité
		(Quantité)	(processus)
1. Toit vert extensif (45 ans, fertilisation au besoin)	100%		
Implantation	2-43%	2	2
Exploitation	9-89%	3	3
Démantèlement (100% Enfouissement LET*)	0-18%	2	3
Toit asphalte et gravier évité	5-90%	2	2
Implantation	100%		
Substrat de culture*	22-56%	2	2
Membranes*	22-48%	2	2
Fertilisation, engrais tout usage	0-21%	2	3
Culture de vivaces en serre*	4-15%	2	2
Propane	0-1%	4	3
Exploitation	100%		
Traitement d'eau évité	29-96%	3	4
Réduction de chauffage	1-68%	4	2
Fertilisation, engrais tout usage	1-45%	2	3
Réduction de la climatisation	0-2%	4	2
2. Toit réfléchissant (25 ans, membrane bitume élastomère avec entretien)	100%		
Implantation	5-13%	2	3
Exploitation	45-83%	2	3
Démantèlement (100% Enfouissement LET*)	0-9%	2	3
Toit asphalte et gravier évité	9-42%	2	2
Implantation	100%		
Membranes*	70-91%	2	3
Enduit réfléchissant (2 couches initiales)*	7-29%	2	3
Propane	1-2%	4	3
Exploitation	100%		
Enduit réfléchissant (1 couche/5 ans)*	99-100%	2	3
Réduction de la climatisation	0-1%	4	2
3. Mur végétalisé (fertilisation 1 an)	100%		
Implantation	1-76%	2	2
Exploitation (100% Traitement d'eau évité)	24-99%	3	4
Démantèlement (exclu)	N/A	N/A	N/A
Implantation	100%		
Terre noire*	1-49%	2	2
Fertilisation, engrais tout usage	0-99%	2	3
Enfouissement en DMS*	0-43%	2	3
Culture de vivaces en serre*	0-10%	2	2
Eau potable	0-1%	2	2

* Les procédés suivis d'un astérisque comprennent, en plus de la production, le transport des matériaux jusqu'au lieu d'implantation de la mesure.

Tableau D-3 : Contribution des processus et qualité des données (suite)

Étape du cycle de vie / Processus	Contribution à l'impact global de la mesure	Qualité	
		Fiabilité	Représentativité
		(Quantité)	(processus)
4. Aménagement végétalisé (fertilisation 1 an)	100%		
Implantation	2-97%	2	2
Exploitation	3-98%	3	3
Démantèlement	N/A	N/A	N/A
Implantation	100%		
Terre noire*	1-43%	2	2
Fertilisation, engrais tout usage	0-97%	2	3
Enfouissement de sol en DMS*	1-52%	2	3
Culture de vivaces en serre*	1-10%	2	2
Excavatrice	0-1%	2	2
Paillis*	0-2%	2	2
Eau potable	0-1%	2	2
Exploitation	100%		
Traitement d'eau évité	38-99%	3	4
Culture de vivaces en serre*	0-26%	2	2
Paillis*	1-34%	2	2
Eau potable	0-1%	2	2
5. Arbre (fertilisation 1an)	100%		
Implantation	4-99%	3	2
Exploitation	1-96%	4	4
Démantèlement	N/A	N/A	N/A
Implantation	100%		
Fertilisation, engrais tout usage	0-98%	2	3
Enfouissement de sol en DMS*	1-71%	2	3
Terre noire*	0-19%	2	2
Arbre, culture en champ (10 ans)*	1-11%	3	3
Excavatrice	0-2%	2	2
Paillis*	0-1%	2	2
Eau potable	0-1%	2	2
Exploitation	100%		
Traitement d'eau évité	53-99%	4	4
Paillis*	1-47%	2	2

* Les procédés suivis d'un astérisque comprennent, en plus de la production, le transport des matériaux jusqu'au lieu d'implantation de la mesure.

Tableau D-3 : Contribution des processus et qualité des données (suite)

Étape du cycle de vie / Processus	Contribution à l'impact global de la mesure	Qualité	
		Fiabilité	Représentativité
		(Quantité)	(processus)
6. Revêtement réfléchissant	100%		
Implantation	9-61%	2	2
Exploitation (aucune)	N/A	NA	N/A
Démantèlement	1-3 %	2	2
Stationnement asphalté évité	38-89%	2	2
Implantation	100%		
Ciment Portland*	96-100%	2	2
Fibres de polypropylène*	0-4%	2	2
Machinerie	0-1 %	4	3
Démantèlement	100%		
Enfouissement du gravier en DMS*	96-99%	2	3
Excavatrice	1-4%	2	2
7. Revêtement perméable	100%		
Implantation	2-34%	2	3
Exploitation (100% Traitement d'eau évité)	4-88%	3	4
Démantèlement	1-10%	2	2
Stationnement asphalté évité	9-81%	2	2
Implantation	100%		
Gravier*	33-58%	2	2
Blocs de ciment*	42-67%	2	3
Machinerie	0-1 %	3	3
Démantèlement	100%		
Enfouissement du gravier en DMS*	97-99 %	2	3
Excavatrice	1-3 %	2	2
8. Jardin pluvial (eau du toit, fertilisation 1 an)	100%		
Implantation	1-55%	2	3
Exploitation	45-99%	3	4
Démantèlement	N/A	N/A	N/A
Implantation	100%		
Fertilisation, engrais tout usage	0-97%	2	3
Terre noire*	1-43%	2	2
Enfouissement de sol en DMS*	1-52%	2	3
Culture de vivaces en serre*	0-9%	2	2
Excavatrice	0-2 %	2	2
Paillis*	0-2 %	2	2
Eau potable	0-1 %	2	2
Exploitation	100%		
Traitement d'eau évité	83-100%	3	4
Paillis*	0-15%	2	2
Culture de vivaces en serre*	0-2 %	2	2

* Les procédés suivis d'un astérisque comprennent, en plus de la production, le transport des matériaux jusqu'au lieu d'implantation de la mesure.

Tableau D-3 : Contribution des processus et qualité des données (suite)

Étape du cycle de vie / Processus	Contribution à l'impact global de la mesure	Qualité	
		Fiabilité	Représentativité
		(Quantité)	(processus)
9. Tranchée d'infiltration (eau du toit)	100%		
Implantation	0-30%	2	3
Exploitation (100% Traitement d'eau évité)	35-99%	2	3
Démantèlement	0-35%	2	3
Implantation	100%		
Gravier*	12-24%	2	2
Enfouissement de sol en DMS*	44-53%	2	3
Excavatrice	0-2 %	2	2
Démantèlement	100%		
Terre noire*	43-51%	2	2
Enfouissement du gravier en DMS*	48-57 %	2	3
Excavatrice	0-1 %	2	2
10. Puits d'infiltration (eau du toit)	100%		
Implantation	0-41%	2	2
Exploitation (100% Traitement d'eau évité)	40-99%	3	4
Démantèlement	0-19%	2	3
Implantation	100%		
Gravier*	38-40 %	2	2
Couvercle en aluminium*	31-33 %	3	2
Enfouissement de sol en DMS*	22-29 %	2	3
Excavatrice	0-1%	2	2
Démantèlement	100%		
Terre noire*	43-51%	2	2
Enfouissement du gravier en DMS*	48-57 %	2	3
Excavatrice	0-1 %	2	2

* Les procédés suivis d'un astérisque comprennent, en plus de la production, le transport des matériaux jusqu'au lieu d'implantation de la mesure.