



# CIRAIG<sup>MC</sup>

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



## RAPPORT TECHNIQUE

### ANALYSE DU CYCLE DE VIE COMPARATIVE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POTENTIELS DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE ET DU VÉHICULE CONVENTIONNEL DANS UN CONTEXTE D'UTILISATION QUÉBÉCOIS

AVRIL 2016

*Préparé pour*

#### **Hydro-Québec**

Direction principale – Environnement et Affaires corporatives  
et Direction – Électrification des transports  
Vice-présidence - Affaires corporatives et Secrétariat général  
75 boul. René-Lévesque ouest, 2<sup>e</sup> étage  
Montréal (Québec) H2Z 1A4

Ce rapport a été préparé par le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits procédés et services (CIRAIG).

Fondé en 2001, 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 un des plus importants centres d'expertise en cycle de vie sur le plan international. Il collabore avec de nombreux centres de recherche à travers le monde et participe activement à l'Initiative sur le cycle de vie du Programme des Nations Unies sur l'Environnement (PNUE) et de la Société de Toxicologie et de Chimie de l'Environnement (SETAC).

Le CIRAIG a développé une expertise reconnue en matière d'outils du cycle de vie incluant l'analyse environnementale du cycle de vie (ACV) et l'analyse sociale du cycle de vie (ASCV). Complétant cette expertise, ses travaux de recherche portent également sur l'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) et d'autres outils incluant les empreintes carbone et eau. Ses activités comprennent des projets de recherche appliquée touchant plusieurs secteurs d'activités clés dont l'énergie, l'aéronautique, l'agroalimentaire, la gestion des matières résiduelles, les pâtes et papiers, les mines et métaux, les produits chimiques, les télécommunications, le secteur financier, la gestion des infrastructures urbaines, le transport ainsi que de la conception de produits « verts ».

## **AVERTISSEMENT**

À l'exception des documents entièrement réalisés par le CIRAIG, comme le présent rapport, toute utilisation du nom du CIRAIG ou de Polytechnique 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 Polytechnique Montréal.

## **CIRAIG**

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

[www.ciraig.org](http://www.ciraig.org)

Rapport soumis par :  
BUREAU DE LA RECHERCHE ET CENTRE DE  
DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE (B.R.C.D.T.)  
POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

Université de Montréal Campus  
C.P. 6079, Succ. Centre-ville  
Montréal (Québec) H3C 3A7

## Équipe de travail

---

### Réalisation

Pierre-Olivier Roy, Ph.D.

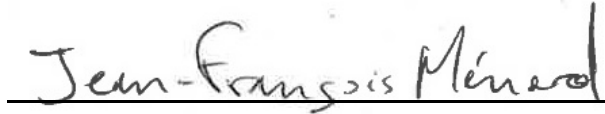
Réalisation de l'ACV



---

Jean-François Ménard

Assistance technique et révision



---

### Collaboration

Sophie Fallaha, M. Sc. A., B. Ing.

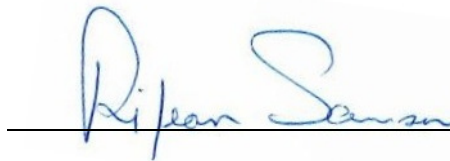
Directrice des relations industrielles de la  
Chaire ICV, CIRAIG

Coordination du projet

### Direction du projet

Réjean Samson, ing., Ph.D.

Directeur du CIRAIG



---

**Revue critique par un comité de parties prenantes**

Gontran Bage, ing., Ph. D.

Présidence du comité de révision

Directeur, Groupe-conseil Stratégie et performance, Raymond Chabot Grant Thornton

Jacques Duval

Révision externe

Chroniqueur automobile

Pierre Beaudoin

Révision externe

Directeur principal, services techniques, CAA-Québec

Victor Poudelet, ing. jr, M. Sc. A.

Conseiller principal, Groupe-conseil Stratégie et performance, Raymond Chabot Grant Thornton



## Sommaire

---

Hydro-Québec a mandaté le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) afin qu'il réalise une analyse de cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécoise. L'objectif d'Hydro-Québec étant de déterminer dans quelle mesure l'utilisation d'un véhicule électrique alimenté par l'électricité québécoise peut s'avérer avantageuse sur le plan environnemental, comparativement au véhicule conventionnel (c.-à-d. avec un moteur à combustion interne) et ce, sur le cycle de vie des véhicules étudiés.

Le cycle de vie des véhicules inclut les étapes de production des composantes du véhicule et des batteries, de transport du lieu de production jusqu'à l'utilisateur, d'utilisation et de la fin de vie du véhicule. L'unité fonctionnelle sur laquelle l'étude se base est :

**« Se déplacer au Québec sur 150 000 km avec un véhicule mis sur le marché en 2013 ».**

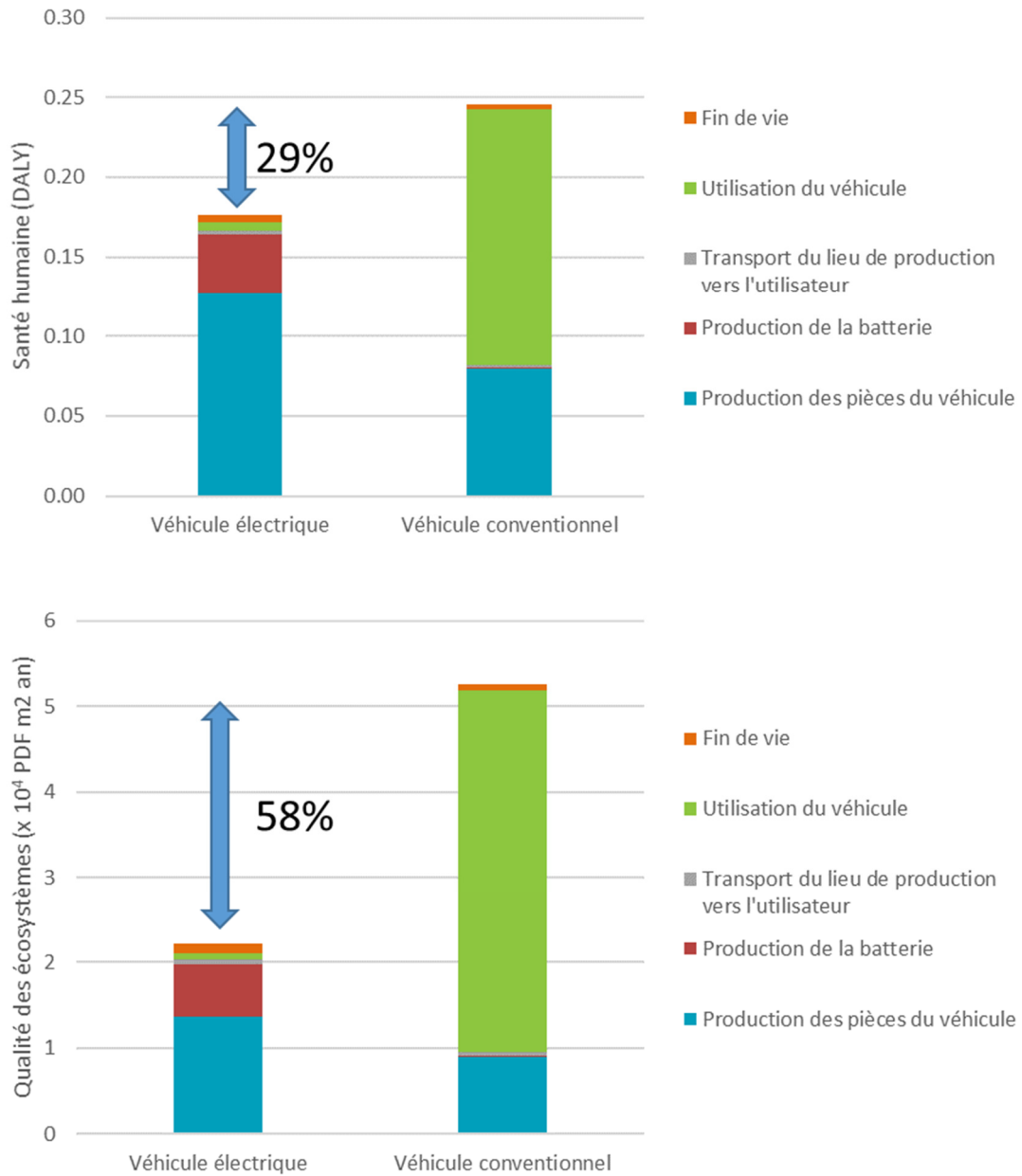
Compte tenu des habitudes de déplacements des automobilistes québécois, cette unité fonctionnelle correspond à la distance moyenne parcourue en 10 ans, à raison de 40 km/jour, soit 15 000 km/an.

Il est important de noter que l'analyse comparative des impacts environnementaux potentiels **ne cible pas un modèle de véhicule conventionnel ou électrique en particulier, mais cherche à représenter une gamme de véhicules représentatifs de ceux en circulation sur les routes du Québec.**

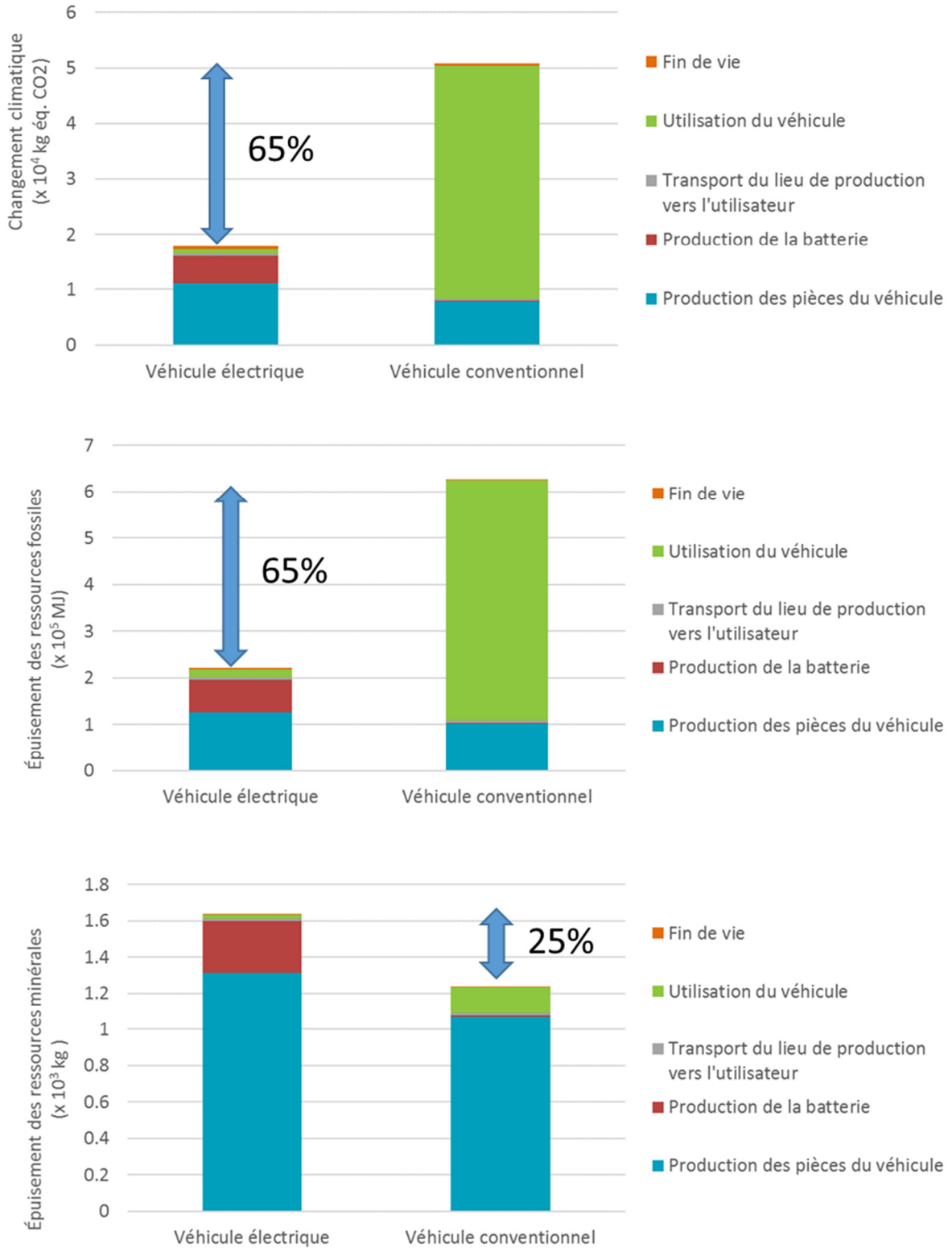
Les impacts potentiels évalués dans le cadre de la présente étude couvrent les catégories d'impacts suivantes : *Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Changement climatique, Épuisement des ressources fossiles et Épuisement des ressources minérales.*

L'analyse (voir Figure S-1 et Figure S-2) a mis en évidence que les impacts environnementaux potentiels du **véhicule électrique** utilisé au Québec sont principalement associés à la production des composantes du véhicule (particulièrement la production du moteur électrique) et de la batterie. L'utilisation du véhicule électrique contribue peu aux impacts environnementaux potentiels du cycle de vie, et ce, **en raison de la faible intensité d'émissions de gaz à effet de serre (GES) attribuable au bouquet électrique québécois.**

L'analyse a également mis en évidence la contribution importante de l'utilisation du **véhicule conventionnel** à ses impacts environnementaux potentiels. Ainsi, **les émissions de GES issues de la combustion de l'essence contribuent de façon importante aux impacts** de ce type de véhicule pour les catégories *Changement climatique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes.* La production du véhicule conventionnel, dont plusieurs composantes sont communes au véhicule électrique, s'avère également un contributeur important aux impacts environnementaux potentiels, mais de façon moindre que son utilisation.



**Figure S-1 : Analyse comparative entre les véhicules électrique et conventionnel après 150000 km (catégories de dommages)**



**Figure S-2 : Analyse comparative entre les véhicules électrique et conventionnel après 150000 km (catégories d'impacts)**

La comparaison des impacts environnementaux potentiels associés aux deux types de véhicules montre l'importance relative de l'étape de production du véhicule électrique et de l'étape d'utilisation du véhicule conventionnel (voir Figure S-1 et S-2).

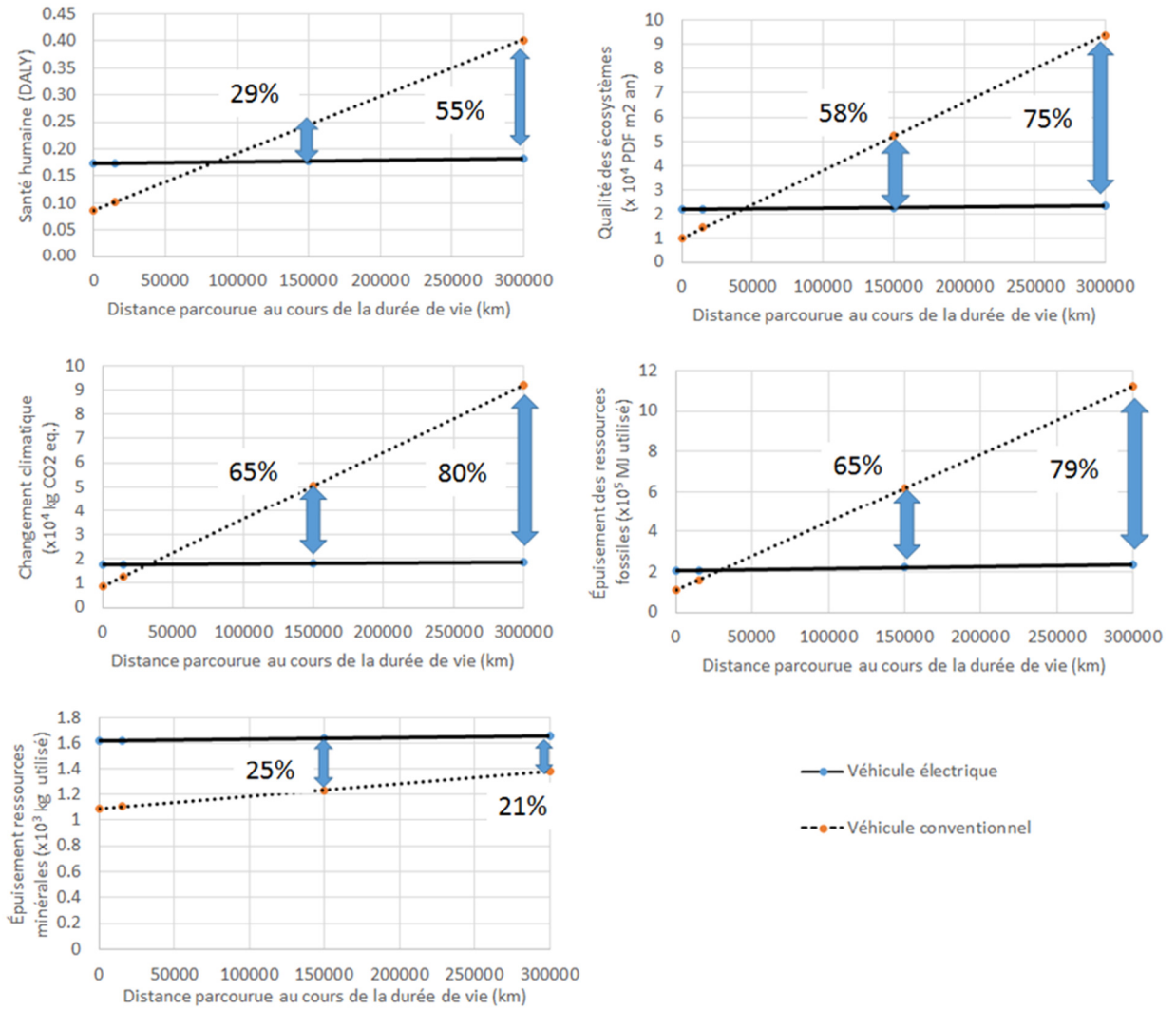
Par conséquent, le véhicule électrique présente des impacts potentiels plus grands que le véhicule conventionnel au moment de son achat (le ratio du résultat pour le véhicule conventionnel sur celui pour le véhicule électrique varie entre 150% et 200% selon la catégorie considérée; voir Figure S-3), mais les impacts associés à l'utilisation du véhicule conventionnel sont tels que les impacts sur le cycle de vie complet pour ce véhicule deviennent généralement plus grands que ceux du véhicule électrique à partir d'une certaine distance parcourue (voir Figure S-3).

Ainsi, l'analyse montre qu'au-delà d'une distance parcourue (point d'équivalence) variant entre 29 000 km (soit, en moyenne, près de 2 ans d'utilisation) et 85 300 km (soit, en moyenne, près de 6 ans d'utilisation), les impacts potentiels du véhicule conventionnel dépassent ceux du véhicule électrique, à l'exception de la catégorie d'impact *Épuisement des ressources minérales* pour laquelle le véhicule conventionnel présente généralement un impact plus petit; seul un véhicule conventionnel plus lourd comparé à un véhicule électrique plus léger permettrait potentiellement d'inverser cette tendance.

Plusieurs facteurs peuvent faire varier les points d'équivalence entre les deux types de véhicules, parmi lesquels la masse des véhicules, leur efficacité énergétique, les conditions d'utilisation, etc. L'influence de ces facteurs a été évaluée de façon exhaustive dans le cadre de la présente étude.

Ainsi, après 150 000 km, le véhicule électrique présente des impacts potentiels de 29% à 65% inférieurs à ceux du véhicule conventionnel, selon les catégories d'impacts considérées. Après 300 000 km, les impacts du véhicule électrique sont de 55% à 80% inférieurs à ceux du véhicule conventionnel. Ces valeurs excluent les résultats de la catégorie *Épuisement des ressources minérales*.

À la lumière des résultats de la présente analyse, il est possible de conclure, **en considérant le cycle de vie complet** des deux types de véhicules étudiés, que le véhicule électrique représente un choix environnementalement préférable au véhicule conventionnel dans un contexte typique québécois, pour une distance parcourue de 150 000 km, à l'exception de la catégorie *Épuisement des ressources minérales*.



**Figure S-3 : Impacts potentiels en fonction de la distance parcourue par les véhicules durant leur durée de vie**

## Summary

---

Hydro-Québec asked the International Reference Centre for the Life Cycle of Products, Processes and Services (CIRAIG) to undertake a comparative life-cycle assessment of the potential environmental impacts of electric vehicles and conventional vehicles in the Québec context. The company's goal was to determine the degree to which the use of an electric vehicle powered by Québec electricity can be environmentally beneficial compared to a conventional vehicle (i.e., powered by an internal combustion engine) over their respective life cycles.

Vehicle life cycle includes the manufacturing of components and batteries, transportation from the plant to the user, use and end of life. The functional unit used for the study was:

***Drive 150,000 km in Québec using a vehicle released in 2013***

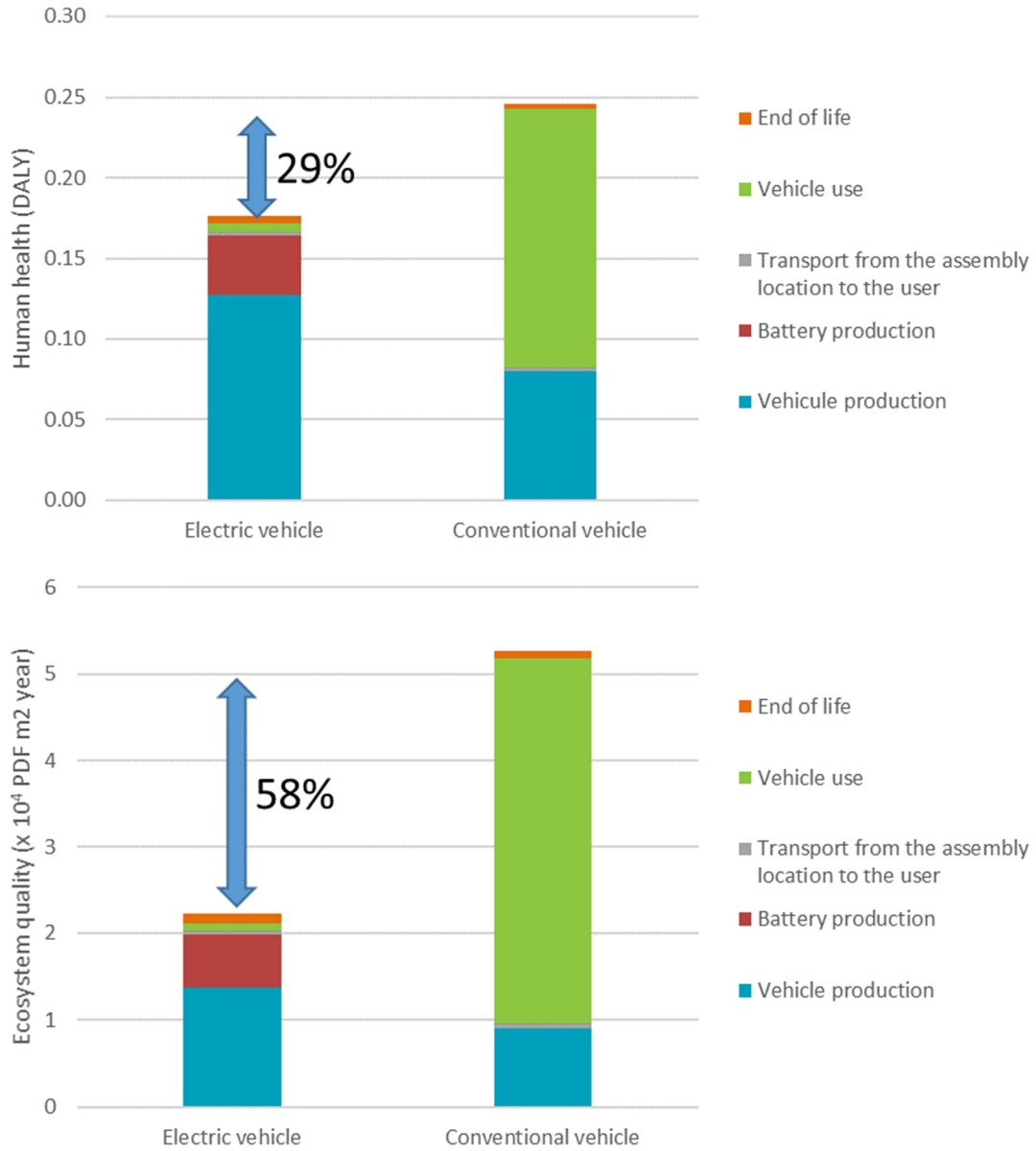
This functional unit was derived from the driving habits of Québec motorists and represents the average distance driven over 10 years, i.e., 40 km/day or 15,000 km/year.

It is important to note that the comparative analysis of potential environmental impacts **does not target specific models of conventional or electric vehicles. It is intended to represent the range of vehicles on Québec roads.**

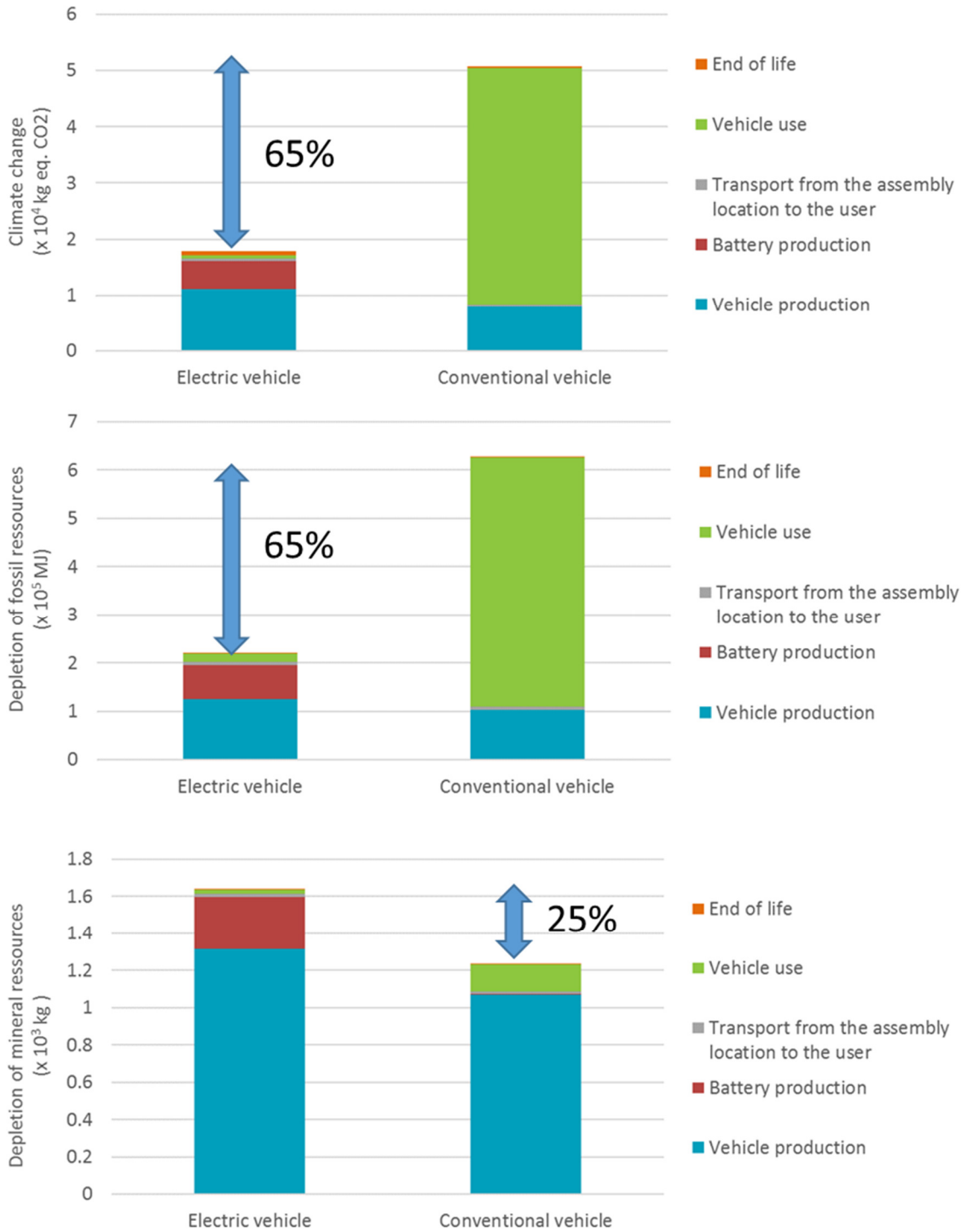
The potential impacts assessed in this study cover the following impact categories: *Human health, Ecosystem quality, Climate change, Depletion of fossil resources* and *Depletion of mineral resources*.

The analysis (see Figure S-1 and Figure S-2) showed that the potential environmental impacts of an **electric vehicle** used in Québec are primarily associated with the manufacturing of vehicle components (particularly the electric motor) and the battery. The use of an electric vehicle makes a small contribution to the potential environmental impact over its life cycle **due to the low greenhouse gas emissions attributable to the Québec electricity mix.**

The analysis also highlighted the significant contribution the use of a **conventional vehicle** makes to its potential environmental impacts. Thus, **the greenhouse gas emissions produced by fuel combustion make a significant contribution to the impacts** of this type of vehicle in the *Climate change, Human health* and *Ecosystem quality* impact categories. The production of conventional vehicles, which share a number of components with electric vehicles, also makes a significant contribution to the potential environmental impacts, but less so than use.



**Figure S-1: Comparative assessment of electric and conventional vehicles after 150,000 km – Impact categories**



**Figure S-2: Comparative assessment of electric and conventional vehicles after 150,000 km – Impact categories**

The comparison of the potential environmental impacts of the vehicle types shows the relative importance of the manufacturing of electric vehicles and the use of conventional vehicles (see Figure S-1 and Figure S-2).



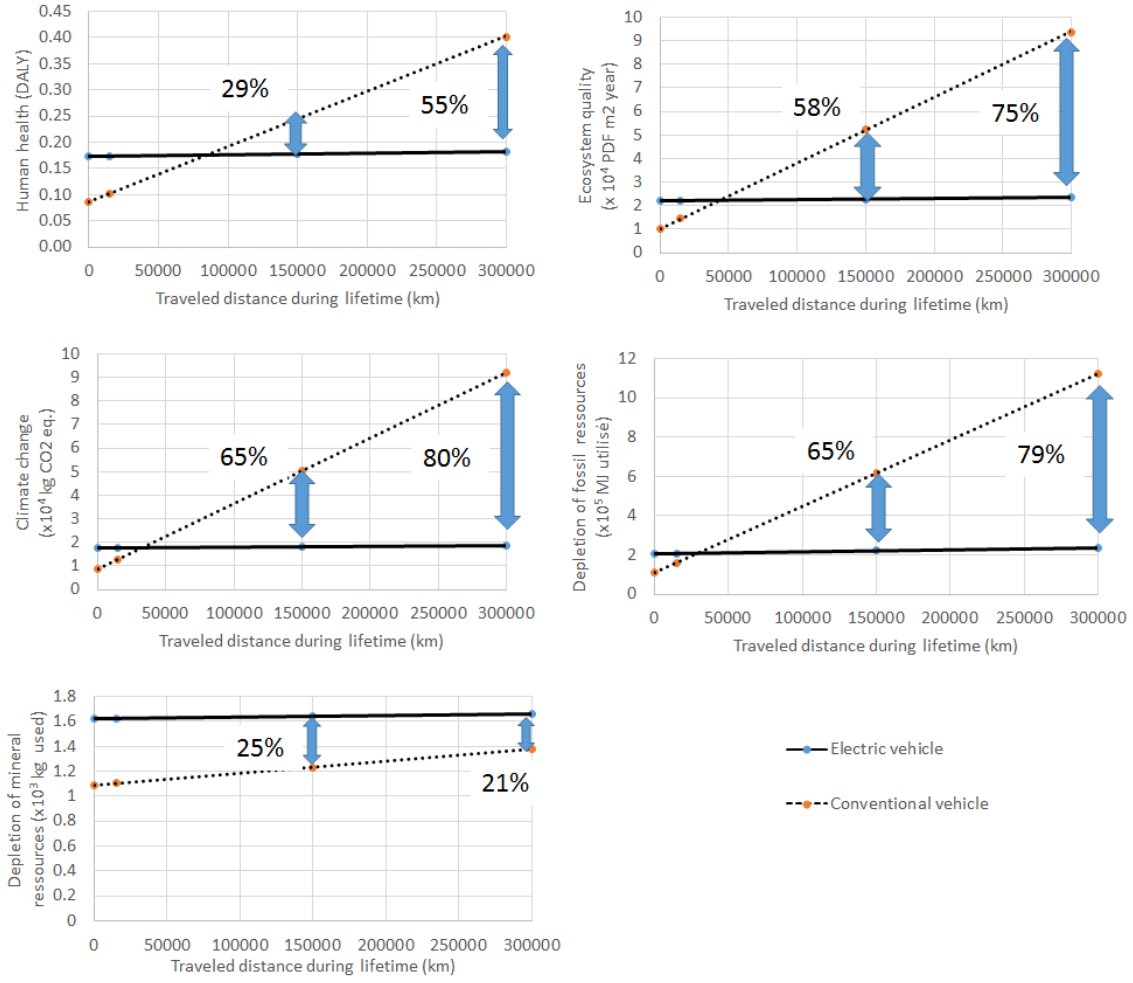
Thus, electric vehicles present larger potential impacts than conventional vehicles at the time of purchase (the ratio between conventional vehicles in relation to electric vehicles varies between 150 and 200%, depending on the category; see Figure S-3), but due to the impacts associated with using conventional vehicles, the full life-cycle impacts of using conventional vehicles generally exceed those of electric vehicles after a certain number of kilometres (see Figure S-3).

The analysis shows that above a distance traveled (equivalence point) varying between 29,000 km (i.e., an average of 2 years of use) and 85,300 km (i.e., an average of nearly 6 years of use), the potential impacts of conventional vehicles exceed those of electric vehicles, with the exception of the *Depletion of mineral resources* category, in which conventional vehicles generally have less impact; this trend is potentially reversed only when comparing a heavier conventional vehicle with a lighter electric vehicle.

A number of factors can alter the equivalence points between the two vehicle types, including vehicle mass, energy efficiency and use conditions. This study performed an exhaustive evaluation of the influence of these factors.

After 150,000 km, the potential impacts of electric vehicles are 29% to 65% lower than those of conventional vehicles, based on the impact categories studied. After 300,000 km, the potential impacts of electric vehicles are 55 to 80% lower than those of conventional vehicles. These values exclude the results of the *Depletion of mineral resources* category.

In light of the results of this analysis, it can be concluded that, **when considering the full life cycle** of the two vehicle types studied, electric vehicles represent an environmentally preferable choice in a typical Québec context, for a travelled distance of 150 000 km, with the exception of the *Depletion of mineral resources* category.



**Figure S-3: Potential impacts as a function of distance traveled over the vehicle's service life**

## TABLE DES MATIÈRES

ÉQUIPE DE TRAVAIL .....	III
SOMMAIRE .....	V
SUMMARY .....	X
LISTE DES TABLEAUX .....	XVIII
LISTE DES FIGURES .....	XIX
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES .....	XXI
<b>1 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2 MISE EN CONTEXTE.....</b>	<b>3</b>
2.1 CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE .....	3
2.2 CARACTÉRISTIQUES DU PARC DE VÉHICULES QUÉBÉCOIS .....	7
2.3 VÉHICULE 100 % ÉLECTRIQUE .....	10
2.3.1 Consommation énergétique du véhicule électrique.....	13
2.3.2 Recharge du véhicule 100% électrique .....	15
2.3.3 Fin de vie de la batterie de véhicule électrique.....	16
2.3.4 Fin de vie de la batterie de véhicule électrique : la disponibilité des ressources .....	17
2.4 VÉHICULE CONVENTIONNEL (ESSENCE) .....	18
2.4.1 Consommation de carburant.....	19
2.5 ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUE ET CONVENTIONNEL .....	20
2.5.1 Études d'ACV comparative entre un véhicule électrique et conventionnel.....	22
<b>3 MODÈLE D'ÉTUDE ACV.....</b>	<b>25</b>
3.1 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE ET APPLICATION ENVISAGÉE .....	25
3.2 FONCTION ET UNITÉ FONCTIONNELLE .....	25
3.3 TRAITEMENT DES FONCTIONS SECONDAIRES ET RÈGLES D'IMPUTATION.....	26
3.4 FRONTIÈRES DES SYSTÈMES .....	27
3.4.1 Processus inclus .....	27
3.4.2 Frontières géographiques et temporelles.....	33
3.5 SOURCES, HYPOTHÈSES ET DONNÉES D'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE (ICV) .....	33
3.6 ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX .....	36
3.7 INTERPRÉTATION.....	38
3.7.1 Analyse de l'inventaire.....	39
3.7.2 Évaluation de la qualité des données d'inventaire .....	39
3.7.3 Analyse de contribution .....	40
3.7.4 Analyse de cohérence et de complétude .....	40

3.7.5	<i>Analyses de sensibilité</i> .....	40
3.7.6	<i>Analyse d'incertitude</i> .....	42
3.8	REVUE CRITIQUE .....	42
<b>4</b>	<b>RÉSULTATS ET DISCUSSION</b> .....	<b>44</b>
4.1	PROFIL D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES VÉHICULES ÉLECTRIQUE ET CONVENTIONNEL .....	44
4.1.1	<i>Profil environnemental du véhicule électrique : catégories de dommages</i> .....	44
4.1.2	<i>Profil environnemental du véhicule électrique : catégories d'impacts complémentaires</i> .....	47
4.1.3	<i>Profil environnemental du véhicule conventionnel : catégories de dommages</i> .....	51
4.1.4	<i>Profil environnemental du véhicule conventionnel : catégories d'impacts complémentaires</i> .53	
<b>5</b>	<b>COMPARAISON DES VÉHICULES ÉLECTRIQUE ET CONVENTIONNEL</b> .....	<b>58</b>
5.1.1	<i>Analyse comparative : catégories de dommages</i> .....	58
5.1.2	<i>Analyse comparative : catégories d'impacts complémentaires</i> .....	59
5.1.3	<i>Mise en perspective</i> .....	61
5.2	QUALITÉ DES DONNÉES D'INVENTAIRE .....	63
5.3	ANALYSES DE SENSIBILITÉ.....	63
5.3.1	<i>Évaluation des impacts avec la méthode ReCiPe</i> .....	63
5.3.2	<i>Analyse sensibilité 2 – Masse des véhicules</i> .....	66
5.3.3	<i>Analyse sensibilité 3 – Type de conduite</i> .....	68
5.3.4	<i>Analyse sensibilité 4 – Changement de la batterie</i> .....	73
5.3.5	<i>Analyse sensibilité 5 – Efficacité de la borne de recharge</i> .....	76
5.3.6	<i>Analyse sensibilité 6 – Lieu de production des véhicules</i> .....	77
5.3.7	<i>Analyse sensibilité 7 – Type de batterie utilisée pour le véhicule électrique</i> .....	79
5.3.8	<i>Analyse sensibilité 8 – Inclusion de la route dans les frontières du système</i> .....	80
5.3.9	<i>Analyse sensibilité 9 – Fin de vie de la batterie</i> .....	81
5.4	RÉSUMÉ DES ANALYSES .....	83
5.5	LIMITES DE L'ACV .....	86
5.6	PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION .....	89
5.6.1	<i>Perspectives d'amélioration de la comparaison des systèmes</i> .....	89
<b>6</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>90</b>
<b>7</b>	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>92</b>
<b>ANNEXE A : Méthodologie de l'Analyse du cycle de vie</b> .....		<b>A-1</b>
<b>ANNEXE B : Détail de la méthode IMPACT World +</b> .....		<b>B-1</b>
<b>ANNEXE C : Détail du modèle ACV</b> .....		<b>C-1</b>
<b>ANNEXE D : Évaluation de la qualité des données d'inventaire</b> .....		<b>D-1</b>

**ANNEXE E : Résultats bruts..... E-1**  
**ANNEXE F : Revue critique..... F-1**

## Liste des tableaux

---

Tableau 2-1 : Consommation énergétique par source et par secteur d'activité au Québec en 2011 (résultats de calculs basés sur les statistiques du MERN, 2013) .....	3
Tableau 2-2 : Bouquet électrique québécois (Tirado-Seco et coll., 2014) .....	5
Tableau 2-3 : Description des véhicules (type automobile) conventionnels et 100 % électriques au Québec considérés.....	7
Tableau 2-4 : Caractéristiques du parc automobile (véhicules conventionnels) québécois.....	9
Tableau 2-5 : Caractéristiques des batteries adaptées pour le transport routier (Durand et coll. 2014) .....	10
Tableau 2-6 : Consommation du véhicule électrique en fonction des conditions climatiques québécoises (Hydro-Québec, 2013) .....	14
Tableau 2-7 : Consommation électrique de divers véhicules (Ressources naturelles Canada, 2013 ; 2015) .....	15
Tableau 2-8 : Autonomie et temps de recharge de la batterie (Durand et coll., 2014).....	16
Tableau 2-9 : Disponibilité des ressources métalliques (De Bruille, 2014) .....	18
Tableau 2-10 : Consommation de carburant de divers véhicules conventionnels au Canada en 2013 (Ressources naturelles Canada, 2013, 2015) .....	19
Tableau 2-11 : Résumé des études comparatives récentes (depuis 2012) entre les véhicules conventionnel et électrique.....	23
Tableau 3-1 : Processus inclus et exclus des frontières de l'ACV.....	30
Tableau 3-2 : Résumé des principales hypothèses pour le scénario de base .....	34
Tableau 3-3 : Résumé des diverses analyses de sensibilité.....	41
Tableau 3-4 : Membres constituants du comité de revue critique.....	42
Tableau 5-1 : Constituants principaux des véhicules .....	61
Tableau 5-2 : Facteur d'effet du chrome considéré par le modèle USEtox (employé par la méthode IMPACT World+) pour les effets cancérigènes associés à la santé humaine .....	72
Tableau 5-3 : Résumé des résultats des diverses analyses de sensibilité effectuées .....	84

## Liste des figures

---

Figure 2-1 : Consommation de l'énergie et types de carburants utilisés pour le transport des passagers et de marchandises au Québec en 2012 (Whitmore et coll. 2015). .....	4
Figure 2-2 : Distribution statistique des différents mix électriques nationaux telle que documentée dans la base de données d'inventaire du cycle de vie <i>ecoinvent</i> . .....	5
Figure 2-3 : Variation de l'empreinte carbone du véhicule électrique selon la composition du bouquet électrique du pays d'utilisation (Wilson, 2013). .....	6
Figure 2-4 : Perte de capacité de la batterie Li-ion d'un véhicule électrique en fonction du nombre de cycles (Lee et coll. 2015) .....	11
Figure 2-5 : Fraction des conducteurs américains dont les besoins en déplacement ne seraient plus satisfaits à la suite d'une perte de capacité de la batterie (Saxena et coll. 2015) .....	12
Figure 2-6 : Évaluation théorique de la distance cumulative potentiellement atteinte par un véhicule électrique à la suite d'une perte de capacité rendant l'autonomie de la batterie inférieure aux déplacements quotidiens de la majorité des conducteurs québécois. ....	13
Figure 2-7 : Les quatre grandes phases de l'ACV (ISO14040 :44). ....	21
Figure 3-1 : Frontières du système pour les véhicules électrique et conventionnel. ....	28
Figure 3-2 : Illustration simplifiée des éléments constitutifs d'une batterie destinée à un véhicule électrique (Ellingsen et coll. 2013). ....	29
Figure 3-3 : Catégories de dommages et catégories d'impacts de la méthode IMPACT World+. ....	37
Figure 4-1 : Profil environnemental du véhicule électrique (catégories de dommages). ....	46
Figure 4-2 : Profil environnemental complémentaire du véhicule électrique (catégories d'impacts). ....	49
Figure 4-3 : Profil environnemental du véhicule conventionnel (catégories de dommages). ....	52
Figure 4-4 : Profil environnemental complémentaire du véhicule conventionnel (catégories d'impacts). ....	54
Figure 4-5 : Évaluation des émissions de gaz à effet de serre en provenance de divers gisements pétroliers à travers le monde (IHS CERA, 2012) .....	56

Figure 5-1 : Analyse comparative entre les véhicules électrique et conventionnel (catégories de dommages). .....	59
Figure 5-2 : Analyse comparative entre les véhicules électrique et conventionnel (catégories d'impacts). .....	60
Figure 5-3 : Analyse comparative des véhicules électrique et conventionnel avec la méthode européenne ReCiPe. ....	65
Figure 5-4 : Analyse de sensibilité portant sur la masse des véhicules.....	67
Figure 5-5 : Analyse de sensibilité portant sur le type de conduite : distance parcourue uniquement.....	69
Figure 5-6 : Analyse de sensibilité portant sur le type de conduite : tous paramètres confondus .....	71
Figure 5-7 : Conséquences d'une modification du facteur d'effet du Cr(VI) sur la catégorie <i>Santé humaine</i> .....	73
Figure 5-8 : Conséquences d'un changement de la batterie sur les catégories considérées .....	75
Figure 5-9 : Variations de l'efficacité de la borne de recharge .....	76
Figure 5-10 : Changement du lieu de production des véhicules : du Japon aux États-Unis.....	78
Figure 5-11 : Variation du profil environnemental du véhicule électrique en fonction de la nature de la batterie utilisée .....	79
Figure 5-12 : Inclusion de la route dans les frontières des systèmes des véhicules .....	80
Figure 5-13 : Changement du scénario de fin de vie pour la batterie du véhicule électrique .....	82



## Liste des abréviations et sigles

---

ACV	Analyse du cycle de vie
BMB	« <i>Battery Management Board</i> »
BMS	« <i>Battery Management System</i> »
CC	Changement climatique (catégorie de dommage environnemental)
CIRAIG	Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
DALY	Disabled Adjusted Life Years, ou espérance de vie corrigée de l'incapacité (EVCI). L'EVCI est un mode d'évaluation mesurant l'espérance de vie en bonne santé
ÉICV	Évaluation des impacts du cycle de vie (appelé ACVI par ISO)
GES	Gaz à effet de serre
IBIS	« <i>Integrated Battery Interface System</i> »
ICV	Inventaire du cycle de vie
ISO	Organisation internationale de normalisation
LiNCM	Lithium, nickel, cobalt, manganèse ; les constituants de la batterie électrique
LiFePO <sub>4</sub>	Lithium, fer, phosphate : les constituants de la batterie électrique
kg éq. CO <sub>2</sub>	Kilogramme d'équivalent CO <sub>2</sub> (dioxyde de carbone)
MJ	Mégajoules d'énergie
PDF*m <sup>2</sup> *an	« <i>Potentially Disappeared Fraction</i> » ou Fraction d'espèces potentiellement disparues sur une surface donnée et durant une certaine période de temps.
QE	Qualité des écosystèmes
R	Ressources
RF	Ressources fossiles
RM	Ressources minérales
SH	Santé humaine (catégorie de dommage environnemental)
VC	Véhicule conventionnel (moteur à combustion interne)
VÉ	Véhicule électrique



## 1 Introduction

---

En 2011, le Québec s'est doté d'un premier *Plan d'action 2011-2020 sur les véhicules électriques*, suivi d'une mise à jour de celui-ci par l'adoption d'une *Stratégie d'électrification des transports 2013-2017*. Le 9 octobre 2015, un nouveau *Plan d'action en électrification des transports 2015-2020* était dévoilé (Gouvernement du Québec, 2015). Doté d'un budget de plus de 420 millions de dollars, ce plan vise les objectifs suivants :

- augmenter le nombre de véhicules électriques dans le parc automobile du Québec;
- participer à la lutte contre les changements climatiques, notamment en réduisant les émissions de gaz à effet de serre;
- réduire la dépendance énergétique au pétrole et ainsi améliorer la balance commerciale du Québec;
- contribuer au développement économique du Québec en misant sur une filière d'avenir et en utilisant l'énergie électrique disponible au Québec.

Afin d'être une réussite, ce plan doit miser sur les déplacements effectués en automobile ; activités représentant près de 95% de tous les déplacements de personnes effectués annuellement au Québec. À terme, ce plan d'action vise l'immatriculation de 100 000 véhicules électriques et hybrides rechargeables au Québec. Les données actuelles laissent présager une tendance lourde où le nombre de Québécois qui deviennent propriétaires d'un véhicule électrique double presque tous les ans : ils étaient 1207 en 2012 et sont passés à 8188 au 31 décembre 2015. À pareille date, les véhicules électriques représentaient seulement 0,13 % des véhicules en circulation au Québec (AVEQ, 2016).

Avec une énergie électrique propre, renouvelable et disponible, un réseau fiable et une expertise de pointe, Hydro-Québec se positionne comme un acteur clé pouvant contribuer à la mise en œuvre du *Plan d'action en électrification des transports et au développement de la mobilité électrique au Québec*.

Hydro-Québec dispose, entre autres, d'un réseau pouvant déjà répondre à la demande en recharge d'un million de véhicules électriques (Hydro-Québec, 2009) et a contribué à mettre en place le premier et le plus important réseau de bornes de recharge publiques pour véhicules électriques du Québec (Gouvernement du Québec, 2016) : le *Circuit électrique*. Inauguré en mars 2012, il comptait en date d'octobre 2015 (Gouvernement du Québec, 2016), 500 bornes en fonction, dont 20 à recharge rapide à 400V. Le *Circuit électrique* a comme objectif d'offrir 800 bornes de recharge d'ici la fin 2016 (Hydro-Québec, 2015). De plus, les chercheurs de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) travaillent au développement de nouveaux matériaux pour les piles, autour de trois objectifs : augmenter la sécurité des batteries, en améliorer la performance et en réduire les coûts de production (Hydro-Québec, 2105b).

Dans un souci de cohérence globale de ses actions, Hydro-Québec cherche à déterminer dans quelle mesure l'utilisation d'un véhicule électrique alimenté par l'électricité québécoise peut s'avérer avantageuse, sur le plan environnemental, comparativement au véhicule conventionnel (c.-à-d. moteur à combustion interne) et ce, par l'analyse du cycle de vie (ACV) des véhicules.

Par ailleurs, le CIRAIG a réalisé en 2014, pour le compte d'Hydro-Québec, l'analyse du cycle de vie de la production, de l'achat du transport et de la distribution de l'électricité au Québec. Les résultats de cette étude ont été versés dans la base de données québécoise d'inventaire du cycle de vie.

Dans ce contexte, Hydro-Québec a mandaté le CIRAIG pour :

**Objectif de l'étude :**

Réaliser une analyse comparative des impacts environnementaux potentiels des véhicules électrique et conventionnel (avec moteur à combustion interne), en considérant leurs cycles de vie respectifs et dans un contexte d'utilisation québécois.

Le but ici **n'est donc pas** de comparer un modèle précis de véhicule conventionnel ou électrique, mais bien de quantifier les impacts potentiels du cycle de vie de ces types véhicules dans un cadre d'utilisation québécois.

Ce rapport présente le contexte d'utilisation des véhicules au Québec ainsi qu'une revue des études pertinentes réalisées permettant de formuler les hypothèses nécessaires à l'étude (section 2), le cadre méthodologique de l'analyse (section 3), la présentation séparée des impacts environnementaux potentiels des véhicules (section 4), leur comparaison (section 5) et la conclusion de cette étude (section 6).

## 2 Mise en contexte

Cette section vise à mettre en place les concepts nécessaires à la compréhension de l'étude. Elle sert également à présenter un ensemble des connaissances sur les véhicules électrique et conventionnel; **connaissances qui supporteront les hypothèses inhérentes à la modélisation du cycle de vie des divers types de véhicules.**

### 2.1 Contexte énergétique

Le secteur des transports contribue largement à la dépendance au pétrole des pays industrialisés. Le Tableau 2-1 présente la consommation des diverses sources énergétiques au Québec. Tel que montré, le pétrole représente plus de 99 % des sources énergétiques consommées par le secteur du transport tandis que l'électricité s'avère la principale source énergétique pour le secteur industriel, commercial et résidentiel; elle s'avère marginale pour le transport.

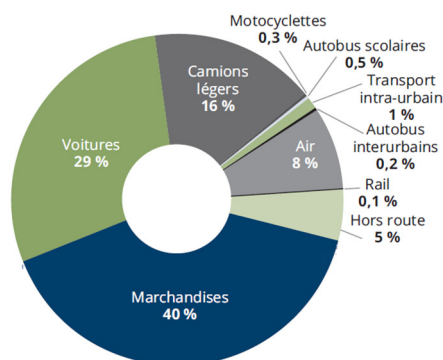
**Tableau 2-1 : Consommation énergétique par source et par secteur d'activité au Québec en 2011 (résultats de calculs basés sur les statistiques du MERN, 2013)**

Secteur d'activité	Électricité	Gaz naturel	Pétrole	Biomasse	Charbon	Énergie totale consommée par secteur d'activité au Québec
Industriel	49,8 %	19,3 %	14,0 %	13,7 %	3,3 %	37,16 %
Commercial	50,9 %	32,1 %	16,3 %	0,0 %	0,7 %	14,97 %
Résidentiel	71,9 %	7,1 %	8,8 %	12,0 %	0,2 %	18,81 %
Transport	0,3 %	0,6 %	99,1 %	0,0 %	<0,0 %	29,06 %

Note : les cellules surlignées en gris indiquent la source énergétique privilégiée par le secteur d'activité.

Les résultats pour le secteur des transports présentés au tableau précédent incluent toutefois d'autres moyens de transport que le transport routier. Ce dernier s'avère par contre le plus grand consommateur d'énergie de ce secteur (83%) (MERN, 2013). La Figure 2-1 présente la consommation d'énergie et des divers carburants pour le transport de passagers et de marchandises au Québec. Les déplacements personnels en voiture s'avèrent un des plus grands consommateurs d'énergie (29%).

GRAPHIQUE 3.3.3 • UTILISATION DE L'ÉNERGIE DANS LE SECTEUR DES TRANSPORTS PAR TYPE DE VÉHICULE POUR LE TRANSPORT DE PASSAGERS ET DE MARCHANDISES, 2012



GRAPHIQUE 3.3.4 • TYPES DE CARBURANTS UTILISÉS POUR LE TRANSPORT DE PASSAGERS ET DE MARCHANDISES AU QUÉBEC, 2012

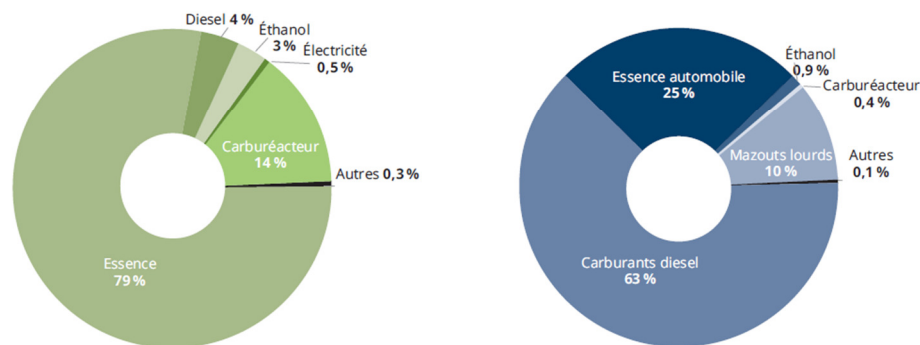
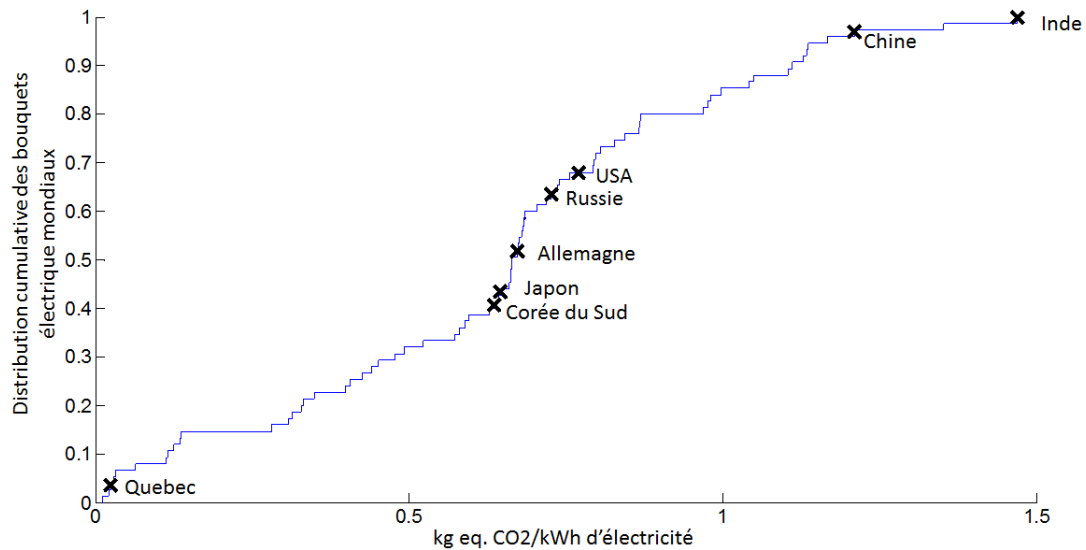


Figure 2-1 : Consommation de l'énergie et types de carburants utilisés pour le transport des passagers et de marchandises au Québec en 2012 (Whitmore et coll. 2015).

Les gains environnementaux potentiels associés à l'électrification des transports sont fortement influencés par les différentes filières de production d'électricité composant le bouquet électrique impliqué dans la recharge des véhicules. À titre d'exemple, la Figure 2-2 illustre l'empreinte carbone de la production d'électricité selon différents contextes géographiques à travers le monde.



**Figure 2-2 : Distribution statistique des différents mix électriques nationaux telle que documentée dans la base de données d'inventaire du cycle de vie ecoinvent.**

La figure montre que l'électricité québécoise est l'une des moins émettrices de gaz à effet de serre (GES) à travers le monde. Cette faible empreinte carbone est principalement due à la place prépondérante de l'hydroélectricité dans le bouquet électrique québécois; une source énergétique renouvelable et peu émettrice de GES (voir Tableau 2-2).

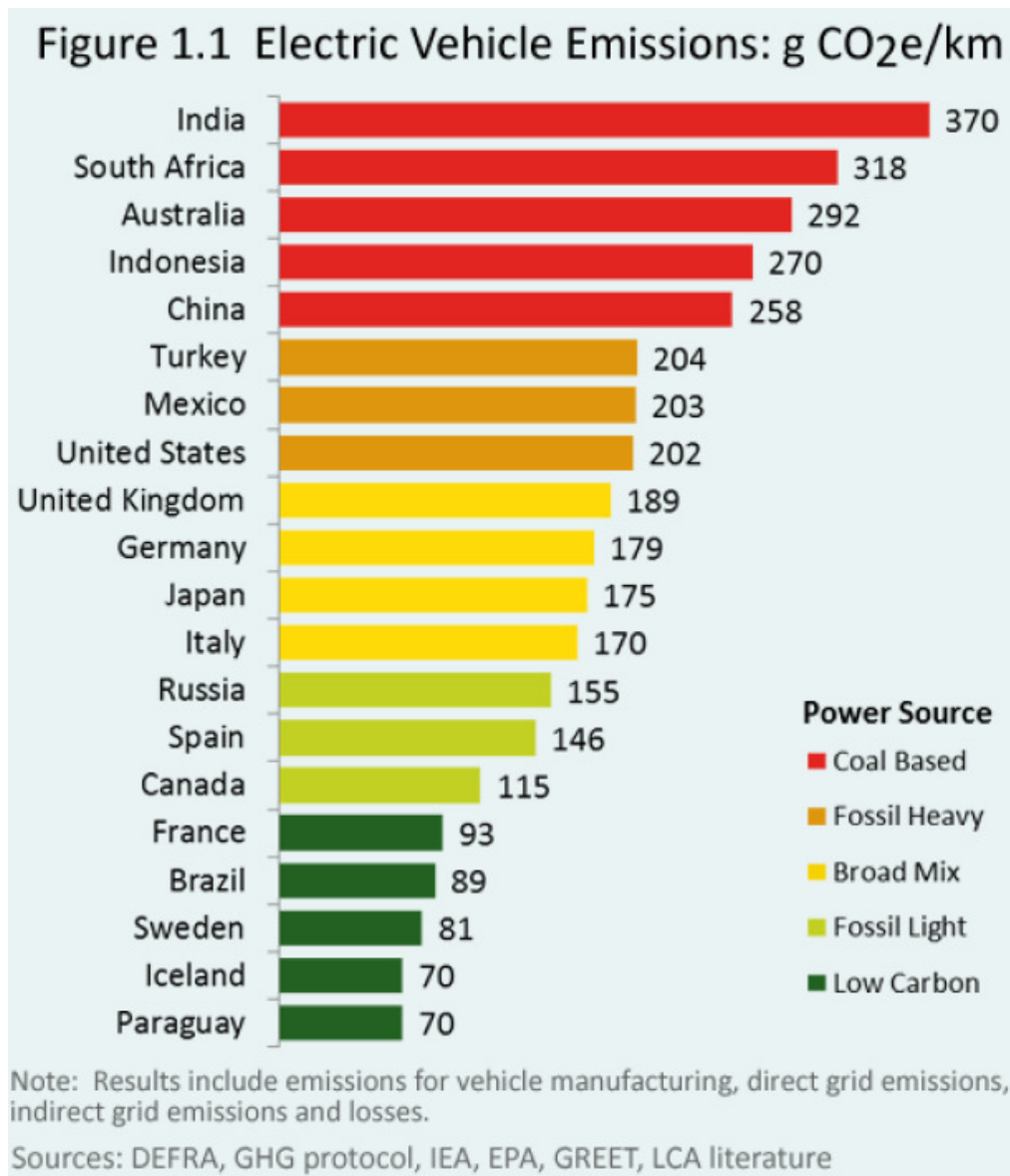
**Tableau 2-2 : Bouquet électrique québécois (Tirado-Seco et coll., 2014)**

Mode de génération électrique	Québec (2008-2012)
Hydroélectrique	95,33 %
Nucléaire	2,62 %
Éolien	0,9 %
Biomasse	0,53 %
Charbon	0,3 %
Gaz naturel	0,21 %
Biogaz/déchets	0,09 %
Pétrole	0,03 %

**Note :** L'étude de Tirado-Seco et coll. (2014) fait également état de pertes totales moyennes de 7,5 % dans le réseau de transport et de distribution d'électricité; élément qui a été pris en compte dans l'analyse comparative des impacts environnementaux potentiels des véhicules.

À titre d'exemple, Wilson (2013) a montré que l'intensité des émissions de GES du véhicule électrique, sur son cycle de vie, pouvait être jusqu'à quatre fois plus élevée dans les pays

dépendant largement du charbon pour produire leur électricité par rapport aux pays utilisant majoritairement de l'énergie électrique de sources renouvelables (voir Figure 2-3).



**Figure 2-3 : Variation de l'empreinte carbone du véhicule électrique selon la composition du bouquet électrique du pays d'utilisation (Wilson, 2013).**

NOTE : seul le résultat d'indicateur pour la catégorie *Changement climatique* (ou l'évaluation des gaz à effet de serre) dans divers contextes géographiques est généralement rapporté. La variation des autres impacts potentiels, associés au changement de contexte géographique, demeure largement inconnue.



## 2.2 Caractéristiques du parc de véhicules québécois

Le Tableau 2-3 fait état des véhicules conventionnels les plus vendus en 2013 (en excluant les modèles sports-utilitaires et camions légers) ainsi que les véhicules 100 % électriques retrouvés sur les routes du Québec en date de 2015.

**Tableau 2-3 : Description des véhicules (type automobile) conventionnels et 100 % électriques au Québec considérés.**

Modèle de véhicule	Vente de véhicules neufs en 2013 (pour véhicules conventionnels)	Masse [kg] <sup>1</sup>	Taille (longueur x largeur x hauteur) [mm]	Lieu d'assemblage
Véhicules conventionnels <sup>2</sup>				
Hyundai Elantra	20459 (1)	1207	4530 x 1775 x 1435	Alabama, États-Unis
Honda Civic	19658 (2)	1244	4631 x 1878 x 1416	Ontario, Canada
Toyota Corolla	15335 (4)	1230	4540 x 1760 x 1465	Ontario, Canada
Mazda 3	13394 (5)	1304	4595 x 1755 x 1470	Hofu, Japon
Volkswagen Jetta	10685 (6)	1289	4628 x 1778 x 1453	Puebla, Mexico
Hyundai Accent	9899 (7)	1087	4370 x 1700 x 1450	Ulsan, Corée du Sud
Chevrolet Cruze	7867 (13)	1386	4597 x 1796 x 1476	Ohio, États-Unis
Kia Rio	7798 (14)	1179	4366 x 1720 x 1455	N/D
Nissan Sentra	6465 (16)	1283	4625 x 1760 x 1496	Aguascalientes, Mexique
Ford Focus	6141 (17)	1321	4534 x 2060 x 1466	Michigan, États-Unis
Nissan Versa	5606 (19)	1067	4455 x 1695 x 1514	Aguascalientes, Mexique

<sup>1</sup> Les caractéristiques (masse et taille) des véhicules proviennent du Guide de l'Auto (<http://www.guideautoweb.com/>) pour l'année 2013.

<sup>2</sup> Note : le tableau n'inclut que les véhicules du Top 20 (<http://www.protegez-vous.ca/automobile/top-50-des-ventes-de-vehicules-neufs-en-2013.html>) et exclut de cette liste les véhicules de type camions et sports-utilitaires tels que (valeur du palmarès entre parenthèses) : la Ford série F (3), Dodge Caravan (8), Ram 1500 (9), Ford Escape (10), Honda CR-V (11), Mazda CX-5 (15), Hyundai Santa Fe (18) et GMC Sierra (20).

Modèle de véhicule	Nombre de véhicules électriques immatriculés au Québec (2015)	Masse [kg] <sup>3</sup>	Taille (longueur x largeur x hauteur) [mm]	Lieu d'assemblage
Véhicules 100% électriques <sup>4</sup>				
Nissan Leaf	1458 (2)	1481	4445 x 1770 x 1550	Tennessee, États-Unis
Tesla Modèle S	745 (3)	1900	4976 x 2187 x 1435	Californie, États-Unis
Mitsubishi i-Miev	331 (5)	1180	3675 x 1585 x 1615	Kurashiki, Japon
Smart ED	304 (6)	N/D	2695 x 1559 x 1542	Hambach, France
Ford Focus Electric	115 (9)	1647	4393 x 2045 x 1488	Michigan, États-Unis
Kia Soul EV	108 (10)	N/D	N/D	Gwangju, Corée du Sud
Chevrolet Spark EV	43 (12)	1300	3720 x 1627 x 1590	Changwon, Corée du Sud

Le Tableau 2-4 présente diverses caractéristiques du parc automobile québécois. La distance moyenne parcourue par ces véhicules est approximativement de 15 000 km par année (soit environ 40 km par jour) alors que près de 80 % des véhicules en circulation au Québec ont moins de 10 ans (20 % des véhicules en circulation au Québec ont plus de 10 ans). Ces véhicules auraient donc atteint, en moyenne, une distance de 150 000 km après cette période. Cette distance s'avère conservatrice considérant que les véhicules envoyés au recyclage en fin de vie auraient parcouru le double de cette distance (c.-à-d. 300 000 km) (Recyq Québec, 2010).

<sup>3</sup> Les caractéristiques (masse et taille) des véhicules proviennent du Guide de l'Auto (<http://www.guideautoweb.com/>) pour l'année 2013.

<sup>4</sup> Note : seuls les véhicules 100 % électriques du Top 12 (<http://www.aveq.ca/actualiteacutes/statistiques-saaq-aveq-sur-lelectromobilite-au-quebec-en-date-du-31-decembre-2015-infographique>) sont rapportés dans le tableau. Le palmarès inclut tous les types de véhicules électriques, incluant les modèles hybrides et les modèles électriques à autonomie prolongée, qui ne sont pas considérés dans ce rapport : Chevrolet Volt (1), Ford C-Max (4), Ford Fusion SE Energi (7), Toyota Prius (8).

**Tableau 2-4 : Caractéristiques du parc automobile (véhicules conventionnels) québécois**

Description du parc automobile québécois	
Masse des véhicules (OEE, 2012)	
Masse (kg)	Proportion (%)
750 à 999	9,2
1000 à 1249	47,8
1250 à 1499	28,5
1500 à 1749	12,3
Distance annuelle parcourue par véhicule léger (OEE, 2012)	
Source	Distance (km/an)
Québec	14 300
Canada	15 200
Distance moyenne parcourue par un véhicule léger quotidiennement (c.-à-d. distance annuelle parcourue/nombre de jours) (km/jr)	
Source	Distance (km/jr)
Québec	39,4
Canada	41,5
Distance moyenne parcourue pour les Québécois pour se rendre et revenir du travail en 2006 (Fonds d'action québécois pour le développement durable, 2010)	
Source	Distance (km/déplacement)
Québec	15,6
Âge des véhicules de promenade sur les routes du Québec de 2009-2013 (SAAQ, 2015)	
Âge des véhicules sur les routes du Québec (ans)	Proportion (%)
<1	8,3
1	7,4
2	7,6
3	7,5
4	7,2
5	7,1
6	7,3
7	7,2
8	7,0
9	6,6
10	5,9
11 et plus	20,9
Distance moyenne parcourue par un véhicule lorsqu'il arrive chez le recycleur (Recyq Québec, 2008)	
Distance parcourue durant la vie du véhicule (km)	300 000

### 2.3 Véhicule 100 % électrique

Le véhicule 100 % électrique se meut uniquement grâce à l'électricité emmagasinée dans une batterie rechargeable. Cette batterie permet au véhicule de se déplacer en alimentant un onduleur en courant électrique continu. Cet onduleur transforme le courant continu en courant alternatif qui est par la suite transmis au moteur électrique.

Plusieurs types de batteries peuvent être utilisés afin d'alimenter le moteur électrique. Le Tableau 2-5 présente divers types de batteries et leurs caractéristiques associées telles que la/le :

- Charge spécifique : quantité d'énergie pouvant être emmagasinée dans la batterie par unité de masse;
- Densité énergétique : quantité d'énergie pouvant être emmagasinée dans la batterie par unité de volume;
- Puissance massique : puissance pouvant être délivrée par la batterie par unité de masse;
- Cyclage : nombre de charges/décharges pouvant être effectuées durant la vie utile d'une batterie.

**Tableau 2-5 : Caractéristiques des batteries adaptées pour le transport routier (Durand et coll. 2014)**

Type	Charge spécifique (Wh/kg)	Densité énergétique (Wh/L)	Puissance massique (W/kg)	Cyclage
Plomb				
Acide-Plomb	35	100	180	1000
Nickel				
Nickel-fer	50-60	60	100-150	2000
Nickel-zinc	75	140	170-260	300
Nickel-cadmium (Ni-Cd)	50-80	300	200	2000
Nickel-métal-hydrure (Ni-Mh)	70-95	180-220	200-300	<3000
ZEBRA				
Sodium-nickel-chlorure (NaNiCl <sub>2</sub> )	90-120	160	155	1200+
Lithium				
<b>Lithium-ion<sup>5</sup></b>	<b>118-250</b>	<b>200-400</b>	<b>200-430</b>	<b>2000</b>
Lithium-ion polymère (LiPO)	130-225	200-250	260-450	>1200
Lithium-titanate	80-100	Inconnu	4000	18 000
<b>Lithium-fer-phosphate</b>	<b>120</b>	<b>220</b>	<b>2000-4500</b>	<b>&gt;2000</b>
Métal-air				
Zinc-air	460	1400	80-140	200

Parmi les types de batteries présentés, les batteries au lithium sont celles que l'on retrouve dans les véhicules électriques actuellement sur le marché. Les batteries au lithium offrent la

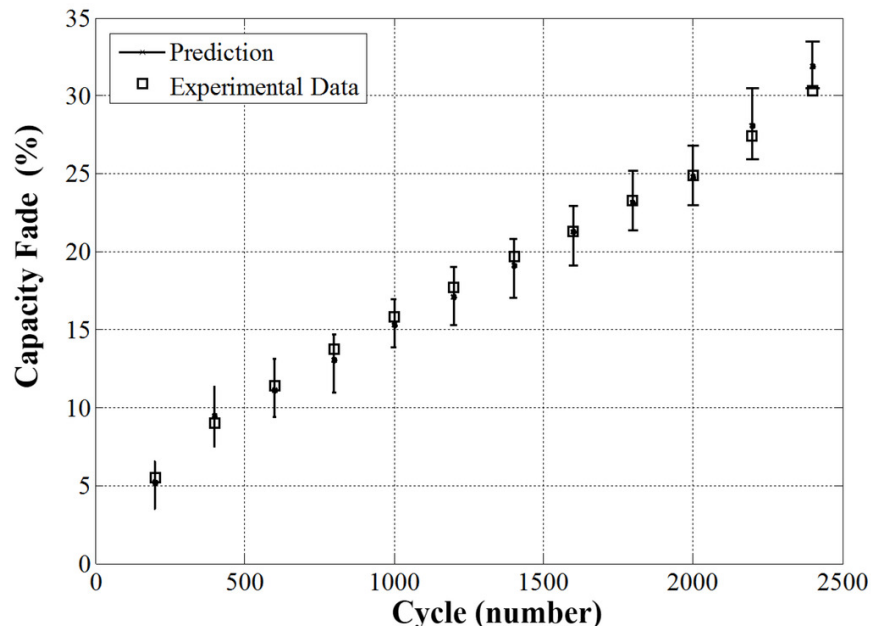
<sup>5</sup> La présente étude prend en considération les batteries LiNCM (lithium nickel-cobalt-manganèse) et LiFePO<sub>4</sub> (lithium-fer-phosphate)

possibilité d'entreposer plus d'énergie (c.-à-d. densité énergétique) dans un volume plus restreint que des batteries traditionnelles telles que les batteries acides-plomb et les batteries Nickel métal hydrure. Les batteries au lithium sont également plus légères que les batteries traditionnelles (Conger, 2015).

Il existe plusieurs types de batteries au lithium utilisant divers matériaux complémentaires à la cathode tels que :  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFePO}_4$ ,  $\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$ , et  $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ . Dans ce dernier cas, x, y et z identifient différents ratios possibles.

Il est à noter que le véhicule électrique, tout comme le véhicule conventionnel, est également équipé d'une batterie plomb-acide de 12 Volt. Cette batterie ne sert pas à la propulsion du véhicule mais bien à l'alimentation électrique de certaines fonctions secondaires (p. ex. éclairage, système de son).

Il est également bon de noter que les valeurs de cyclage présentées au tableau précédent, pour les batteries lithium-ion, équivaut à une perte de capacité d'environ 20-25 %; valeur généralement associée à la « la fin de vie » d'une batterie dans un véhicule électrique dans la littérature (plus de détails à la section 2.3.3). Un cycle a été défini par Lee et coll. (2015) comme étant une décharge et recharge complètes de la batterie.

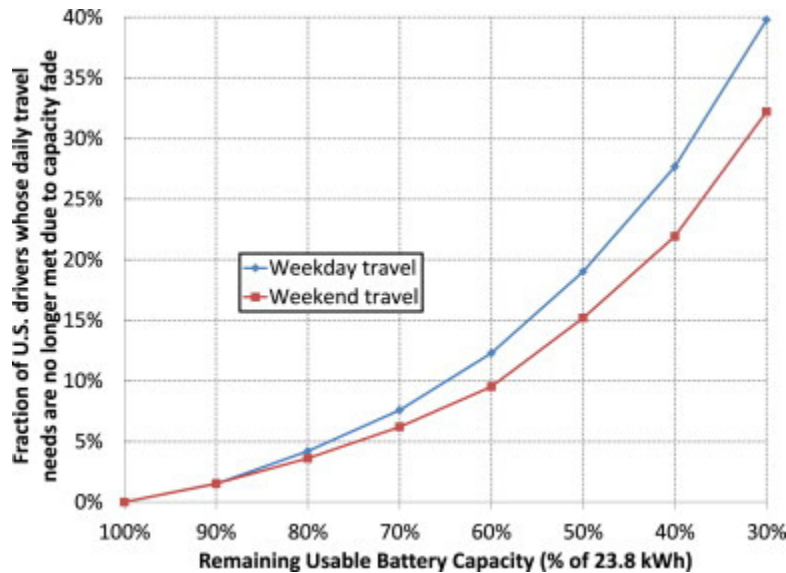


**Figure 2-4 : Perte de capacité de la batterie Li-ion d'un véhicule électrique en fonction du nombre de cycles (Lee et coll. 2015)**

Toutefois, à 80 % de sa capacité d'origine, le véhicule électrique serait à même de répondre aux besoins d'un grand nombre d'automobilistes. En effet, selon Saxena et coll. (2015), la durée de vie de la batterie ne devrait pas être mesurée sur une distance parcourue, un nombre de cycles ou même à partir d'une diminution de la capacité d'origine de la batterie, telle que généralement considérée, mais bien lorsque la charge de la batterie ne permettrait plus de répondre aux besoins quotidiens de déplacement des utilisateurs.

Les résultats de l'étude américaine de Saxena et coll. (2015) sont présentés à la Figure 2-5. Ainsi, il est montré, que malgré une diminution de la capacité de la batterie jusqu'à 30 % de sa valeur

d'origine, le véhicule électrique pourrait encore répondre aux besoins de déplacement d'environ 65 % des automobilistes américains. Aux États-Unis, la distance quotidienne parcourue a été évaluée, en moyenne, à 48 km/jour (US Department of transportation, 2011) soit près de 8 km de plus que la moyenne québécoise. Considérant que les moyennes des déplacements des automobilistes américains et québécois sont similaires, les résultats présentés à la Figure 2-5 seraient extrapolables à la situation québécoise.



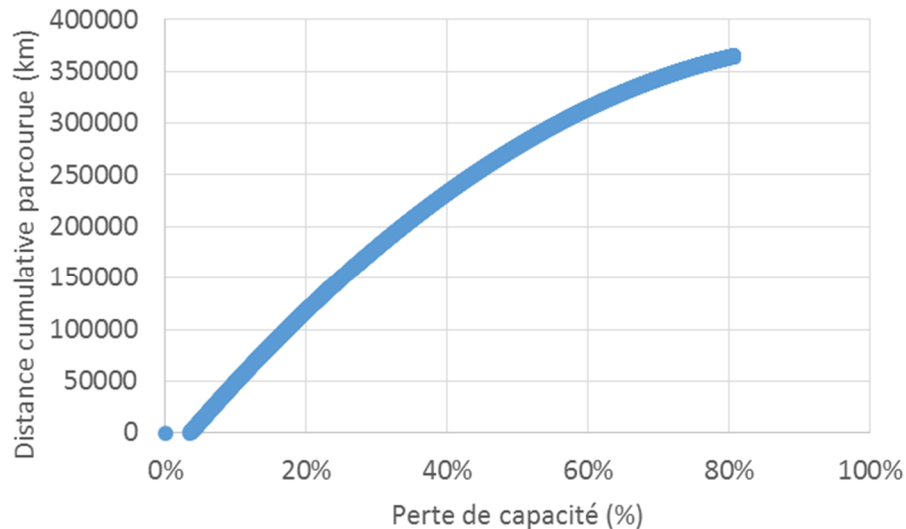
**Figure 2-5 : Fraction des conducteurs américains dont les besoins en déplacement ne seraient plus satisfaits à la suite d'une perte de capacité de la batterie<sup>6</sup> (Saxena et coll. 2015)**

Afin de déterminer la distance totale théorique parcourue par un véhicule en fonction du nombre de cycles et de la perte de capacité de la batterie, les hypothèses suivantes ont été émises :

- L'autonomie initiale du véhicule électrique a été fixée à 90 km; une valeur conservatrice comparativement aux données d'autonomie présentées par les constructeurs, mais conséquentes avec les valeurs trouvées par le banc d'essai d'Hydro-Québec (voir section 2.3.1);
- Une réduction de la distance parcourue en fonction de la perte de capacité de la batterie;
- Il existe une relation linéaire entre la perte de capacité et le nombre de cycles en fonction des résultats avancés par Lee et coll. (2015);
- Une perte de capacité de 70 % (c.-à-d., à 30% de la capacité d'origine) permet encore de répondre aux besoins de déplacement de la majorité des Québécois.

Selon ces diverses hypothèses, la distance cumulative (voir figure suivante) parcourue par le véhicule électrique avec sa batterie d'origine pourrait être bien au-delà de 300 000 km (c.-à-d. la distance parcourue par un véhicule lorsqu'il se retrouve chez le recycleur).

<sup>6</sup> Note : la capacité de la batterie est équivalente à celle de la Leaf de Nissan



**Figure 2-6 : Évaluation théorique de la distance cumulative potentiellement atteinte par un véhicule électrique à la suite d'une perte de capacité rendant l'autonomie de la batterie inférieure aux déplacements quotidiens de la majorité des conducteurs québécois.**

### 2.3.1 Consommation énergétique du véhicule électrique

Une étude d'Hydro-Québec portant sur un banc d'essai réalisé avec un modèle Mitsubishi i-MiEV (Hydro-Québec, 2013) a évalué les caractéristiques de consommation d'électricité du véhicule dans des conditions québécoises. L'étude est arrivée aux conclusions suivantes :

- L'autonomie de la batterie est d'au maximum 95 km (outre la réserve de 20 %);
- L'autonomie du véhicule diminue de :
  - 5 km lorsque la température extérieure varie de 18 °C à 23 °C en raison de l'utilisation du climatiseur;
  - 13 km lorsque la température extérieure varie de 10 °C à 0 °C en raison de l'utilisation du chauffage;
  - 40 % en période hivernale, en raison de l'utilisation accrue du chauffage.
- Les performances de la batterie sont équivalentes entre les deux modèles testés (européen et nord-américain);
- La consommation électrique oscille entre 13 kWh/100 km et 24 kWh/100 km.

Cette étude d'Hydro-Québec (2013) s'est également intéressée aux performances du véhicule électrique selon les conditions saisonnières. Ces résultats sont présentés au tableau suivant.

**Tableau 2-6 : Consommation du véhicule électrique en fonction des conditions climatiques québécoises (Hydro-Québec, 2013)**

Saison	Perte d'autonomie de la batterie selon les saisons (km)	Consommation moyenne du véhicule électrique (kWh/100 km)
Été	5	14
Printemps et automne	13	18
Hiver	38	22
Moyenne annuelle (en supposant que chaque saison dure 3 mois)		18

Ainsi, cette étude, bien que réalisée avec un seul type de modèle de véhicule électrique (la i-Miev), présente une consommation accrue d'énergie par le véhicule électrique dans des conditions réelles (par rapport à une consommation annoncée par le fabricant).

Les valeurs de consommation obtenues lors du banc d'essai semblent être corroborées par les données annuelles de consommation énergétique rapportées par Ressources naturelles Canada pour plusieurs modèles de véhicules électriques (voir Tableau 2-7). Ces valeurs montrent en effet qu'il existe une certaine variation dans la consommation d'électricité en fonction du modèle de véhicule électrique évalué. Ces résultats montrent une variation allant de 15,2 à 22,7 kWh/100 km. Cette étude ne fait toutefois pas explicitement état de la variation saisonnière de la consommation électrique, mais inclut, particulièrement les données de 2015, des consommations électriques en condition réelle d'utilisation.

L'objectif de cette étude comparative n'étant pas de considérer un modèle spécifique de véhicule, mais bien une gamme de véhicules électriques, la consommation énergétique de plusieurs véhicules a également été recensée.



**Tableau 2-7 : Consommation électrique de divers véhicules (Ressources naturelles Canada, 2013 ; 2015)**

Marque	Modèle	Consommation énergétique (kWh/100 km)			
		Urbain	Autoroute	Urbain	Autoroute
		2013 <sup>7</sup>		2015	
Nissan	Leaf	19,3	23,0	16,5	20,8
Tesla	Modèle S	23,9	23,2	22,2	21,7
Mitsubishi	i-MIEV	16,8	21,1	16,9	21,4
Smart	Fortwo electric drive	13,4	18,5	17,2	22,5
Ford	Focus électrique	15,1	17,8	15,2	18,8
Kia	Kia Soul EV	N/D		17,5	22,7
Chevrolet	Spark EV	N/D		16,0	19,6
Moyenne		17,7	20,7	17,3	21,1
Moyenne sur les déplacements (selon le scénario de Ressources Naturelles Canada : 55% en milieu urbain, 45% sur l'autoroute)		19,0		19,0	

NOTE : la consommation électrique des divers véhicules représente des consommations électriques en conditions réelles d'utilisation. En ce sens, ces consommations tiennent compte d'une multitude de paramètres pouvant l'affecter (p. ex., climatisation, chauffage, condition de la chaussée, type de conduite).

### 2.3.2 Recharge du véhicule 100% électrique

Le Tableau 2-8 présente l'autonomie et le temps de recharge de la batterie associée à la batterie au lithium-ion (Li-ion) selon les trois types de chargeurs standards :

- Chargeur de niveau 1 : prise de courant conventionnelle en courant alternatif à faible puissance (120 V) (p. ex. : recharge à la maison);
- Chargeur de niveau 2 : installation spécifiquement destinée à la recharge de véhicules en courant alternatif de grande puissance (240V) (borne de recharge la plus répandue au sein du réseau de recharge public du Québec, le *Circuit électrique*);
- Chargeur de niveau 3 : installation de grande puissance en courant continu (400 V) (20 bornes de ce type au sein du *Circuit électrique* en date d'octobre 2015).

<sup>7</sup> Deux années de références sont présentées puisque Ressources Naturelles Canada a modifié la façon d'exécuter ses tests; 2015 présentant des données plus représentatives de conditions routières réelles.

**Tableau 2-8 : Autonomie et temps de recharge de la batterie (Durand et coll., 2014)**

Marque et modèle de véhicule	Type de batterie	Énergie (kWh)	Autonomie (km)	Recharge 120 V (heures)	Recharge 240 V (heures)	Recharge 400 V (heures)
Mitsubishi i-MiEV	Li-ion	16	155	14	7	0,5
Nissan Leaf	Li-ion	24	160	12-16	6-8	0,25-0,5
Tesla S	Li-ion	60	425	30+	4-12	0,5

Note : l'autonomie présentée est celle rapportée par les constructeurs et ne tient pas compte des variations de consommation électrique associées aux habitudes de conduite des Québécois et des conditions climatiques.

La vaste majorité des conducteurs rechargent leur véhicule à la maison. Selon une étude (AVEQ, 2016), 85 % des conducteurs utilisent leur chargeur à la maison. Ces mêmes conducteurs peuvent se servir également des chargeurs publics ou au travail, mais dans proportion moindre : 50 % des conducteurs s'y fient pour moins de 5 % de leurs recharges.

### 2.3.3 Fin de vie de la batterie de véhicule électrique

Certaines sources considèrent que la batterie, qui ne pourrait plus être utilisée dans un contexte de mobilité, pourrait avoir une seconde vie afin de servir, par exemple, de système d'entreposage local d'énergie électrique (US EPA, 2013). Cette seconde vie n'a toutefois pas été prise en compte dans le cadre de la présente étude.

Même si la batterie peut être utilisée pour la mobilité ou pour entreposer de l'énergie, la batterie devra être gérée afin de limiter les conséquences négatives de son « élimination finale ». Il existe divers moyens afin de recycler les diverses composantes de la batterie de véhicule électrique, telles que le nickel, le cobalt, le cuivre et le lithium. À l'heure actuelle, le marché du recyclage des batteries des véhicules électriques est fortement influencé par la récupération du cobalt; la récupération des autres matériaux présentant une rentabilité économique moins attrayante, spécialement en ce qui a trait au lithium (Contestabile et coll., 2012). En effet, le lithium et le manganèse ne sont généralement pas récupérés en ce moment.

L'EPA liste diverses techniques afin de recycler les batteries des véhicules en fin de vie (EPA, 2013) :

- Procédés hydrométallurgiques : processus chimique où les composantes de la batterie sont séparées à l'aide d'une solution alcaline;
- Procédés pyrométallurgiques : utilise des températures élevées pour séparer les divers éléments de la batterie;
- Recyclage direct : les composantes sont séparées par des processus physique ou chimique à basse température.

La Commission de coopération environnementale (CCE, 2015) a dressé un portrait exhaustif de la gestion actuelle des batteries des véhicules électriques en fin de vie en Amérique du Nord. À l'heure actuelle, il n'y aurait que quelques usines en Amérique du Nord et en Europe en mesure

de recycler les composantes des batteries. Au Canada, l'usine de la compagnie Retrieiv Technologies, située en Colombie-Britannique, et qui utilise un procédé hydrométallurgique de récupération des composantes, est le lieu où les batteries des véhicules électriques et hybrides sont recyclées.

#### **2.3.4 Fin de vie de la batterie de véhicule électrique : la disponibilité des ressources**

La disponibilité des ressources est régulièrement considérée comme une problématique associée aux véhicules électriques et plus particulièrement aux batteries.

En ce sens, De Bruille (2014) a développé une méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie visant la prise en compte de l'impact de l'épuisement des ressources minérales et métalliques en considérant la fonctionnalité des ressources, en distinguant ressource extraite<sup>8</sup> et ressource dissipée<sup>9</sup> et en considérant l'adaptation<sup>10</sup> des utilisateurs qui sont en compétition pour les fonctionnalités des ressources (grâce à la substituabilité), afin de définir l'effet de l'épuisement des ressources sur les utilisateurs incapables de s'adapter avant l'épuisement. Cette étude a par la suite investigué la pression supplémentaire sur les ressources pour divers scénarios d'électrification des véhicules légers, soit la production de 15 millions de véhicules électriques d'ici 2030 à l'échelle mondiale et un scénario de changement complet du parc mondial de véhicules légers, soit près de 750 millions de véhicules. Les véhicules électriques utiliseraient des batteries de type lithium-ion.

Le Tableau 2-9 présente les résultats obtenus par De Bruille (2014). La production de véhicules à l'échéance de 2030 (15 millions de véhicules) ne semble mettre que de la pression significative sur la consommation de lithium. En effet, une augmentation de l'utilisation du lithium dans les 20 prochaines années diminuerait la durée des réserves de près de 200 ans (diminution de 709 à 537 ans). Toutefois, un changement complet du parc mondial de véhicules légers diminuerait drastiquement les réserves mondiales de lithium et de cobalt.

---

<sup>8</sup> La ressource extraite correspond à la ressource qui est extraite du sol et potentiellement recyclé.

<sup>9</sup> La ressource dissipée est une ressource qui est réellement perdue pour les utilisateurs futurs. La ressource dissipée est en opposition avec les ressources recyclées qui peuvent être considérées comme des ressources extraites déplacées.

<sup>10</sup> La capacité d'adaptation des usagers se définit par la présence de diverses autres ressources métalliques pouvant répondre aux mêmes besoins fonctionnels.

**Tableau 2-9 : Disponibilité des ressources métalliques (De Bruille, 2014)**

Ressource métallique	Réserves mondiales identifiées [kg]	Production primaire [kg/an]	Années de disponibilité (approximatives) [ans]		
			Avec adaptation		
			Réserves selon la consommation actuelle	Objectifs de 15 millions de véhicules électriques à l'échelle mondiale à l'aube de 2030	Électrification complète de la flotte mondiale de véhicules légers
Aluminium	3,47×10 <sup>13</sup>	1,59×10 <sup>11</sup>	Infini*		
Cuivre	3,47×10 <sup>13</sup>	1,41×10 <sup>10</sup>	192	192	167
Graphite	2,58×10 <sup>11</sup>	1,03×10 <sup>9</sup>	Infini		
Fer	1,74×10 <sup>14</sup>	2,08×10 <sup>12</sup>	94	94	93
Nickel	1,45×10 <sup>11</sup>	9,10×10 <sup>8</sup>	177	177	110
Lithium	1,58×10 <sup>10</sup>	2,46×10 <sup>7</sup>	709	537	40
Manganèse	5,15×10 <sup>12</sup>	1,21×10 <sup>10</sup>	425	425	424
Cobalt	1,30×10 <sup>10</sup>	5,65×10 <sup>7</sup>	278	258	53
Chrome	1,20×10 <sup>13</sup>	1,34×10 <sup>10</sup>	898	898	N/A
Terres rares	1,59×10 <sup>11</sup>	1,18×10 <sup>8</sup>	>1000	>1000	>1000

\* Infini représente une capacité d'adaptation maximale par d'autres ressources métalliques avant qu'il y ait épuisement de la ressource.

## 2.4 Véhicule conventionnel (essence)

Le véhicule conventionnel se meut uniquement grâce à la combustion de carburant (p. ex. essence, diesel) dans le moteur à combustion interne. L'énergie thermique de la combustion est alors convertie en énergie mécanique qui permet de déplacer le véhicule. Cette combustion génère toutefois de nombreuses substances ayant des impacts potentiels sur la santé humaine et l'environnement :

- Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) : un GES participant au changement climatique et à l'acidification des océans. Les GES augmentent la température moyenne à l'échelle de la planète, ce qui engendre de nombreux dérèglements du climat et qui peuvent, entre autres, favoriser la multiplication des insectes qui s'avèrent un vecteur important pour la prolifération de maladies;
- Oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) : est un précurseur à la formation d'ozone photochimique (smog), favorisant les problèmes respiratoires, et causent entre autres l'acidification des milieux terrestres et aquatiques et l'eutrophisation du milieu marin;
- Particules fines (PM) : causent potentiellement des troubles respiratoires, lorsqu'inhalées;
- Monoxyde de carbone (CO) : est considéré comme toxique pour l'être humain et les animaux;
- Composés organiques volatils (COV) : sont des précurseurs à la formation d'ozone photochimique (smog) et sont considérés comme toxiques pour l'être humain et écotoxiques pour la faune et la flore. Certains COV sont considérés comme des substances cancérigènes.

### 2.4.1 Consommation de carburant

Le Tableau 2-10 présente les données de consommation de carburant pour les divers modèles de véhicules les plus vendus en 2013 au Québec.

Les résultats présentés proviennent de tests annuels effectués par Ressources naturelles Canada. Pour 2013, il est important de noter que les valeurs présentées ne tiennent pas compte de la réalité canadienne/québécoise en ce qui a trait à la climatisation/chauffage. Pour tenir compte de cette réalité, Ressources Naturelles Canada estimait que la consommation de carburant obtenu lors des tests devait être majorée de 15 % (Ressources naturelles Canada, 2013). Pour l'année 2013, les résultats sont rapportés avec et sans cette majoration. En 2015, les tests effectués par Ressources naturelles Canada ont été modifiés et tiennent maintenant directement compte de la climatisation/chauffage; une majoration n'est donc pas nécessaire. Selon les résultats obtenus, les données majorées de 15 % en 2013 diffèrent peu des résultats de consommation obtenus en 2015.

**Tableau 2-10 : Consommation de carburant de divers véhicules conventionnels au Canada en 2013 (Ressources naturelles Canada, 2013, 2015)**

Modèle de véhicule conventionnel	2013		2015	
	Consommation SANS majoration et consommation (avec majoration de 15 %) (L/100 km)		Consommation selon des essais routiers plus représentatifs (L/100 km)	
	en milieu urbain	autoroute	en milieu urbain	autoroute
Hyundai Elantra	7,2 (8,3)	5,2 (6,0)	8,5	6,3
Honda Civic	7,2 (8,3)	5,4 (6,2)	7,9	6,1
Toyota Corolla	7,8 (9,0)	5,7 (6,6)	8,6	6,5
Mazda 3	7,1 (8,2)	4,9 (5,6)	7,9	5,7
Volkswagen Jetta	9,3 (10,7)	6,7 (7,7)	9,2	6,4
Hyundai accent	7,2 (8,3)	5,2 (6,0)	8,9	6,3
Chevrolet Cruze	7,8 (9,0)	5,2 (6,0)	9,1	6,3
Kia Rio	7,1 (8,2)	5,5 (6,3)	8,7	6,3
Nissan Sentra	N/A		8,0	6,1
Ford Focus	7,5 (8,6)	5,1 (5,9)	8,1	5,9
Nissan Versa	N/A		7,5	6,0
<b>Moyenne</b>	<b>7,6 (8,7)</b>	<b>5,4 (6,3)</b>	<b>8,4</b>	<b>6,2</b>
Moyenne sur les déplacements (selon le scénario de Ressources Naturelles Canada : 55% en milieu urbain, 45% sur l'autoroute)	<b>6,6 (7,6)</b>		<b>7,4</b>	

La proposition de majoration des données de consommation de Ressources Naturelles Canada de 15 %, en 2013, semblait acceptable considérant que le US Department of Energy (2015) a évalué :

- Une augmentation de la consommation de carburant de 12 % lorsque la température diminue de 25 à -6 °C;
- L'augmentation de la consommation de carburant peut atteindre 22 % pour ces mêmes températures si le déplacement se fait sur une courte distance (4 à 6 km).

## 2.5 Analyse du cycle de vie des véhicules électrique et conventionnel

L'approche « cycle de vie » est issue d'un courant de pensée holistique qui tient compte de l'extraction et du traitement des matières premières, des processus de fabrication, du transport et de la distribution, de l'utilisation du produit fini et finalement, du recyclage et de la gestion des déchets en fin de vie.

La pensée « cycle de vie » a comme principal objectif de permettre la réduction des impacts globaux des produits et des services, en orientant la prise de décision. Elle constitue donc un outil d'aide important à une gestion plus « écologique » et contribue au développement durable. Il s'agit entre autres d'éviter que des améliorations à une étape du cycle de vie ne résultent en un déplacement des problèmes vers d'autres étapes/sites/problèmes.

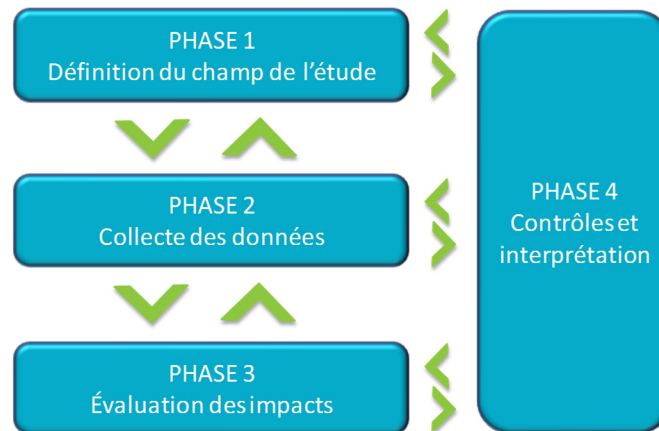
L'analyse du cycle de vie (ACV) représente une méthodologie permettant d'établir la performance environnementale d'un produit ou d'une activité sur l'ensemble de son cycle de vie. Il s'agit donc d'une approche holistique, qui tient compte de l'extraction et du traitement des matières premières, des processus de fabrication, du transport et de la distribution, de l'utilisation et de la gestion du produit en fin de vie.

La réalisation d'une ACV d'un produit ou de l'ensemble des activités d'une industrie permet à cette dernière :

- D'entreprendre une réflexion rigoureuse menant à une meilleure compréhension des forces, faiblesses et opportunités d'améliorations environnementales de ses produits (établissement du profil d'impact environnemental);
- De communiquer à ses clients et à ses différentes parties prenantes les attributs environnementaux de ses produits ou services d'une manière objective et crédible;
- De positionner (« benchmarking ») ses produits par rapport aux produits les plus performants du point de vue environnemental dans un secteur donné;
- De démontrer aux différentes parties prenantes sa maîtrise et ses connaissances du cycle de vie de ses produits, incluant la chaîne d'approvisionnement;
- De construire un argumentaire scientifique solide pour démontrer les attributs environnementaux d'un produit en réponse à des allégations de différentes parties prenantes (clients, concurrents, journalistes), ou en réaction à une décision réglementaire ou politique;
- De faciliter les communications internes dans un processus d'amélioration continue et d'écoconception.

Reconnue internationalement, l'ACV est une méthodologie encadrée par la série de normes ISO 14040 à 14044.

Une ACV se réalise en quatre grandes phases :



**Figure 2-7 : Les quatre grandes phases de l'ACV (ISO14040 :44).**

La phase de **définition des objectifs et du champ de l'étude** établit les bases de l'étude. En effet, il est important de noter qu'une ACV porte sur une ou plusieurs fonctions remplies par un produit ou service, ce qui assure la comparabilité d'options alternatives ayant des performances différentes. **Cette phase permet donc de définir un scénario de base qui se veut le plus représentatif d'une situation moyenne. Plusieurs autres scénarios pourront être testés afin de compléter l'analyse particulièrement afin de tenir compte de la variabilité de paramètres jugés importants.**

La **phase d'inventaire** correspond à la collecte de données quantitatives concernant les flux de matière et d'énergie entrants et sortants des différents processus inclus dans l'analyse. Elle sert également à répertorier les différentes hypothèses nécessaires pour pallier au manque de données. Elle permet également d'évaluer la qualité des données utilisées.

L'**évaluation des impacts du cycle de vie** vise à comprendre et à analyser les impacts environnementaux potentiels des différentes options investiguées. L'évaluation des impacts utilise comme entrants les données répertoriées lors de la phase d'inventaire. Les impacts potentiels sont calculés, pour chacune des catégories d'impacts ou de dommages considérées, à l'aide d'un facteur quantitatif (dit de caractérisation) représentatif de l'importance de l'impact potentiellement engendré par une substance extraite de ou émise à l'environnement ; l'option présentant le résultat d'indicateur de catégorie le plus élevé est celle qui est présente l'impact potentiel le plus grand pour cette catégorie.

Finalement, en colligeant toutes les informations et résultats obtenus, la phase d'interprétation permet d'identifier, si possible, la ou les options investiguées qui sont préférables du point de vue environnemental.

**NOTE : En ACV, pour pouvoir conclure qu'un produit est avantage (ou favorisé) par rapport à un autre, il faut que TOUTES les catégories d'impacts environnementaux considérées favorisent ledit produit.**

Il est toutefois utile de noter qu'il est possible (voir courant) que deux études ACV différentes sur les mêmes produits ne conduisent pas aux mêmes conclusions. En effet les conclusions d'une ACV dépendent, entre autres :

- De l'unité fonctionnelle déterminée ;
- Des hypothèses formulées ;
- De la qualité des données d'inventaire ;
- Du contexte géographique ;
- Du contexte temporel ;
- De la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie sélectionnée.

### **2.5.1 Études d'ACV comparative entre un véhicule électrique et conventionnel**

Dans un contexte d'ACV, un véhicule électrique doit être comparé à un véhicule conventionnel sur la base de modèles similaires en termes de leur fonction soit le déplacement de passagers. Cette comparaison doit être basée sur des modèles de véhicules les plus comparables en termes de :

- Taille;
- De masse;
- De puissance.

D'autres spécificités propres à chacun des modèles des véhicules peuvent être pris en compte lors de l'achat, tel que le design, le confort, le volume intérieur, l'insonorisation, les accessoires, etc., mais ses spécificités peuvent difficilement être prises en compte dans le cadre d'une ACV. Il en est de même du temps nécessaire à la recharge du véhicule électrique (ou période d'indisponibilité temporaire), qui ne peut être pris en compte dans le cadre une ACV.

En Europe principalement, quelques ACV ont comparé des véhicules électriques et conventionnels. Certaines de ces études ont comparé différents bouquets énergétiques (ou « grid mix ») alimentant le véhicule électrique, mais aucune ACV n'a encore considéré le véhicule électrique alimenté par le bouquet électrique québécois.

Le Tableau 2-11 résume quelques études ACV récentes (depuis 2012) portant sur la comparaison entre les véhicules conventionnel et électrique.



**Tableau 2-11 : Résumé des études comparatives récentes (depuis 2012) entre les véhicules conventionnel et électrique**

Auteur	Année	Contexte géographique	Comparaison	Unité fonctionnelle	Catégories d'impacts considérées	Méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie et niveau des évaluations des impacts du cycle de vie	Favorise
Renault	2011	Europe	Fluence (diesel, essence, électrique)	Durée de vie des véhicules (150 000 km)	Toutes les catégories considérées par la méthode	CML (problème)	Pas de favori net
Aguirre et coll.	2012	États-Unis / Californie	Nissan Leaf, Nissan Versa et Toyota Prius	1 mile à un moment indéterminé lors de la durée de vie du véhicule	Changement climatique	IPCC (problème)	Véhicule électrique
Warburg et coll.	2013	Europe / Belgique	Véhicule comparable de classe B	Durée de vie des véhicules (150 000 km)	Toutes les catégories considérées par la méthode	CML (problème)	Pas de favori net
Hawkins et coll.	2013	Europe	Nissan Leaf avec Mercedes Benz A	Durée de vie des véhicules (150 000 km)	Toutes les catégories considérées par la méthode	ReCiPe (problème)	Pas de favori net
Fayçal-Siddikou et coll.	?	Europe / Belgique	Valeurs de la littérature	Durée de vie des véhicules (230 500 km)	Toutes les catégories considérées par la méthode	ILCD (problème)	Pas de favori net
Messagie et coll.	2014	Europe	Volkswagen Golf A4 et Nissan Leaf	1 km en Europe	Changement climatique, acidification, épuisement des ressources minérales et effets respiratoires	CC : IPCC 4 Acidification : CML Minéraux : Eco-indicator99 Effets respiratoires : IMPACT 2002+ (tous : problèmes)	Pas de favori net
Nealer et coll.	2015	États-Unis	Véhicules comparables intermédiaires	Durée de vie des véhicules (217 256 km)	Changement climatique	Non précisée	Véhicule électrique

Il apparaît que la plupart des études s'entendent quant à la sélection d'une unité fonctionnelle basée sur la distance parcourue par le véhicule électrique ou conventionnel. Toutefois, les études n'utilisent pas la même valeur pour cette distance parcourue. En effet, plusieurs établissent cette distance à 150 000 km (c.-à-d. 10 ans en parcourant en moyenne 15 000 km/an) tandis que d'autres se basent alternativement sur des distances de 1 km, 1,6 km

(c.-à-d. 1 mile), 217 256 km ou 230 500 km (c.-à-d. plus de 15 ans en parcourant en moyenne 15 000 km/an).

Il apparaît que la plupart des études recensées sont basées sur un bouquet électrique européen (pour la recharge du véhicule électrique) et qu'elles ne sont pas en mesure d'établir qu'un type de véhicule est plus favorable qu'un autre.

**NOTE : En ACV, pour pouvoir conclure qu'un produit est avantagé (ou favorisé) par rapport à un autre, il faut que TOUTES les catégories d'impacts environnementaux considérées favorisent ledit produit.**

Cette situation est notamment causée par le niveau où est faite l'évaluation des impacts du cycle de vie, soit au niveau des impacts environnementaux (ou au niveau « problème »). Ainsi, contrairement à l'évaluation au niveau des « dommages », qui modélise tous les mécanismes environnementaux liant une émission dans l'environnement à une aire de protection, c'est-à-dire un élément que l'on désire protéger tel que la santé humaine ou la qualité des écosystèmes (c.-à-d. la biodiversité), l'évaluation au niveau des impacts ne pousse la modélisation que jusqu'à un indicateur intermédiaire entre l'émission et l'aire de protection (par exemple pour la catégorie *Changement climatique*, c'est le forçage radiatif infrarouge, soit la capacité du gaz à effet de serre à retenir de la chaleur dans l'atmosphère, qui est modélisé). Il est ainsi très difficile de comparer la signification environnementale de plusieurs catégories d'impacts n'ayant pas de point commun à première vue, ce que permet par contre l'évaluation au niveau des dommages, en regroupant plusieurs catégories d'impacts en une même catégorie de dommage.

Bien qu'une telle évaluation soit plus pertinente d'un point de vue environnemental, l'incertitude inhérente à la modélisation est toutefois plus grande. Les catégories de dommages étant moins nombreuses, elles facilitent l'interprétation des résultats.

Bien que la multitude de catégories prises en compte en ACV ne permette pas de favoriser l'un des types de véhicules, il est possible de tirer certaines conclusions par rapport aux catégories d'impacts environnementaux individuelles. Généralement, les études répertoriées favorisent :

Le véhicule électrique pour les catégories suivantes :

- *Changement climatique;*
- *Épuisement des ressources fossiles;*
- *Formation d'ozone photochimique (smog).*

Le véhicule conventionnel pour les catégories suivantes :

- *Épuisement des ressources minérales;*
- *Toxicité humaine;*
- *Écotoxicité.*

### 3 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.

#### 3.1 Objectifs de l'étude et application envisagée

L'**objectif de cette étude** est de fournir une analyse comparative des impacts environnementaux potentiels des véhicules électrique et conventionnel (à combustion interne), en considérant leurs cycles de vie respectifs et dans un contexte d'application québécois.

Les résultats de cette étude sont prévus à des fins de divulgation publique par Hydro-Québec. Conformément aux normes ISO, les revues critiques d'ACV par une tierce partie sont facultatives lorsque les résultats sont destinés à un usage interne par le mandataire. Cependant, une telle revue est une étape importante afin d'assurer la cohérence entre l'étude ACV et les exigences et principes de la norme 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.

Pour cette étude, la revue critique a été réalisée par un expert ACV externe et un comité d'experts indépendants. Se référer à la section 3.8 pour plus de détail sur le processus de revue critique.

La description des caractéristiques des véhicules étudiés et de leur contexte d'utilisation est présentée dans les sections suivantes.

#### 3.2 Fonction et unité fonctionnelle

Les véhicules étudiés sont évalués sur la base de leur **fonction** : déplacer un ou des passagers.

L'**unité fonctionnelle** c'est-à-dire la référence à laquelle se rapportent les calculs d'inventaire et d'évaluation des impacts du cycle de vie se définit comme suit :

*« Se déplacer au Québec sur 150 000 km avec un véhicule mis sur le marché en 2013 ».*

**NOTE : Bien que l'analyse se base sur l'année de référence 2013, les conclusions de cette étude pourraient être considérées représentatives des modèles de 2015 ou toute autre année tant qu'il n'y a pas de différences significatives de la masse, de la nature des composantes, de la taille et des performances telles la consommation énergétique (carburant et électricité) ou l'autonomie des véhicules.**

Il est bon de noter qu'en ACV, il est nécessaire que l'unité fonctionnelle puisse être fournie par les produits étudiés, mais que les performances démontrées par ceux-ci, soit les conditions et les circonstances dans lesquelles la fonction est réalisée, peuvent différer. En ce sens, considérant la différence d'autonomie du véhicule électrique et son temps de recharge, la performance sur certains longs déplacements ne peut être identique pour les deux types de véhicules.

En ce sens, afin de rendre les véhicules les plus comparables possible, les hypothèses suivantes doivent être considérées :

- Le trajet effectué lors d'un déplacement en voiture est inférieur à l'autonomie de la batterie ; ce qui semble plausible considérant que la moyenne des déplacements quotidiens des Québécois se situe à près de 40 km/jour (voir section 2.2);
- La somme de tous les déplacements quotidiens équivaut à des déplacements annuels de 15 000 km. Ainsi, la distance de 150 000 km serait atteinte après une période d'utilisation du véhicule équivalente à près de 10 ans;
- Au terme des déplacements équivalents à 150 000 km, la batterie du véhicule électrique aura une capacité de 80% (comparativement à la capacité originale);
- Les limites de vitesse en vigueur au Québec seront respectées ; ce faisant le temps de déplacement sera approximativement le même pour les deux véhicules puisque les vitesses maximales atteintes par les véhicules sont supérieures aux limites de vitesse;
- La recharge du véhicule électrique a été réalisée au préalable (à la maison ou à une borne de recharge) permettant ainsi d'effectuer le déplacement pendant un laps de temps similaire;
- Le même nombre de passagers (de même masse) déplacés.

Cette unité fonctionnelle fait également en sorte que l'identité de l'utilisateur du véhicule (et son changement lors de la revente du véhicule ou d'un transfert au terme d'un contrat de location à long terme) n'affecte pas les impacts potentiels des véhicules investigués. En effet, seul le service rendu par le véhicule, représenté par la distance parcourue par celui-ci, importe lors de cette comparaison.

### 3.3 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.

Lorsqu'un processus est multifonctionnel (c.-à-d. qu'il génère plus d'un produit ou qu'il participe au recyclage de produits intermédiaires), il est nécessaire de répartir ses entrants et sortants entre ses différentes fonctions. Il s'agit en quelque sorte d'attribuer la responsabilité des fonctions quant à ces flux de matières et d'énergie.

À noter :

- La fin de vie de la batterie pourrait être considérée multifonctionnelle si elle est réutilisée après son utilisation dans un véhicule électrique. Un tel contexte n'a pas été utilisé dans le cadre de cette étude; la batterie n'a donc qu'une seule fonction soit d'alimenter le véhicule;
- Il existe deux écoles de pensées majeures pour le traitement des matériaux recyclés en ACV : 1) la prise en compte des conséquences environnementales du recyclage ou 2) la prise en compte des conséquences environnementales du recyclage ainsi que l'addition de crédits environnementaux associés à l'évitement d'une production de matériaux primaires. Les deux écoles de pensées sont valables. Par contre, la seconde approche peut potentiellement entraîner une erreur de cohérence où il y aurait un double bénéfice à utiliser des matériaux recyclés et obtenir un crédit environnemental pour le

recyclage. Afin d'éviter une telle situation, la première option a été retenue dans cette étude.;

- Tous autres processus multifonctionnels (p.ex. le raffinage du pétrole) ont été traités selon les hypothèses inhérentes à la base de données d'inventaire du cycle de vie *ecoinvent v3.1*.

### 3.4 Frontières des systèmes

Les frontières des systèmes servent à identifier les étapes, processus et flux qui seront 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 sous-sections suivantes présentent une description générale des frontières des systèmes, ainsi que les considérations géographiques et temporelles associées.

#### 3.4.1 *Processus inclus*

La Figure 3-1 schématise les frontières générales des systèmes étudiés. Elles incluent l'extraction des matières premières, la production des diverses pièces communes, la production des pièces spécifiques aux différents véhicules, l'assemblage final du véhicule, le transport du lieu de production vers l'utilisateur, l'utilisation ainsi que la fin de vie des véhicules. Les frontières du système incluent également tous les processus de transport intermédiaire ainsi que les émissions à l'air, à l'eau et au sol. Le détail des systèmes (quantification des flux et processus) est également fourni à l'Annexe C du présent rapport.

Mentionnons également que les diverses étapes du cycle de vie des produits 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**.

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.

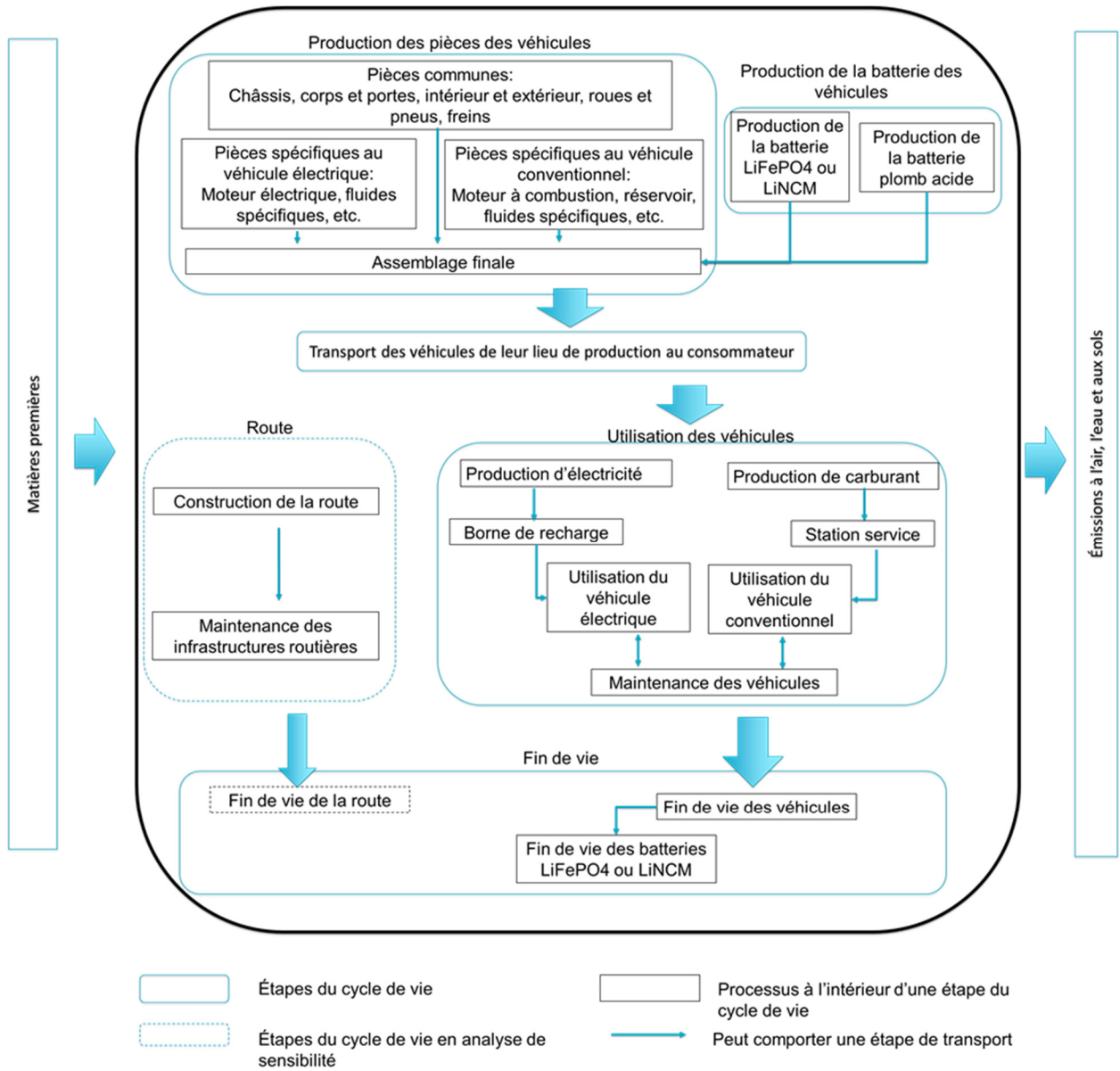
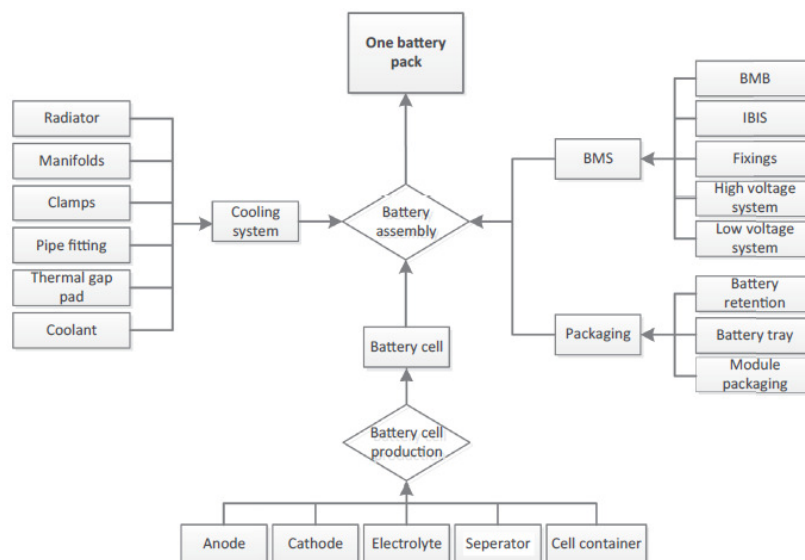


Figure 3-1 : Frontières du système pour les véhicules électrique et conventionnel.

La production de la batterie pour le véhicule électrique (c.-à-d. production de batterie  $\text{LiFePO}_4$  ou  $\text{LiNCM}$ ) comporte également plusieurs étapes. Ces étapes sont illustrées à la Figure 3-2 où :

- L'anode est composée d'un collecteur de courant en cuivre enduit d'une pâte d'électrode négative. La pâte d'électrode négative est principalement composée de graphite synthétique;
- La cathode est composée d'un collecteur de courant en aluminium enduit d'une pâte d'électrode positive. La pâte d'électrode positive est principalement composée de  $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ ;
- Le séparateur est un film poreux de polyoléfine;
- Le « Battery Management Board » (BMB) contrôle le voltage aux cellules de la batterie et les limites de température;
- L'« Integrated Battery Interface System » (IBIS) contrôle le BMB en plus de s'assurer des stratégies de charge et décharge de la batterie;
- Le système de refroidissement est un radiateur en aluminium.



**Figure 3-2 : Illustration simplifiée des éléments constitutifs d'une batterie destinée à un véhicule électrique (Ellingsen et coll. 2013).**

Note : L'illustration décrit une batterie de type  $\text{LiNCM}$  (c.-à-d.  $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ ). BMS = « Battery Management System », BMB = « Battery Management Board », IBIS = « Integrated Battery Interface System ».

Les processus et flux inclus et exclus de l'analyse sont résumés au Tableau 3-1. L'approvisionnement et la gestion des rejets ont été répartis entre les étapes du cycle de vie afin de simplifier la lecture du tableau. Il est à noter qu'aucun critère d'inclusion ou de coupure n'a été appliqué pour la présente étude : toutes les données disponibles ont été intégrées au modèle.

Tableau 3-1 : Processus inclus et exclus des frontières de l'ACV

Étapes du cycle de vie	Processus/Sous-processus	Provenance de la donnée d'inventaire	Localisation géographique	Commentaires
Pré-Production	Extraction des matières premières nécessaires à l'étape de production	<i>ecoinvent</i>		Processus d'arrière-plan
Production / Fabrication des pièces communes	Châssis	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut l'acier, les autres métaux et les polymères requis. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Corps et portes	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut l'acier et autres métaux, le verre et les polymères et l'assemblage requis. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Intérieur et extérieur	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut la peinture, le tableau de bord, les sièges, les ceintures de sécurité, l'isolation, le système électrique et l'assemblage. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Roues et pneus	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut l'acier, le caoutchouc, les autres métaux et les polymères requis. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Freins	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut l'acier et les matériaux de friction. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Fluides communs	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut l'huile à frein, l'huile à servodirection, le réfrigérant (R134a), l'huile à amortisseur et le liquide lave vitre. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Batterie plomb-acide	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut la batterie ainsi que les accessoires de la batterie. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Assemblage final	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut l'énergie et les matériaux requis pour la ligne d'assemblage. Cette étape est considérée identique pour les deux types de véhicules. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .



Production / Fabrication des pièces spécifiques au véhicule électrique	Moteur électrique	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut le moteur électrique, l'inverseur, le contrôleur. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Batterie Lithium	LiFePO4 : Majeau et coll. LiNCM : Ellingsen et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Deux types de batteries au lithium ont été modélisés : LiFePO4 (analyse de sensibilité) et LiNCM (scénario de base). Inclut les étapes établies à la Figure 3-2
	Transmission différentielle	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut toutes les composantes associées à une boîte à transmission et l'énergie d'assemblage. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
Production / Fabrication des composantes spécifiques au véhicule conventionnel	Moteur à combustion interne	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut les composantes du moteur ainsi que le transport des composantes. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Transmission	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut l'enveloppe (« casing »), arbre (« shaft ») et engrenage (« gears »), le différentiel ainsi que les autres pièces de la boîte d'engrenage. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Groupe motopropulseur (« powertrain »)	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut le tuyau d'échappement, le système électrique et thermique du groupe motopropulseur, le réservoir à essence, le système de contrôle des émissions, le filtre à pollen, le purificateur d'air et le vase d'expansion (« coolant expansion tank »). Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
	Fluides spécifiques	Hawkins et coll.	Approvisionnement marché mondial; lieu de production : États-Unis	Inclut l'huile à moteur et le réfrigérant pour le groupe motopropulseur. Inclut également le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> .
Distribution	Transport	Calculateur des distances	Nord-Américain pour le train et le camion	Inclut la consommation d'énergie (carburant) et les émissions associées aux transport ferroviaire et routier pour transporter les véhicules du lieu de production jusqu'à l'utilisateur.

Utilisation	Véhicule électrique	<i>ecoinvent</i> et Tableaux 2-6 et 2-7	Électricité québécoise	Inclut la consommation/production d'électricité et les émissions (limitées) du véhicule électrique. Inclut également les pertes d'électricité le long du réseau de transport et de distribution.
	Infrastructure de la recharge	AddÉnergie	Infrastructure : approvisionnement mondial Électricité québécoise	Inclut l'infrastructure de la borne de recharge fournie par AddÉnergie : soit l'aluminium, les divers câbles électriques ainsi que les chargeurs. Inclut le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> . Inclut également les pertes d'électricité lors de la recharge du véhicule.
	Véhicule conventionnel	<i>ecoinvent</i> et Tableau 2-10	Production de pétrole et éthanol à l'échelle mondiale	Inclut la consommation/production de carburant (95 % pétrole conventionnel et 5 % éthanol) ainsi que les émissions de combustion. Inclut également l'infrastructure de la station-service, le transport et les matières résiduelles associés par la sélection des processus individuels dans la base de données <i>ecoinvent</i> . Exclut les déversements souvent associés à la station-service.
	Entretien des véhicules	Hawkins et coll.	Approvisionnement mondial Québec (électricité québécoise)	Inclut l'entretien des véhicules. Cette étude tient compte des changements d'huile : 0.8L/1000 km (Mercedes Benz, 2015) pour le véhicule conventionnel. Tous les autres processus d'entretien sont considérés identiques entre les véhicules électrique et conventionnel tel que considéré par Hawkins et coll. (2013).
Fin de vie	Du véhicule VÉ et VC	Hawkins et coll.	Québec (électricité québécoise)	Inclut la fin de vie du véhicule. Considéré identique entre les véhicules électrique et conventionnel.
	De la batterie	<i>ecoinvent</i>	Processus de recyclage à l'échelle mondiale	Basé sur le processus de la base de données <i>ecoinvent</i> .
Toutes les étapes	Émissions à l'air, l'eau et les sols	<i>ecoinvent</i>		Processus d'arrière-plan

### 3.4.2 Frontières géographiques et temporelles

Conformément à l'unité fonctionnelle sélectionnée, la présente étude constitue une ACV représentative du contexte québécois en 2013. Même si la durée de vie du véhicule s'échelonne sur plusieurs années et que les processus peuvent changer durant cette période, il est tout de même considéré que les données utilisées sont représentatives.

Par ailleurs, il est à noter que certains processus compris dans les frontières du/des système(s) 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 matières résiduelles, 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.

### 3.5 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.

La qualité des résultats d'une ACV dépend de la qualité des données utilisées pour effectuer la modélisation. Cette étude est principalement basée sur les données collectées par :

- Hawkins et coll. (2014) pour la production des constituants des véhicules électrique et conventionnel. Il est bon de noter que cette étude est basée sur les constituants de la Leaf de Nissan ainsi que de la Classe A de Mercedes Benz (un modèle européen non disponible au Québec);
  - Bien que l'objectif de cette étude est de comparer des véhicules électriques et conventionnels et non, de comparer des modèles spécifiques de véhicules entre eux, le niveau de détail des données de cette étude demeure inégalé jusqu'à présent;
  - Compte tenu de l'objectif de l'étude, l'hypothèse est faite que la nature des constituants de la Leaf de Nissan ainsi que de la Classe A de Mercedes Benz sont similaires pour tous les modèles de véhicules et que la variabilité de la masse des véhicules n'est explicable que par la quantité de ces composantes.
- Ellingsen et coll. (2011) pour la production des constituants de la batterie de type LiNCM;
- CIRAIG et Hydro-Québec (2014) pour la production, le transport et la distribution d'électricité au Québec;
- Les données rapportées au Tableau 2-7 ainsi que les données provenant du banc d'essai réalisé par Hydro-Québec (2013) (voir Tableau 2-6), pour la consommation moyenne d'électricité d'un véhicule électrique;
- Les données présentées au Tableau 2-10 pour la consommation de carburant des véhicules conventionnels au Québec.

Le Tableau 3-2 présente les principales hypothèses considérées pour le scénario de base. D'autres hypothèses ont été considérées pour les analyses de sensibilités (voir section 3.7.5).

**NOTE : L'ACV prévoit des analyses de sensibilités afin de compléter le scénario de base qui se veut une représentation typique/normale/moyenne des paramètres associés à la production, l'utilisation et la fin de vie des divers véhicules. Les analyses de sensibilité servent à évaluer un éventail de possibilités associées à la production, l'utilisation et la fin de vie des véhicules qui pourraient potentiellement avoir des conséquences sur les conclusions de la comparaison des véhicules. Le scénario de base est présenté au tableau suivant tandis que les analyses de sensibilités sont présentées à la section 3.7.5.**

**Tableau 3-2 : Résumé des principales hypothèses pour le scénario de base**

Paramètre	Hypothèse	Commentaires
Constituants du véhicule électrique	Basées sur les données publiées représentatives de la Nissan Leaf	Sélection basée sur la disponibilité des données quantitatives détaillées des constituants d'un véhicule électrique
Constituants du véhicule conventionnel	Basées sur les données publiées représentatives de la Classe A de Mercedes Benz Européen	Sélection basée sur la disponibilité des données quantitatives détaillées des constituants d'un véhicule conventionnel
Masse totale du véhicule électrique	1521 kg	Basée sur la masse des composantes telles qu'évaluées par Hawkins et coll. (2013). Cette masse diverge de la masse de la Leaf de Nissan rapportée par d'autres sources (voir Tableau 2-3). Plusieurs valeurs seront évaluées en analyse de sensibilité
Masse totale du véhicule conventionnel	1295 kg	Basée sur la masse des composantes telles qu'évaluées par Hawkins et coll. (2013). Plusieurs valeurs seront évaluées en analyse de sensibilité
Utilisation des véhicules	150 000 km (15 000 km/an donc 10 ans; 40 km/jour)	Cohérent avec les unités fonctionnelles utilisées auparavant en ACV (voir Tableau 2-11)  Considérant une moyenne annuelle de 15 000 km (voir Tableau 2-4), le véhicule aurait 10 ans, en moyenne, après avoir parcouru la distance spécifiée par l'unité fonctionnelle
Capacité de la batterie du véhicule électrique après 150 000 km	75-80 %	Basé sur les données de la littérature. Cette capacité serait toutefois plus que suffisante pour assurer un déplacement quotidien moyen des automobilistes québécois.
Distance d'un déplacement	Inférieur à l'autonomie de la batterie du véhicule électrique; 40 km/jour en moyenne	Basée sur les données de la littérature de déplacements annuels La somme des déplacements quotidiens correspond à la durée de vie du véhicule
Lieu de production des véhicules pour le scénario de base	États-Unis	Les modèles de véhicules sont majoritairement assemblés en Amérique du Nord. Les États-Unis ont été choisis afin de représenter cette réalité.
Distance de transport par train	2000 km (distance approximative Tennessee-Montréal)	Distance approximative évaluée à l'aide d'un calculateur de distance

Distance de transport par camion	50 km	Hypothèse généralement postulée en ACV pour un transport régional
Type de batterie utilisé pour la batterie du véhicule électrique	LiNCM	Données d'inventaire du cycle de vie la plus fiable; valeurs provenant d'un fabricant de batteries et collectées par Ellingsen et coll. (2014)
Consommation d'électricité par le véhicule électrique	19 kWh/100 km	Voir Tableau 2-7
Efficacité de la recharge du véhicule électrique	7,5% de perte à la borne de recharge	La perte d'électricité sur le réseau de transport et de distribution d'Hydro-Québec a été considérée dans le développement de la donnée <i>ecoinvent</i> .  La donnée de la perte d'efficacité à la borne de recharge a été fournie par Hydro-Québec.
Infrastructure de la borne de recharge	Borne de recharge à la maison (garantie de 3 ans) et utilisation de la borne du <i>circuit électrique</i> (durée de vie de 15 ans)	Basée sur la composition d'une borne de recharge telle que développée par AddÉnergie. La borne à la maison est totalement allouée au véhicule électrique. La fraction du circuit électrique a été calculée selon : Une recharge complète * nb de recharge de l'utilisateur/ nb de recharge potentielle par le circuit électrique
Infrastructure de la station-service	Incluse	Basé sur les hypothèses de la base de données <i>ecoinvent</i>
Consommation de carburant en milieu urbain	8,7 L/100 km	7,6 L/100 km +15% pour utilisation de chauffage ou climatiseur Voir Tableau 2-10
Consommation de carburant en milieu routier	6,3 L/100 km	5,4 L/100 km +15% pour utilisation de chauffage ou climatiseur Voir Tableau 2-10
Scénario de déplacement des véhicules	55% en milieu urbain, 45% sur l'autoroute	Basé sur le scénario développé par Ressources naturelles Canada (2013,2015)
Scénario de base pour la fin de vie de la batterie	Procédé hydrométallurgique	Recyclage dans une usine située en Colombie-Britannique. Le processus <i>ecoinvent</i> a été utilisé directement
Bouquet électrique du Québec	Bouquet électrique de 2012 représentatif du bouquet électrique de 2015	Depuis 2013, la centrale nucléaire Gentilly 2 ne compte plus dans le bouquet électrique québécois.

Les autres données proviennent de données d'inventaire du cycle de vie (ICV) disponible dans la base de données *ecoinvent* version 3.1 ([www.ecoinvent.ch/](http://www.ecoinvent.ch/)). Cette base de données d'origine 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.).

L'utilisation de données européennes pour représenter l'Amérique du Nord peut introduire un biais dans certains cas. Cependant, il est estimé que la cohérence et la complétude de cette base de données en font une option préférable à d'autres données disponibles pour la plupart des processus. En outre, bien qu'*ecoinvent* soit d'origine européenne, elle contient des informations qui représentent plusieurs régions du monde. Dans la mesure du possible, les jeux de données

génériques employés dans le cadre de cette étude ont été adaptés de manière à augmenter leur représentativité des produits et du contexte analysés.

Plus particulièrement, pour toutes les activités ayant lieu au Québec, les jeux de données génériques ont été adaptés en remplaçant les bouquets électriques ("*grid mix*") européens par :

- Le *bouquet électrique* québécois pour les processus d'avant-plan, c.-à-d. :
  - La consommation d'électricité durant l'utilisation du véhicule électrique;
  - L'étape de maintenance des deux types de véhicules;
  - L'étape de fin de vie des véhicules.

Le logiciel SimaPro 8.0.5, développé par PRé Consultants ([www.pre.nl](http://www.pre.nl)), a été utilisé pour faire la modélisation des systèmes et réaliser le calcul de l'inventaire.

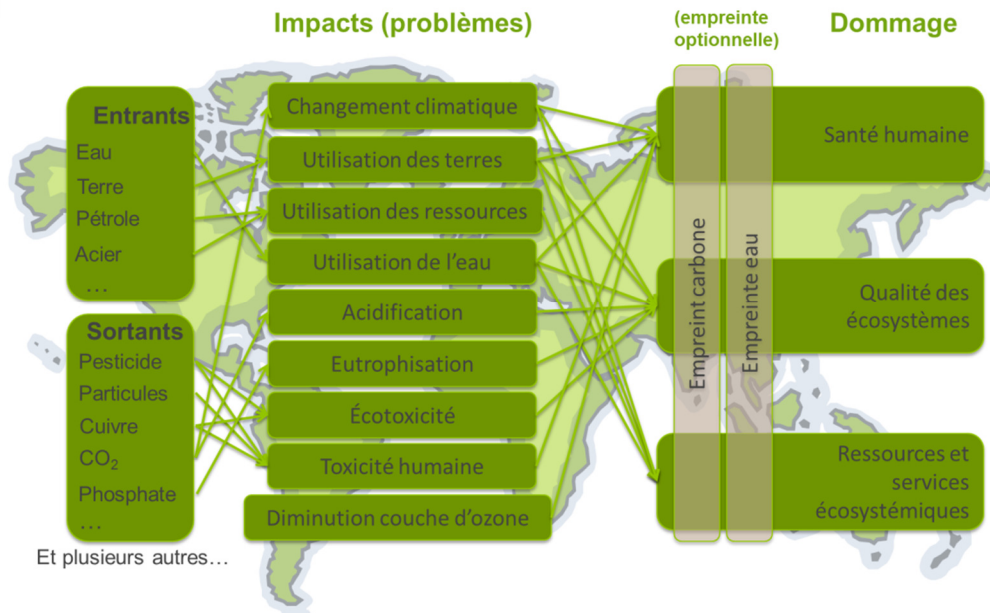
### 3.6 Évaluation des impacts environnementaux

L'ACV diffère de l'analyse de risque. Contrairement à cette dernière, conduite dans un contexte réglementaire et qui utilise une approche conservatrice, l'ACV **tente de fournir la meilleure estimation possible** (Udo-de-Haes et coll., 2002). En effet, **l'évaluation des impacts du cycle de vie tente de représenter le cas le plus probable**, c.-à-d. que les modèles utilisés, soit les modèles de transport et de devenir des contaminants dans l'environnement et d'effet 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.**

Afin d'évaluer les impacts environnementaux potentiels des véhicules sur leur cycle de vie, la méthode d'évaluation des impacts IMPACT World+<sup>11</sup> a été utilisée. Il s'agit de la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie la plus récente (qui inclut donc les plus récentes mises à jour des modèles environnementaux utilisés pour évaluer les impacts potentiels), la plus complète et permettant de regrouper le plus grand nombre de catégories d'impacts.

---

<sup>11</sup> [www.impactworldplus.org/en/presentation.php](http://www.impactworldplus.org/en/presentation.php); Note : en attente de publication scientifique, la documentation est disponible sur demande



**Figure 3-3 : Catégories de dommages et catégories d'impacts de la méthode IMPACT World+.**

*Rappel : L'évaluation au niveau dit « dommage » modélise tous les mécanismes environnementaux liant une émission à une aire de protection telle que la santé humaine ou la qualité des écosystèmes (c.-à-d. une modélisation des impacts dommages). Bien qu'une telle évaluation réside au sommet de la pertinence environnementale, l'incertitude inhérente à la modélisation est toutefois plus élevée. Toutefois, les impacts dommages étant moins nombreux, ils facilitent l'interprétation des résultats.*

Les profils environnementaux des véhicules ont été établis à partir des catégories de dommages de la méthode IMPACT World+ peuvent se résumer ainsi :

- **Santé humaine :** cette catégorie prend en compte les substances ayant des effets toxiques (cancérogènes et non cancérogènes) et respiratoires, des changements climatiques, 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 potentiellement causée par ces substances est exprimée en DALY - *Disabled Ajusted Life Years*, unité reflétant le dommage à la santé humaine;
- **Qualité des écosystèmes :** cette catégorie regroupe les impacts liés à l'écotoxicité aquatique, à l'acidification terrestre, océanique et aquatique, à l'eutrophisation aquatique et marine, aux effets d'émissions de radiations ionisantes sur les milieux aquatiques, aux changements climatiques et à l'occupation des terres. Elle est quantifiée en fraction d'espèces potentiellement disparues, pour une surface donnée et durant une certaine période de temps (PDF\*m<sup>2</sup>\*an) ;
- **Ressources et services écosystémiques :** cette catégorie de dommage n'est pas opérationnelle à ce stade de développement de la méthode.

Toutefois, afin de compléter le profil environnemental au niveau des catégories de dommages, quelques catégories d'impacts seront également évaluées.

*Rappel : L'évaluation au niveau des impacts ne modélise pas tous les mécanismes environnementaux liant une émission à une aire de protection telle que la santé humaine ou la qualité des écosystèmes (c.-à-d. une modélisation des impacts dommages). Toutefois, une évaluation à ce niveau représente théoriquement un compromis entre la pertinence environnementale d'un impact donné et l'incertitude inhérente à la modélisation environnementale. Toutefois, les catégories d'impacts, de par leur plus grand nombre, complexifient l'interprétation des résultats.*

Ce rapport ne présentera que les résultats associés aux catégories suivantes :

- **Changement climatique (GIEC 2007)** : les émissions de gaz à effet de serre anthropiques absorbent les radiations infrarouges émises par la surface terrestre maintenant l'énergie thermique dans la basse atmosphère. L'augmentation des gaz à effet de serre lors du siècle dernier a eu pour effet d'augmenter la température moyenne de l'atmosphère et des océans. Les résultats pour cette catégorie d'impact sont typiquement ceux rapportés dans les diverses études portant sur l'empreinte carbone;
- **Épuisement des ressources fossiles** : présente la consommation de ressources fossiles empêchant leur utilisation par les générations futures;
- **Épuisement des ressources minérales** : présente la consommation de minéraux empêchant leur utilisation par les générations futures.

Mentionnons que :

- Les résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie (« ÉICV ») représentent des résultats d'indicateurs quantifiant les 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;
- Les catégories d'impacts et de dommages considérées ne couvrent pas l'éventail des impacts environnementaux possibles associés aux activités humaines. Plusieurs types d'impacts, dont le bruit, les odeurs, les tremblements de terre et les champs électromagnétiques ne sont pas inclus dans les modèles d'impact en ACV;
- Les résultats n'ont pas été normalisés à une quelconque référence. De même, les catégories de dommages et d'impacts n'ont pas été pondérées à un score unique (voir l'annexe A pour plus de détails sur les notions de pondération et de normalisation).

Tout comme pour l'inventaire du cycle de vie, le logiciel SimaPro 8.0.5 a été utilisé pour calculer les résultats d'indicateurs de catégories de dommages et d'impacts associés aux émissions inventoriées.

Une deuxième évaluation basée sur la méthode ReCiPe (Goedkoop *et coll.*, 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 World+.

### 3.7 Interprétation

Cette dernière étape de l'ACV permet de discuter les résultats obtenus suite à l'évaluation des impacts du cycle de vie et de les mettre en perspective. Étant donné l'objectif et le public visé



par l'étude, la discussion des résultats est présentée au chapitre 4 de manière simplifiée. Les conclusions sont néanmoins appuyées sur une analyse complète et approfondie. Cela comprend notamment :

- Une évaluation de la qualité des données;
- Des analyses de contributions;
- Des analyses de sensibilité et de scénarios;
- Des analyses d'incertitudes.

La méthodologie employée pour l'analyse et l'interprétation des données et résultats est résumée dans les sous-sections suivantes.

### **3.7.1 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. 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 tirer des conclusions. Pour que l'analyse de l'inventaire du cycle de vie soit pertinente, elle doit être faite en parallèle avec l'évaluation des impacts. Ainsi, en accord avec la norme ISO 14 044, l'évaluation des impacts du cycle de vie présentée et discutée au chapitre 4 constitue l'interprétation des résultats d'inventaire du cycle de vie, 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 prédominants.

### **3.7.2 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 les exigences spécifiées ci-dessous, 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 les véhicules mis sur le marché en 2013 ainsi que lors de ses déplacements équivalents à 150 000 km (soit, en moyenne, près de 10 ans) ;
- Du contexte géographique dans lequel s'inscrivent les systèmes à l'étude, soit les véhicules conventionnel et électrique ;
- Des caractéristiques technologiques des processus.

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 de l'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.

### **3.7.3 Analyse de contribution**

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 les données d'inventaire du cycle de vie contribuent au profil environnemental du système 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 aux impacts est minime. Par contre, des données de bonne qualité devront être recherchées 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 chacune des catégories de dommages et d'impacts investiguées. Les résultats détaillés de l'analyse de contribution sont disponibles à l'Annexe E.

### **3.7.4 Analyse de cohérence et de 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 **complétude** a été assurée grâce à une définition attentive des frontières du système analysé. 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 du cycle de vie ont également été validés par une seconde méthode ÉICV.

### **3.7.5 Analyses de sensibilité**

Plusieurs paramètres utilisés lors de la modélisation des systèmes présentent une certaine incertitude, plus particulièrement liée aux hypothèses et aux jeux 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 qualité des données, des analyses de sensibilité ont été effectuées sur les paramètres présentés au Tableau 3-3. Les résultats des analyses de sensibilité effectuées sont présentés à la section 5.3.

Tableau 3-3 : Résumé des diverses analyses de sensibilité

Scénario	Nom du scénario	Éléments évalués	Scénario de base	Analyse de sensibilité	Commentaire
1	Évaluation des impacts	Méthode d'évaluation des impacts	IMPACT World +	ReCiPe	Méthode d'évaluation des impacts la plus récente après IMPACT World +
2	Masse des véhicules	Masses des véhicules	1295 kg pour le véhicule conventionnel et 1520 kg pour le véhicule électrique	De 1067 à 1475 pour le véhicule conventionnel et de 1180 à 1900 kg pour le véhicule électrique	La masse des véhicules retrouvés au Québec (voir Tableau 2-3)
3	Type de conduite	Durée de vie des véhicules	150 000 km	0 à 300 000 km	Variation de la durée de vie attendue des véhicules
		Consommation d'électricité par le véhicule électrique	19 kWh/100 km	13 à 24 kWh/100 km	Voir Tableau 2-7 et banc d'essai Hydro-Québec
		Consommation de carburant en milieu urbain	7,6 L/100 km +15% pour utilisation de chauffage ou climatiseur	7,1 à 9,3 L/100 km +15% pour utilisation de chauffage ou climatiseur	Variation de la consommation des divers modèles de véhicules conventionnels; voir Tableau 2-10
		Consommation de carburant sur l'autoroute	5,4 L/100 km +15% pour utilisation de chauffage ou climatiseur	4,9 à 6,7 L/100 km +15% pour utilisation de chauffage ou climatiseur	Variation de la consommation des divers modèles de véhicules conventionnels; voir Tableau 2-10
		Scénario de déplacement des véhicules	55% en milieu urbain, 45% sur l'autoroute	0-100 % milieu urbain (donc 100 % à 0 % sur l'autoroute)	Intégralité des scénarios potentiels
4	Changement de la batterie	Changement de la batterie au cours de la durée de vie du véhicule	Aucun changement	Changement de la batterie à 50 000 km ou 100 000 km	Hypothèse arbitraire sur une durée de vie réduite potentielle de la batterie
5	Efficacité de la borne de recharge	Borne de recharge	7,5 % de perte	0 à 20 % de perte	Hypothèse arbitraire sur le taux de perte à la borne de recharge
6	Lieu de production des véhicules	Distances de transport et alimentation énergétique	États-Unis (Tennessee)	Japon (8900 km par bateau et 3700 km par train)  Cas hypothétique : Québec	Couvre un échantillon des lieux de production. Le Japon représente le lieu de production le plus éloigné du Québec. Évalue l'hypothèse d'un Québec devenant un producteur de véhicules et de batteries
7	Type de batterie utilisé pour le véhicule électrique	Batterie	LiNCM	LiFePO <sub>4</sub>	Basée sur les données d'inventaire disponibles
8	Inclusion de la route dans les frontières du système	Route	Exclue	Inclue	Sert de mise en perspective de la contribution de la route face à celle des véhicules
9	Fin de vie de la batterie	Fin de vie de la batterie	Processus hydrométallurgique	Procédé pyrométallurgique et processus direct à basse température (cryogénique)	Le procédé pyrométallurgique provient de la base de données <i>ecoinvent</i> tandis que le procédé cryogénique suit la modélisation effectuée par Hawkins et coll. (2013)

### 3.7.6 Analyse d'incertitude

L'incertitude inhérente au modèle d'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.

#### Incertitude sur les données d'inventaire : analyse Monte-Carlo

Une analyse d'incertitude de type Monte-Carlo a été réalisée à l'aide du logiciel SimaPro 8.0.5 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 1 000. Toutefois, les résultats de l'analyse d'incertitude ont mis en évidence des problématiques inhérentes à la base de données *ecoinvent v3.1* quant à l'évaluation des incertitudes. En effet, une erreur d'allocation de la forme de distribution statistique (*normale* plutôt que *log normale*) crée un artefact mathématique (p.ex. des émissions de polluants négatifs). Considérant les limitations quant à l'incertitude de la base de données, l'analyse d'incertitude ne sera pas présentée dans le cadre de ce rapport.

#### Incertitude sur les modèles de caractérisation

L'incertitude sur les modèles de caractérisation est généralement considérée en produisant une analyse de sensibilité basée sur une seconde méthode d'évaluation des impacts. Cette façon de faire permet d'évaluer la variabilité des modèles de caractérisation et donc, de tester la robustesse des résultats obtenus à partir de la première méthode d'évaluation des impacts.

### 3.8 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 3-4 : Membres constituants du comité de revue critique**

Nom	Organisme d'attache	Implication / Champ d'expertise
<b>Gontran Bage</b>	Raymond Chabot Grant Thornton	Président du comité de revue, expert ACV
<b>Jacques Duval</b>		Réviseur, chroniqueur automobile
<b>Pierre Beaudoin</b>	CAA-Québec	Réviseur, expert technique véhicule
<b>Victor Poudelet</b>	Raymond Chabot Grant Thornton	Réviseur, expert ACV

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.

**L'ACV a été jugée comme étant conforme aux exigences de la norme ISO 14040/14044 par le comité de revue critique.** Les commentaires ainsi que les réponses sont présentés à l'Annexe F.

## 4 Résultats et discussion

Ce chapitre couvre les deux dernières phases de l'ACV : c'est-à-dire l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) des systèmes étudiés et l'interprétation des résultats. Il présente le profil d'impact environnemental des systèmes à l'étude, leur mise en perspective l'un par rapport à l'autre, de même que différentes études de sensibilités et une analyse de la qualité des données. Les résultats bruts de l'ÉICV sont disponibles à l'Annexe E.

### 4.1 Profil d'impact environnemental des véhicules électrique et conventionnel

Le premier objectif de l'étude était d'établir les profils d'impacts environnementaux des véhicules électrique et conventionnel, **et ce, après 150 000 km parcourus.**

#### 4.1.1 Profil environnemental du véhicule électrique : catégories de dommages

La Figure 4-1 présente le profil environnemental du véhicule électrique selon les deux catégories de dommages de la méthode IMPACT World +.

Il apparaît que :

##### Étape de production du véhicule

- L'étape de la production du véhicule s'avère le principal contributeur aux impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique, comptant pour 72 % des impacts pour la catégorie *Santé humaine* et 62 % des impacts pour la catégorie *Qualité des écosystèmes*.
- Les principales composantes contribuant à la catégorie *Santé humaine* sont :
  - production du moteur électrique et de la transmission (52 % de l'étape de production) ;
  - production du corps et les portes (22 % de l'étape de production) ;
  - production de l'intérieur et de l'extérieur (13 % de l'étape de production) ;
  - production du châssis (9 % de l'étape de production).
- Les principales pièces contribuant à la catégorie *Qualité des écosystèmes* sont :
  - production du moteur électrique et de la transmission (50 % de l'étape de production) ;
  - production du corps et les portes (20 % de l'étape de production) ;
  - production de l'intérieur et de l'extérieur (17 % de l'étape de production) ;
  - production du châssis (7 % de l'étape de production).
- Les quatre composantes du véhicule responsables de la majeure partie des impacts pour les catégories *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* sont principalement constituées (% massique) **d'aluminium, de cuivre, d'acier inoxydable et de fer** ;
  - Trois de ces composantes (c.-à-d. corps et les portes, l'intérieur et de l'extérieur ainsi que le châssis) sont de fabrication similaire au véhicule conventionnel. Seuls le moteur électrique et la transmission sont de fabrication spécifique au véhicule électrique (plus forte proportion d'aluminium et de cuivre).

### Étape de production de la batterie

- L'étape de production de la batterie contribue au profil environnemental du véhicule à hauteur de 21 % des impacts pour la catégorie *Santé humaine* et de 28 % des impacts pour la catégorie *Qualité des écosystèmes*.
  - Les principales pièces contribuant à la catégorie *Santé humaine* sont :
    - Les composantes de la batterie (73 %) telles que l'anode et la cathode ainsi que l'électricité nécessaire à la production de la batterie (28 kWh/kg de batterie) sont les principaux contributeurs. Il est à noter que le bouquet électrique du lieu de production a une grande importance sur ce résultat. Dans le scénario de base, le lieu de production de la batterie est le Japon ; pays dont le bouquet électrique présente une empreinte carbone supérieure à celle du Québec (voir Figure 2-2) ;
    - L'emballage représente 14 % de l'impact de la batterie ;
    - Le « battery management system » représente 9 % de l'impact de la batterie.
  - Les principales pièces contribuant à la catégorie *Qualité des écosystèmes* sont :
    - Les composantes de la batterie (79 %) telles que l'anode et la cathode ainsi que l'électricité nécessaire à la production de la batterie sont les principaux contributeurs ;
    - L'emballage représente 12 % de l'impact de la batterie ;
    - Le « battery management system » représente 6 % de l'impact de la batterie.

### Étape de transport du véhicule du lieu de production vers l'utilisateur

- L'étape de transport du lieu de production vers l'utilisateur (*Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* : < 1 %) s'avère un contributeur marginal au profil environnemental du véhicule électrique.

### Étape d'utilisation du véhicule

- En raison de la propreté du bouquet électrique québécois, l'étape d'utilisation du véhicule (*Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* : <4 %) est un contributeur relativement peu important au profil environnemental du véhicule ;
- L'approvisionnement électrique, compte pour près de 80 % du faible impact de l'étape d'utilisation ;
- La maintenance du véhicule et la fabrication de la borne de recharge complètent le portrait de l'étape d'utilisation.

### Étape de fin de vie du véhicule et de la batterie

- L'étape de fin de vie (*Santé humaine* : 2,5 % et *Qualité des écosystèmes* : 5 %) s'avère un contributeur relativement peu important au profil environnemental du véhicule.

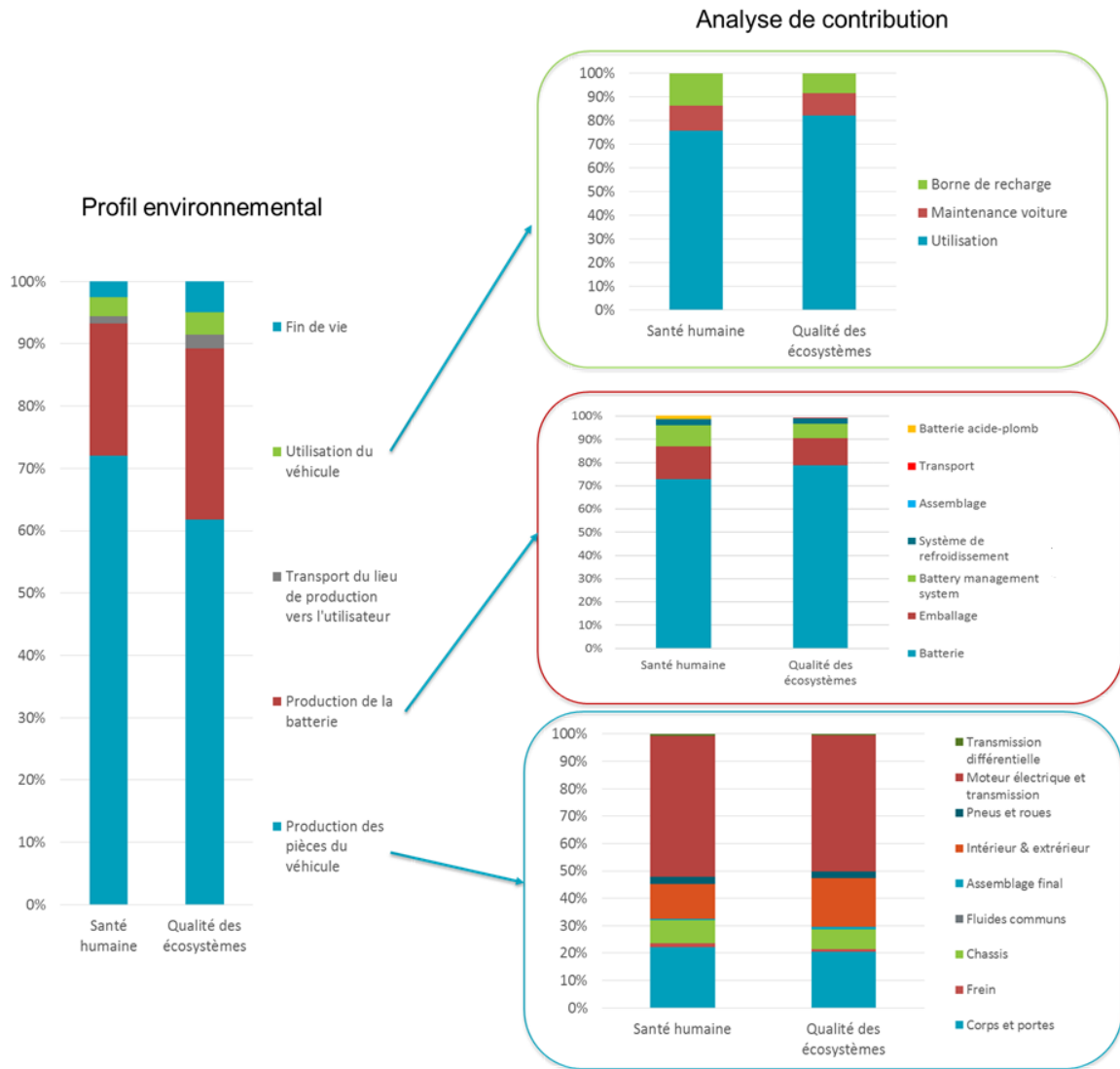


Figure 4-1 : Profil environnemental du véhicule électrique (catégories de dommages).



#### 4.1.2 Profil environnemental du véhicule électrique : catégories d'impacts complémentaires

La Figure 4-2 présente le profil environnemental complémentaire du véhicule électrique selon trois catégories d'impacts (c.-à-d. *Changement climatique*, *Épuisement des ressources fossiles* et *Épuisement des ressources minérales*) de la méthode IMPACT World +.

Il apparaît que :

##### Étape de production du véhicule

- L'étape de production du véhicule s'avère le principal contributeur aux impacts environnementaux complémentaires du véhicule électrique, comptant pour 63 % des impacts pour la catégorie *Changement climatique*, 57 % des impacts pour la catégorie *Épuisement des ressources fossiles* et 80 % des impacts pour la catégorie *Épuisement des ressources minérales*.
- Les principales composantes contribuant à la catégorie *Changement climatique* sont :
  - production du moteur électrique et de la transmission (43 %) ;
  - production du corps et des portes (23 %) ;
  - production de l'intérieur et de l'extérieur (20 %) ;
  - production du châssis (8 %).
- Les principales composantes contribuant à la catégorie *Épuisement des ressources fossiles* sont :
  - production du moteur électrique et de la transmission (35 %) ;
  - production de l'intérieur et de l'extérieur (27 %) ;
  - production du corps et des portes (22 %) ;
  - production du châssis (7 %).
- Les principales composantes contribuant à la catégorie *Épuisement des ressources minérales* sont :
  - production du moteur électrique et de la transmission (36 %) ;
  - production du corps et des portes (34 %) ;
  - production du châssis (12 %) ;
  - production de l'intérieur et de l'extérieur (10 %).

##### Étape de production de la batterie

- La production de la batterie du véhicule électrique contribue pour 28 % des impacts pour la catégorie *Changement climatique*, 33 % des impacts pour la catégorie *Épuisement des ressources fossiles* et 18 % des impacts pour la catégorie *Épuisement des ressources minérales*.
- Les principales composantes contribuant à la catégorie *Changement climatique* sont :
  - production des composantes de la batterie (78 %) ;
  - l'emballage (13 %) ;
  - le « battery management system » (6 %).
- Les principales pièces contribuant à la catégorie *Épuisement des ressources fossiles* sont :
  - production des composantes de la batterie (83 %) ;

- l'emballage (10 %) ;
- le « batterie management system » (4 %).
- Les principales pièces contribuant à la catégorie *Épuisement des ressources minérales* sont :
  - production des composantes de la batterie (67 %) ;
  - l'emballage (21 %) ;
  - le « battery management system » (8 %).

#### **Étape de transport du véhicule du lieu de production vers l'utilisateur**

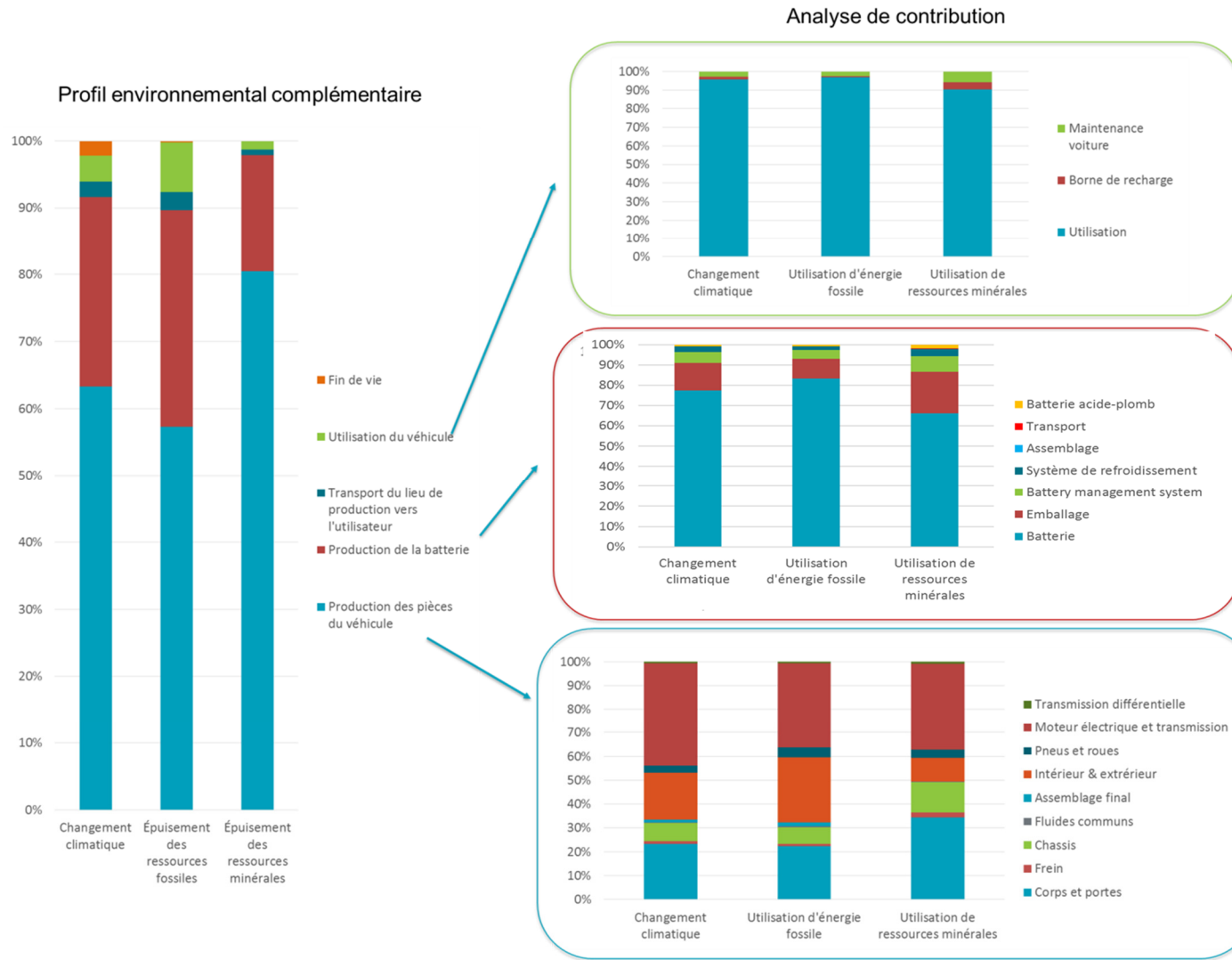
- L'étape de transport du lieu de production vers l'utilisateur s'avère un contributeur marginal (< 1 %) au profil environnemental complémentaire du véhicule.

#### **Étape d'utilisation du véhicule**

- En raison de la propreté du bouquet électrique québécois, l'étape d'utilisation du véhicule est un contributeur relativement peu important (*Changement climatique* : 4 %, *Épuisement des ressources fossiles* : 8 % et *Épuisement des ressources minérales* : 1 %) au profil environnemental complémentaire du véhicule.
- L'approvisionnement électrique compte pour près de 90 % de la catégorie *Changement climatique* , 94 % de la catégorie *Épuisement des ressources fossiles* et 80 % de la catégorie *Épuisement des ressources minérales*.

#### **Étape de fin de vie du véhicule**

- L'étape de fin de vie s'avère un contributeur marginal (<4 %) au profil environnemental complémentaire du véhicule.



**Figure 4-2 : Profil environnemental complémentaire du véhicule électrique (catégories d'impacts).**

### **Véhicule électrique : globalement, on retient que...**

- Les étapes de production du véhicule et de la batterie sont les principaux contributeurs aux impacts environnementaux du véhicule électrique ;
- Le moteur électrique et la transmission s'avèrent les principaux contributeurs à l'étape de production du véhicule et se distinguent du véhicule conventionnel par une présence accrue d'aluminium et de cuivre ;
- **Au Québec, l'étape d'utilisation du véhicule (c.-à-d. la consommation d'électricité) s'avère un contributeur relativement peu important ;**
- Les étapes de transport du véhicule du lieu de production vers l'utilisateur et de fin de vie du véhicule sont des contributeurs peu importants.

#### 4.1.3 Profil environnemental du véhicule conventionnel : catégories de dommages

La Figure 4-3 présente le profil environnemental du véhicule conventionnel selon les deux catégories de dommages de la méthode IMPACT World +.

Il apparaît que :

##### Étape de production du véhicule

- L'étape de production du véhicule contribue au profil environnemental du véhicule à hauteur de 33 % des impacts pour la catégorie *Santé humaine* et de 17 % des impacts pour la catégorie *Qualité des écosystèmes*.
  - Les principales pièces contribuant à la catégorie *Santé humaine* sont :
    - corps et portes (27 % de l'étape de production) ;
    - châssis (17 % de l'étape de production) ;
    - intérieur et extérieur (20 % de l'étape de production) ;
    - moteur à combustion interne (13 % de l'étape de production) ;
    - pneus et roues (5 % de l'étape de production) ;
    - groupe motopropulseur (9 % de l'étape de production) ;
    - transmission (5 % de l'étape de production).
  - Les principales pièces contribuant à la catégorie *Qualité des écosystèmes* sont :
    - corps et portes (22 % de l'étape de production) ;
    - châssis (15 % de l'étape de production) ;
    - intérieur et extérieur (25 % de l'étape de production) ;
    - moteur à combustion interne (11 % de l'étape de production) ;
    - pneus et roues (5 % de l'étape de production) ;
    - groupe motopropulseur (11 % de l'étape de production) ;
    - la transmission (7 % de l'étape de production).

##### Étape de production de la batterie

- L'étape de production de la batterie plomb-acide s'avère un contributeur marginal (<0,2 %) au profil environnemental du véhicule.

##### Étape de transport du véhicule du lieu de production vers l'utilisateur

- L'étape de transport du lieu de production vers l'utilisateur s'avère un contributeur marginal (< 1 %) au profil environnemental du véhicule.

##### Étape d'utilisation du véhicule

- L'étape d'utilisation du véhicule représente le principal contributeur au profil environnemental total du véhicule.
  - Pour la *Santé humaine*, l'étape d'utilisation représente 65% de l'impact total du véhicule :
    - Près de 76 % de l'impact de l'étape d'utilisation est attribuable aux émissions du véhicule durant son utilisation : le CO<sub>2</sub> s'avère la principale émission contributrice (92 %) à l'étape d'utilisation du véhicule ;
    - La production (et son transport jusqu'au consommateur) de l'éthanol (2 %) et de l'essence (20 %) sont les autres contributeurs de l'étape d'utilisation.

- Pour la *Qualité des écosystèmes*, l'étape d'utilisation représente 80 % de l'impact total du véhicule :
  - Près de 77 % de ces contributions sont associées aux émissions du véhicule durant son utilisation : le CO<sub>2</sub> s'avère la principale émission contributrice (94 %) à l'étape d'utilisation du véhicule ;
  - La production (et son transport jusqu'au consommateur) de l'éthanol (2 %) et de l'essence (19 %) sont les autres contributeurs à cette étape.

### Étape de fin de vie du véhicule

- L'étape de fin de vie s'avère un contributeur marginal (<2 %) au profil environnemental.

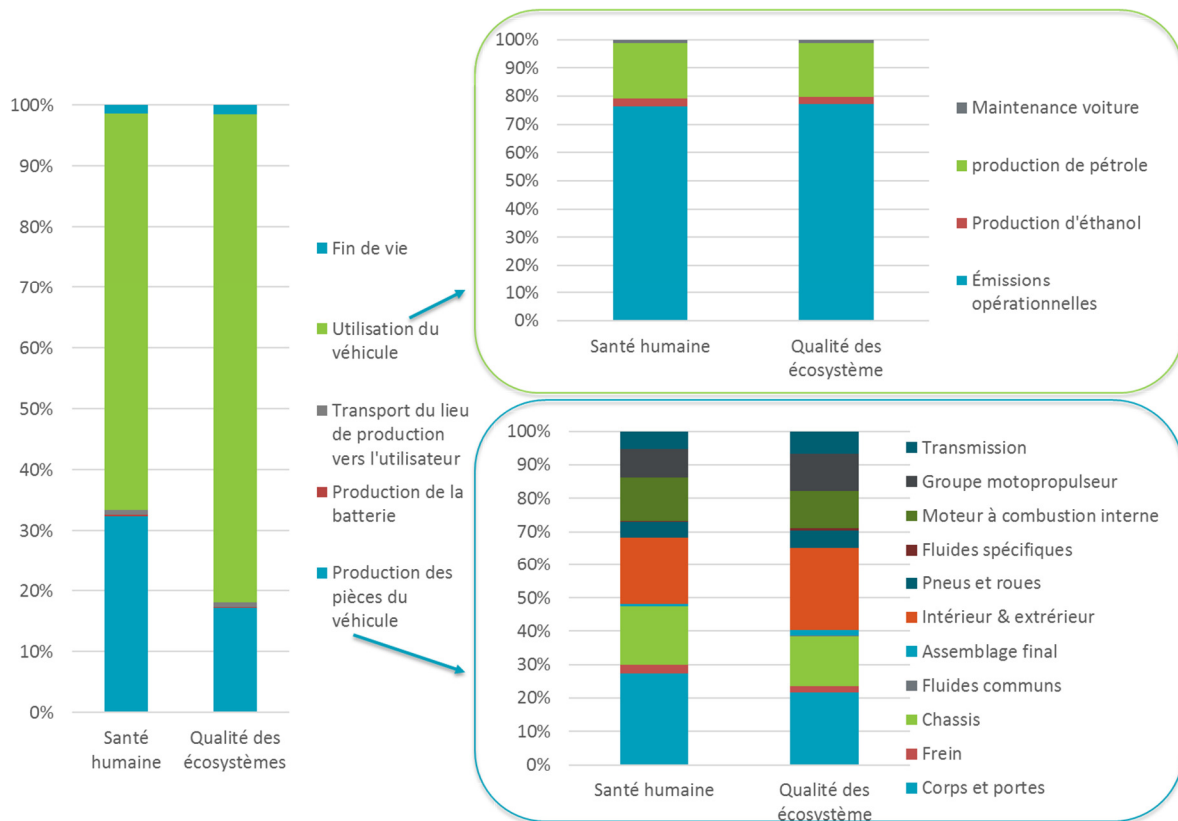


Figure 4-3 : Profil environnemental du véhicule conventionnel (catégories de dommages).

#### **4.1.4 Profil environnemental du véhicule conventionnel : catégories d'impacts complémentaires**

La Figure 4-4 présente le profil environnemental complémentaire du véhicule conventionnel selon trois catégories d'impacts (c.-à-d. *Changement climatique*, *Épuisement des ressources fossiles* et *Épuisement des ressources minérales*) de la méthode IMPACT World +.

Il apparaît que :

##### **Étape de production du véhicule**

- L'étape de production du véhicule contribue aux catégories *Changement climatique* et *Épuisement des ressources fossiles* à hauteur de 16 % chacun ;
- L'étape de production du véhicule s'avère le principal contributeur à la catégorie *Épuisement des ressources minérales* (87 %).

##### **Étape de production de la batterie**

- L'étape de production de la batterie plomb-acide s'avère un contributeur marginal (<1 %) au profil environnemental complémentaire du véhicule.

##### **Étape de transport du véhicule du lieu de production vers l'utilisateur**

- L'étape de transport du lieu de production vers l'utilisateur s'avère un contributeur marginal (< 2 %) au profil environnemental complémentaire du véhicule.

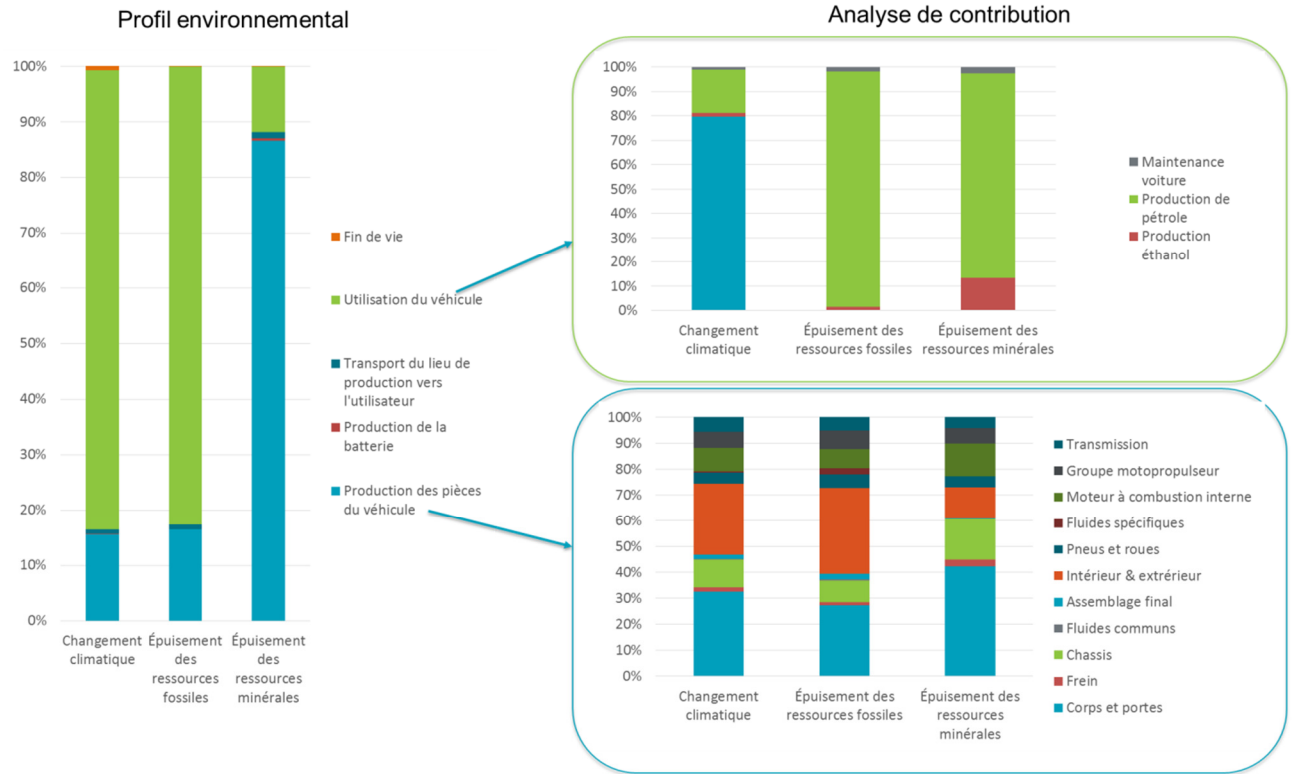
##### **Étape d'utilisation du véhicule**

- L'étape d'utilisation du véhicule représente le principal contributeur aux catégories *Changement climatique* (83 %) et *Épuisement des ressources fossiles* (82 %) ;
  - Près de 80% de la contribution à la catégorie *Changement climatique* est associé aux émissions du véhicule durant son utilisation ;
  - Près de 100% de la contribution de la catégorie *Épuisement des ressources fossiles* est associé à la production de l'essence.

L'étape d'utilisation contribue à hauteur de 12 % à la catégorie *Épuisement des ressources minérales*.

##### **Étape de fin de vie du véhicule**

- L'étape de fin de vie s'avère un contributeur marginal (<1 %) au profil environnemental complémentaire du véhicule.



**Figure 4-4 : Profil environnemental complémentaire du véhicule conventionnel (catégories d'impacts).**



**À noter :**

La production de pétrole considérée dans cette étude réfère à du pétrole conventionnel. Outre les émissions de GES, il est difficile actuellement d'établir l'inventaire du pétrole produit à partir de sources non conventionnelles telles qu'à partir des sables bitumineux ou de schiste.

Le processus *ecoinvent* de production de l'essence<sup>12</sup> utilisée ne considère pas la production de pétrole conventionnel à partir d'un gisement ou d'une géographie précise, mais plutôt d'une moyenne mondiale de la production. Le processus équivaut à près de 130 et 550 kg eq. CO<sub>2</sub>/baril de produit raffiné pour l'étape de production uniquement et sur tout le cycle de vie, respectivement.

Afin de potentiellement tenir compte d'un changement d'approvisionnement se répercutant sur la catégorie *Changement climatique*, il est possible de se référer à la figure suivante adaptée d'une étude provenant de l'IHS CERA (2012) évaluant les émissions GES associées à divers gisements de pétrole conventionnel et non conventionnel (« oil sands ») à travers le monde.

Il est toutefois à noter que certaines différences peuvent exister entre les frontières des systèmes considérées par l'étude du IHS CERA et le processus *ecoinvent*. L'approvisionnement québécois en pétrole, en 2013, provenant majoritairement d'Algérie (Whitmore et coll., 2015), n'est malheureusement pas présenté aux fins de comparaison.

Il apparaît toutefois que la production de pétrole mondiale, telle que rapportée dans le processus *ecoinvent*, émet généralement plus de GES, que la plupart des gisements pétroliers considérés par l'IHS CERA (2012). L'utilisation du processus mondial *ecoinvent* s'avérerait donc potentiellement (tout dépendant de l'approvisionnement) une hypothèse pénalisante, pour l'étape de production du pétrole uniquement, pour le véhicule conventionnel. Considérant toutefois que cette hypothèse pénalisante ne contribue qu'à 10% de l'étape d'utilisation du véhicule conventionnel, il est possible de penser que la diminution de l'impact potentiel ne serait pas significative.

---

<sup>12</sup> c.-à-d. « Petrol, low-sulfur {RoW} | market for »

**Well-to-wheels GHG emissions for oil sands and other crudes**  
(tight boundary)

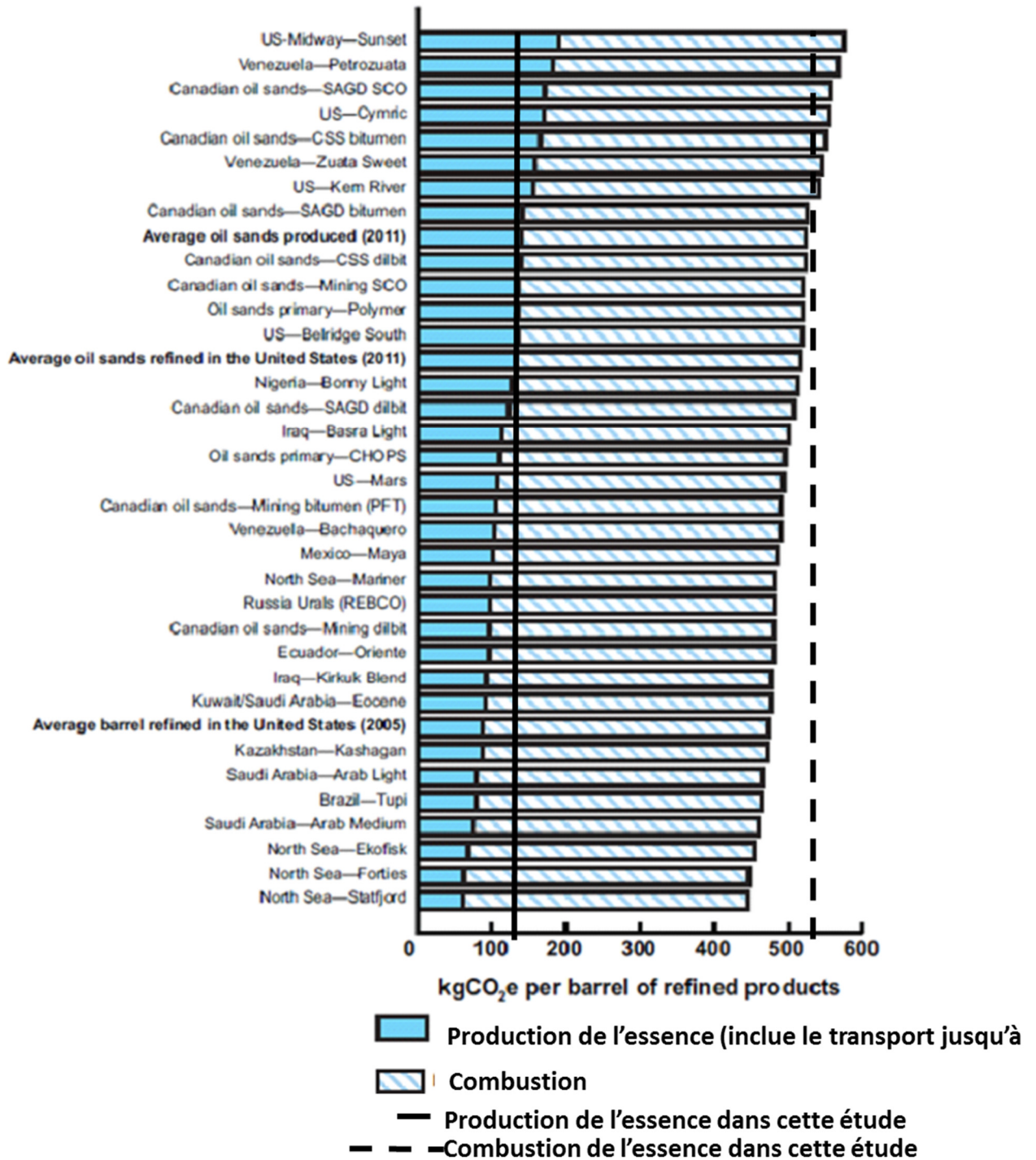


Figure 4-5 : Évaluation des émissions de gaz à effet de serre en provenance de divers gisements pétroliers à travers le monde (IHS CERA, 2012)

### Véhicule conventionnel : globalement, on retient que...

- L'étape d'utilisation, et particulièrement les émissions du véhicule durant celle-ci, est le principal contributeur au profil environnemental pour les catégories *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes*, *Changement climatique* et *Épuisement des ressources fossiles* ;
- Les émissions de CO<sub>2</sub> lors de l'étape d'utilisation sont le principal contributeur aux catégories de dommages *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* : l'influence de la catégorie d'impact *Changement climatique* sur les catégories de dommages *Santé humaine* (modélisée p. ex. par le biais d'inondations et la prolifération des maladies) et *Qualité des écosystèmes* (via p.ex. la désertification) est donc plus importante que celle de la catégorie d'impact *toxicité (Santé humaine)* ou la catégorie *écotoxicité (Qualité des écosystèmes)* associée à l'inhalation des émissions du véhicule ;
- L'étape de production du véhicule s'avère également un contributeur important pour toutes les catégories d'impacts environnementaux, particulièrement pour la catégorie *Épuisement des ressources minérales*;
- Les étapes de transport du véhicule du lieu de production vers l'utilisateur et de fin de vie du véhicule sont des contributeurs peu importants aux différents résultats d'indicateurs de catégories.

## 5 Comparaison des véhicules électrique et conventionnel

---

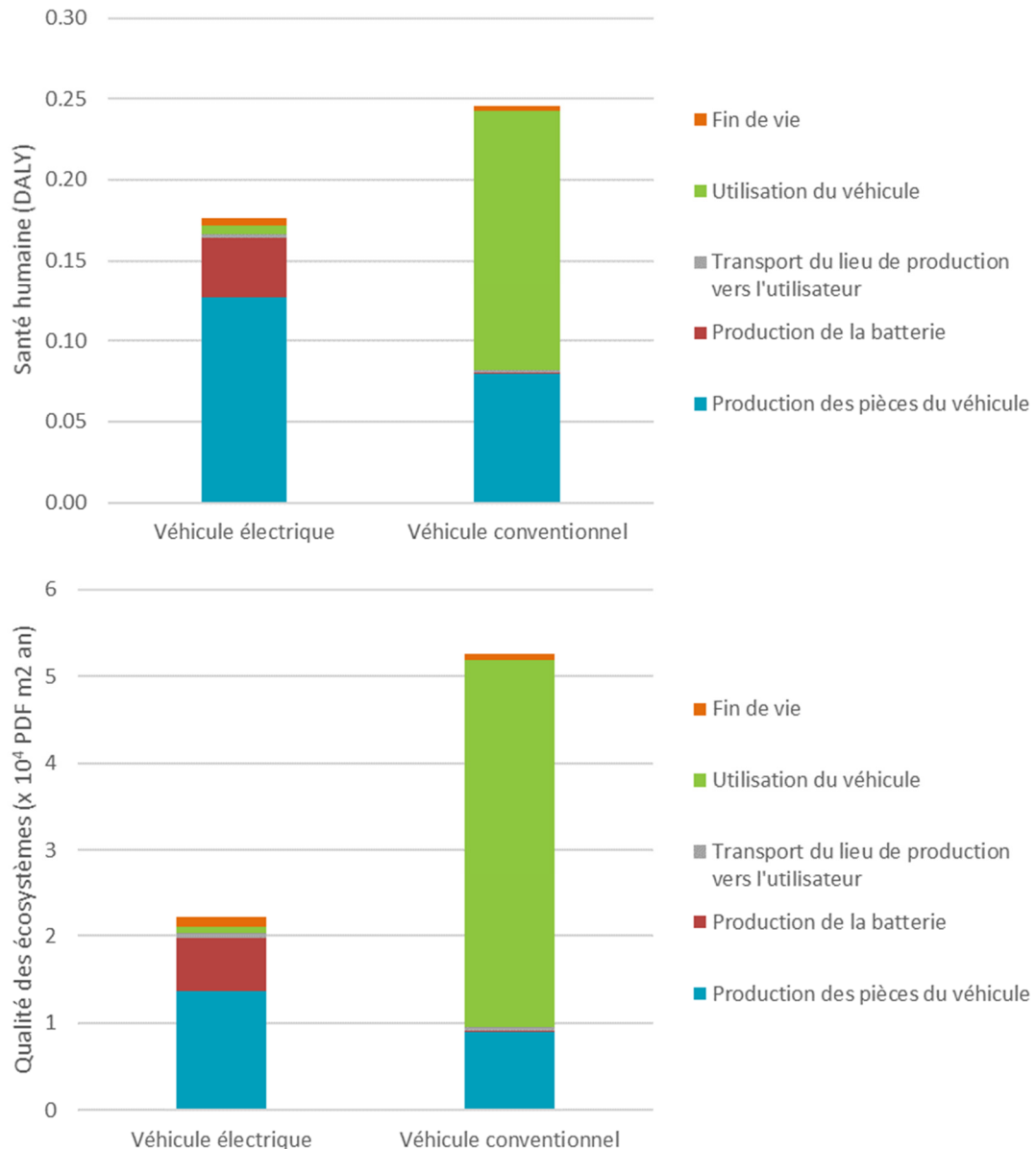
Cette section compare les profils d'impacts environnementaux des véhicules électrique et conventionnel présentés préalablement **et ce après 150 000 km parcourus**.

### 5.1.1 Analyse comparative : catégories de dommages

La Figure 5-1 compare le véhicule conventionnel au véhicule électrique selon les deux catégories de dommages de la méthode IMPACT World +.

Il apparaît que :

- Les résultats d'indicateurs du véhicule électrique sont inférieurs de 29 % à ceux du véhicule conventionnel pour la catégorie *Santé humaine* et de 58 % pour la catégorie *Qualité des écosystèmes* ;
- La différence s'explique particulièrement par la différence majeure des impacts associés à l'étape d'utilisation où le véhicule électrique présente des résultats d'indicateurs inférieurs de 3270 % (*Santé humaine*) et 5680 % (*Qualité des écosystèmes*) à ceux du véhicule conventionnel ;
- Les différences majeures pour les autres étapes du cycle de vie sont :
  - L'étape de production du véhicule électrique présente des résultats d'indicateurs supérieurs de 59 % (*Santé humaine*) et 51 % (*Qualité des écosystèmes*) à ceux du véhicule conventionnel (voir section 5.1.3 pour plus d'explications);
  - La comparaison des batteries des deux véhicules peut s'avérer trompeuse. En effet, la fonction des batteries (acide-plomb et au lithium) est grandement différente au niveau de la propulsion du véhicule. Les impacts potentiels de la batterie acide-plomb des deux types de véhicules sont identiques. La contribution relative de la batterie Li-ion aux impacts du véhicule électrique a été discutée à la section 4.1.1 et, comme la fonction de cette batterie n'a pas d'équivalent au niveau du véhicule conventionnel, il n'est pas approprié de comparer ses impacts avec ceux de la batterie acide-plomb;
  - L'étape de transport et de fin de vie des véhicules contribuent que marginalement aux diverses catégories et n'ont donc que peu d'incidence sur la comparaison des véhicules.



**Figure 5-1 : Analyse comparative entre les véhicules électrique et conventionnel (catégories de dommages).**

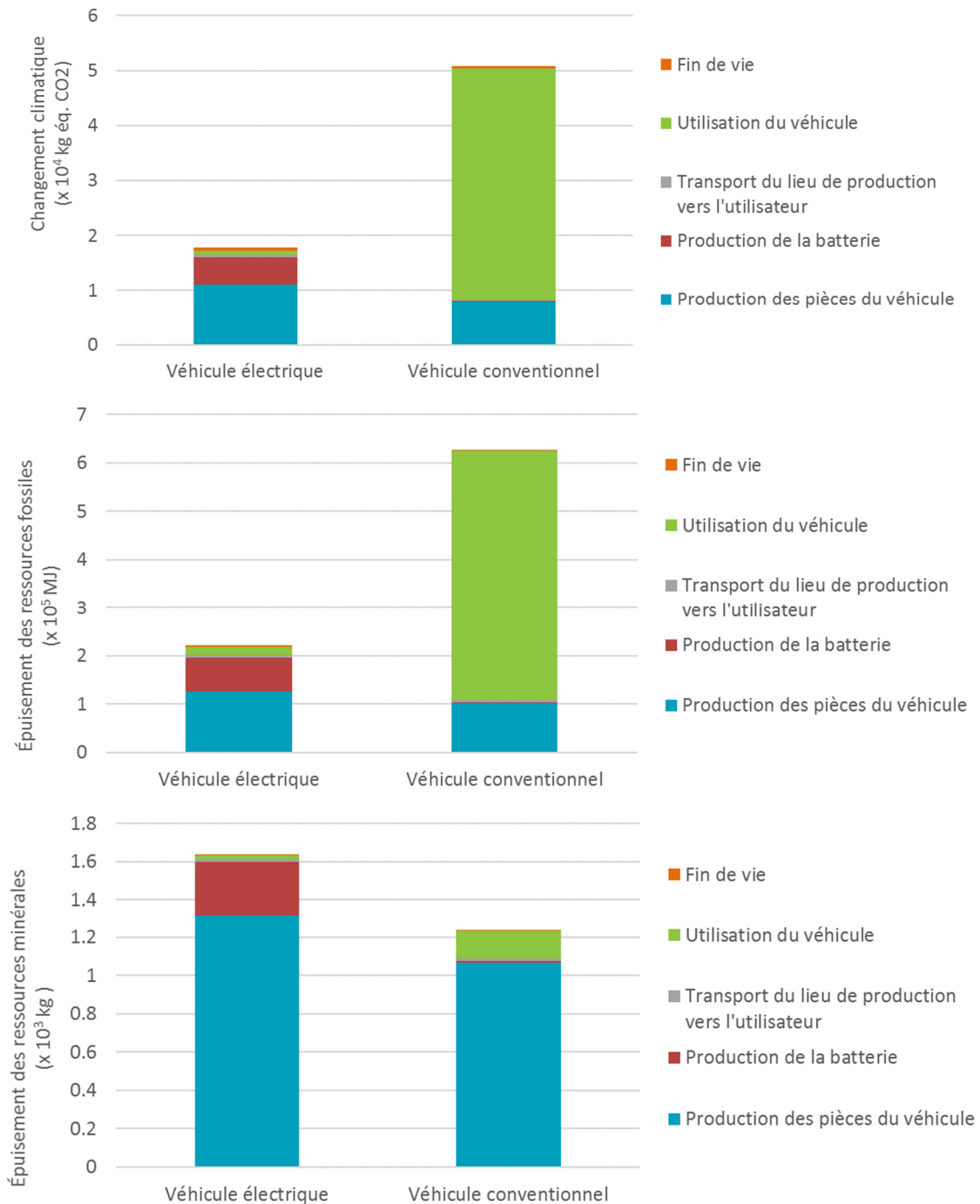
### 5.1.2 Analyse comparative : catégories d'impacts complémentaires

La Figure 5-2 présente la comparaison du véhicule conventionnel et du véhicule électrique selon les trois catégories d'impacts complémentaires de la méthode IMPACT World +.

Il apparaît que :

- Les résultats d'indicateurs pour le véhicule électrique sont inférieurs de près de 65 % à ceux pour le véhicule conventionnel pour les catégories *Changement climatique* et *Épuisement des ressources fossiles* ;

- Le résultat du véhicule électrique s'avère plus élevé de 25% que celui pour le véhicule conventionnel pour la catégorie *Épuisement des ressources minérales*. Pour les deux véhicules, l'étape de production des véhicules s'avère le principal responsable.



**Figure 5-2 : Analyse comparative entre les véhicules électrique et conventionnel (catégories d'impacts).**

**Par conséquent :**

- Le scénario de base, se voulant la meilleure représentation d'un scénario moyen, est à l'avantage du véhicule électrique au niveau des catégories de dommages (*Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*) ;
- Seule la catégorie d'impact *Épuisement des ressources minérales* empêche de conclure que le véhicule électrique est meilleur, en terme environnemental, que le véhicule conventionnel.

**5.1.3 Mise en perspective**

La différence entre les composantes d'un véhicule conventionnel et électrique selon Hawkins et coll. (2013), outre la batterie du véhicule électrique pour 253 kg, est principalement explicable par la différence des quantités de métaux et l'impact associé à leur production.

Il apparaît que l'aluminium et le cuivre sont les matériaux de prédilection pour les pièces spécifiques au véhicule électrique. L'aluminium est choisi notamment à cause de sa plus faible densité qui sert à pallier la masse additionnelle de la batterie électrique tandis que le cuivre est utilisé dans le système électrique accru. Toutefois, ces deux matériaux présentent des facteurs associés à leur production plus élevés pour chacune des catégories considérées résultant ainsi en des impacts potentiels plus élevés pour le véhicule électrique comparativement au véhicule conventionnel.

**Tableau 5-1 : Constituants principaux des véhicules**

Composantes	Acier	Fer	Aluminium	Cuivre
<b>Pièces communes (kg) (Hawkins et coll. 2013)</b>				
Corps et portes	470,2	0,0	0,0	0,2
Freins	10,6	18,2	0,0	0,0
Châssis	172,5	0,0	3,3	4,1
Intérieur-extérieur	70,6	0,0	18,5	11,5
Pneus et roues	47	0,0	0,0	0,0
<b>Pièces spécifiques au véhicule conventionnel (kg) (Hawkins et coll. 2013)</b>				
Pièces spécifiques	110,4	97,5	49,5	6,5
<b>Pièces spécifiques au véhicule électrique (kg) (Hawkins et coll. 2013)</b>				
Pièces spécifiques	33,1	13,2	184,5	110,0
Total véhicule conventionnel	881,3	115,7	71,3	22,3
Total véhicule électrique	804,0	31,4	206,3	125,8
<b>Facteur associé à la production selon la méthode IMPACT World + (par kg de matériel produit) (</b>				
<i>Santé humaine</i> (DALY/kg)	$3,4 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-4}$
<i>Qualité des écosystèmes</i> (PDF m2 an/kg)	2,1	2,2	16,8	18,5
<i>Changement climatique</i> (kg CO2 eq. /kg)	1,8	2,0	15,6	5,5
<i>Épuisement des ressources fossiles</i> (MJ /kg)	14,9	16,2	120,1	74,1
<i>Épuisement des ressources minérales</i> (kg/kg)	0,7	0,9	1,3	1,3

### **Globalement, on retient que...**

- **Le véhicule électrique présente des résultats d'indicateurs plus faibles que pour le véhicule conventionnel pour les catégories *Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Changement climatique* et *Épuisement des ressources fossiles* ;**
- **Le véhicule électrique présente un résultat d'indicateur plus élevé que pour le véhicule conventionnel pour la catégorie *Épuisement des ressources minérales* ; *empêchant de conclure que le véhicule électrique est meilleur que le véhicule conventionnel du point de vue environnemental.***
- Une utilisation plus importante de certains métaux, comme l'aluminium et le cuivre, ainsi que la production de la batterie du véhicule électrique explique les impacts potentiels environnementaux plus élevés associés à la fabrication du véhicule électrique que du véhicule conventionnel.
- **Dans un contexte d'utilisation québécois, le véhicule électrique présente des impacts potentiels négligeables lors de son étape d'utilisation, comparativement au véhicule conventionnel.**



## 5.2 Qualité des données d'inventaire

Les résultats de l'analyse de la qualité des données d'inventaire sont résumés à l'Annexe D du présent rapport. Cette analyse allie la « certitude » de la donnée (donnée représentative du processus désiré, complète et pertinente temporellement et géographiquement) et la contribution de la donnée aux impacts potentiels. Dans un tel cas, on retrouve quatre grandes catégories :

- Données incertaines et contribuant largement aux impacts potentiels;
- Données incertaines et contribuant partiellement aux impacts potentiels;
- Données certaines et contribuant largement aux impacts potentiels;
- Données certaines et contribuant partiellement aux impacts potentiels.

À partir de cette analyse, il a été possible de constater que :

- Dans l'ensemble, les données employées pour l'étude sont jugées acceptables.
- Les données concernant les composantes des véhicules sont détaillées, mais ne représentent pas nécessairement chacun des modèles de véhicules retrouvés au Québec et peuvent difficilement être représentatives d'une large gamme de modèles de véhicules. La qualité des données pourrait être améliorée en réalisant une collecte de données visant plusieurs modèles de véhicules utilisés au Québec. Cette situation ne peut donc être améliorée à court terme;
- Les impacts potentiels liés aux composantes de la borne de recharge s'avèrent relativement incertains puisque ces composantes ont été modélisées à l'aide de données incomplètes. Cet élément du modèle représente par le fait même une limite et diminue la certitude avec laquelle les conclusions peuvent être tirées. Cependant, la borne de recharge présente globalement une faible contribution aux résultats d'indicateurs de catégories considérés. De plus, par expérience, il est très rare que les infrastructures associées à un système soient le principal contributeur aux impacts, spécialement si la durée de vie de celles-ci s'avère longue. Par conséquent, il est peu probable que l'infrastructure de la borne de recharge, s'il était possible de mieux la modéliser, mette en doute les conclusions de l'étude.

## 5.3 Analyses de sensibilité

Neuf analyses de sensibilité ont été effectuées pour vérifier l'influence des hypothèses et choix de modélisation sur les conclusions de l'étude.

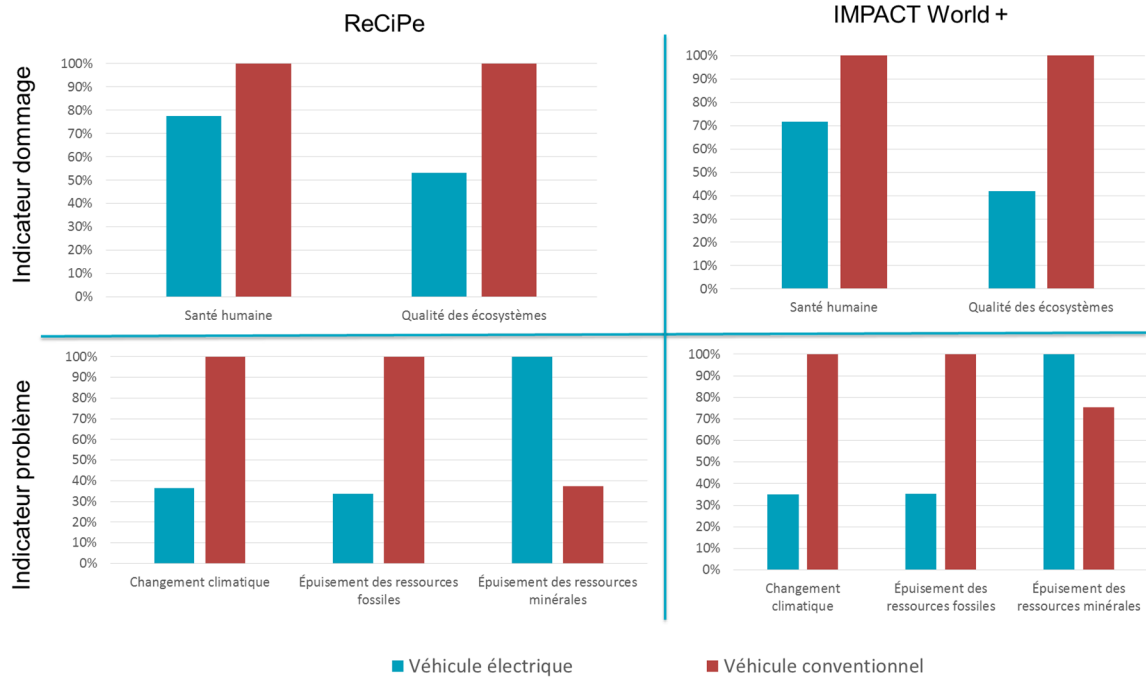
### 5.3.1 Évaluation des impacts avec la méthode ReCiPe

Tel que mentionné précédemment, l'évaluation des impacts a été réalisée avec une seconde méthode, ReCiPe (Goedkoop et coll., 2009), afin d'évaluer l'influence des modèles de caractérisation sur les conclusions de l'étude. En d'autres mots, cette section vise à tester la robustesse des résultats obtenus à partir d'IMPACT World+.

Les résultats obtenus avec cette seconde méthode sont présentés et comparés à ceux obtenus avec la méthode IMPACT World+ à la Figure 5-3.

Il apparaît que :

- **Les conclusions obtenues avec ReCiPe sont les mêmes, pour le scénario de base, que celles obtenues avec IMPACT World+** : le véhicule électrique présente des résultats d'indicateurs inférieurs au véhicule conventionnel pour les catégories *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes*, *Changement climatique* et *Épuisement des ressources fossiles* tandis que le véhicule électrique présente un résultat d'indicateur plus élevé pour la catégorie *Épuisement des ressources minérales* ;
- L'écart entre les véhicules pour les deux méthodes diffère de :
  - **6 % pour la catégorie *Santé humaine*** : malgré l'utilisation du même modèle consensuel, USEtox, pour le calcul d'indicateurs sous-jacents à la *Santé humaine*, IMPACT World+ considère un plus grand nombre d'indicateurs sous-jacents (p. ex. le *Changement climatique* non plus uniquement pour un horizon de 100 ans, mais également pour un horizon compris entre 100 et 500 ans) qui ne sont pas considérées par ReCiPe ;
  - **11 % pour la catégorie *Qualité des écosystèmes*** : IMPACT World+ considère la catégorie d'impact *Acidification des océans*, une catégorie importante, en lien avec les émissions de CO<sub>2</sub>, qui n'est pas prise en compte par la méthode ReCiPe ;
  - **2 % pour la catégorie *Changement climatique*** : les résultats sont basés sur le même modèle développé par le GIEC. Certains facteurs ont été légèrement amendés dans la méthode IMPACT World+ notamment pour le méthane, incluant son oxydation en CO<sub>2</sub> ;
  - **2 % pour la catégorie *Épuisement de ressources fossiles*** : différentes substances sont considérées par les deux méthodes dans cette catégorie d'impact. Par exemple, l'uranium y est caractérisé avec IMPACT World+ tandis que ReCiPe le classifie plutôt dans la catégorie *Épuisement des ressources minérales* ;
  - **38 % pour la catégorie *Épuisement des ressources minérales*** : plusieurs métaux, incluant le lithium, sont caractérisés par la méthode IMPACT World+ alors qu'ils ne le sont pas avec ReCiPe. Ce faisant, ReCiPe sous-estime l'importance de l'utilisation des ressources minérales.



**Figure 5-3 : Analyse comparative des véhicules électrique et conventionnel avec la méthode européenne ReCiPe.**

### 5.3.2 Analyse sensibilité 2 – Masse des véhicules

Cette étude ne cherche pas à comparer un modèle de véhicule conventionnel ou électrique précis, mais bien le plus grand éventail de véhicules, relativement comparables, en circulation au Québec. En ce sens, les véhicules possèdent des caractéristiques et/ou composantes différentes qui influent directement sur la masse des véhicules.

En ce sens, cette analyse de sensibilité cherche à mettre en évidence l'influence de la masse des véhicules sur la comparaison entre les véhicules électrique et conventionnel en considérant pour chacun la plage de valeurs correspondant aux modèles présents sur les routes du Québec. La liste et les caractéristiques des composantes ont été considérées identiques au cas de base, faute de données quantitatives détaillées disponibles sur les composantes des autres modèles de véhicules. Leurs masses respectives ont été mises à l'échelle de la masse totale du véhicule dans les mêmes ratios que pour le cas de base. Les masses des véhicules considérées dans cette analyse sont présentées au Tableau 2-3.

NOTE : la masse supérieure de la Tesla modèle S est associée à une plus grande batterie ; correspondant à des données significativement différentes de celles pour les autres véhicules électriques. Ce modèle de véhicule a tout de même été considéré et les composantes ont été mises à l'échelle comme pour les autres modèles.

Il apparaît que :

- La masse des véhicules (et de ces composantes) n'a aucune incidence sur les conclusions pour les catégories *Qualité des écosystèmes*, *Changement climatique* et *Épuisement des ressources fossiles* ; le véhicule électrique demeure préférable au véhicule conventionnel ;
- La masse des véhicules influence les conclusions pour les catégories :
  - *Santé humaine* : les modèles plus lourds de véhicules électriques pourraient avoir des impacts potentiels similaires au véhicule conventionnel le plus léger ;
  - *Épuisement des ressources minérales* : les véhicules électriques plus légers pourraient avoir des impacts potentiels similaires au véhicule conventionnel plus lourd.

Il est à noter que la consommation énergétique n'a pas été modifiée en fonction de la masse des véhicules. Les différents modèles de véhicules électriques et conventionnels présentent des consommations énergétiques quelque peu différentes entre eux et une masse plus élevée peut engendrer une consommation plus élevée, mais les résultats de l'analyse de sensibilité présentés à la section 5.3.3.2 démontrent qu'une variation de la performance énergétique du véhicule électrique affecte peu sa performance environnementale, contrairement au véhicule conventionnel.

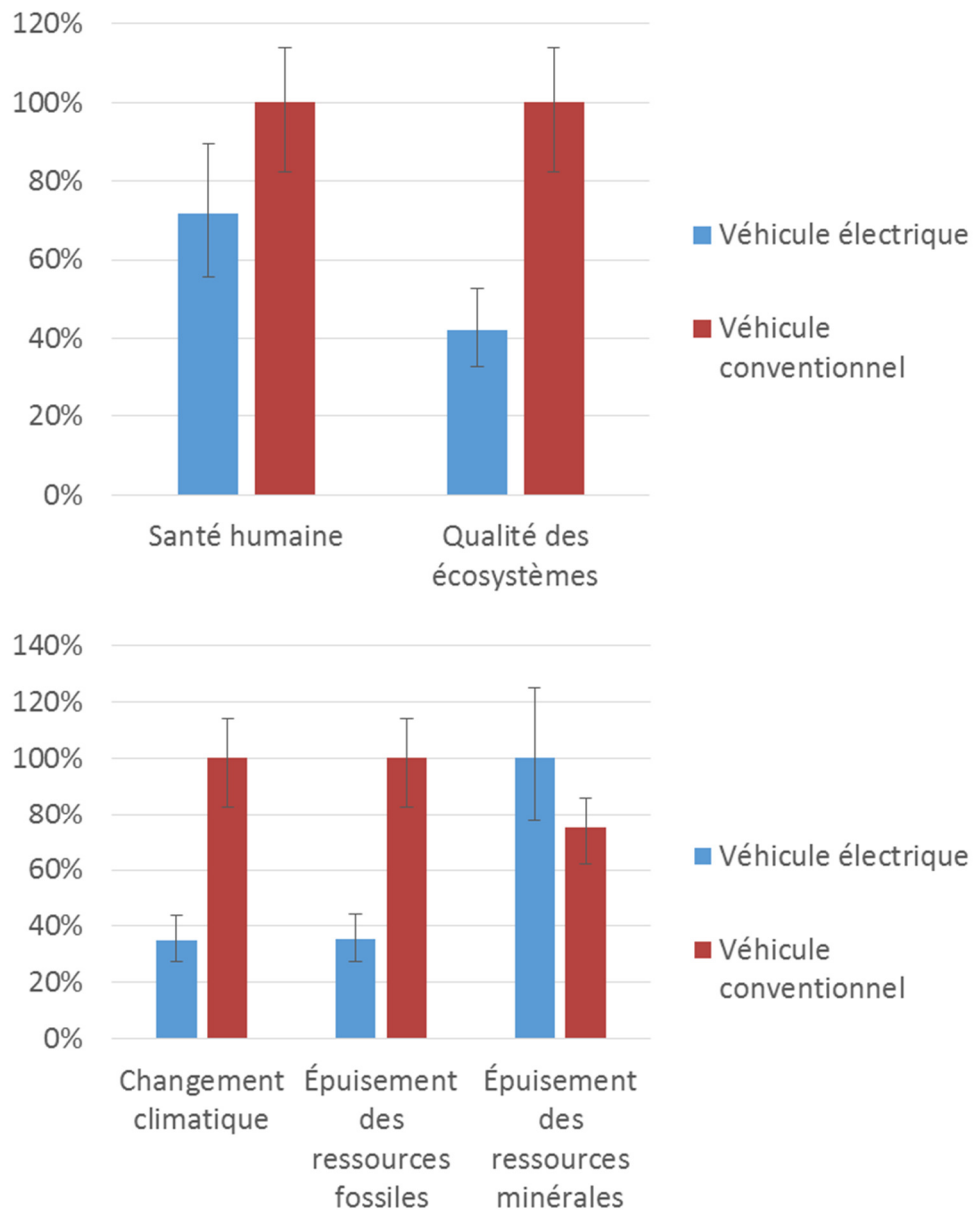


Figure 5-4 : Analyse de sensibilité portant sur la masse des véhicules.

### 5.3.3 Analyse sensibilité 3 – Type de conduite

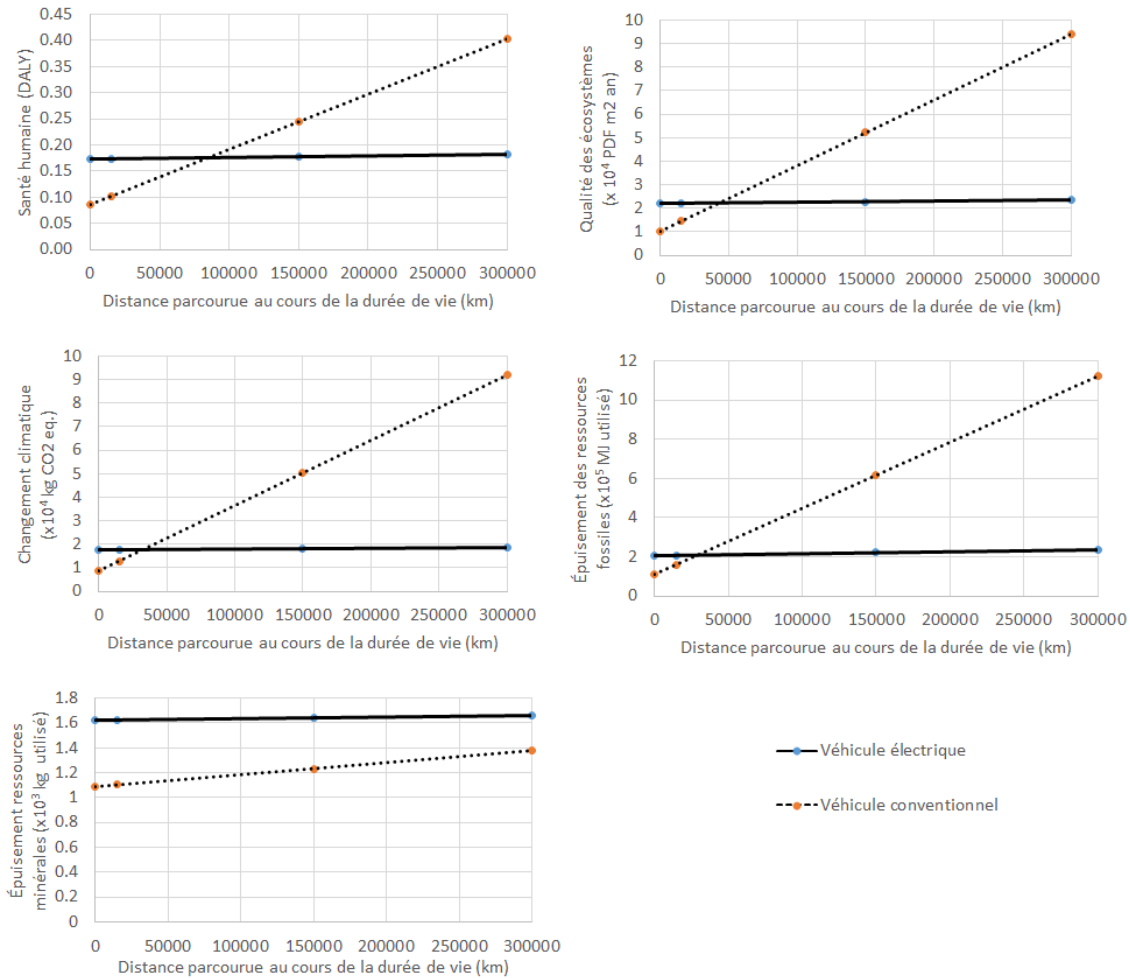
Considérant l'importance de la contribution de l'étape de l'utilisation du véhicule conventionnel, plusieurs paramètres de conduite peuvent influencer les résultats obtenus. Cette section cherche donc à mettre en lumière les hypothèses permettant de renforcer ou, au contraire, d'infirmes les conclusions établies.

#### 5.3.3.1 Durée de vie des véhicules

La Figure 5-5 présente les résultats de l'analyse de sensibilité en ne considérant qu'une variation de la distance parcourue.

Il apparaît que :

- À faible distance le véhicule conventionnel présente moins d'impacts potentiels, pour toutes les catégories considérées, comparativement au véhicule électrique. Seule l'étape d'utilisation permet une inversion des conclusions (à l'exception de la catégorie *Épuisement des ressources minérales*) ;
- Il existe donc une distance pour laquelle l'impact du véhicule électrique est équivalent à celui du véhicule conventionnel. Ce point d'équivalence pour les diverses catégories se trouve :
  - *Santé humaine* : à une distance de 85 300 km ; soit près de 6 ans en considérant un déplacement de 15 000 km/an ;
  - *Qualité des écosystèmes* : à une distance de 43 000 km soit près de 3 ans en considérant un déplacement de 15 000 km/an ;
  - *Changement climatique* à une distance de 32 000 km ; soit près de 2 ans en considérant un déplacement de 15 000 km/an ;
  - *Épuisement des ressources fossiles* à une distance de 29 000 km ; soit près de 2 ans en considérant un déplacement de 15 000 km/an ;
  - *Épuisement des ressources minérales*: le véhicule électrique ne s'avère pas préférable au véhicule conventionnel pour la catégorie selon l'intervalle de distance considéré.
- Ainsi, en considérant une distance parcourue de 300 000 km, plutôt que 150 000 km dans le scénario de base, on constate que les impacts potentiels du véhicule électrique sont (100%-Véhicule électrique/véhicule conventionnel) :
  - *Santé humaine* : 55 % inférieurs à ceux du véhicule conventionnel ;
  - *Qualité des écosystèmes* : 75 % inférieurs à ceux du véhicule conventionnel ;
  - *Changement climatique* : 80 % inférieurs à ceux du véhicule conventionnel ;
  - *Épuisement des ressources fossiles* : 79 % inférieurs à ceux du véhicule conventionnel ;
  - *Épuisement des ressources minérales* : 21 % supérieurs à ceux du véhicule conventionnel.



**Figure 5-5 : Analyse de sensibilité portant sur le type de conduite : distance parcourue uniquement.**

### 5.3.3.2 Tous paramètres confondus

Cette analyse de sensibilité incorpore de nombreux paramètres : la distance parcourue par les véhicules, la consommation d’électricité par le véhicule électrique, la consommation de carburant en milieu urbain, la consommation de carburant sur l’autoroute et le scénario de déplacement des véhicules.

La multiplication de l’évaluation des paramètres crée une plage de variations des résultats d’indicateurs de catégories pour une durée de vie donnée. La Figure 5-6 présente les résultats de l’analyse de sensibilité portant sur tous les paramètres définissant le type de conduite.

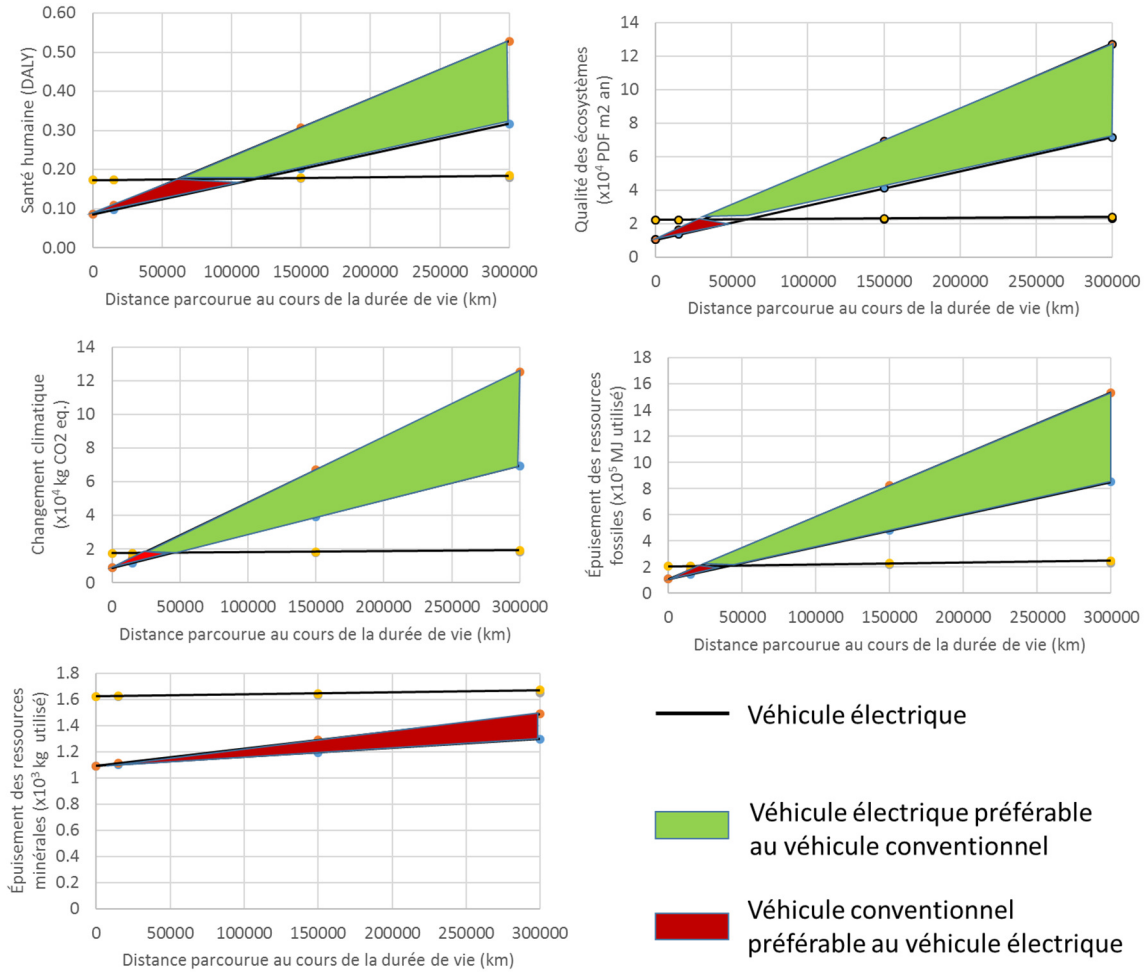
Il apparaît que :

- **Pour le véhicule électrique** : Les diverses variations des paramètres du véhicule électrique n'influencent que légèrement les résultats pour toutes les catégories considérées ; ceux-ci se superposent (donc invisible sur les graphiques), quelle que soit la consommation d'électricité durant la vie utile du véhicule électrique ;
  - Ainsi une variation de la consommation électrique du véhicule électrique n'engendre aucun impact significatif comparativement au véhicule conventionnel.
- **Pour le véhicule conventionnel** : Les variations des paramètres influencent les résultats d'indicateurs du véhicule conventionnel. En effet, il existe une variation importante d'impact potentiel à 300 000 km entre le scénario minimal et maximal :
  - Le scénario minimal (pour toutes les durées de vie investiguées et toutes les catégories) du véhicule conventionnel est composé d'un scénario 100 % autoroute avec une consommation de 4.9 L/100 km + 15 % ;
  - Le scénario maximal (pour toutes les durées de vie investiguées et toutes les catégories) du véhicule conventionnel est composé d'un scénario 100 % urbain avec une consommation de 9.3 L/100 km +15 %.

Pour chaque catégorie :

- Le point d'équivalence pour les diverses catégories se trouve selon les types de conduites :
  - *Santé humaine* : à une distance entre 60 000 et 119 000 km soit de 4 à 8 ans en considérant un déplacement de 15 000 km/an ;
  - *Qualité des écosystèmes* : à une distance entre 31 000 et 60 000 km soit près de 2 à 4 ans en considérant un déplacement de 15 000 km/an ;
  - *Changement climatique* : à une distance entre 23 000 et 44 000 km soit près de 1.5 à 3 ans en considérant un déplacement de 15 000 km/an ;
  - *Épuisement des ressources fossiles* : à une distance entre 22 000 et 41 000 km soit près de 1.5 à 3 ans en considérant un déplacement de 15 000 km/an ;
  - *Épuisement des ressources minérales* : le véhicule électrique ne s'avère pas préférable au véhicule conventionnel pour la catégorie selon l'intervalle de distance considéré.





**Figure 5-6 : Analyse de sensibilité portant sur le type de conduite : tous paramètres confondus**

### 5.3.3.3 Correction du facteur de caractérisation des impacts pour le Cr(VI)

Selon la base de données *ecoinvent*, la production d'acier, de fer, d'aluminium et de cuivre émettent une quantité non négligeable de Cr(VI) à l'eau (particulièrement l'aluminium et le cuivre) où il pourra être ingéré lorsque les êtres humains boivent de l'eau.

Le modèle USEtox, utilisé pour évaluer les effets cancérogènes (ainsi que non cancérogènes) par la méthode IMPACT World+ (c.-à-d. deux catégories d'impact agrégées au sein de la catégorie de dommage *Santé humaine*), considère que l'ingestion de Cr(VI) est aussi dommageable que son inhalation (voir Tableau 5-2).

**Tableau 5-2 : Facteur d'effet du chrome considéré par le modèle USEtox (employé par la méthode IMPACT World+) pour les effets cancérogènes associés à la santé humaine**

Substances inorganiques considérées dans USEtox	Inhalation	Ingestion
Cr(III)	0	0
Cr(VI)	23	23

Toutefois, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) juge que « *le Cr(VI) ingéré est largement réduit en Cr(III) dans le système gastro-intestinal et il est par conséquent peu probable que l'ingestion de cette substance pose un risque à la santé* » (OMS, 2006).

Par conséquent, le modèle USEtox surestimerait l'importance des conséquences sur la santé humaine de l'émission de Cr(VI). Afin, d'avoir une évaluation plus représentative, le facteur d'effet cancérogène pour l'ingestion a été modifié et jugé équivalent à celui du Cr(III) (c.-à-d. 0). Une telle correction du facteur est acceptable du point de vue du modèle USEtox. En effet, la documentation du modèle recommande :

*“Advenant où une substance contribue largement aux impacts de la toxicité, il est recommandé de vérifier la représentativité des paramètres d'entrées du modèle et de les corriger, au besoin, lorsque possible.”*

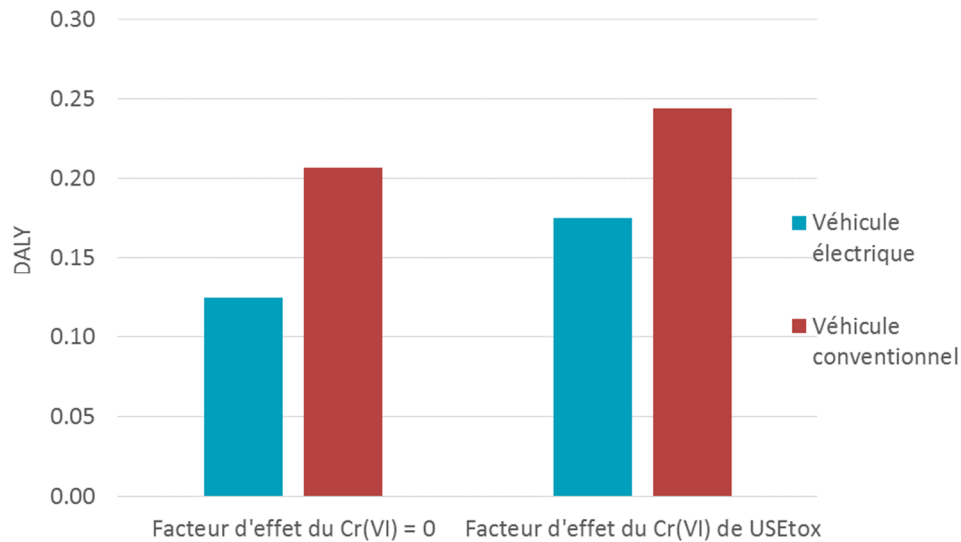
En corrigeant le facteur de caractérisation du Cr(VI), les résultats d'indicateurs suivants ont été obtenus pour la catégorie *Santé humaine* (les résultats d'indicateurs pour les autres catégories ne sont pas modifiés par ce changement).

Il apparaît que des conclusions similaires à celles obtenues préalablement pour la catégorie *Santé humaine* sont observées.

Une modification du facteur d'effet pour le Cr(IV) engendre :

- Une diminution du résultat d'indicateur de 30 % pour le véhicule électrique ;
- Une diminution du résultat d'indicateur de 15 % pour le véhicule conventionnel ;

Par conséquent, les conclusions de la comparaison des deux véhicules seraient maintenues et l'avantage du véhicule électrique augmenté de près de 15%.



**Figure 5-7 : Conséquences d'une modification du facteur d'effet du Cr(VI) sur la catégorie Santé humaine**

#### 5.3.4 Analyse sensibilité 4 – Changement de la batterie

Considérant que le remplacement de la batterie du véhicule électrique est parfois cité comme une éventualité engendrant des impacts environnementaux potentiellement plus élevés, cette analyse de sensibilité cherche à évaluer les impacts potentiels d'un changement de batterie durant l'étape d'utilisation du véhicule électrique. Ce remplacement peut être rendu nécessaire à la suite d'une défectuosité ou d'une perte de capacité de recharge ne permettant plus de répondre aux besoins quotidiens de déplacement de certains automobilistes.

**Note : bien que l'analyse de sensibilité a considéré un changement de la batterie après 50 000 ou à 100 000 km parcourus; les impacts potentiels associés au changement de la batterie, quelle que soit la distance parcourue au moment du remplacement, seront les mêmes.**

Il apparaît que :

- Le changement de batterie au cours de la durée de vie du véhicule électrique augmente les résultats pour toutes les catégories considérées.
- Par conséquent, à 150 000 km, l'ajout d'une seconde batterie résulte en :
  - *Santé humaine* : augmentation de l'impact du véhicule électrique de 21% et diminution de l'écart entre le véhicule électrique et le véhicule conventionnel de 53% ;
  - *Qualité des écosystèmes* : augmentation de l'impact du véhicule électrique de 26% et diminution de l'écart entre le véhicule électrique et le véhicule conventionnel de 19% ;
  - *Changement climatique* : augmentation de l'impact du véhicule électrique de 27% et diminution de l'écart entre le véhicule électrique et le véhicule conventionnel de 14% ;

- *Épuisement des ressources fossiles*: augmentation de l'impact du véhicule électrique de 30% et diminution l'écart entre le véhicule électrique et le véhicule conventionnel de 16% ;
- *Épuisement des ressources minérales*: augmentation de l'impact du véhicule électrique de 17% et augmentation de l'écart entre le véhicule électrique et le véhicule conventionnel de 15%.
- En considérant les divers types de conduite et la distance parcourue :
  - Pour la catégorie *Santé humaine* : l'avantage du véhicule électrique diminue au point où le véhicule électrique ne peut être considéré, de façon sûre, meilleur que le véhicule conventionnel avant 150 000 km ;
  - Pour la catégorie *Qualité des écosystèmes*: le véhicule électrique demeure avantageux après 100 000 km, mais cet avantage a été significativement diminué par le changement de batterie durant l'étape d'utilisation ;
  - Pour la catégorie *Changement climatique*: le véhicule électrique demeure avantageux pour la plupart des scénarios de type de conduite pour le véhicule conventionnel après 50 000 km ;
  - Pour la catégorie *Épuisement des ressources fossiles*: le véhicule électrique demeure avantageux dans la plupart des scénarios de type de conduite pour le véhicule conventionnel après 50 000 km ;
  - Pour la catégorie *Épuisement des ressources minérales*: accentue l'avantage du véhicule conventionnel sur le véhicule électrique.

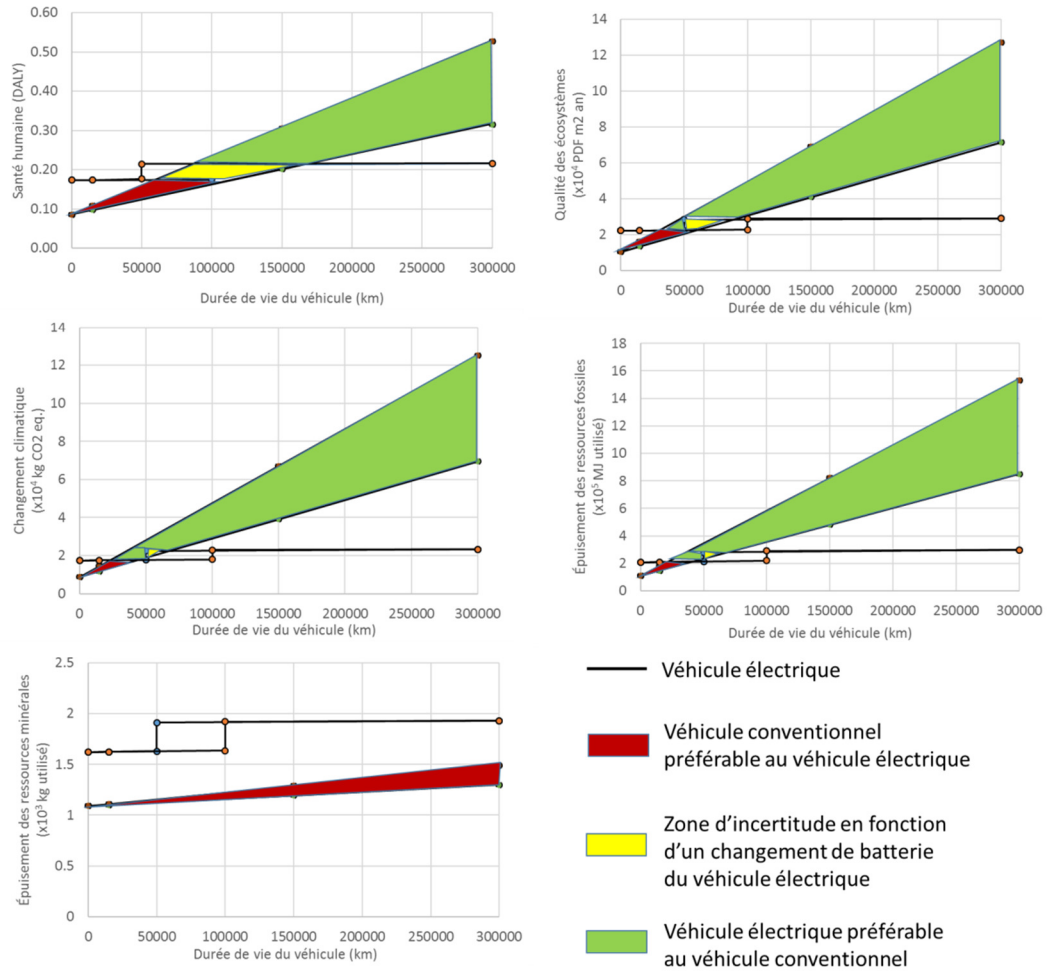


Figure 5-8 : Conséquences d'un changement de la batterie sur les catégories considérées

### 5.3.5 Analyse sensibilité 5 – Efficacité de la borne de recharge

La présente analyse de sensibilité vise à évaluer l'influence d'un changement de l'efficacité de la borne de recharge. Il a été considéré dans le scénario de base que la borne de recharge était associée à une perte d'énergie de 7,5 %. Cette analyse considère une absence de perte d'énergie ainsi qu'une perte de l'ordre de 20 % (note : les pertes sur le réseau de transport et de distribution demeurent inchangées). Les résultats de cette analyse sont présentés à la Figure 5-9.

Il apparaît que :

- L'efficacité de la borne de recharge n'est pas un paramètre sensible pour le cycle de vie du véhicule électrique; une variation maximale de 2 % des résultats d'indicateurs est observée.

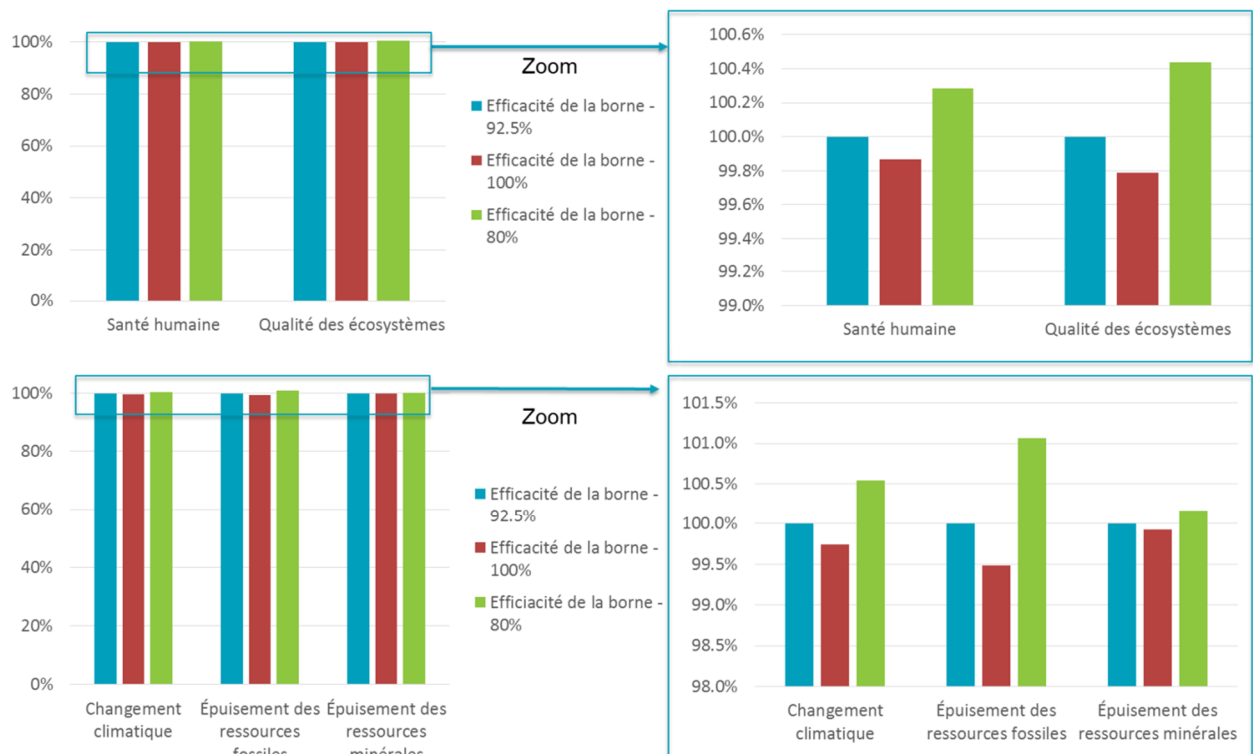


Figure 5-9 : Variations de l'efficacité de la borne de recharge

### 5.3.6 Analyse sensibilité 6 – Lieu de production des véhicules

La présente analyse de sensibilité vise à évaluer l'influence d'un changement du lieu de production des véhicules, ce qui se répercute à la fois sur le bouquet électrique utilisé ainsi que sur les modes et la distance de transport entre le lieu de production et l'utilisateur. Les métaux impliqués dans la production des véhicules proviennent néanmoins du marché mondial.

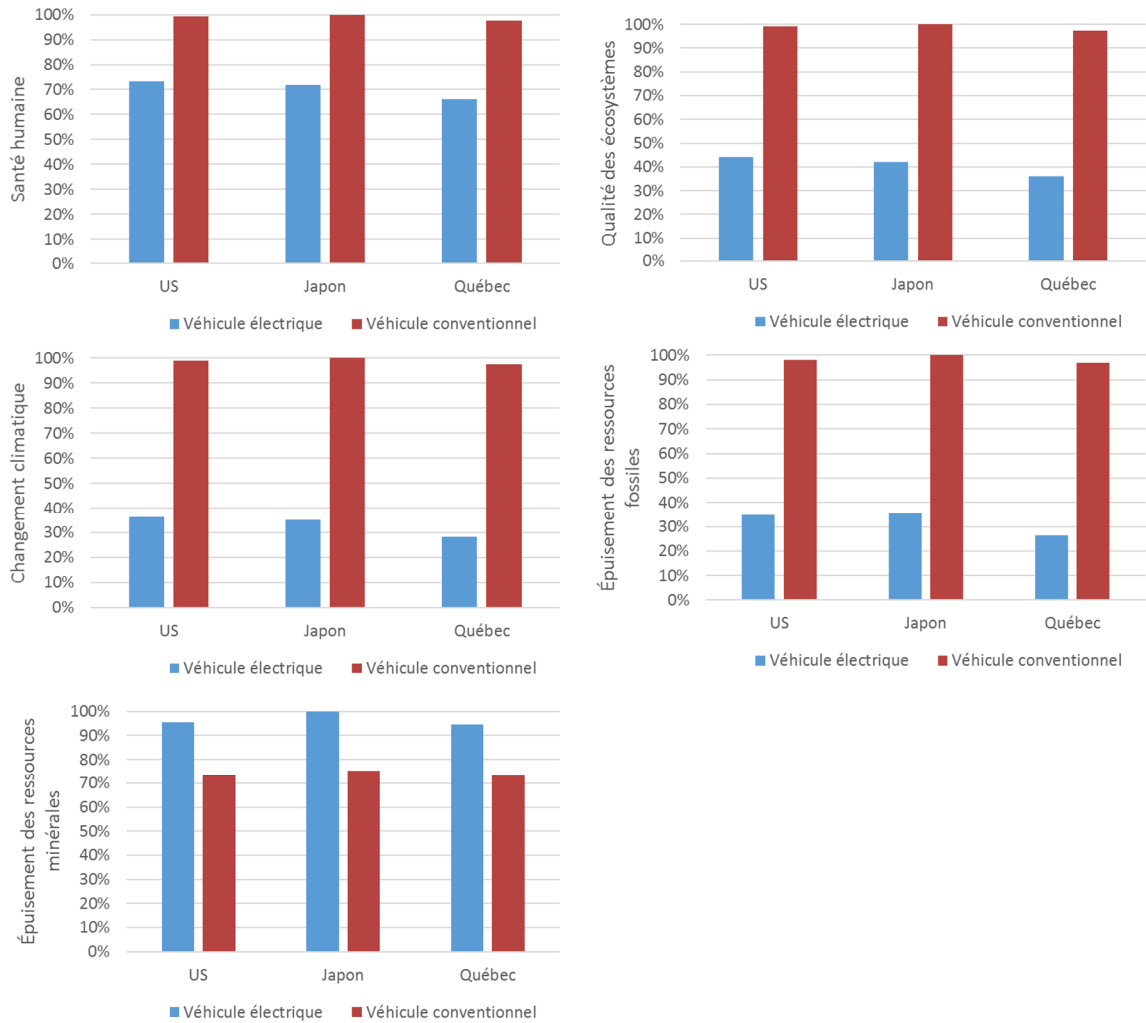
Trois lieux de productions ont été considérés, soit le Japon (scénario de base), les États-Unis (état du Tennessee) et le Québec.

Les résultats de cette analyse sont présentés à la Figure 5-10.

**NOTE : la barre maximale (100 %), par impact potentiel, a été attribuée au véhicule ET au pays producteur présentant les impacts potentiels les plus élevés.**

Il apparaît que :

- Le changement de lieu de production induit généralement une variation relativement faible des résultats d'indicateurs de catégories.
  - Le lieu de production influence donc peu les conclusions précédemment établies, à savoir que le véhicule électrique présente des impacts potentiels inférieurs au véhicule conventionnel pour toutes les catégories considérées, sauf *Épuisement des ressources minérales* ;
  - Toutes les catégories, à l'exception d'*Épuisement des ressources minérales*, sont maximisées pour le véhicule conventionnel produit au Japon. Pour la catégorie *Épuisement des ressources minérales*, il s'agit du véhicule électrique également produit au Japon qui présente l'impact potentiel le plus élevé. Par conséquent, il pourrait être conclu que le bouquet électrique moins carboné du Japon est généralement contrebalancé par le transport plus important des véhicules (du lieu de production à l'utilisateur) ;
  - Pour chaque véhicule considéré individuellement, les catégories sont toutes minimisées au Québec où le bouquet électrique y est le plus propre tandis que les distances de transport vers le marché visé sont les plus faibles ;
  - Un plus grand bénéfice environnemental pourrait potentiellement être réalisé si les véhicules s'approvisionnaient en matériaux québécois plutôt que sur le marché mondial. Toutefois, il n'existe aucune indication qu'un éventuel constructeur automobile québécois pourrait s'approvisionner autrement que sur un marché mondial.



**Figure 5-10 : Changement du lieu de production des véhicules : du Japon aux États-Unis**

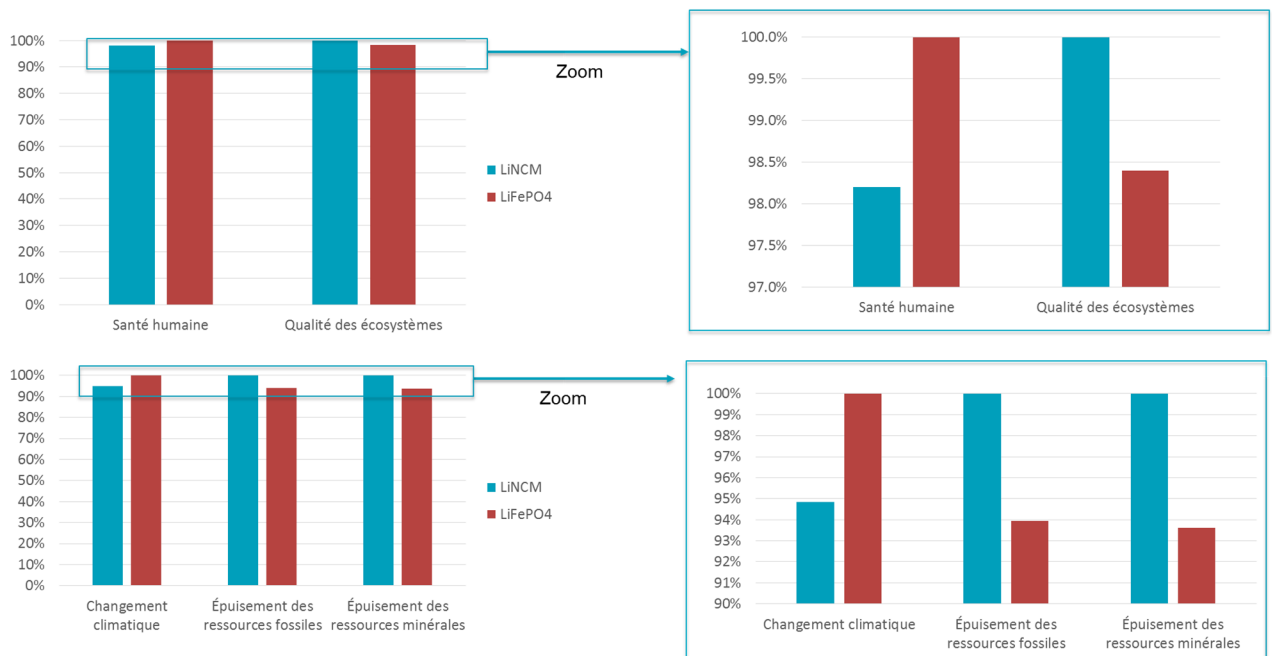


### 5.3.7 Analyse de sensibilité 7 – Type de batterie utilisée pour le véhicule électrique

La présente analyse de sensibilité vise à évaluer l'influence d'un changement du type de batterie utilisée pour le véhicule électrique. Deux types de batteries ont été considérés, soit la LiNCM (batterie utilisée pour le scénario de base) et la LiFePO<sub>4</sub>. Les résultats de cette analyse sont présentés à la Figure 5-11.

Il apparaît que :

- Le type de batterie influence peu les résultats d'indicateurs ;
  - Le changement du type de batterie induit généralement une variation des résultats d'indicateurs inférieure à 5 % pour les catégories *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes* et *Changement climatique* et inférieure à 10 % pour les catégories *Épuisement des ressources fossiles* et *Épuisement des ressources minérales* ; une variation jugée relativement peu importante.



**Figure 5-11 : Variation du profil environnemental du véhicule électrique en fonction de la nature de la batterie utilisée**

### 5.3.8 Analyse sensibilité 8 – Inclusion de la route dans les frontières du système

L'inclusion de la route dans les frontières du système ne change pas les conclusions de l'analyse comparative des impacts environnementaux potentiels entre les deux véhicules ; la route étant commune aux deux véhicules, les résultats d'indicateurs de catégories pour les deux véhicules augmenteront de façon identique.

Cette analyse de sensibilité cherche donc à mettre en perspective la contribution de la route (construction, maintenance et fin de vie) dans le cycle de vie des véhicules.

Il apparaît que :

- L'inclusion de la route influence peu les résultats d'indicateurs sur le cycle de vie des véhicules, induisant une variation maximale de 3%. Les conclusions de l'analyse comparative demeurent ainsi inchangées.

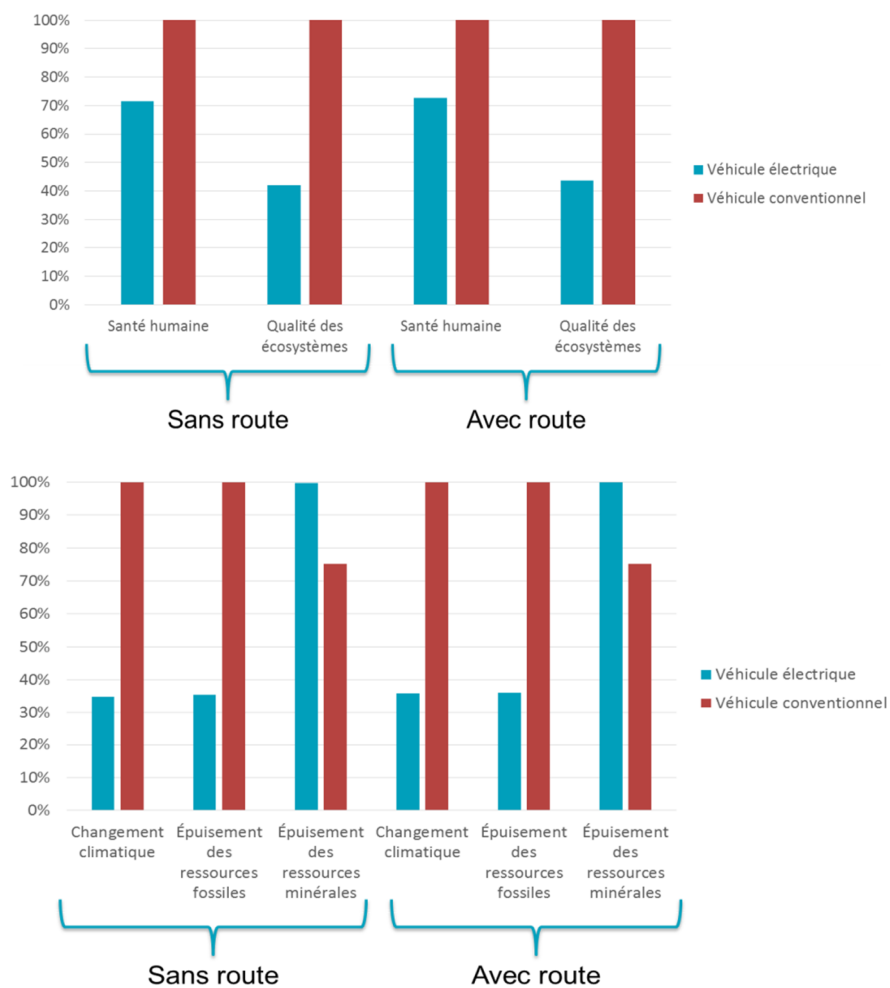


Figure 5-12 : Inclusion de la route dans les frontières des systèmes des véhicules

### 5.3.9 Analyse sensibilité 9 – Fin de vie de la batterie

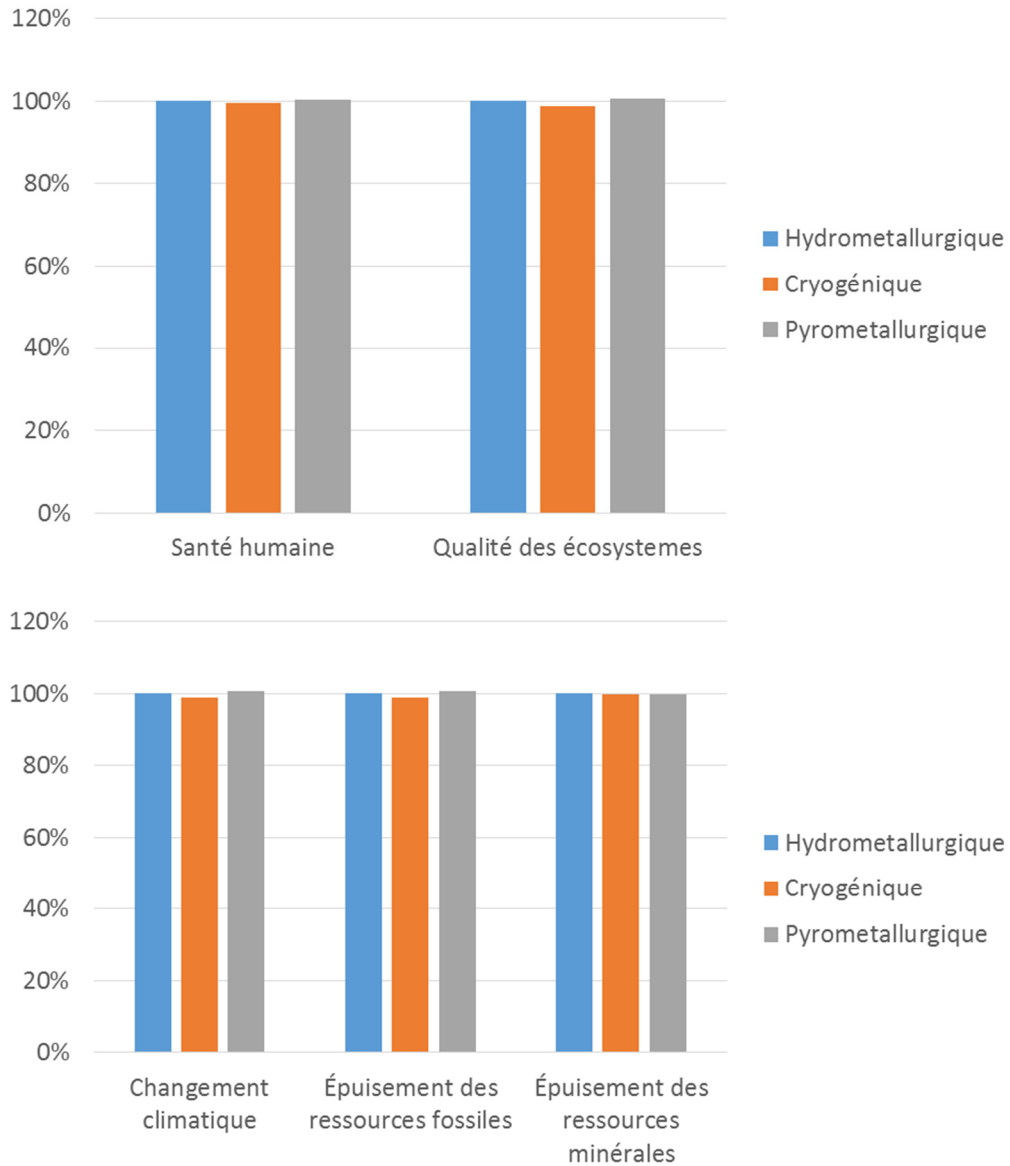
Pour le scénario de base, la recommandation du CCE (2015) a été suivie, à savoir que le scénario de fin de vie préconisé pour le recyclage des batteries au Canada semble être l'utilisation d'un procédé hydrométallurgique dans une usine située en Colombie-Britannique. Toutefois, tel que rapporté à la section 2.3.4, il existe d'autres procédés de recyclage tels que le procédé pyrométallurgique et le recyclage direct des composantes à la suite de leur séparation par processus physique ou chimique à basse température (c.-à-d. cryogénisation). Cette analyse de sensibilité cherche à comparer les impacts potentiels de ces trois techniques de recyclage (sans toutefois changer le lieu où se trouve l'usine de recyclage).

**NOTE : les divers processus de recyclage des matériaux de la batterie ne tiennent pas compte de l'efficacité du processus ou du crédit environnemental associé au recyclage des divers matériaux.**

**Rappel : la fin de vie du véhicule électrique (incluant sa batterie) représente moins de 5 % de l'impact potentiel total pour toutes les catégories considérées. La fin de vie de la batterie représente près de 25 % de l'impact de la fin de vie des véhicules pour toutes les catégories. Par conséquent, la fin de vie des autres composantes du véhicules représente 75 % de l'impact de la fin de vie pour toutes les catégories.**

Il apparaît alors que :

- Le scénario de fin de vie de la batterie influence peu les résultats globaux des divers indicateurs de catégories ; ceux-ci créant une variation maximale d'approximativement 2 % pour toutes les catégories considérées.
  - Cette situation est notamment due au fait que le bénéfice environnemental du recyclage, où il y aurait un crédit environnemental pour l'évitement de la production de matériaux vierges, n'a pas été considéré dans l'approche de cette étude.



**Figure 5-13 : Changement du scénario de fin de vie pour la batterie du véhicule électrique**

## 5.4 Résumé des analyses

Le tableau suivant résume toutes les analyses de sensibilité à l'aide d'un code de couleurs.

- Le vert indique l'absence d'inversion des conclusions obtenues entre le scénario de base et l'analyse de sensibilité;
- L'orange indique une inversion potentielle des conclusions en fonction de certains cas spécifiques identifiés lors de l'analyse de sensibilité;
- Le rouge indiquerait (ne s'applique pas dans le cadre de cette étude) une inversion des conclusions complète à la suite de l'analyse de sensibilité.

Tableau 5-3 : Résumé des résultats des diverses analyses de sensibilité effectuées

Scénario	Nom du scénario	Éléments évalués	Commentaires
0	Scénario de base	Hypothèses du scénario de base	Considérant une distance parcourue de 150 000 km, le véhicule électrique est préférable au véhicule conventionnel pour les catégories <i>Santé humaine</i> , <i>Qualité des écosystèmes</i> , <i>Changement climatique</i> et <i>Épuisement des ressources fossiles</i> . Le véhicule conventionnel est toutefois préférable pour la catégorie <i>Épuisement des ressources minérales</i>
1	Évaluation des impacts	Méthode d'évaluation des impacts	Les conclusions du scénario de base demeurent inchangées ; les résultats d'indicateurs de catégories obtenus sont donc robustes
2	Masses des véhicules	Masse des véhicules	Les conclusions du scénario de base demeurent inchangées pour les catégories <i>Qualité des écosystèmes</i> , <i>Changement climatique</i> et <i>Épuisement des ressources fossiles</i> . Il existe une potentielle inversion des conclusions pour les catégories <i>Santé humaine</i> et <i>Épuisement des ressources minérales</i> . Pour la catégorie <i>Santé humaine</i> , les véhicules électriques lourds pourraient avoir des impacts potentiels équivalents au véhicule conventionnel léger. Pour la catégorie <i>Épuisement des ressources minérales</i> , des impacts similaires pourraient être observés pour les véhicules électriques légers comparativement aux véhicules conventionnels plus lourds.
3	Type de conduite	Distance parcourue par les véhicules	Le véhicule électrique demeure préférable au véhicule conventionnel pour les catégories <i>Santé humaine</i> , <i>Qualité des écosystèmes</i> , <i>Changement climatique</i> et <i>Épuisement des ressources fossiles</i> . Le véhicule conventionnel demeure préférable pour la catégorie <i>Épuisement des ressources minérales</i>
		Tous paramètres confondus : <ul style="list-style-type: none"> <li>Distances parcourue par les véhicules</li> <li>Consommation d'électricité par le véhicule électrique</li> <li>Consommation de carburant en milieu urbain</li> <li>Consommation de carburant sur l'autoroute</li> <li>Scénario de déplacement des véhicules</li> </ul>	Alors que le véhicule électrique avait été montré préférable au véhicule conventionnel pour le cas de base pour les catégories <i>Santé humaine</i> , <i>Qualité des écosystèmes</i> , <i>Changement climatique</i> et <i>Épuisement des ressources fossiles</i> , cette analyse de sensibilité montre que, si la distance parcourue par le véhicule électrique se situe entre 50 000 et 100 000 km que le véhicule conventionnel pourrait s'avérer préférable pour un nombre de ces catégories  Le type de conduite n'a que peu d'incidence pour la catégorie <i>Épuisement des ressources minérales</i> ; le véhicule conventionnel présente donc un résultat d'indicateur plus faible

4	Changement de la batterie	Changement de la batterie au cours de la durée de vie du véhicule	Un changement de la batterie au cours de la durée de vie du véhicule électrique réduit son bénéfice environnemental pour les diverses catégories à l'exception de <i>Épuisement des ressources minérales</i> . Dans ce dernier cas, le véhicule conventionnel accentue son avantage par rapport au véhicule électrique.
5	Efficacité de la borne de recharge	Borne de recharge	Les conclusions du scénario de base demeurent inchangées. L'efficacité de la borne de recharge n'influence que peu les résultats d'indicateurs de catégories.
6	Production des véhicules	Lieu de production	Les conclusions du scénario de base demeurent inchangées. Le lieu de production n'influence que peu les résultats d'indicateurs de catégories.
7	Type de batterie utilisé pour le véhicule électrique	Batterie	Les conclusions du scénario de base demeurent inchangées. L'utilisation d'une batterie LiFePO <sub>4</sub> plutôt qu'une batterie LiNCM n'influence que peu les résultats d'indicateurs de catégories.
8	Inclusion de la route dans les frontières du système	Route	Les conclusions du scénario de base demeurent inchangées. La route étant commune aux deux véhicules, son inclusion n'altère pas les conclusions précédemment obtenues.
9	Fin de vie de la batterie	Fin de vie de la batterie	Les conclusions du scénario de base demeurent inchangées. Un changement de scénario de fin de vie de la batterie n'influence que peu les résultats d'indicateurs de catégories.

## 5.5 Limites de l'ACV

Cette ACV vise l'évaluation et la mise en perspectives du profil environnemental des véhicules électrique et conventionnel dans le cadre de leur utilisation au Québec. Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent être évitées.

Ses conclusions doivent également être interprétées en tenant compte des limites de l'étude et inhérentes à l'ACV. En effet, une certaine incertitude est associée à certaines hypothèses de base, comme l'utilisation des données spécifiques à deux modèles de véhicules électrique et conventionnel pour représenter l'ensemble des véhicules relativement comparables.

Il est également à noter que l'ACV possède des limites importantes associées à l'incertitude de la modélisation des impacts environnementaux du cycle de vie. Par exemple, certains impacts environnementaux ne sont pas pris en compte (p.ex. le bruit, la transformation des terres et la gestion des courants associés à l'hydroélectricité), ou leur estimation présente une grande incertitude (surestimation de la toxicité de métaux). Toutes ces limites ne peuvent être résolues ou améliorées à court terme, puisque la majorité des données disponibles associées au véhicule électrique ont été utilisées. De plus, les méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie incorporant les développements méthodologiques les plus récents ont également été utilisées.

Les principales incertitudes/limites de cette étude sont détaillées ci-après :

### 1. La qualité des données d'inventaire

- Les données relatives aux véhicules électrique et conventionnel proviennent d'une étude basée sur un autre contexte géographique. Aucune analyse de similitude détaillée n'a été faite entre les versions européenne et canadienne des différents modèles de véhicules;
- L'étude se limite aux modèles de véhicules représentatifs du contexte de l'année 2013. **Les résultats de l'étude pourraient être extrapolés à une année ultérieure seulement si les caractéristiques (p. ex. masse, composantes, consommation énergétique) des véhicules n'ont pas été modifiées significativement;**
- Les analyses comparatives se basent sur des données issues de sources différentes (p. ex. articles divers, base de données *ecoinvent*). Il existe une possibilité que les systèmes comparés présentent des incohérences dans leur arrière-plan, malgré les efforts consentis pour les rendre comparables;
- Certains processus liés au cycle de vie des véhicules n'ont pu être modélisés, notamment pour les activités de bureau (p.ex. processus de conception des véhicules);
- Les accidents et anomalies (représentés par une plus faible durée de vie des véhicules et des rejets à l'environnement) n'ont pas été considérés dans l'étude, comme c'est généralement le cas en ACV. Il est difficile et parfois impossible de déterminer leurs influences sur les conclusions de l'étude;
- Certains flux (matières premières ou émissions) ont été modélisés à l'aide de données substitutives, en l'absence de données spécifiques, tirées de la base de données *ecoinvent*. Ces données peuvent donc influencer la validité des résultats lorsqu'elles sont utilisées hors de leur contexte géographique d'origine.



## 2. L'absence d'évaluation de certains impacts

Plusieurs enjeux spécifiques aux véhicules électrique et conventionnel ne sont pas captés par l'ACV environnementale et peuvent donc limiter l'interprétation des résultats. Les impacts non pris en compte incluent :

- Les retombées sociales et économiques;
- Les impacts aux biens humains (p.ex. détérioration des bâtiments);
- La pollution liée aux accidents ou à de mauvaises pratiques;
- Le bruit et les odeurs;
- La pollution lumineuse;
- L'analyse du cycle de vie n'est pas un outil approprié afin d'évaluer les risques de nature très localisée; qui dépendent par exemple de la géologie du sol et/ou de facteurs spécifiques aux sites. Dans de tels cas, les résultats d'ACV ne peuvent en aucun cas se substituer à une analyse de risques.

## 3. L'incertitude quant à la modélisation des impacts environnementaux

Il est important de comprendre que l'ACV diffère de l'analyse de risque. Contrairement à cette dernière, conduite dans un contexte réglementaire et qui utilise une approche conservatrice, l'ACV tente de fournir la meilleure estimation possible (Udo-de-Haes et coll., 2002). En effet, l'évaluation des impacts du cycle de vie tente de représenter le cas le plus probable, c.-à-d. 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 également de rappeler que les résultats de l'ACV représentent des impacts environnementaux potentiels et non réels.

De plus, les méthodes d'impacts sont reconnues pour avoir certaines incertitudes inhérentes :

- Les méthodes d'impacts ne couvrent pas toutes les substances inventoriées. 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 base de données des méthodes, des facteurs de caractérisation qui convertissent les flux élémentaires inventoriés en unités d'indicateurs de catégories d'impacts et de dommages. 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 la phase d'évaluation des impacts du cycle de vie. **C'est le cas notamment de certains métaux impliqués dans la fabrication des batteries des véhicules électriques;**
- Les catégories d'impacts « substances cancérigènes », « substances non cancérigènes » (deux catégories d'impacts influençant la catégorie de dommage *Santé humaine*) et « écotoxicité » (influençant la catégorie de dommage *Qualité des écosystèmes*) 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 modèles d'évaluation des émissions toxiques employées pour caractériser les métaux ont été extrapolés 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 aquatique » et « toxicité humaine – substances cancérigènes/non cancérigènes », ce qui désavantage particulièrement le véhicule électrique dans le cadre de la présente étude;
- La modélisation de l'impact sur l'eau n'a pas été évaluée puisque, d'une part, les données dans la base de données *ecoinvent* sont très lacunaires et, d'autre part, les méthodes de caractérisation sont limitées.

#### **4. L'incertitude due aux conséquences de l'intégration de véhicules électriques au Québec**

Cette étude ne tient pas compte des conséquences d'une consommation accrue d'électricité en territoire québécois associé à l'électrification des transports, entraînant une diminution potentielle des exportations et du remplacement de sources de production d'électricité dans les marchés voisins.

## 5.6 Perspectives d'amélioration

### 5.6.1 Perspectives d'amélioration de la comparaison des systèmes

Cette section liste les éléments pouvant améliorer la robustesse de l'étude et/ou raffiner les résultats obtenus.

#### Inventaire du cycle de vie

- Améliorer la qualité des données, particulièrement au niveau de la borne de recharge, bien que cette dernière n'ait pas été identifiée comme ayant une contribution importante sur le cycle de vie du véhicule électrique;
- Récolter des données d'inventaire des véhicules électrique et conventionnel représentatifs de plusieurs autres modèles afin de s'assurer de la robustesse des exemples de véhicules évalués.

#### Évaluation des impacts du cycle de vie

- Améliorer les facteurs de caractérisation des métaux;
  - Certains métaux n'ont pas facteur de caractérisation pour les catégories *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* (p.ex. lithium, cobalt);
- Intégrer (et développer au besoin) les facteurs de caractérisation jusqu'au niveau dommage pour les ressources et les services écosystémiques.

Note : Le développement et l'amélioration des facteurs de caractérisation et des modèles d'impacts utilisés en ACV sont l'un des objectifs de la Chaire internationale en analyse du cycle de vie du CIRAIG à laquelle participe Hydro-Québec depuis 2007.

#### Analyse de l'incertitude

- Effectuer une analyse de l'incertitude lorsqu'une correction des fonctions de probabilité sera apportée à la base de données *ecoinvent*;
- Améliorer la quantification de l'incertitude des modèles de caractérisation.

## 6 Conclusion

---

Le présent rapport établit la comparaison des impacts environnementaux des véhicules électrique et conventionnel tel qu'utilisés au Québec dans le but de déterminer dans quelle mesure l'utilisation d'un véhicule électrique alimenté par l'électricité québécoise, s'avérait environnementalement avantageuse, comparativement au véhicule conventionnel, et ce, sur le cycle de vie des véhicules.

Pour le véhicule électrique, l'analyse a montré que les étapes de production du véhicule et de la batterie sont les principaux contributeurs aux indicateurs *Santé humaine* (94 %), *Qualité des écosystèmes* (91 %), *Changement climatique* (92 %), *Épuisement des ressources fossiles* (90 %) et *Épuisement des ressources minérales* (98 %). L'étape d'utilisation de la voiture électrique n'engendre pour sa part pratiquement aucun impact. L'importance relative des étapes de production des composantes du véhicule électrique comparativement à celle de l'étape d'utilisation, s'explique d'un point de vue cycle de vie, notamment par l'utilisation d'une électricité provenant essentiellement de sources renouvelables (l'hydroélectricité contribuant à plus de 95 % du bouquet électrique) pour la recharge du véhicule.

Pour le **véhicule conventionnel**, l'étape d'utilisation est le principal contributeur aux indicateurs *Santé humaine* (65 %), *Qualité des écosystèmes* (80 %), *Changement climatique* (83 %), *Épuisement des ressources fossiles* (83 %) à l'exception de l'*Épuisement des ressources minérales* (12 %). Dans ce cas, l'étape de production du véhicule s'avère le principal contributeur. Pour les autres indicateurs, l'étape de production est le second contributeur en importance aux impacts environnementaux potentiels.

La comparaison des impacts environnementaux potentiels associés aux deux types de véhicules montre l'importance relative de l'étape de production du véhicule électrique et de l'étape d'utilisation du véhicule conventionnel. Ainsi, le véhicule électrique présente des impacts potentiels plus élevés que le véhicule conventionnel au moment de son achat en raison principalement de la batterie et de la présence de certaines composantes métalliques (notamment en aluminium et en cuivre) plus importantes au niveau du moteur et de la transmission. Les impacts associés à l'étape d'utilisation du véhicule conventionnel augmentent plus rapidement, dépassant ceux pour le véhicule électrique à partir d'une certaine distance.

Ainsi, cette analyse montre qu'au-delà d'une certaine distance parcourue (point d'équivalence), variant entre 29 000 km (soit, en moyenne, près de 2 ans d'utilisation) et 85 300 km (soit, en moyenne, près de 6 ans d'utilisation), les impacts potentiels du véhicule conventionnel dépassent ceux du véhicule électrique, à l'exception de la catégorie d'impact *Épuisement des ressources minérales* pour laquelle le véhicule conventionnel présente toujours une meilleure performance.

Plusieurs facteurs peuvent faire varier les points d'équivalence entre les deux types de véhicules, parmi lesquels la masse des véhicules, leur efficacité énergétique, les conditions d'utilisation, etc. L'impact de ces facteurs a été évalué de façon exhaustive dans le cadre de la présente étude.

Ainsi, après 150 000 km, le véhicule électrique présente des impacts inférieurs à ceux du véhicule conventionnel, selon les catégories d'impacts considérées, à l'exception de *Épuisement*

*des ressources minérales* pour laquelle le véhicule conventionnel présente toujours une meilleure performance).

À la lumière des résultats de la présente analyse, il est possible de conclure, **en considérant le cycle de vie complet** des deux types de véhicules étudiés, que le véhicule électrique représente un choix environnementalement préférable au véhicule conventionnel dans un contexte québécois, sur une distance de 150 000 km, à l'exception de la catégorie *Épuisement des ressources minérales*.

## 7 Références

---

- Automotive parts manufacturers' association (APMA). (2012). Electric vehicle batteries: end of life challenges. [En ligne] <https://apma.ca/blogs/environmentandenergy/electric-vehicle-batteries-end-of-life-challenges>. Page consultée le 9 septembre 2015.
- Association des véhicules électriques du Québec (AVEQ). (2014). Portrait détaillé de l'électromobilité au Québec en date du 30 novembre 2014. [En ligne] <http://www.aveq.ca/actualiteacutes/votre-cadeau-de-noel-portrait-detaille-de-lelectromobilite-au-quebec-en-date-du-30-novembre-2014>. Page consultée le 9 septembre 2015
- Association des véhicules électriques du Québec (AVEQ). 2015. Habitudes de recharge – Nissan Leaf vs Chevrolet Volt. [En ligne] <http://www.aveq.ca/actualiteacutes/habitude-de-recharge-nissan-leaf-vs-chevrolet-volt>. Page consultée le 1 mars 2016.
- Association des véhicules électriques du Québec (AVEQ). 2016. La voiture électrique fait sa place, lentement mais sûrement. [En ligne] <http://www.aveq.ca/actualiteacutes/la-voiture-electrique-fait-sa-place-lentement-mais-surement-reportage-ici-radio-canada>. Page consultée le 1 mars 2016.
- Aguirre, K., Eisenhardt, L., Lim, C., Nelson, B., Norring, B., Slowik, P., Tu, N. (2012). Lifecycle analysis comparison of a battery electric vehicle and a conventional gasoline vehicle. California air resources board. [En ligne] <http://www.environment.ucla.edu/media/files/BatteryElectricVehicleLCA2012-rh-ptd.pdf>. Page consultée le 9 septembre 2015
- Boston Consulting Group, (2010). Batteries for electric cars: challenges, opportunities and the outlook to 2020. [En ligne] <https://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>. Page consultée le 9 septembre 2015
- Commission de coopération environnementale (CCE). (2015). Gestion écologiquement rationnelle des batteries en fin de cycle de vie provenant de véhicules à propulsion électrique en Amérique du Nord, Commission de coopération environnementale, Montréal, Canada, 107 p. [En ligne] <http://www3.cec.org/islandora/fr/item/11637-environmentally-sound-management-end-life-batteries-from-electric-drive-vehicles-fr.pdf>. Page consultée le 1 mars 2016.
- Conger, C., (2015) Will lithium-ion batteries power cars?. How Stuff Works. [En ligne] <http://auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/vehicles/lithium-ion-battery-car.htm> Page consultée le 9 septembre 2015
- Contestabile, M. Offer, G, North R.,. (2012). Electric vehicles: a synthesis of the current literature with a focus on economic and environmental viability. LCA Works. [En ligne] [www.lcaworks.com/EV%20Lit%20Rev%20FINAL.pdf](http://www.lcaworks.com/EV%20Lit%20Rev%20FINAL.pdf). Page consultée le 9 septembre 2015
- Durand, A., Lavigne-Lefebvre, N., Rougès, J-F., Carrier, M., Gagné, M., Mercier, J., Montreuil B., (2014). L'électrification des transports: une perspective québécoise. Université Laval. [En ligne] [https://www.itis.ulaval.ca/files/content/sites/itis/files/fichiers/Rapport\\_TEIIQ\\_ITIS.pdf](https://www.itis.ulaval.ca/files/content/sites/itis/files/fichiers/Rapport_TEIIQ_ITIS.pdf). Page consultée le 9 septembre 2015
- Ellingsen, L. A-W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valoen, L. O., Stronman, A. H., (2013). Journal of industrial ecology, 18, 1, 113-124
- Fayçal-Siddikou, B., Vincent, W., Nele, S., Heijke, R., Maarten M., Van Mierlo Joeri, I., (?) Clean vehicles research: LCA and policy measures. Department of electrical engineering and Energy technology and Mobility and automotive technology research group from the Brussel University. 83 p.

- Fonds d'action Québécois pour le développement durable. (2010). Comportements des Québécois en matière de transport: compilation de statistiques et résultats de sondage. [En ligne] [http://www.faqdd.qc.ca/public/pdf/Outils\\_et\\_services/Les\\_Quebecois\\_et\\_les\\_transports.pdf](http://www.faqdd.qc.ca/public/pdf/Outils_et_services/Les_Quebecois_et_les_transports.pdf) Page consultée le 1 mars 2016.
- Goedkoop, M.J., Heijungs, R., Huijbregts, M., de Schryver, A., Strujis, 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. (2015). Plan d'action en électrification des transports 2015-2020. [En ligne] <http://www.transportselectriques.gouv.qc.ca/fr/plan-daction/>. Page consultée le 15 octobre 2015
- Gouvernement du Québec. (2016). Recharge dans les lieux publics. [En ligne] <http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/particuliers/recharge-publics.asp>. Page consultée le 1 mars 2016.
- Hawkins, T.R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Hammer Stromman, A., (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of industrial ecology*. 17 (1). 53-64
- 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.
- Hydro-Québec. (2009). Plan stratégique 2009-2013. [En ligne] <http://www.hydroquebec.com/publications/fr/docs/plan-strategique/plan-strategique-2009-2013.pdf>. Page consultée le 9 février 2016
- Hydro-Québec. (2013). Projet pilote d'essai de véhicules électriques Mitsubishi. [En ligne] <http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/essai-route.html> Page consultée le 9 septembre 2015
- Hydro-Québec. (2015). Le circuit électrique. [En ligne] <http://lecircuitelectrique.com/index.fr.html;jsessionid=57476F3008491342E5D5C8B4B6E16866>. Page consultée le 9 septembre 2015
- Hydro-Québec. (2015b). Développement et commercialisation de technologies de pointe : matériaux de batterie. [En ligne]. <http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/materiaux-batteries.html>. Page consultée le 9 septembre 2015
- IHS Cera. (2012). Oil sands, greenhouse gases, and US oil supply. [En ligne] [http://www.api.org/~media/Files/%20Oil-and-Natural-Gas/Oil\\_Sands/CERA\\_Oil\\_Sands\\_GHGs\\_US\\_Oil\\_Supply.pdf](http://www.api.org/~media/Files/%20Oil-and-Natural-Gas/Oil_Sands/CERA_Oil_Sands_GHGs_US_Oil_Supply.pdf). Page consultée le 31 octobre 2014.
- 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.
- Johnson Matthey Battery system. (2015). Our guide to batteries : 3rd edition. [En ligne] <http://www.jmbatterysystems.com/JMBS/media/JMBS/Documents/JMBS-23946-Battery-Guide-Update-August-2015-Web.pdf>. Page consultée le 9 septembre 2015.
- Lee, J., Sung, W., Choi, J-H., (2015) Metamodel for efficient estimation of capacity-fade uncertainty in Li-Ion batteries for electric vehicles. *Energies*. 8(6). 5538-5554
- Mercedes Benz. (2015). Manuel du conducteur Mercedes-Benz Classe A: Huile moteur. [En ligne] [http://www.mercamanu.com/huile\\_moteur-277.html](http://www.mercamanu.com/huile_moteur-277.html). Page consultée le 9 septembre 2015.

- Messagie, M., Faycal-Siddikou B., Coosemans, T., Macharis, C., van Mierlo, J., (2014). A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different technologies and fuels. *Energies*. 7. p.1467-1482.
- Ministère de l'énergie et ressources naturelles du Québec (MERN). (2013). Statistiques énergétiques. [En ligne] <http://www.mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques/index.jsp>. Page consultée le 9 septembre 2015.
- Nealer, R., Reichmuth, D., Anair, D., (2015) Cleaner cars from cradle to grave : how electric cars beat gasoline cars on lifetime global warming emissions. Union of concerned scientists [En ligne] <http://www.uconsusa.org/sites/default/files/attach/2015/11/Cleaner-Cars-from-Cradle-to-Grave-full-report.pdf>. Page consultée le 9 février 2016.
- Office de l'efficacité énergétique (OEE). (2012). Rapport d'étape de l'enquête sur les véhicules au Canada, 2008 : Chapitre 2. Analyse par secteur géographique. Ressources naturelles Canada. <http://oe.nrcan.gc.ca/publications/statistiques/evc08/chapitre2.cfm?attr=0>. Page consultée le 9 septembre 2015.
- Office mondiale de la santé (OMS). (2006). Environmental health criteria 234: elemental speciation in human health risk assessment. 256 p.
- Recyc-Québec. (2008). Les véhicules hors d'usage. [En ligne] <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/Fiche-vehicules.pdf>. Page consultée le 9 septembre 2015.
- Renault. (2011). Fluence and Fluence Z.E. Life cycle assessment. [En ligne] <http://group.renault.com/wp-content/uploads/2014/09/fluence-acv-2011.pdf>. Page consultée le 9 septembre 2015.
- Ressources naturelles Canada. (2013) Guide de consommation de carburant 2013. [En ligne] [http://publications.gc.ca/collections/collection\\_2013/rncan-nrcan/M141-5-2013-fra.pdf](http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/rncan-nrcan/M141-5-2013-fra.pdf) Page consultée le 9 septembre 2015.
- Ressources naturelles Canada. (2015) Guide de consommation de carburant 2015. [En ligne] <http://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/transports/voitures-camions-legers/achats/7488>. Page consultée le 9 septembre 2015.
- SAAQ. (2015). Dossier statistique Bilan 2014; accidents, parc automobile et permis de conduire. [En ligne] [http://www.saaq.gouv.qc.ca/rdsr/sites/files/12015001\\_0.pdf](http://www.saaq.gouv.qc.ca/rdsr/sites/files/12015001_0.pdf). Page consultée le 9 septembre 2015
- Saxena, S., Le Floch, C., MacDonald, J., Moura, S. (2015). Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models. *Journal of power sources*. 282. 265-276
- Tech Vehi. (2012). Consumption of electric cars : the top 13 in Wh/km. [En ligne] <http://www.technologicvehicles.com/en/green-transportation-news/1961/consumption-of-electric-cars-the-top-13-in-wh-km#.VRRtJeHNWAU> Page consultée le 9 septembre 2015
- Tirado-Seco, P., Martineau, G., (2014). Comparaison des filières de production d'électricité et des bouquet d'énergie électrique. [En ligne] <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/pdf/comparaison-filieres-et-bouquets.pdf> Page consultée le 9 septembre 2015
- U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (2011). Summary of travel trends: 2009 National Household Travel Survey. [En ligne] <http://nhts.ornl.gov/2009/pub/stt.pdf>. Page consultée le 1 mars 2016.
- US Department of energy. (2015). Fuel economy in cold weather. [En ligne] <https://www.fueleconomy.gov/feg/coldweather.shtml> Page consultée le 9 septembre 2015
- US EPA. (2013). Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles. [En ligne] [http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-01/documents/lithium\\_batteries\\_lca.pdf](http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-01/documents/lithium_batteries_lca.pdf). Page consultée le 9 septembre 2015



- Warburg, N., Forell, A., Guillon, L, Teulon, H., Canaguier, B., (2013). Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et vul à l'horizon 2012 et 2020. [En ligne] [http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90511\\_acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90511_acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf). Page consultée le 9 septembre 2015
- Weidema, B.P. et Suhr Wesnaes, 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.
- Wilson, L. (2013) Shades of green : electric car's carbone missions around the globe. Shrink that footprint. [En ligne] <http://shrinkthatfootprint.com/wp-content/uploads/2013/02/Shades-of-Green-Full-Report.pdf>. Page consultée le 9 septembre 2015
- Whitmore, J., Pineau, P-O, (2015). État de l'énergie au Québec 2016. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. [En ligne] <http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2015/12/EEQ2016.pdf>. Page consultée le 9 février 2016.

## Annexe A : Méthodologie de l'Analyse du cycle de vie (ACV)

---

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	<i>Description des catégories de données</i> .....	6
A.3.2	<i>Recueil des données</i> .....	8
A.3.3	<i>Validation des données</i> .....	8
A.3.4	<i>Mise en rapport des données avec le processus élémentaire</i> .....	9
A.3.5	<i>Mise en rapport des données avec l'unité fonctionnelle</i> .....	9
A.4	PHASE III DE L'ACV : ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE .....	10
A.4.1	<i>Sélection des catégories d'impacts et des modèles de caractérisation</i> .....	11
A.4.2	<i>Classification et caractérisation des résultats d'inventaire</i> .....	13
A.4.3	<i>Éléments optionnels</i> .....	14
A.5	PHASE IV DE L'ACV : INTERPRÉTATION .....	15
A.6	RÉFÉRENCES .....	16

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 « Extrait »

**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 produits<sup>1</sup> 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.

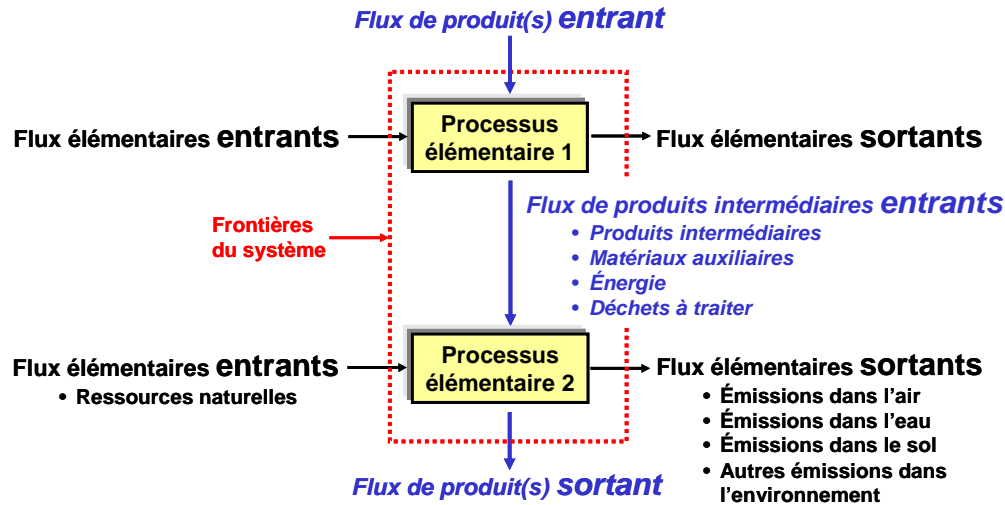
L'ISO définit un **système de produits** comme un ensemble de processus élémentaires liés par des flux de matière et d'énergie qui remplissent une ou plusieurs fonctions. Dans ce sens, le sujet d'une ACV est caractérisé par ses fonctions et non seulement en termes de ses produits finaux. Ceci permet 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.

---

<sup>1</sup> 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 élémentaires<sup>2</sup> 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.

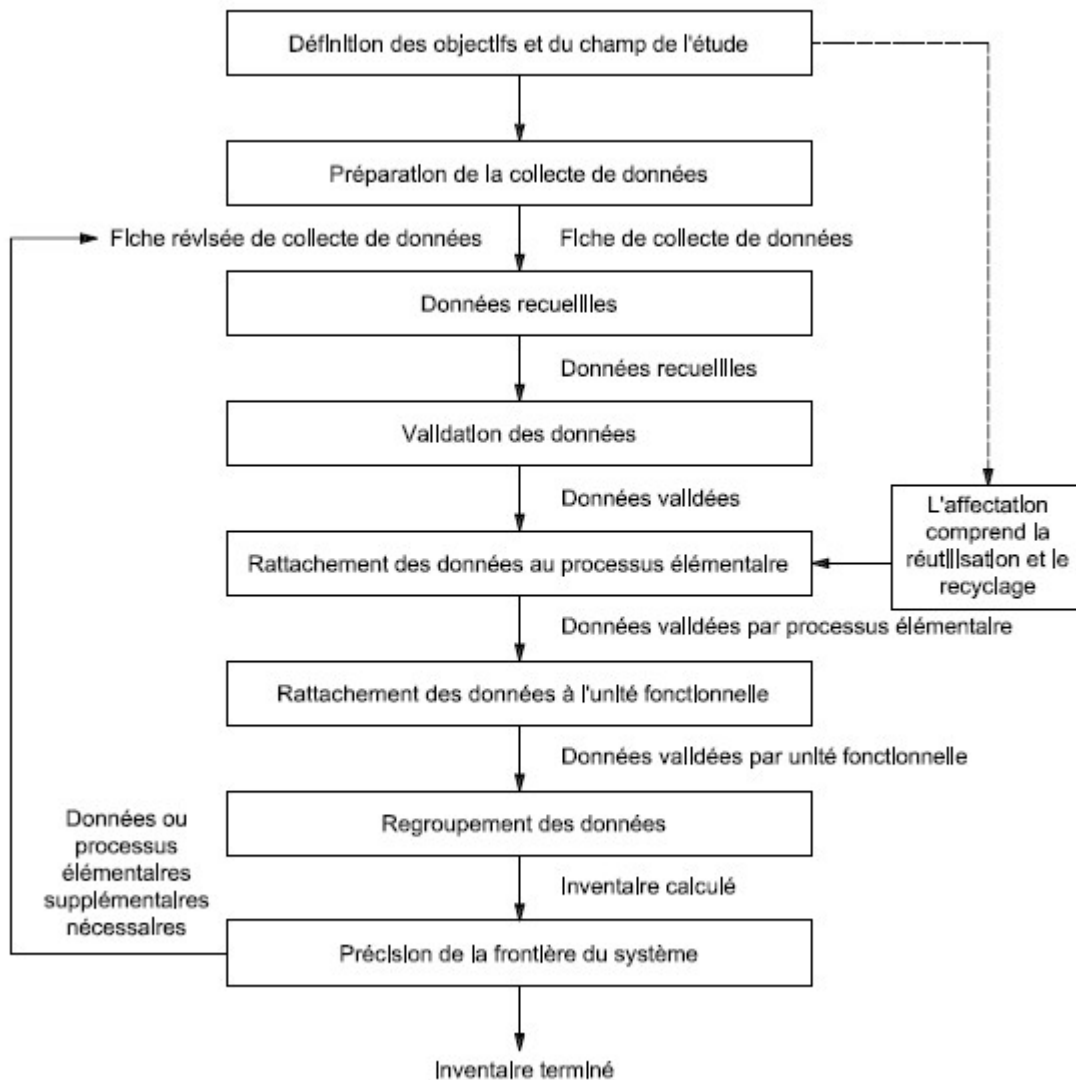
Une fois que la liste des processus élémentaires inclus dans le système de produits est complétée et afin de construire l'inventaire du système et de poursuivre avec l'évaluation des impacts potentiels, les données pertinentes concernant ces processus (c.-à-d. les entrants et les sortants) doivent être 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.

<sup>2</sup> 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.

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



**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 métadonnées<sup>3</sup> 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.

---

<sup>3</sup> 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.3.1.4 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.

#### **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 disponibles<sup>4</sup>. 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 a présentement un manque de données d'inventaire spécifiques nord américaines, ce qui va affecter les résultats d'études faites au Canada.

---

<sup>4</sup> 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.

L'absence d'un format de documentation unique<sup>5</sup>, 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 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

---

<sup>5</sup> 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.

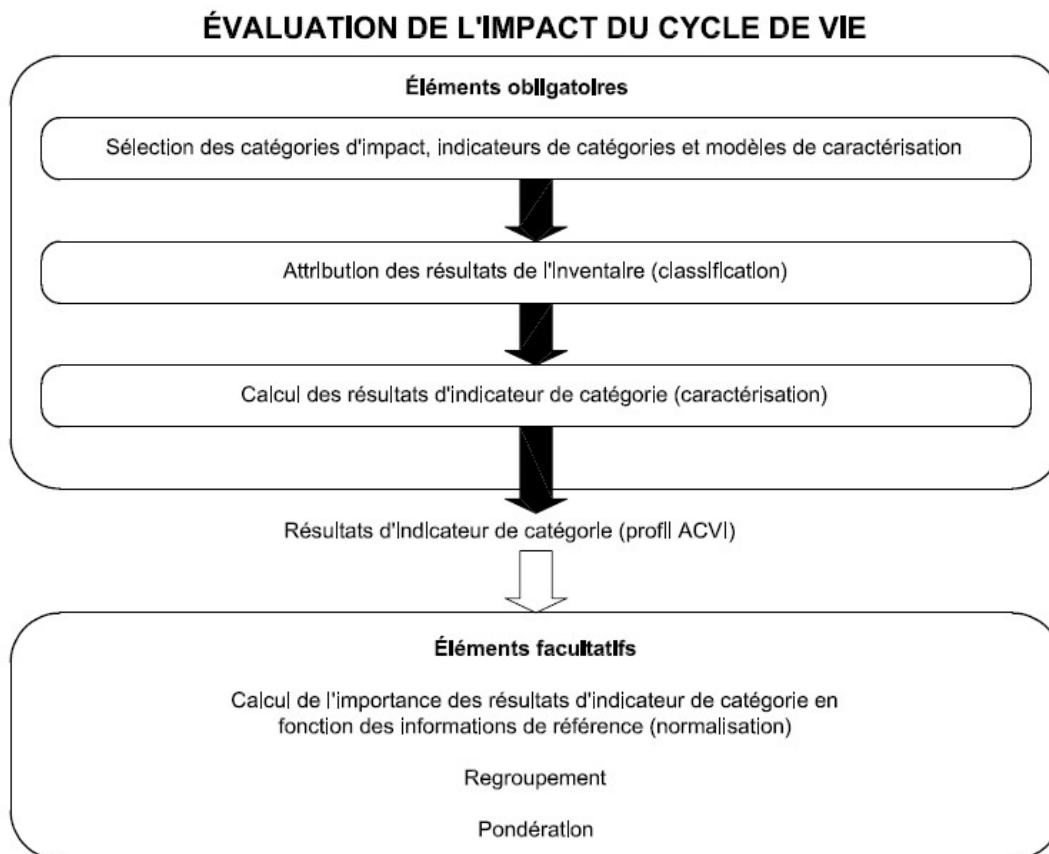
être suffisant pour répondre aux objectifs de l'étude, et les catégories de données (c.-à-d. substances individuelles ou groupes de ressources naturelles ou d'émissions dans l'environnement) ne devraient être agrégées seulement si elles concernent des substances équivalentes et des impacts similaires 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).

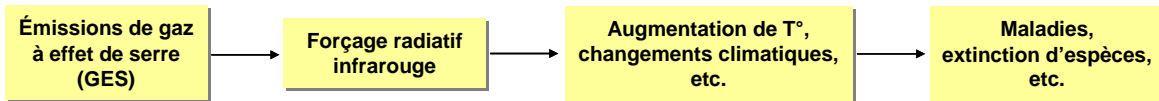


**Figure A-3: Éléments de la phase d'ÉICV.**

(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 CO<sub>2</sub>-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 <sup>2</sup>
Facteurs de caractérisation	Potentiel de réchauffement global (GWP <sub>100</sub> ) pour chaque GES	kg d'équivalents CO <sub>2</sub> / 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 <sub>2</sub> / 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 caractéristiques<sup>6</sup>. 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.

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

---

<sup>6</sup> 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.

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 réalité<sup>7</sup>.
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.

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.

---

<sup>7</sup> 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.

## 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

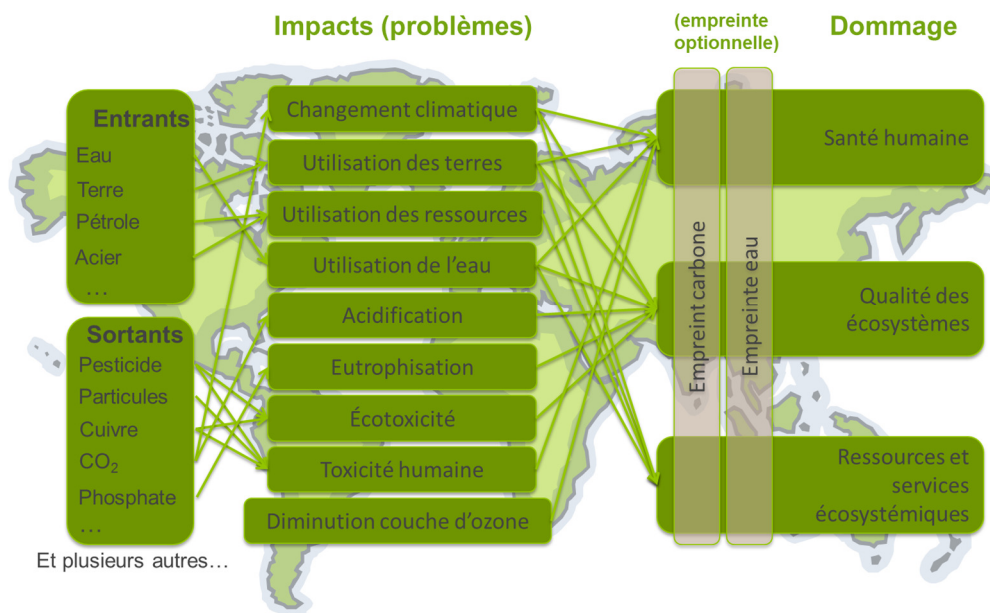
- BARE, J., NORRIS, G.B., PENNINGTON, D.W., MCKONE, T. (2003). TRACI – The tool for the Reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 6(3-4), pp. 49-78.
- ISO 14 040 (2006). « Management environnemental – Analyse du cycle de vie - Principes et 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.
- Jolliet, 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., KLÖPPFER, 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 :**  
**Détail de la méthode IMPACT World +**

---

## Description de la méthode IMPACT World +

Les impacts environnementaux potentiels du cycle de vie ont été évalués à l'aide de la nouvelle méthode d'évaluation des impacts IMPACT World+<sup>1</sup>. IMPACT World+ permet d'effectuer une évaluation des impacts potentiels au niveau « problème » et au niveau « dommage » (voir Figure suivante).



**Figure Catégories de dommage et catégories d'impacts de la méthode IMPACT World+.**

(Source : <http://www.impactworldplus.org/en/methodology.php>).

L'évaluation au niveau « problème » ne modélise pas tous les mécanismes environnementaux liant une émission à une aire de protection telle que la santé humaine ou la qualité des écosystèmes (c.-à-d. une modélisation des impacts dommages). Toutefois, une évaluation problème représente théoriquement un compromis entre la pertinence environnementale d'un impact donné et l'incertitude inhérente à la modélisation environnementale. Toutefois, les impacts problèmes, en raison de leur plus grand nombre, complexifient l'interprétation des résultats.

L'évaluation au niveau « dommage » modélise tous les mécanismes environnementaux liant une émission à une aire de protection telle que la santé humaine ou la qualité des écosystèmes (c.-à-d. une modélisation des impacts dommages). Bien qu'une telle évaluation réside au sommet de la pertinence environnementale, l'incertitude inhérente à la modélisation est toutefois maximisée. Les impacts dommages étant moins nombreux, ils facilitent cependant l'interprétation des résultats.

Mentionnons que :

- Les résultats de l'ÉICV représentent 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

<sup>1</sup> ([www.impactworldplus.org/en/presentation.php](http://www.impactworldplus.org/en/presentation.php); Note : en attente de publication scientifique, la documentation est disponible sur demande)

impacts finaux ou le risque sur les milieux récepteurs et le dépassement des normes ou marges de sécurité.

- Ces catégories ne couvrent pas l'éventail des impacts environnementaux possibles associés aux activités humaines. Plusieurs types d'impacts, dont le bruit, les odeurs, les tremblements de terre et les champs électromagnétiques ne sont pas inclus dans la méthode.
- La méthode ne permet pas de normaliser les résultats à une quelconque référence ou d'évaluer un score unique

IMPACT World + considère 18 catégories d'impact qui peuvent se résumer ainsi :

- 1) **Substances cancérigènes (Rosenbaum et coll., 2008)** : Le modèle USEtox est utilisé pour déterminer l'impact toxique des substances cancérigènes. Le modèle considère toutes les voies d'exposition de contaminants à l'humain : l'ingestion, la respiration, le contact, l'ingestion d'eau et de poissons.
- 2) **Substances cancérigènes, résidus de pesticides (Fantke et coll., 2011)** : Cette catégorie d'impact évalue l'impact potentiel des pesticides via diverses voies d'exposition de contamination à l'humain. Le modèle USEtox a été utilisé pour évaluer ces effets.
- 3) **Substances non cancérigènes (Rosenbaum et coll., 2008)** : Le modèle USEtox est utilisé pour déterminer l'impact toxique des substances non cancérigènes. Le modèle considère toutes les voies d'exposition de contaminants à l'humain : l'ingestion, la respiration, le contact, l'ingestion d'eau et de poissons.
- 4) **Effets respiratoires (Humbert, 2011)** : les effets respiratoires sont causés par les particules fines (ayant un diamètre de moins de 10  $\mu\text{m}$ ) et liés aux impacts à la santé humaine lorsque celles-ci sont inhalées.
- 5) **Radiations ionisantes (Frischknecht et coll, 2000)** : évalue les conséquences des émissions routinières de substances radioactives.
- 6) **Destruction de la couche d'ozone (Goedkoop, 2009)** : les émissions anthropogéniques de substances destructrices de la couche d'ozone interagissent avec la couche d'ozone. Elles brisent les molécules d'ozone en molécule d'oxygène. Il en résulte une augmentation des rayons ultra-violet qui atteignent la surface de la Terre, ce qui augmente le risque de cancer de la peau et des cataractes. Il peut également causer un vieillissement prématuré et un affaiblissement du système immunitaire.
- 7) **Changement climatique (GIEC, 2007)** : les émissions de gaz à effet de serre engendrées par les activités humaines absorbent les radiations infrarouges émises par la surface terrestre, maintenant l'énergie thermique dans la basse atmosphère. L'augmentation des gaz à effet de serre lors du siècle dernier a eu pour effet d'augmenter la température moyenne de l'atmosphère et des océans.
- 8) **Consommation de l'eau (Boulay et coll., 2011)** : cette catégorie d'impact évalue le manque (s'il y a lieu) de ressources en eau pour répondre aux exigences de consommation d'eau dans une région.
- 9) **Smog (oxydation photochimique) (Goedkoop, 2009)** : cette catégorie est associée aux impacts de l'ozone et d'autres composés d'oxygène formé suite à l'oxydation de composés organiques volatils (VOC) en présence d'oxyde nitreux ( $\text{NO}_x$ ) sous l'influence de la lumière.

L'ozone dans la troposphère s'avère un risque pour la santé humaine puisqu'elle peut endommager les poumons.

- 10) **Acidification terrestre (Roy et coll., 2014)** : Les émissions de substances acidifiantes anthropogéniques sont transportées dans l'atmosphère avant de se déposer sur les milieux terrestres, ce qui a pour effet de diminuer le pH des sols et cause des impacts sur la faune et la flore.
- 11) **Acidification aquatique (Roy et coll., 2013)** : Les émissions de substances acidifiantes anthropogéniques sont transportées dans l'atmosphère avant de se déposer sur les milieux terrestres et les milieux aquatiques. Les substances déposées sur les milieux terrestres migrent vers les milieux aquatiques. Les substances acidifiantes dans les milieux aquatiques ont pour effet d'en diminuer le pH, ce qui cause des impacts sur les poissons.
- 12) **Écotoxicité aquatique à long terme (Rosenbaum et coll., 2008)** : Les polluants émis dans l'environnement et se retrouvant dans l'eau peuvent être toxiques pour la faune et la flore aquatiques.
- 13) **Écotoxicité aquatique à court terme (Rosenbaum et coll., 2008)** : Les polluants émis dans l'environnement et se retrouvant dans l'eau peuvent être toxiques pour la faune et la flore aquatiques.
- 14) **Eutrophisation aquatique (Helmes et coll., 2012)** : Les rejets de nutriments dans l'eau favorisent la prolifération d'algues pouvant asphyxier un cours d'eau si elles sont en trop grand nombre. Les milieux aquatiques (c.-à-d. l'eau douce) sont particulièrement affectés par des émissions de phosphore,
- 15) **Eutrophisation marine (Roy et coll., 2012)** : Les rejets de nutriments dans l'eau favorisent la prolifération d'algues pouvant asphyxier un cours d'eau si elles sont en trop grand nombre. Les estuaires et les milieux marins sont affectés par des émissions d'azote.
- 16) **Occupation des terres (Saad et coll., 2011)** : cette catégorie d'impact considère l'effet sur la biodiversité d'une transformation et de l'occupation d'une certaine surface.
- 17) **Utilisation des ressources fossiles** : présente la consommation de ressources fossiles empêchant leur utilisation par les générations futures.
- 18) **Utilisation des ressources minérales** : présente la consommation de minéraux empêchant leur utilisation par les générations futures.

Les catégories de dommage peuvent se résumer ainsi :

- 1) **Santé humaine** : cette catégorie prend en compte les substances ayant des effets toxiques (cancérogènes et non cancérogènes) et respiratoires, ayant un impact sur le changement climatique, produisant des radiations ionisantes, qui consomment de l'eau et qui contribuent à la destruction de la couche d'ozone. Afin d'évaluer le facteur de dommage, la gravité de la maladie potentiellement causée par ces substances est exprimée en DALY - *Disabled Adjusted Life Years*, unité reflétant le dommage à la santé humaine.
- 2) **Qualité des écosystèmes** : cette catégorie regroupe les impacts liés à l'écotoxicité aquatique, à l'acidification terrestre et aquatique, à l'eutrophisation aquatique et marine, aux effets d'émissions de radiations ionisantes sur les milieux aquatiques, au changement climatique, à l'acidification des océans, à la consommation de l'eau, à la pollution thermique de l'eau, à l'abaissement des nappes phréatiques et à l'occupation des terres. Elle est quantifiée en fraction

d'espèces potentiellement disparues, sur une surface donnée et durant une certaine période de temps, par kilogramme de substance émise ( $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{an} / \text{kg}$ ).

- 3) **Ressources et services écosystémiques** : cette catégorie d'impact dommage n'a pas encore été intégrée à la méthode IMPACT World +.

## RÉFÉRENCES

- BOULAY, A.-M., BULLE, C., BAYART, J.-B., DESCHÊNES, L., and MARGNI M., 2011. Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health. Environmental Science & Technology, 45(20), 8948-8957.
- FANTKE P., CHARLES R., ALENCASTRO L.F., FRIEDRICH R., JOLLIET O., 2011. Plant uptake of pesticides and human health: dynamic modeling of residues in wheat and ingestion intake. Chemosphere, 85 1639-1647
- GIEC (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In : Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 129-235. Disponible sur : [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html) [page consultée le 3 juin 2013]. Plus précisément : Global Warming Potential (Table 2-14) : [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/tssts-2-5.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/tssts-2-5.html) [page consultée le 3 juin 2013]
- GOEDKOOP, M., HEIJUNGS, R. HUIJBREGTS, M., DE SCHRYVER, A., STRUIJS, J., VAN ZELM, R. 2009. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level.
- HUMBERT, S., MARSHALL, J.D., SHAKED, S., SPADARO, J., NISHIOKA, Y., PREISS, P.H., MCKONE, T.E., HORVATH, A. and JOLLIET, O., 2011. Intake fractions for particulate matter: Recommendations for life cycle assessment. Environmental Science and Technology, 45 (11) 4808-4816
- HELMES R., HUIJBREGTS M.A.J., HENDERSON A.D., JOLLIET O., 2012. Spatially explicit fate factors of freshwater phosphorous emissions at the global scale. International Journal of Life Cycle Assessment,
- ROSENBAUM R.K., BACHMANN T.K., GOLD L.S., HUIJBREGTS M.A.J., JOLLIET O., JURASKE R., KOEHLER A., LARSEN H.F., MACLEOD M., MARGNI M., MCKONE T.E., PAYET J., SCHUHMACHER M., VAN DE MEENT D., HAUSCHILD M.Z., 2008. USEtox-The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. International Journal of Life Cycle Assessment 13(7) 532-546.
- ROY P.-O., HUIJBREGTS M., DESCHENES L. and MARGNI M., 2012. Spatially-differentiated atmospheric source-receptor relationships for nitrogen oxides, sulfur oxides, and ammonia emissions at the global scale for life cycle impact assessment. Atmospheric Environment, 62, 74-81
- ROY P.-O., DESCHENES L., MARGNI M. 2013. Uncertainty and spatial variability in characterization factors for aquatic acidification at the global scale. International Journal of Life Cycle Assessment 19(4) 882-890
- ROY P.-O., AZEVEDO, L.B., MARGNI M, VAN ZELM, R., DESCHENES L. HUIJBREGTS M. 2014. Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: a systematic analysis of spatial variability and uncertainty. Science of the environment. Online first
- SAAD R., MARGNI M., KOELLNER T., WITTSTOCK B. and DESCHENES L., 2011. Assessment of land use impacts on soil ecological functions: development of spatially differentiated characterization factors within a Canadian context. International Journal of Life Cycle Assessment, 16(3), 198-211

**Annexe C-1 :**  
**Données et hypothèses**

---



## Batterie du véhicule électrique

**1.0 battery pack** 1 p  
1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Adaptation à la base de donnée Ecoinvent 3.1 des donne

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
1.2 battery cell		6.00E-01 kg	Undefined	0	0	0
2.0 Packaging		3.20E-01 kg	Undefined	0	0	0
3.0 Battery management system		3.70E-02 kg	Undefined	0	0	0
4.0 Cooling system		4.10E-02 kg	Undefined	0	0	0
Precious metal refinery {GLO}   market		1.90E-08 p	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}   market		2.30E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {G		5.10E-02 tkm	Undefined	0	0	0
Electricity, medium voltage {JP}   market 4.0E-4*prod_jap = 0.0004		kWh	Undefined	0	0	0 si production au Japon
Electricity, medium voltage {SERC}   market 4.0E-4*prod_us = 0		kWh	Undefined	0	0	0 si production au Tennessee

**1.2 battery cell** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Adaptation à la base de donnée Ecoinvent 3.1 des donne

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
1.2.1 Anode		3.90E-01 kg	Undefined	0	0	0
1.2.2 Cathode		4.30E-01 kg	Undefined	0	0	0
1.2.3 Electrolyte		1.60E-01 kg	Undefined	0	0	0
1.2.4 Separator		2.20E-02 kg	Undefined	0	0	0
1.2.5 Cell container		6.70E-03 kg	Undefined	0	0	0
Water, decarbonised, at user {GLO}   m		380 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}   market		2.60E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {G		1.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Precious metal refinery {GLO}   market		1.90E-08 p	Undefined	0	0	0
Electricity, medium voltage {JP}   market 2.8E1*prod_jap = 28		kWh	Undefined	0	0	0 si production au japon
Electricity, medium voltage {SERC}   market 2.8E1*prod_us = 0		kWh	Undefined	0	0	0 si production US

**1.2.1 Anode** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
1.2.1.1 Negative current collector		5.70E-01 kg	Undefined	0	0	0
1.2.1.2 Negative electrode paste		4.30E-01 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}   market		3.70E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {G		1.00E-02 tkm	Undefined	0	0	0

**1.2.1.1 Negative current collector** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Copper {GLO}   market for   Alloc Def, l		1 kg	Undefined	0	0	0
Sheet rolling, copper {GLO}   market fo		1 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}   market		2.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {G		1.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Metal working factory {GLO}   market f		4.60E-10 p	Undefined	0	0	0

**1.2.1.2 Negative electrode paste** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Graphite, battery grade {GLO}   market		9.60E-01 kg	Undefined	0	0	0
Carboxymethyl cellulose, powder {GLO		2.00E-02 kg	Undefined	0	0	0
Acrylic acid {GLO}   market for   Alloc D		2.00E-02 kg	Undefined	0	0	0
N-methyl-2-pyrrolidone {GLO}   market		9.40E-01 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}   market		1.2 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {G		1.90E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Chemical factory, organics {GLO}   marl		4.00E-10 p	Undefined	0	0	0

**1.2.2 Cathode** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
------	--------	------	--------------	----------------	-----	---------

1.2.2.1 Positive current collector	1.10E-01 kg	Undefined	0	0	0
1.2.2.2 Positive electrode paste	8.90E-01 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}  market	5.50E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {G	1.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0

**1.2.2.1 Positive current collector** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Aluminium, cast and wrought alloys {G		1 kg	Undefined	0	0	0
Sheet rolling, aluminium {GLO}  marke		1 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}  market		2.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {G		1.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Aluminium casting facility {GLO}  mark		1.50E-10 p	Undefined	0	0	0

**1.2.2.2 Positive electrode paste** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Polyvinylfluoride {GLO}  market for   A		4.00E-02 kg	Undefined	0	0	0
Carbon black {GLO}  market for   Alloc		2.00E-02 kg	Undefined	0	0	0
N-methyl-2-pyrrolidone {GLO}  market		4.10E-01 kg	Undefined	0	0	0
1.2.2.2.1 Positive active material		9.40E-01 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}  market		4.60E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {G		1.40E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Chemical factory, organics {GLO}  marl		4.00E-10 p	Undefined	0	0	0

**1.2.2.2.1 Positive active material** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Nickel cobalt manganese hydroxide_pi		1 kg	Undefined	0	0	0

**1.2.3 Electrolyte** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Lithium hexafluorophosphate {GLO}  n		1.20E-01 kg	Undefined	0	0	0
Ethylene carbonate {GLO}  market for		8.80E-01 kg	Undefined	0	0	0
Chemical factory, organics {GLO}  marl		4.00E-10 p	Undefined	0	0	0

**1.2.4 Separator** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Polypropylene, granulate {GLO}  marke		1 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}  market for		1 kg	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}  mark		7.40E-10 p	Undefined	0	0	0

**1.2.4 Separator** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Polypropylene, granulate {GLO}  marke		1 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}  market for		1 kg	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}  mark		7.40E-10 p	Undefined	0	0	0

**1.2.5.1 Tab aluminium** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Aluminium, cast and wrought alloys {G		1 kg	Undefined	0	0	0
Sheet rolling, aluminium {GLO}  marke		1 kg	Undefined	0	0	0
Aluminium casting facility {GLO}  mark		1.50E-10 p	Undefined	0	0	0

**1.2.5.2 Tab copper**

1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Copper {GLO}   market for   Alloc Def, l		1 kg	Undefined	0	0	0
Sheet rolling, copper {GLO}   market for		1 kg	Undefined	0	0	0
Metal working factory {GLO}   market for		4.60E-10 p	Undefined	0	0	0

**1.2.5.3 Multilayer pouch**

1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Aluminium, cast and wrought alloys {GLO}		5.00E-01 kg	Undefined	0	0	0
Polyethylene terephthalate, granulate, low density		7.80E-02 kg	Undefined	0	0	0
Nylon 6 {GLO}   market for   Alloc Def, l		8.00E-02 kg	Undefined	0	0	0
Polypropylene, granulate {GLO}   market for		3.20E-01 kg	Undefined	0	0	0
Packaging film, low density polyethylene		2.50E-02 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}   market for   Alloc Def, l		4.70E-01 kg	Undefined	0	0	0
Sheet rolling, aluminium {GLO}   market for		5.00E-01 kg	Undefined	0	0	0
Aluminium casting facility {GLO}   market for		7.70E-11 p	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}   market for		3.50E-10 p	Undefined	0	0	0

**2.0 Packaging**

1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
2.1 Module packaging		5.90E-01 kg	Undefined	0	0	0
2.2 Battery retention		1.10E-01 kg	Undefined	0	0	0
2.3 Battery tray		3.00E-01 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}   market for		2.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}		1.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0

**2.1 Module packaging**

1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
2.1.1 Module fasteners		4.80E-02 kg	Undefined	0	0	0
2.1.2 Outerframe		4.80E-01 kg	Undefined	0	0	0
2.1.3 Innerframe		4.00E-01 kg	Undefined	0	0	0
2.1.4 Bimetallic bushbars and washers		3.40E-02 kg	Undefined	0	0	0
2.1.5 End-bushbar, aluminium		1.60E-03 kg	Undefined	0	0	0
2.1.6 End-bushbar, copper		4.90E-03 kg	Undefined	0	0	0
2.1.7 module lid		2.80E-02 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}   market for		2.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}		1.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Precious metal refinery {GLO}   market for		1.90E-08 p	Undefined	0	0	0

**2.1.1 Module fasteners**

1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Steel, low-alloyed {GLO}   market for   Alloc Def, l		9.60E-01 kg	Undefined	0	0	0
Nylon 6 {GLO}   market for   Alloc Def, l		4.20E-02 kg	Undefined	0	0	0
Metal working, average for steel production		9.60E-01 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}   market for   Alloc Def, l		4.20E-02 kg	Undefined	0	0	0
Metal working factory {GLO}   market for		4.40E-10 p	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}   market for		3.10E-11 p	Undefined	0	0	0

**2.1.2 Outerframe**

1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Nylon 6-6, glass-filled {GLO}  market for		3.00E-01 kg	Undefined	0	0	0
Aluminium, cast and wrought alloys {GLO}  market for		7.00E-01 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}  market for		3.00E-01 kg	Undefined	0	0	0
Sheet rolling, aluminium {GLO}  market for		7.00E-01 kg	Undefined	0	0	0
Anodising, aluminium sheet {GLO}  market for		3.00E-02 m2	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}  market for		2.10E-10 p	Undefined	0	0	0
Aluminium casting facility {GLO}  market for		1.10E-10 p	Undefined	0	0	0

**2.1.3 Innerframe** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Nylon 6-6, glass-filled {GLO}  market for		3.50E-01 kg	Undefined	0	0	0
Aluminium, cast and wrought alloys {GLO}  market for		6.50E-01 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}  market for		3.50E-01 kg	Undefined	0	0	0
Sheet rolling, aluminium {GLO}  market for		6.50E-01 kg	Undefined	0	0	0
Anodising, aluminium sheet {GLO}  market for		3.00E-02 m2	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}  market for		2.60E-10 p	Undefined	0	0	0
Aluminium casting facility {GLO}  market for		1.00E-10 p	Undefined	0	0	0

**2.1.4 Bimetallic bushbars and washers** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Aluminium, cast and wrought alloys {GLO}  market for		2.50E-01 kg	Undefined	0	0	0
Copper {GLO}  market for   Alloc Def, (4.9E-1+8.6E-2 = 0.576		kg	Undefined	0	0	0
Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO}  market for		1.70E-01 kg	Undefined	0	0	0
Metal working, average for aluminium		2.50E-01 kg	Undefined	0	0	0
Metal working, average for copper processing		5.70E-01 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}  market for		1.70E-01 kg	Undefined	0	0	0
Metal working factory {GLO}  market for		3.80E-10 p	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}  market for		1.30E-10 p	Undefined	0	0	0

**2.1.5 End-bushbar, aluminium** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Aluminium, cast and wrought alloys {GLO}  market for		9.10E-01 kg	Undefined	0	0	0
Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO}  market for		9.10E-02 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}  market for		9.10E-02 kg	Undefined	0	0	0
Metal working, average for aluminium		9.10E-01 kg	Undefined	0	0	0
Aluminium casting facility {GLO}  market for		1.40E-10 p	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}  market for		6.70E-11 p	Undefined	0	0	0

**2.1.6 End-bushbar, copper** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Metal working, average for copper processing		9.70E-01 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}  market for		3.10E-02 kg	Undefined	0	0	0
Copper {GLO}  market for   Alloc Def, (8.2E-1+1.5E-1 = 0.97		kg	Undefined	0	0	0
Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO}  market for		3.10E-02 kg	Undefined	0	0	0
Metal working factory {GLO}  market for		4.40E-10 p	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}  market for		2.30E-11 p	Undefined	0	0	0

**2.2 Battery retention** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
2.2.1 Strap retention		8.70E-02 kg	Undefined	0	0	0
2.2.2 Lower retention		3.50E-01 kg	Undefined	0	0	0
2.2.3 Heat transfer plate		4.60E-01 kg	Undefined	0	0	0
Synthetic rubber {GLO}  market for   A		1.00E-01 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}  market for		2.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}  market for		1.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0

**2.2.1 Strap retention** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG)\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Steel, low-alloyed {GLO}  market for   .		4.90E-01 kg	Undefined	0	0	0
Nylon 6 {GLO}  market for   Alloc Def,		1.30E-01 kg	Undefined	0	0	0
Polypropylene, granulate {GLO}  market for		3.80E-01 kg	Undefined	0	0	0
Metal working, average for steel production		4.90E-01 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}  market for		5.10E-01 kg	Undefined	0	0	0
Metal working factory {GLO}  market for		2.20E-10 p	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}  market for		3.80E-10 p	Undefined	0	0	0

**2.2.2 Lower retention**

1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Steel, low-alloyed {GLO}  market for   .		1 kg	Undefined	0	0	0
Metal working, average for steel production		1 kg	Undefined	0	0	0
Metal working factory {GLO}  market for		4.60E-10 p	Undefined	0	0	0

**2.2.3 Heat transfer plate**

1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Steel, low-alloyed {GLO}  market for   .		1 kg	Undefined	0	0	0
Metal working, average for steel production		1 kg	Undefined	0	0	0
Metal working factory {GLO}  market for		4.60E-10 p	Undefined	0	0	0

**2.3 Battery tray**

1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
2.3.1 Tray with fasteners		7.90E-01 kg	Undefined	0	0	0
2.3.2 Tray lid		2.10E-01 kg	Undefined	0	0	0
2.3.3 Tray seal		4.10E-04 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}  market for		2.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}  market for		1.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0

**2.3.1 Tray with fasteners**

1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Steel, low-alloyed {GLO}  market for   .		1 kg	Undefined	0	0	0
Metal working, average for steel production		1 kg	Undefined	0	0	0
Metal working factory {GLO}  market for		4.60E-10 p	Undefined	0	0	0

**2.3.2 Tray lid**

1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Polypropylene, granulate {GLO}  market for		1 kg	Undefined	0	0	0
Injection moulding {GLO}  market for		1 kg	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}  market for		7.40E-10 p	Undefined	0	0	0

**2.3.3 Tray seal**

1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2* Min	Max	Comment
Injection moulding {GLO}  market for		1 kg	Undefined	0	0	0
Butyl acrylate {GLO}  market for   Alloc Def,		1 kg	Undefined	0	0	0
Plastic processing factory {GLO}  market for		7.40E-10 p	Undefined	0	0	0

**3.0 Battery management system**

1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prc Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
Printed wiring board, through-hole mo	8.90E-02	kg	Undefined	0	0	0	
3.1 IBIS	4.80E-01	kg	Undefined	0	0	0	
3.2 IBIS fasteners	3.00E-03	kg	Undefined	0	0	0	
3.3 High voltage system	3.00E-01	kg	Undefined	0	0	0	
3.4 Low voltage system	1.30E-01	kg	Undefined	0	0	0	
Transport, freight train {RoW}   market	2.00E-01	tkm	Undefined	0	0	0	
Transport, freight, lorry, unspecified {G	1.00E-01	tkm	Undefined	0	0	0	

**3.1 IBIS** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
Acrylonitrile-butadiene-styrene copoly	2.00E-04	kg	Undefined	0	0	0	
Printed wiring board, through-hole mo	1.10E-01	kg	Undefined	0	0	0	
Integrated circuit, logic type {GLO}   ma	1.70E-05	kg	Undefined	0	0	0	
Steel, low-alloyed {GLO}   market for   .	8.50E-01	kg	Undefined	0	0	0	
Electric connector, wire clamp {GLO}   r	2.10E-02	kg	Undefined	0	0	0	
Polyethylene terephthalate, granulate,	6.80E-03	kg	Undefined	0	0	0	
Nylon 6 {GLO}   market for   Alloc Def,	1.90E-03	kg	Undefined	0	0	0	
Brass {GLO}   market for   Alloc Def, U	5.70E-03	kg	Undefined	0	0	0	
Metal working, average for steel produ	8.50E-01	kg	Undefined	0	0	0	
Casting, brass {GLO}   market for   Alloc	5.70E-03	kg	Undefined	0	0	0	
Injection moulding {GLO}   market for	8.80E-03	kg	Undefined	0	0	0	
Electronic component factory {GLO}   n	2.00E-08	p	Undefined	0	0	0	

**3.2 IBIS fasteners** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
Steel, low-alloyed {GLO}   market for   .	1	kg	Undefined	0	0	0	
Metal working, average for steel produ	1	kg	Undefined	0	0	0	
Metal working factory {GLO}   market f	4.60E-10	p	Undefined	0	0	0	

**3.3 High voltage system** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
Steel, low-alloyed {GLO}   market for   .	1.40E-03	kg	Undefined	0	0	0	
Aluminium, cast and wrought alloys {G	1.20E-01	kg	Undefined	0	0	0	
Nylon 6-6 {GLO}   market for   Alloc De	4.40E-02	kg	Undefined	0	0	0	
Synthetic rubber {GLO}   market for   A	3.60E-03	kg	Undefined	0	0	0	
Polyethylene terephthalate, granulate,	5.70E-02	kg	Undefined	0	0	0	
Copper {GLO}   market for   Alloc Def, (2.3E-1+4.1E-2 = 0.271		kg	Undefined	0	0	0	
Polyphenylene sulfide {GLO}   market f	3.20E-02	kg	Undefined	0	0	0	
Tin {GLO}   market for   Alloc Def, U	1.60E-02	kg	Undefined	0	0	0	
Cable, ribbon cable, 20-pin, with plugs	4.50E-01	kg	Undefined	0	0	0	
Metal working, average for steel produ	1.40E-03	kg	Undefined	0	0	0	
Metal working, average for aluminium	1.20E-01	kg	Undefined	0	0	0	
Metal working, average for copper pro	2.70E-01	kg	Undefined	0	0	0	
Metal working, average for metal prod	1.60E-02	kg	Undefined	0	0	0	
Injection moulding {GLO}   market for	1.40E-01	kg	Undefined	0	0	0	
Electronic component factory {GLO}   n	2.00E-08	p	Undefined	0	0	0	

**3.4 Low voltage system** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
Injection moulding {GLO}   market for	2.90E-02	kg	Undefined	0	0	0	
Nylon 6-6 {GLO}   market for   Alloc De	2.90E-02	kg	Undefined	0	0	0	
Electronic component, passive, unspec	9.70E-01	kg	Undefined	0	0	0	
Electronic component factory {GLO}   n	2.00E-08	p	Undefined	0	0	0	

**4.0 Cooling system** 1 kg Mass 100% not defined CIRAIG\Prç Données de Ellingsen

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
------	--------	------	--------------	------	--------	-----	---------

4.1 Radiator	8.70E-01 kg	Undefined	0	0	0
4.2 Manifolds	3.80E-02 kg	Undefined	0	0	0
4.3 Clamps and fasteners	2.30E-02 kg	Undefined	0	0	0
4.4 Pipe fitting	9.60E-04 kg	Undefined	0	0	0
4.5 Thermal pad	2.00E-02 kg	Undefined	0	0	0
Ethylene glycol {GLO}   market for   All	4.80E-02 kg	Undefined	0	0	0
Transport, freight train {RoW}   market	2.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0
Transport, freight, lorry, unspecified {G	1.00E-01 tkm	Undefined	0	0	0

**4.1 Radiator** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG\Prç Données de Ellingsen)

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
Aluminium, cast and wrought alloys {G		1 kg	Undefined	0	0	0	
Sheet rolling, aluminium {GLO}   marke		1 kg	Undefined	0	0	0	
Aluminium casting facility {GLO}   mark		1.50E-10 p	Undefined	0	0	0	

**4.2 Manifolds** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG\Prç Données de Ellingsen)

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
Metal working, average for aluminium		1 kg	Undefined	0	0	0	
Aluminium, cast and wrought alloys {G		1 kg	Undefined	0	0	0	
Aluminium casting facility {GLO}   mark		1.50E-10 p	Undefined	0	0	0	

**4.3 Clamps and fasteners** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG\Prç Données de Ellingsen)

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
Steel, low-alloyed {GLO}   market for   .		1 kg	Undefined	0	0	0	
Metal working, average for steel produ		1 kg	Undefined	0	0	0	
Metal working factory {GLO}   market f		4.60E-10 p	Undefined	0	0	0	

**4.4 Pipe fitting** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG\Prç Données de Ellingsen)

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
Polyvinylchloride, bulk polymerised {G		7.50E-01 kg	Undefined	0	0	0	
Synthetic rubber {GLO}   market for   A		2.50E-01 kg	Undefined	0	0	0	
Injection moulding {GLO}   market for		1 kg	Undefined	0	0	0	
Plastic processing factory {GLO}   mark		7.40E-10 p	Undefined	0	0	0	

**4.5 Thermal pad** 1 kg Mass 100% not defined (CIRAIG\Prç Données de Ellingsen)

Known inputs from technosphere (materials/fuels)

Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2	2* Min	Max	Comment
Glass fibre {GLO}   market for   Alloc D		1.00E-01 kg	Undefined	0	0	0	
Silicon, electronics grade {GLO}   marke		3.00E-01 kg	Undefined	0	0	0	
Acrylonitrile-butadiene-styrene copoly		6.00E-01 kg	Undefined	0	0	0	
Injection moulding {GLO}   market for		1 kg	Undefined	0	0	0	
Plastic processing factory {GLO}   mark		7.40E-10 p	Undefined	0	0	0	



ées de Ellingsen qui était en Ecoinvent 2.:

ées de Ellingsen qui était en Ecoinvent 2.:



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

---

### 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

#### Qualité des données réalisées sur le profil environnemental - Véhicule électrique

Étape du cycle de vie / Processus	Contribution minimal à l'impact global	Contribution maximale à l'impact global	Qualité	
			Fiabilité (Quantité)	Représentativité (processus)
Production des pièces du véhicule	57.32%	80.51%	2	2
Production de la batterie	17.37%	32.35%	2	2
Transport du lieu de production à l'utilisateur	0.86%	2.69%	2	2
Utilisation	1.19%	7.43%	2	2
Fin de vie	0.06%	3.79%	2	2

##### Production des pièces du véhicule

Corps et portes	20.34%	34.36%	2	2
Frein	0.96%	2.21%	2	2
Chassis	6.85%	12.72%	2	2
Fluides communs	0.01%	0.36%	2	2
Assemblage final	0.19%	1.71%	2	2
Intérieur & extérieur	9.82%	27.36%	2	2
Pneus et roues	2.54%	4.16%	2	2
Moteur électrique et transmission	35.54%	51.52%	2	2
Transmission différentielle	0.59%	0.97%	2	2

##### Production de la batterie

Batterie	67.42%	83.90%	2	2
Emballage	9.96%	20.87%	2	2
Battery management system	4.36%	9.11%	2	2
Système de refroidissement	1.64%	3.61%	2	2
Assemblage	0.06%	0.17%	2	2
Transport	0.04%	0.09%	2	2

##### Transport du lieu de production vers l'utilisateur

Transport océanique	11.69%	35.80%	2	2
Transport par train	62.65%	86.29%	2	2
Transport par camion	1.56%	2.09%	2	2

##### Utilisation du véhicule

Production d'électricité	86.17%	96.95%	1	1
Infrastructure de recharge	0.43%	3.98%	4	4
Maintenance du véhicule	2.61%	11.98%	2	2

##### Fin de vie

Fin de vie du véhicule	96.98%	99.66%	3	3
Fin de vie de la batterie	0.34%	3.02%	3	3

#### Qualité des données réalisées sur le profil environnemental - Véhicule conventionnel

Étape du cycle de vie / Processus	Contribution minimal à l'impact global	Contribution maximale à l'impact global	Qualité	
			Fiabilité (Quantité)	Représentativité (processus)
Production des pièces du véhicule	15.62%	86.60%	2	2
Production de la batterie	0.08%	0.45%	2	2

Transport du lieu de production à l'utilisateur	0.76%	1.07%	2	2
Utilisation	11.80%	82.80%	2	2
Fin de vie	0.07%	1.57%	2	2

**Production des pièces du véhicule**

Corps et portes	21.66%	42.26%	2	2
Frein	1.18%	2.72%	2	2
Chassis	8.36%	17.47%	2	2
Fluides communs	0.02%	0.44%	2	2
Assemblage final	0.23%	2.08%	2	2
Intérieur & extérieur	12.08%	33.37%	2	2
Pneus et roues	4.25%	5.17%	2	2
Fluides spécifiques	0.06%	2.57%	2	2
Moteur à combustion interne	7.33%	12.93%	2	2
Groupe motopropulseur	5.88%	5.88%	2	2
Transmission	4.17%	6.58%	2	2

**Production de la batterie**

Batterie	100.00%	100.00%	2	2
----------	---------	---------	---	---

**Transport du lieu de production vers l'utilisateur**

Transport océanique	11.69%	35.80%	2	2
Transport par train	62.65%	86.29%	2	2
Transport par camion	1.56%	2.09%	2	2

**Utilisation du véhicule**

Émissions opérationnelles	0.00%	79.54%	2	2
Production d'éthanol	1.46%	13.44%	2	2
Production de pétrole	17.67%	96.78%	2	2
Maintenance du véhicule	1.06%	2.66%	2	2

**Fin de vie**

Fin de vie du véhicule	100%	100%	3	3
------------------------	------	------	---	---

**Annexe E :**  
**Résultats bruts**

---

Résultats simulation Simapro: Véhicule électrique

Production

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 p 1.0 Production electric car\_pi (of project PI202b HQ - electric car)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	1.0 Product body and d brakes_pi	chassis_pi	common fl final assem interior & ext tires and whe	electric mo	electric vehicule	differential transmission_pi			
Global warming, short-term, ecosystem	PDF.m2,1	2016.583	0 467.4803	23.29411	155.8137	3.541956	24.40904	393.96102	61.218815	872.9812	13.88324
Global warming, long-term, ecosystem	PDF.m2,1	6333.383	0 1475.613	73.15218	489.0659	10.44308	78.18032	1233.3373	191.41392	2739.291	42.88743
Global warming, short-term, human health	DALY	0.009068	0 0.002102	1.05E-04	0.000701	1.59E-05	1.10E-04	0.00177147	0.0002753	0.003925	6.24E-05
Global warming, long-term, human health	DALY	0.02853	0 0.006647	0.00033	0.002203	4.70E-05	0.000352	0.00555594	0.0008623	0.012339	0.000193
Marine acidification, short-term	PDF.m2,1	161.3136	0 38.2386	1.895744	12.62451	0.266869	2.028551	31.697853	4.96013	68.48998	1.111384
Marine acidification, long-term	PDF.m2,1	1486.041	0 352.2586	17.46382	116.2985	2.458425	18.68725	292.00447	45.693319	630.938	10.2382
Land occupation, biodiversity	PDF.m2,1	221.0586	0 42.10481	2.076517	15.57714	0.192257	1.426714	33.599435	4.853362	119.6819	1.546418
Water use impacts, human health	DALY	0.011983	0 0.003473	0.000118	0.000882	3.03E-05	3.05E-04	0.00279319	0.0004136	0.003889	7.95E-05
Water use impacts, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	-62.984	0 -13.0035	-0.47757	-4.70575	-0.05674	-0.54285	-9.0062725	-1.863598	-32.8021	-0.52563
Water use impacts, terrestrial ecosystem	PDF.m2,1	0.147183	0 0.026499	0.001459	0.010139	0.000151	0.00035	0.02190756	0.0027545	0.083241	0.000682
Thermally polluted water	PDF.m2,1	0.006107	0 0.00099	4.98E-05	0.000371	9.36E-06	1.95E-05	0.00097139	9.97E-05	0.003573	2.36E-05
Freshwater acidification	PDF.m2,1	155.7712	0 20.20278	0.920731	8.375421	0.180709	0.840518	22.125892	2.5658877	100.0304	0.528847
Terrestrial acidification	PDF.m2,1	1578.014	0 203.725	9.263184	84.6475	1.815383	8.446281	223.08417	26.200566	1015.501	5.330877
Freshwater eutrophication	PDF.m2,1	28.46735	0 4.606691	0.266772	1.842593	1.1631	0.12266	10.653409	1.0953865	8.5338	0.182943
Marine eutrophication	PDF.m2,1	23.19613	0 4.455102	0.256655	1.93854	0.020701	0.081725	3.2516427	0.5476308	12.42271	0.221416
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2,1	46.43254	0 12.89795	0.741227	4.585503	0.025516	0.076798	5.8589266	1.5408573	20.29128	0.414493
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2,1	1666.254	0 168.4097	7.903849	92.50813	0.360889	1.697267	166.31365	19.23765	1204.92	4.903423
Respiratory inorganics	DALY	0.005355	0 0.000896	5.82E-05	0.000358	5.87E-06	2.05E-05	0.00073497	1.17E-04	0.003139	2.49E-05
Respiratory organics	DALY	1.81E-06	0 3.53E-07	1.78E-08	1.30E-07	3.16E-09	1.21E-08	2.98E-07	4.50E-08	9.44E-07	9.69E-09
Carcinogens, short-term	DALY	0.011387	0 0.00412	0.000268	0.001532	2.18E-06	7.16E-06	0.00113854	0.0005199	0.003652	0.000148
Carcinogens, long-term	DALY	0.037122	0 0.010741	0.000768	0.004123	7.91E-06	3.53E-05	0.00353668	0.0010783	0.016537	0.000296
Non-carcinogens, short-term	DALY	0.012914	0 0.002184	0.000157	0.000871	5.39E-06	1.07E-05	0.00126894	0.0002035	0.008161	5.24E-05
Non-carcinogens, long-term	DALY	0.02258	0 1.44E-03	4.56E-05	0.001002	3.68E-06	1.54E-05	0.00221179	1.73E-04	0.017665	2.78E-05
Ionizing radiation, human health	DALY	2.85E-05	0 8.34E-06	2.82E-07	1.93E-06	5.64E-08	1.12E-06	7.80E-06	9.14E-07	7.81E-06	2.64E-07
Ionizing radiation, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	9.14E-06	0 2.61E-06	8.75E-08	6.16E-07	1.74E-08	3.62E-07	2.61E-06	3.50E-07	2.41E-06	8.46E-08
Ozone layer depletion	DALY	2.98E-06	0 4.79E-07	2.12E-08	1.76E-07	1.07E-07	3.84E-08	6.04E-07	8.90E-08	1.45E-06	1.44E-08

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 p 1.0 Production electric car\_pi (of project PI202b HQ - electric car)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	1.0 Product body and d brakes_pi	chassis_pi	common fl final assem interior & ext tires and whe	electric mo	electric vehicule	differential transmission_pi			
Global warming	kg CO2 e	11116.68	0 2576.249	128.2051	857.7623	19.30343	134.9198	2175.9484	336.58781	4811.626	76.08086
Land occupation, biodiversity	ha.yr ara	0.036665	0 0.006979	0.000344	0.002583	3.18E-05	2.36E-04	0.00556686	0.000805	0.019861	0.000257
Fossil energy use	MJ depriv	125260	0 28065.15	1207.947	8583.097	453.9878	2138.069	34268.054	5214.2303	44516.91	812.5543
Mineral resources use	kg depriv	1315.185	0 451.8425	29.07185	167.2471	0.195902	2.469795	129.20773	45.941911	476.4522	12.75641
Water use	m3 depriv	3.105591	0 0.391953	0.021696	0.168374	0.002118	0.005996	0.47199422	0.0438078	1.989554	0.010096
Terrestrial acidification	kg SO2 e	95.07107	0 12.06941	0.547215	5.050871	0.107638	0.502333	13.392453	1.5656394	61.52028	0.315236
Aquatic eutrophication	kg PO4- e	47.61158	0 4.348274	0.169977	2.41903	0.036989	0.083288	5.2271194	0.5080812	34.72139	0.097435
marine eutrophication	kg N eq	15.05982	0 2.636311	0.126098	1.018246	0.022526	0.080022	2.8104214	0.3043433	7.984378	0.077477
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	1737.454	0 182.1581	8.671548	98.15693	0.393162	1.763171	174.68896	20.961214	1245.33	5.330589
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	7.68085	0 1.099507	0.0287	0.353802	0.00214	0.018181	0.79888519	0.0894123	5.27155	0.018705
Respiratory inorganics	kg PM2.5	6.441552	0 1.077751	0.070038	0.431144	0.007062	0.024629	0.88413308	0.1410176	3.775829	0.029948
Respiratory organics	kg NMVOC	46.46476	0 9.054779	0.455416	3.321695	0.080916	0.309113	7.643901	1.1526147	24.19797	0.248356
Carcinogens, short-term	CTUh	0.004215	0 0.001291	9.00E-05	0.000491	8.77E-07	3.68E-06	0.00040619	1.39E-04	0.001754	3.86E-05
Carcinogens, long-term	CTUh	9.82E-08	0 2.91E-08	9.96E-10	6.69E-09	1.99E-10	3.81E-09	2.62E-08	2.83E-09	2.75E-08	9.08E-10
Carcinogens, indoor	CTUh	0	0 0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	1.21E-10	0 1.32E-11	8.47E-13	6.61E-12	1.17E-13	2.89E-13	3.29E-11	1.54E-12	6.48E-11	3.42E-13
Non-carcinogens, short-term	CTUh	0.027911	0 0.003328	1.18E-04	0.001369	5.46E-06	1.59E-05	0.00263023	0.0002787	0.020108	5.78E-05
Non-carcinogens, long-term	CTUh	7.09E-06	0 2.10E-06	7.19E-08	4.83E-07	1.44E-08	2.75E-07	1.89E-06	2.04E-07	1.98E-06	6.55E-08
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0	0 0	0	0	0	0	0	0	0	0
Non-carcinogens, pesticides residues	CTUh	2.34E-08	0 2.75E-09	1.73E-10	1.27E-09	2.59E-11	5.09E-11	8.42E-09	3.24E-10	1.03E-08	7.25E-11
Ionizing radiation	Bq C-14 e	137560.6	0 40257.99	1362.505	9302.399	272.5674	5402.404	37603.408	4403.2227	37683.27	1272.853
Ozone Layer Depletion	kg CFC-1	0.001453	0 2.12E-04	9.09E-06	8.08E-05	6.33E-05	1.76E-05	0.00028942	4.21E-05	0.000733	6.47E-06

Batterie

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment

Product: 253 kg 1.0 battery pack (of project Pi202b HQ - electric car)  
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
Indicator: Characterization  
Skip categories: Never  
Exclude infrastructure processes: No  
Exclude long-term emissions: No  
Sorted on item: Impact category  
Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	1.0 battery	1.2 battery	2.0 Packagi	3.0 Battery	4.0 Cooling	Precious m	Transport, fr	Transport, fr	Electricity, medium voltage {JP}	market for   Alloc Def, U
Global warming, short-term, ecosystem	PDF.m2,1	901.0198	0	703.458	121.4639	50.41948	24.08884	0.769479	0.49593579	0.3126397	0.011564	
Global warming, long-term, ecosystem	PDF.m2,1	2868.353	0	2246.549	379.9839	160.3213	76.2373	2.529996	1.620413	1.0736772	0.037472	
Global warming, short-term, human health	DALY	4.05E-03	0	3.16E-03	5.46E-04	2.27E-04	1.08E-04	3.46E-06	2.23E-06	1.41E-06	5.20E-08	
Global warming, long-term, human health	DALY	1.29E-02	0	1.01E-02	1.71E-03	7.22E-04	3.43E-04	1.14E-05	7.30E-06	4.84E-06	1.69E-07	
Marine acidification, short-term	PDF.m2,1	73.88758	0	58.1422	9.580716	4.13E+00	1.894957	0.065633	0.04201551	0.0280806	0.000973	
Marine acidification, long-term	PDF.m2,1	680.6614	0	535.613	88.25872	38.07378	17.45658	0.604615	0.38705199	0.2586823	0.008966	
Land occupation, biodiversity	PDF.m2,1	90.55815	0	70.33695	8.985078	9.29E+00	1.535003	0.168813	0.12890201	0.1112739	0.000879	
Water use impacts, human health	DALY	9.86E-03	0	8.85E-03	5.22E-04	3.51E-04	1.30E-04	2.84E-06	1.66E-06	4.04E-07	1.76E-08	
Water use impacts, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	-28.5078	0	-22.9916	-3.22E+00	-1.36E+00	-9.11E-01	-1.35E-02	-1.42E-02	-1.09E-03	-3.24E-04	
Water use impacts, terrestrial ecosystem	PDF.m2,1	0.033696	0	1.77E-02	8.96E-03	4.52E-03	2.42E-03	3.10E-05	2.68E-05	5.35E-06	8.93E-08	
Thermally polluted water	PDF.m2,1	1.39E-03	0	6.68E-04	3.96E-04	1.52E-04	1.72E-04	1.10E-06	1.59E-06	1.58E-07	2.33E-09	
Freshwater acidification	PDF.m2,1	84.6479	0	72.08216	7.045649	3.89E+00	1.551537	0.036394	0.02396299	0.013737	0.00048	
Terrestrial acidification	PDF.m2,1	852.4233	0	725.5283	71.01159	39.48875	15.61709	0.399404	0.23976253	0.1335784	0.004822	
Freshwater eutrophication	PDF.m2,1	11.5346	0	9.597345	0.99935	7.27E-01	0.135388	6.02E-02	0.00423477	0.0110308	7.78E-05	
Marine eutrophication	PDF.m2,1	13.00705	0	10.45939	1.806674	5.99E-01	1.29E-01	7.46E-03	2.80E-03	0.0031677	4.83E-05	
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2,1	9.948692	0	6.318386	1.817731	1.47E+00	0.283792	4.30E-02	3.93E-03	0.0082076	4.42E-05	
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2,1	519.629	0	406.0883	35.79207	72.74313	4.679739	0.242964	0.05521868	0.0268391	0.000729	
Respiratory inorganics	DALY	2.11E-03	0	1.63E-03	2.86E-04	1.25E-04	6.49E-05	1.80E-06	8.64E-07	7.63E-07	1.15E-08	
Respiratory organics	DALY	8.12E-07	0	6.33E-07	9.61E-08	6.15E-08	1.97E-08	6.71E-10	4.43E-10	5.37E-10	6.61E-12	
Carcinogens, short-term	DALY	1.24E-03	0	4.79E-04	5.26E-04	1.45E-04	8.81E-05	3.71E-06	9.28E-07	1.58E-07	3.25E-09	
Carcinogens, long-term	DALY	6.33E-03	0	3.67E-03	1.60E-03	7.65E-04	2.88E-04	5.08E-06	3.15E-06	4.69E-07	1.71E-08	
Non-carcinogens, short-term	DALY	3.13E-03	0	2.44E-03	3.37E-04	2.98E-04	5.04E-05	2.10E-06	5.58E-07	2.66E-07	5.68E-09	
Non-carcinogens, long-term	DALY	7.62E-03	0	6.13E-03	3.37E-04	1.12E-03	2.36E-05	8.61E-07	6.15E-07	9.92E-08	7.17E-09	
Ionizing radiation, human health	DALY	3.49E-05	0	3.29E-05	9.76E-07	7.98E-07	1.95E-07	5.39E-09	1.12E-08	3.07E-09	7.06E-10	
Ionizing radiation, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	1.15E-05	0	1.09E-05	3.00E-07	2.49E-07	5.70E-08	2.18E-09	3.53E-09	2.27E-09	2.35E-10	
Ozone layer depletion	DALY	1.56E-06	0	1.33E-06	1.20E-07	7.62E-08	2.83E-08	7.39E-10	5.51E-10	8.52E-10	1.75E-11	

Calculation: Analyze  
Results: Impact assessment  
Product: 253 kg 1.0 battery pack (of project Pi202b HQ - electric car)  
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
Indicator: Characterization  
Skip categories: Never  
Exclude infrastructure processes: No  
Exclude long-term emissions: No  
Sorted on item: Impact category  
Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	1.0 battery	1.2 battery	2.0 Packagi	3.0 Battery	4.0 Cooling	Precious m	Transport, fr	Transport, fr	Electricity, medium voltage {JP}	market for   Alloc Def, U
Global warming	kg CO2 e	4979.37	0	3890.596	668.2682	278.8676	132.778	4.279749	2.7599204	1.7564672	0.064108	
Land occupation, biodiversity	ha.yr ara	1.50E-02	0	1.17E-02	1.49E-03	1.54E-03	2.53E-04	2.81E-05	2.15E-05	1.86E-05	1.46E-07	
Fossil energy use	MJ depriv	70679.5	0	59299.76	7039.344	3079.301	1160.942	38.90676	32.222203	27.995724	1.022551	
Mineral resources use	kg depriv	283.8102	0	191.3409	59.21854	22.34578	10.23669	0.479074	0.1521775	0.0355373	0.001485	
Water use	m3 depriv	0.746407	0	0.413432	1.88E-01	9.23E-02	0.05183	4.92E-04	4.06E-04	7.01E-05	2.38E-06	
Terrestrial acidification	kg SO2 e	51.7698	0	44.19144	4.234822	2.37E+00	0.931315	0.024538	0.01396095	0.0070649	0.000286	
Aquatic eutrophication	kg PO4-ε	16.23936	0	12.90863	0.995318	2.19E+00	0.135556	3.96E-03	3.29E-03	0.0006156	4.09E-05	
marine eutrophication	kg N eq	4.915252	0	3.451935	0.835939	4.23E-01	1.97E-01	2.82E-03	3.04E-03	6.57E-04	1.17E-05	
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	537.7945	0	418.7421	37.99996	75.70905	4.964228	0.285879	0.05930376	0.0332878	0.000765	
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	2.62927	0	2.304831	1.36E-01	1.72E-01	0.013627	9.93E-04	4.36E-04	0.0018496	1.06E-05	
Respiratory inorganics	kg PM2.5	2.533261	0	1.956732	3.44E-01	1.51E-01	7.81E-02	2.17E-03	1.04E-03	0.0009184	1.39E-05	
Respiratory organics	kg NMVC	20.83182	0	16.24096	2.464985	1.58E+00	0.50549	0.017214	0.01137071	0.0137709	0.00017	
Carcinogens, short-term	CTUh	6.58E-04	0	3.60E-04	1.85E-04	7.91E-05	3.27E-05	7.63E-07	3.54E-07	5.45E-08	1.77E-09	
Carcinogens, long-term	CTUh	1.18E-07	0	1.11E-07	3.44E-09	2.82E-09	7.04E-10	1.61E-11	3.97E-11	3.28E-12	2.36E-12	
Carcinogens, indoor	CTUh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	3.07E-11	0	2.11E-11	5.34E-12	2.85E-12	1.36E-12	1.23E-14	2.97E-14	3.22E-15	1.22E-16	
Non-carcinogens, short-term	CTUh	8.50E-03	0	6.78E-03	4.56E-04	1.22E-03	3.83E-05	2.73E-06	7.83E-07	4.56E-07	7.46E-09	
Non-carcinogens, long-term	CTUh	8.49E-06	0	7.98E-06	2.48E-07	2.04E-07	5.08E-08	1.16E-09	2.86E-09	2.37E-10	1.70E-10	
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Non-carcinogens, pesticides residues	CTUh	5.09E-09	0	3.51E-09	8.34E-10	5.44E-10	1.95E-10	2.53E-12	6.80E-12	6.07E-13	2.00E-14	
Ionizing radiation	Bq C-14 ε	168276.6	0	158667.6	4708.462	3859.538	942.5527	26.00748	54.363236	14.703063	3.40132	
Ozone Layer Depletion	kg CFC-1	0.000711	0	0.000608	5.32E-05	3.63E-05	1.19E-05	3.79E-07	2.58E-07	4.25E-07	7.85E-09	

## Transport Océanique

Distance	8900 km	body and dbrakes	chassis	common flui final assem interior & ε tires and w electr electric vehicule differential trans
Mass	1384.5 kg	443.2638	31.02703	186.880056
		8.54	0	238
		79.36	390	7.079

Calculation: Analyze  
Results: Impact assessment  
Product: 1 kgkm Transport, transoceanic freight ship/OCE U (of project Ecoinvent unit processes)  
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
Indicator: Characterization  
Skip categories: Never  
Exclude infrastructure processes: No

Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Transport, transoceanic freight ship/OCE U
Global warming, short-term, ecosystem	PDF.m2.1	1.91E-06
Global warming, long-term, ecosystem	PDF.m2.1	6.59E-06
Global warming, short-term, human health	DALY	8.58E-12
Global warming, long-term, human health	DALY	2.97E-11
Marine acidification, short-term	PDF.m2.1	1.72E-07
Marine acidification, long-term	PDF.m2.1	1.59E-06
Land occupation, biodiversity	PDF.m2.1	3.81E-08
Water use impacts, human health	DALY	1.24E-09
Water use impacts, freshwater ecosystem	PDF.m2.1	9.47E-11
Water use impacts, terrestrial ecosystem	PDF.m2.1	6.51E-11
Thermally polluted water	PDF.m2.1	2.75E-12
Freshwater acidification	PDF.m2.1	3.3E-07
Terrestrial acidification	PDF.m2.1	3.3E-06
Freshwater eutrophication	PDF.m2.1	7.9E-08
Marine eutrophication	PDF.m2.1	3.89E-08
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2.1	4.82E-09
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2.1	4.43E-08
Respiratory inorganics	DALY	4.81E-12
Respiratory organics	DALY	6.47E-15
Carcinogens, short-term	DALY	8.45E-13
Carcinogens, long-term	DALY	3.35E-12
Non-carcinogens, short-term	DALY	9.37E-13
Non-carcinogens, long-term	DALY	5.61E-13
Ionizing radiation, human health	DALY	2.96E-14
Ionizing radiation, freshwater ecosystem	PDF.m2.1	9.06E-15
Ozone layer depletion	DALY	3.2E-15

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 kgkm Transport, transoceanic freight ship/OCE U (of project Ecoinvent unit processes)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Transport, transoceanic freight ship/OCE U
Global warming	kg CO2 e	1.07E-05
Land occupation, biodiversity	ha.yr ara	6.34E-12
Fossil energy use	MJ depriv	0.000161
Mineral resources use	kg depriv	1.34E-07
Water use	m3 depriv	1.34E-08
Terrestrial acidification	kg SO2 e	1.89E-07
Aquatic eutrophication	kg PO4- e	7.35E-09
marine eutrophication	kg N eq	3.53E-09
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	4.86E-08
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	9.13E-10
Respiratory inorganics	kg PM2.5	5.79E-09
Respiratory organics	kg NMVC	1.66E-07
Carcinogens, short-term	CTUh	3.64E-13
Carcinogens, long-term	CTUh	1.03E-16
Carcinogens, indoor	CTUh	0
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	5.18E-23
Non-carcinogens, short-term	CTUh	8.73E-13
Non-carcinogens, long-term	CTUh	7.45E-15
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0
Non-carcinogens, pesticides residues	CTUh	2.42E-18
Ionizing radiation	Bq C-14 e	0.000148
Ozone Layer Depletion	kg CFC-1	1.6E-12

## Transport land

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 tkm Transport, lorry >32t, EUROS/RER U (of project Ecoinvent unit processes)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never

Distar 50 km  
 Mass 1384.5 kg

Exclude infrastructure processes: No 1.3845 ton  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category 69.225 ton km  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	Transport,	Operation,	Lorry 40t/R	Maintenan	Road/CH/I	Operation,	Disposal, lorr	Disposal, road/RER/I	U
Global warming, short-term, ecosystem	PDF.m2,1	0.019151	0	0.015052	0.001082	0.000586	0.002229	0.000131	4.7936E-05	2.312E-05	
Global warming, long-term, ecosystem	PDF.m2,1	0.064482	0	0.051277	0.003528	0.001913	0.007083	0.000432	0.00016944	7.876E-05	
Global warming, short-term, human health	DALY	8.61E-08	0	6.77E-08	4.87E-09	2.63E-09	1E-08	5.88E-10	2.1553E-10	1.04E-10	
Global warming, long-term, human health	DALY	2.9E-07	0	2.31E-07	1.59E-08	8.62E-09	3.19E-08	1.95E-09	7.6333E-10	3.548E-10	
Marine acidification, short-term	PDF.m2,1	0.001679	0	0.001339	8.87E-05	4.97E-05	0.000184	1.11E-05	4.4443E-06	2.056E-06	
Marine acidification, long-term	PDF.m2,1	0.015465	0	0.012335	0.000817	0.000458	0.001693	0.000102	4.0942E-05	1.894E-05	
Land occupation, biodiversity	PDF.m2,1	0.000992	0	9.35E-05	6.25E-05	3.3E-05	8.94E-05	0.000712	3.05E-07	9.177E-07	
Water use impacts, human health	DALY	1.22E-05	0	1.49E-06	3.05E-06	1.15E-06	2.86E-06	3.6E-06	4.8876E-09	1.074E-08	
Water use impacts, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	9.08E-07	0	2.64E-07	1.45E-07	1.06E-07	3.43E-07	4.82E-08	7.0709E-10	8.326E-10	
Water use impacts, terrestrial ecosystem	PDF.m2,1	6.41E-07	0	8.57E-08	3.83E-07	3.65E-08	1.15E-07	1.95E-08	7.9552E-10	6.242E-10	
Thermally polluted water	PDF.m2,1	1.71E-08	0	6.33E-09	3.8E-09	3.35E-09	2.67E-09	8.61E-10	1.6594E-11	1.651E-11	
Freshwater acidification	PDF.m2,1	0.000495	0	0.000344	3.68E-05	1.91E-05	8.95E-05	4.75E-06	2.1499E-07	1.216E-06	
Terrestrial acidification	PDF.m2,1	0.004845	0	0.00335	0.000369	0.000191	0.000874	4.67E-05	2.0962E-06	1.173E-05	
Freshwater eutrophication	PDF.m2,1	0.000545	0	0.000452	1.71E-05	2.2E-05	5.12E-05	1.16E-06	1.0784E-07	7.896E-07	
Marine eutrophication	PDF.m2,1	0.000108	0	7.92E-05	5.08E-06	1.93E-06	2.09E-05	7.91E-07	7.9278E-08	3.271E-07	
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2,1	0.000141	0	8.21E-05	2.77E-05	4.97E-06	2.54E-05	6.49E-07	5.2156E-07	1.23E-07	
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2,1	0.001086	0	8.89E-05	0.000348	4.53E-05	0.000143	1.72E-05	0.0004262	7.863E-07	
Respiratory inorganics	DALY	1.79E-08	0	9.49E-09	1.63E-09	7.41E-10	5.81E-09	1.57E-10	7.3904E-12	6.818E-11	
Respiratory organics	DALY	2.08E-11	0	1.35E-11	8.44E-13	4.82E-13	5.84E-12	8.64E-14	9.3578E-15	5.646E-14	
Carcinogens, short-term	DALY	1.99E-08	0	1.7E-09	8.68E-09	1.17E-09	8.14E-09	1.52E-10	2.1304E-11	1.8E-11	
Carcinogens, long-term	DALY	6.29E-08	0	4.6E-09	2.88E-08	3.71E-09	2.51E-08	6.41E-10	6.9928E-11	5.453E-11	
Non-carcinogens, short-term	DALY	1.49E-08	0	2.36E-09	6.27E-09	1.09E-09	5.04E-09	1.29E-10	1.6975E-11	1.307E-11	
Non-carcinogens, long-term	DALY	6.63E-09	0	6.41E-10	3.97E-09	5.48E-10	9.47E-10	4.22E-10	9.1081E-11	5.18E-12	
Ionizing radiation, human health	DALY	2.05E-10	0	3.28E-11	2.62E-11	2.29E-11	4.95E-11	7.33E-11	9.3458E-14	1.912E-13	
Ionizing radiation, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	6.5E-11	0	1.01E-11	7.96E-12	7.23E-12	1.58E-11	2.38E-11	2.9001E-14	6.046E-14	
Ozone layer depletion	DALY	4.63E-11	0	3.33E-11	1.15E-12	1.78E-12	9.87E-12	2.04E-13	9.3479E-15	5.139E-14	

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 tkm Transport, lorry >32t, EUROS/RER U (of project Ecoinvent unit processes)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	Transport,	Operation,	Lorry 40t/R	Maintenan	Road/CH/I	Operation,	Disposal, lorr	Disposal, road/RER/I	U
Global warming	kg CO2 e	0.107183	0	0.084519	0.005991	0.003252	0.01229	0.000729	0.00027116	0.0001297	
Land occupation, biodiversity	ha.yr ara	1.64E-07	0	1.55E-08	1.03E-08	5.45E-09	1.37E-08	1.19E-07	5.0466E-11	1.519E-10	
Fossil energy use	MJ depriv	1.777843	0	1.204983	0.09177	0.095592	0.343136	0.039964	0.00034898	0.002049	
Mineral resources use	kg depriv	0.00413	0	0.000285	0.002089	0.000201	0.001545	6.85E-06	6.6079E-07	3.579E-06	
Water use	m3 depriv	0.000256	0	5.32E-05	3.46E-05	1.05E-05	0.000145	1.28E-05	1.5765E-07	2.237E-07	
Terrestrial acidification	kg SO2 e	0.00026	0	0.000177	2.17E-05	1.13E-05	4.63E-05	2.79E-06	1.0907E-07	5.975E-07	
Aquatic eutrophication	kg PO4-ε	4.42E-05	0	1.56E-05	1.45E-05	3.62E-06	8.57E-06	1.89E-06	2.2793E-08	4.641E-08	
marine eutrophication	kg N eq	1.06E-05	0	6.82E-06	1.11E-06	3.43E-07	2.1E-06	2.15E-07	1.2093E-08	2.811E-08	
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	0.001199	0	0.000138	0.000379	5.06E-05	0.000168	1.79E-05	0.00044373	8.863E-07	
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	3.76E-05	0	3.32E-05	1.67E-06	9.08E-07	1.42E-06	3.46E-07	7.2124E-09	2.945E-08	
Respiratory inorganics	kg PM2.5	2.15E-05	0	1.14E-05	1.96E-06	8.91E-07	6.99E-06	1.88E-07	8.8926E-09	8.204E-08	
Respiratory organics	kg NMVC	0.000533	0	0.000345	2.16E-05	1.23E-05	0.00015	2.21E-06	2.3994E-07	1.448E-06	
Carcinogens, short-term	CTUh	7.19E-09	0	5.48E-10	3.25E-09	4.24E-10	2.89E-09	6.86E-11	7.9267E-12	6.302E-12	
Carcinogens, long-term	CTUh	7.02E-13	0	1.14E-13	9.15E-14	7.87E-14	1.69E-13	2.48E-13	3.2346E-16	6.559E-16	
Carcinogens, indoor	CTUh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	3.91E-18	0	9.58E-20	6.71E-19	2.8E-18	3.16E-19	2.5E-20	1.0237E-21	3.494E-21	
Non-carcinogens, short-term	CTUh	2.02E-08	0	3.84E-09	6.61E-09	1.05E-09	3.12E-09	3.09E-10	5.2981E-09	1.557E-11	
Non-carcinogens, long-term	CTUh	5.07E-11	0	8.2E-12	6.6E-12	5.68E-12	1.22E-11	1.79E-11	2.334E-14	4.733E-14	
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Non-carcinogens, pesticides residues	CTUh	4.45E-14	0	1.21E-15	3.23E-14	5.24E-16	5.85E-16	9.85E-15	5.2999E-18	3.082E-17	
Ionizing radiation	Bq C-14 ε	1.017309	0	0.163716	0.130949	0.113879	0.245539	0.36181	0.00046618	0.0009495	
Ozone Layer Depletion	kg CFC-1	2.32E-08	0	1.67E-08	5.5E-10	8.85E-10	4.93E-09	8.61E-11	4.3448E-12	2.571E-11	

## Maintenance car

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment



Product: 1 p maintenance car\_pi (of project Pi202b HQ - electric car)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	maintenan	Electricité,	Tap water {CA-QC}  market for   Alloc Def, U
Global warming, short-term, ecosystem	PDF.m2,1	3.424528	0	2.965193	0.459335
Global warming, long-term, ecosystem	PDF.m2,1	1.07E+01	0	9.22E+00	1.47E+00
Global warming, short-term, human hea	DALY	1.54E-05	0	1.33E-05	2.07E-06
Global warming, long-term, human heal	DALY	4.81E-05	0	4.15E-05	6.60E-06
Marine acidification, short-term	PDF.m2,1	0.271162	0	0.233205	0.037956
Marine acidification, long-term	PDF.m2,1	2.497973	0	2.148317	0.349656
Land occupation, biodiversity	PDF.m2,1	3.83E-01	0	3.35E-01	4.78E-02
Water use impacts, human health	DALY	-1.67E-05	0	3.30E-06	-2.00E-05
Water use impacts, freshwater ecosyste	PDF.m2,1	-0.11741	0	2.97E-04	-1.18E-01
Water use impacts, terrestrial ecosystem	PDF.m2,1	4.53E-02	0	6.18E-05	4.52E-02
Thermally polluted water	PDF.m2,1	1.07E-05	0	8.22E-06	2.48E-06
Freshwater acidification	PDF.m2,1	0.174363	0.065316	0.086763	0.022284
Terrestrial acidification	PDF.m2,1	1.210915	0.138285	0.86249	0.21014
Freshwater eutrophication	PDF.m2,1	0.022654	0	0.01724	0.005415
Marine eutrophication	PDF.m2,1	0.012867	0	0.010057	0.00281
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2,1	22.39489	22.36129	0.017966	0.015633
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2,1	3.20E+01	3.11E+01	2.22E-01	7.14E-01
Respiratory inorganics	DALY	6.32E-05	5.78E-05	4.36E-06	1.04E-06
Respiratory organics	DALY	1.93E-09	0	1.49E-09	4.43E-10
Carcinogens, short-term	DALY	9.05E-06	0	3.42E-06	5.63E-06
Carcinogens, long-term	DALY	2.72E-05	0	9.53E-06	1.77E-05
Non-carcinogens, short-term	DALY	2.77E-04	0.00027	2.51E-06	4.06E-06
Non-carcinogens, long-term	DALY	5.19E-06	0	4.59E-06	6.00E-07
Ionizing radiation, human health	DALY	1.31E-06	0	1.30E-06	1.28E-08
Ionizing radiation, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	8.97E-07	0	8.91E-07	6.77E-09
Ozone layer depletion	DALY	2.74E-09	0	2.05E-09	6.97E-10

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 p maintenance car\_pi (of project Pi202b HQ - electric car)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	maintenan	Electricité,	Tap water {CA-QC}  market for   Alloc Def, U
Global warming	kg CO2 e	1.87E+01	0	1.62E+01	2.54E+00
Land occupation, biodiversity	ha.yr ara	6.36E-05	0	5.56E-05	7.93E-06
Fossil energy use	MJ depriv	4.25E+02	0	3.95E+02	2.93E+01
Mineral resources use	kg depriv	1.09E+00	0	4.39E-01	6.55E-01
Water use	m3 depriv	2.54E-01	0	1.96E-02	2.34E-01
Terrestrial acidification	kg SO2 e	8.15E-02	0.01822	5.08E-02	1.25E-02
Aquatic eutrophication	kg PO4-ε	1.24E-02	0	1.00E-02	2.41E-03
marine eutrophication	kg N eq	6.55E-03	0	1.41E-03	5.14E-03
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	2.33E+01	22.36129	2.41E-01	7.28E-01
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	3.11E+01	31.09204	3.19E-03	6.81E-04
Respiratory inorganics	kg PM2.5	7.61E-02	0.069565	5.24E-03	1.25E-03
Respiratory organics	kg NMVC	4.96E-02	0	3.82E-02	1.13E-02
Carcinogens, short-term	CTUh	3.15E-06	0	1.12E-06	2.03E-06
Carcinogens, long-term	CTUh	2.37E-09	0	2.33E-09	4.03E-11
Carcinogens, indoor	CTUh	0.00E+00	0	0.00E+00	0.00E+00
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	1.55E-14	0	1.20E-15	1.43E-14
Non-carcinogens, short-term	CTUh	1.98E-02	0.019789	4.81E-06	2.38E-06
Non-carcinogens, long-term	CTUh	1.71E-07	0	1.68E-07	2.91E-09
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0.00E+00	0	0.00E+00	0.00E+00
Non-carcinogens, pesticides residues	CTUh	4.76E-12	0	1.84E-12	2.92E-12
Ionizing radiation	Bq C-14 ε	6.83E+03	0	6.77E+03	6.33E+01
Ozone Layer Depletion	kg CFC-1	1.18E-06	0	8.84E-07	2.94E-07

## Operation car

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 m Operation, passenger car, electric, LiMn2O4/CH U Hub CIRAIG\_QC\_pi (of project Pi202b HQ - electric car)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	Operation,	Electricité,	borne de recharge_pi
Global warming, short-term, ecosystem	PDF.m2,1	7.98E-07	0	7.87E-07	1.10E-08
Global warming, long-term, ecosystem	PDF.m2,1	2.48E-06	0	2.45E-06	3.50E-08
Global warming, short-term, human hea	DALY	3.59E-12	0	3.54E-12	4.97E-14
Global warming, long-term, human heal	DALY	1.12E-11	0	1.10E-11	1.58E-13

Marine acidification, short-term	PDF.m2,1	6.28E-08	0	6.19E-08	8.64E-10
Marine acidification, long-term	PDF.m2,1	5.78E-07	0	5.70E-07	7.96E-09
Land occupation, biodiversity	PDF.m2,1	8.96E-08	0	8.91E-08	4.87E-10
Water use impacts, human health	DALY	9.08E-13	0	8.76E-13	3.25E-14
Water use impacts, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	-2.98E-10	0	7.90E-11	-3.77E-10
Water use impacts, terrestrial ecosystem	PDF.m2,1	1.75E-11	0	1.64E-11	1.09E-12
Thermally polluted water	PDF.m2,1	2.23E-12	0	2.18E-12	5.14E-14
Freshwater acidification	PDF.m2,1	2.38E-08	0	2.30E-08	7.48E-10
Terrestrial acidification	PDF.m2,1	2.37E-07	0	2.29E-07	7.53E-09
Freshwater eutrophication	PDF.m2,1	4.63E-09	0	4.58E-09	4.95E-11
Marine eutrophication	PDF.m2,1	2.72E-09	0	2.67E-09	5.38E-11
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2,1	5.14E-08	4.64E-08	4.77E-09	1.34E-10
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2,1	9.06E-08	2.96E-08	5.90E-08	2.06E-09
Respiratory inorganics	DALY	7.67E-12	6.48E-12	1.16E-12	3.18E-14
Respiratory organics	DALY	4.05E-16	0	3.96E-16	9.20E-18
Carcinogens, short-term	DALY	1.22E-12	2.68E-13	9.09E-13	4.31E-14
Carcinogens, long-term	DALY	2.67E-12	0	2.53E-12	1.43E-13
Non-carcinogens, short-term	DALY	1.47E-12	7.80E-13	6.67E-13	2.49E-14
Non-carcinogens, long-term	DALY	1.23E-12	0	1.22E-12	9.33E-15
Ionizing radiation, human health	DALY	3.45E-13	0	3.45E-13	4.95E-17
Ionizing radiation, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	2.37E-13	0	2.37E-13	1.71E-17
Ozone layer depletion	DALY	5.51E-16	0	5.43E-16	7.95E-18

**Calculation:** Analyze  
**Results:** Impact assessment  
**Product:** 1 m Operation, passenger car, electric, LIMn2O4/CH U Hub CIRAIG\_QC\_pi (of project Pi202b HQ - electric car)  
**Method:** IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
**Indicator:** Characterization  
**Skip categories:** Never  
**Exclude infrastructure processes:** No  
**Exclude long-term emissions:** No  
**Sorted on item:** Impact category  
**Sort order:** Ascending

Impact category	Unit	Total	Operation, Electricité, borne de recharge_pi		
Global warming	kg CO2 e	4.36E-06	0	4.30E-06	6.09E-08
Land occupation, biodiversity	ha.yr ara	1.49E-11	0	1.48E-11	8.04E-14
Fossil energy use	MJ depriv	1.05E-04	0	1.05E-04	4.70E-07
Mineral resources use	kg depriv	1.22E-07	0	1.17E-07	5.14E-09
Water use	m3 depriv	5.23E-09	0	5.21E-09	2.25E-11
Terrestrial acidification	kg SO2 ei	1.39E-08	0	1.35E-08	4.49E-10
Aquatic eutrophication	kg PO4- e	2.72E-09	0	2.66E-09	5.81E-11
marine eutrophication	kg N eq	4.03E-10	0	3.74E-10	2.89E-11
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	1.13E-07	4.64E-08	6.39E-08	2.19E-09
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	3.04E-08	2.96E-08	8.46E-10	5.37E-12
Respiratory inorganics	kg PM2.5	9.23E-09	7.80E-09	1.39E-09	3.83E-11
Respiratory organics	kg NMVC	1.04E-08	0	1.02E-08	2.36E-10
Carcinogens, short-term	CTUh	3.38E-13	2.32E-14	2.98E-13	1.62E-14
Carcinogens, long-term	CTUh	6.19E-16	0	6.19E-16	1.62E-19
Carcinogens, indoor	CTUh	0.00E+00	0	0.00E+00	0
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	4.91E-22	0.00E+00	3.18E-22	1.73E-22
Non-carcinogens, short-term	CTUh	5.25E-12	3.96E-12	1.28E-12	1.64E-14
Non-carcinogens, long-term	CTUh	4.47E-14	0.00E+00	4.47E-14	1.17E-17
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0.00E+00	0	0.00E+00	0
Non-carcinogens, pesticides residues	CTUh	5.15E-19	0.00E+00	4.88E-19	2.61E-20
Ionizing radiation	Bq C-14 e	1.80E-03	0	1.80E-03	2.39E-07
Ozone Layer Depletion	kg CFC-1	2.38E-13	0	2.35E-13	3.61E-15

## Fin de vie

**Calculation:** Analyze  
**Results:** Impact assessment  
**Product:** 1 p End of life vehiclle\_pi (of project Pi202b HQ - electric car)  
**Method:** IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
**Indicator:** Characterization  
**Skip categories:** Never  
**Exclude infrastructure processes:** No

Exclude long-term emissions: No  
Sorted on item: Impact category  
Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	End of life	Transport,	Electricité,	Electricité,	Waste plas	Waste glas:	Waste paint	{ Zinc in car sh	Spent catal	Waste elec	Waste rubl	Wast	Spent	antifreezer liquid {GLO}	mi
Global warming, short-term, ecosystem	PDF.m2.1	67.85624	0	0.991716	0.337768	1.311783	3.984419	0.209109	42.319687	0.3109289	0.149725	0.050721	16.73933	0.8	0.651701		
Global warming, long-term, ecosystem	PDF.m2.1	236.5792	0	3.385913	1.047933	4.076771	11.06989	0.551134	150.46142	0.9769174	0.485263	0.162783	59.49377	2.82	2.047849		
Global warming, short-term, human health	DALY	0.000305	0	4.46E-06	1.52E-06	5.90E-06	1.79E-05	9.40E-07	0.00019028	1.40E-06	6.73E-07	2.28E-07	7.53E-05	#####	2.93E-06		
Global warming, long-term, human health	DALY	0.001066	0	1.53E-05	4.72E-06	1.84E-05	4.99E-05	2.48E-06	0.00067783	4.40E-06	2.19E-06	7.33E-07	0.000268	#####	9.23E-06		
Marine acidification, short-term	PDF.m2.1	6.199259	0	0.088298	0.026547	0.103169	0.283422	0.014179	3.9517838	0.0254249	0.01267	0.004205	1.562481	0.07	0.053152		
Marine acidification, long-term	PDF.m2.1	57.10832	0	0.813414	0.244557	0.950402	2.610921	0.130618	36.404312	0.2342176	0.116713	0.038737	14.39377	0.68	0.489645		
Land occupation, biodiversity	PDF.m2.1	1.068469	0	0.270074	0.034669	0.148422	0.188175	0.109565	0.05207314	0.0712856	0.107363	0.004926	0.026587	0.01	0.045702		
Water use impacts, human health	DALY	2.84E-05	0	1.19E-06	7.93E-07	1.46E-06	3.12E-06	3.56E-08	1.12E-06	1.01E-06	7.28E-07	1.49E-07	9.51E-06	#####	-6.67E-08		
Water use impacts, freshwater ecosystem	PDF.m2.1	-0.01978	0	-0.00313	3.39E-05	0.000132	-0.00191	-0.00142	-0.0032571	-0.0022982	-0.00119	-0.00146	-0.00293	-0	-0.00056		
Water use impacts, terrestrial ecosystem	PDF.m2.1	0.000163	0	1.59E-05	6.93E-06	2.73E-05	5.27E-06	2.07E-05	9.58E-06	1.71E-05	9.06E-06	3.74E-06	6.32E-06	#####	3.84E-05		
Thermally polluted water	PDF.m2.1	6.86E-06	0	4.53E-07	9.37E-07	3.63E-06	2.37E-07	2.19E-07	2.88E-07	2.65E-07	1.18E-07	2.33E-07	2.57E-07	#####	8.64E-08		
Freshwater acidification	PDF.m2.1	0.183597	0	0.02753	0.009734	0.038383	0.013321	0.007896	0.02886685	0.0089901	0.005099	0.002636	0.018571	0	0.019198		
Terrestrial acidification	PDF.m2.1	1.812489	0	0.270451	0.096744	0.38156	0.1303	0.078037	0.28006005	0.089175	0.050753	0.026548	0.181164	0.03	0.194715		
Freshwater eutrophication	PDF.m2.1	0.360996	0	0.03458	0.001835	0.007627	0.029861	0.006917	0.1900344	0.0051382	0.002516	0.000283	0.075704	0	0.002121		
Marine eutrophication	PDF.m2.1	0.126321	0	0.004909	0.001118	0.004449	0.092079	0.005806	0.00741555	0.0039886	0.000692	0.000253	0.004162	0	0.000766		
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2.1	1.048668	0	0.033132	0.001935	0.007948	0.036276	0.003172	0.86763191	0.0713994	0.001844	0.000473	0.012101	0.01	0.000605		
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2.1	453.0508	0	0.07628	0.022561	0.09824	7.662612	0.203408	15.355261	407.23571	0.011923	0.006343	15.5104	6.85	0.0021732		
Respiratory inorganics	DALY	8.74E-06	0	2.11E-06	4.91E-07	1.93E-06	5.98E-07	5.59E-07	9.12E-07	3.87E-07	3.24E-07	9.35E-08	4.12E-07	#####	8.16E-07		
Respiratory organics	DALY	5.23E-09	0	8.82E-10	1.65E-10	6.60E-10	5.22E-10	2.44E-10	1.13E-09	2.45E-10	1.53E-10	3.63E-11	6.08E-10	#####	5.10E-10		
Carcinogens, short-term	DALY	0.000365	0	4.67E-07	3.60E-07	1.51E-06	1.13E-06	3.99E-07	0.00035961	6.46E-07	3.59E-07	2.78E-08	4.10E-07	#####	8.19E-08		
Carcinogens, long-term	DALY	0.001198	0	1.39E-06	9.95E-07	4.22E-06	5.82E-06	8.20E-06	0.00117091	1.85E-06	1.17E-06	1.34E-07	1.09E-06	#####	9.95E-07		
Non-carcinogens, short-term	DALY	2.77E-05	0	9.09E-07	2.71E-07	1.11E-06	1.28E-06	1.89E-07	2.12E-05	1.28E-06	1.32E-07	1.04E-07	5.12E-07	#####	2.86E-07		
Non-carcinogens, long-term	DALY	0.000353	0	2.96E-07	4.91E-07	2.03E-06	3.03E-05	9.03E-07	0.00024771	6.68E-05	8.84E-08	7.16E-08	3.01E-06	#####	3.00E-07		
Ionizing radiation, human health	DALY	7.50E-07	0	9.42E-09	1.50E-07	5.75E-07	2.70E-09	2.84E-09	2.38E-09	2.55E-09	7.71E-10	1.30E-09	1.88E-09	#####	8.06E-10		
Ionizing radiation, freshwater ecosystem	PDF.m2.1	5.12E-07	0	7.06E-09	1.03E-07	3.94E-07	1.65E-09	1.25E-09	1.29E-09	1.11E-09	3.63E-10	3.77E-10	8.72E-10	#####	4.72E-10		
Ozone layer depletion	DALY	7.91E-09	0	2.67E-09	2.26E-10	9.05E-10	6.16E-10	9.95E-10	5.98E-10	7.26E-10	1.45E-10	4.89E-11	5.48E-10	#####	1.63E-10		

Calculation: Analyze  
Results: Impact assessment  
Product: 1 p End of life vehicule\_pi (of project Pi202b HQ - electric car)  
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
Indicator: Characterization  
Skip categories: Never  
Exclude infrastructure processes: No  
Exclude long-term emissions: No  
Sorted on item: Impact category  
Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	End of life	Transport,	Electricité,	Electricité,	Waste plas	Waste glas:	Waste paint	{ Zinc in car sh	Spent catal	Waste elec	Waste rubl	Wast	Spent	antifreezer liquid {GLO}	mi
Global warming	kg CO2 e	382.3477	0	5.573791	1.844207	7.164846	21.33794	1.10863	239.61654	1.7107866	0.832563	0.28112	94.77274	4.52	3.583869		
Land occupation, biodiversity	ha.yr ara	0.000178	0	4.51E-05	5.75E-06	2.46E-05	3.14E-05	1.82E-05	8.68E-06	1.19E-05	1.79E-05	8.16E-07	4.43E-06	#####	7.58E-06		
Fossil energy use	MJ depri	431.8849	0	87.27806	45.29675	174.9275	22.09222	16.85424	23.412329	14.236983	7.290103	3.328381	14.06105	4.84	18.2638		
Mineral resources use	kg depriv	0.993959	0	0.106237	0.047768	0.194389	0.031769	0.053565	0.12764536	0.035411	0.327399	0.003384	0.047023	0.01	0.009941		
Water use	m3 depri	0.016739	0	0.000204	0.005036	0.00868	9.02E-05	0.000939	0.00017111	0.0006289	0.000159	5.55E-05	0.000114	#####	0.000613		
Terrestrial acidification	kg SO2 e	0.102067	0	0.014994	0.005701	0.02247	0.007005	0.004372	0.0145573	0.0050193	0.002918	0.001574	0.009732	0	0.011829		
Aquatic eutrophication	kg PO4-e	0.021245	0	0.001853	0.001068	0.004433	0.001041	0.000687	0.00456235	0.0011371	0.000796	0.000365	0.002081	0	0.002852		
marine eutrophication	kg N eq	0.403864	0	0.001544	0.000157	0.000623	0.356357	0.025288	0.00118407	0.0149733	0.000539	0.000432	0.000865	0	0.001542		
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	454.0757	0	0.102116	0.024547	0.106524	7.779425	0.206645	16.211346	407.26398	0.013763	0.006639	15.51528	6.82	0.022264		
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	0.07098	0	0.007588	0.000349	0.001409	0.002068	0.000458	0.00555894	0.0436121	0.000158	0.000261	0.007356	0	0.000269		
Respiratory inorganics	kg PM2.5	0.01051	0	0.002542	0.000593	0.002319	0.00072	0.000672	0.00109709	0.0004652	0.00039	0.000112	0.000495	0	0.000981		
Respiratory organics	kg NMVC	0.134049	0	0.022626	0.004241	0.016921	0.013376	0.006257	0.02887746	0.0062833	0.003911	0.000931	0.015585	0	0.013065		
Carcinogens, short-term	CTUh	0.000136	0	1.61E-07	1.17E-07	4.97E-07	6.04E-07	7.47E-07	0.00013298	2.17E-07	1.33E-07	1.41E-08	1.30E-07	#####	9.36E-08		
Carcinogens, long-term	CTUh	1.35E-09	0	9.43E-12	2.70E-10	1.03E-09	4.89E-12	7.87E-12	5.28E-12	7.15E-12	2.02E-12	4.76E-12	4.98E-12	#####	1.53E-12		
Carcinogens, indoor	CTUh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	1.33E-13	0	9.04E-15	1.32E-16	5.29E-16	5.10E-15	5.04E-14	4.77E-15	3.10E-14	8.35E-15	3.26E-15	3.93E-15	#####	1.47E-14		
Non-carcinogens, short-term	CTUh	0.005421	0	1.63E-06	5.08E-07	2.13E-06	4.52E-05	1.26E-06	0.00022904	0.0049472	1.55E-07	2.02E-07	0.000192	#####	4.53E-07		
Non-carcinogens, long-term	CTUh	9.76E-08	0	6.80E-10	1.95E-08	7.44E-08	3.53E-10	5.68E-10	3.81E-10	5.16E-10	1.46E-10	3.43E-10	3.59E-10	#####	1.10E-10		
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Non-carcinogens, pesticides residues	CTUh	2.27E-11	0	1.75E-12	2.03E-13	8.14E-13	8.14E-13	8.24E-12	9.52E-13	5.22E-12	2.36E-12	7.35E-13	8.25E-13	#####	3.88E-13		
Ionizing radiation	Bq C-14 e	3899.58	0	45.04031	783.4037	2993.371	12.97388	13.6108	11.465802	12.264819	3.715144	6.292586	9.052194	4.52	3.867443		
Ozone Layer Depletion	kg CFC-1	3.62E-06	0	1.33E-06	9.72E-08	3.91E-07	2.98E-07	4.31E-07	2.74E-07	3.13E-07	6.09E-08	2.29E-08	2.21E-07	#####	7.95E-08		

## Recyclage batterie

Calculation: Analyze  
Results: Impact assessment  
Product: 1 p end of life batterie\_pi (of project Pi202b HQ - electric car)  
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
Indicator: Characterization

Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	end of life   Nitrogen, li Chemical, i Lime, hydr; Sulfuric aci	Electricité	Electricité, at	Shredder fraction after manual dismantling of used electronic product (GLO)	market fo		
Global warming, short-term, ecosystem	PDF.m2,1	0.366445	0 0.130603	0.00994	0.017686	0.006673	0.000551	0.00027514	0.2007165
Global warming, long-term, ecosystem	PDF.m2,1	1.22416	0 0.416343	0.028296	0.061477	0.02147	0.00171	0.00085509	0.6940092
Global warming, short-term, human health	DALY	1.65E-06	0 5.87E-07	4.47E-08	7.95E-08	3.00E-08	2.48E-09	1.24E-09	9.02E-07
Global warming, long-term, human health	DALY	5.51E-06	0 1.88E-06	1.27E-07	2.77E-07	9.67E-08	7.70E-09	3.85E-09	3.13E-06
Marine acidification, short-term	PDF.m2,1	0.031774	0 0.010749	0.000687	0.001611	0.000556	4.33E-05	2.16E-05	1.81E-02
Marine acidification, long-term	PDF.m2,1	0.292709	0 0.09902	0.006328	0.014841	0.005125	0.000399	0.00019934	0.1667967
Land occupation, biodiversity	PDF.m2,1	0.016214	0 0.007122	0.001142	0.001254	0.001408	5.66E-05	3.11E-05	5.20E-03
Water use impacts, human health	DALY	2.14E-05	0 2.04E-05	1.48E-07	6.31E-09	4.58E-07	1.29E-09	3.06E-10	3.61E-07
Water use impacts, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	-5.20E-03	0 -3.44E-03	-1.51E-04	-2.89E-04	-1.39E-04	5.53E-08	2.76E-08	-1.18E-03
Water use impacts, terrestrial ecosystem	PDF.m2,1	1.21E-05	0 9.04E-06	5.59E-07	1.54E-07	2.67E-07	1.13E-08	5.74E-09	2.11E-06
Thermally polluted water	PDF.m2,1	8.07E-07	0 6.54E-07	2.30E-08	6.07E-09	1.31E-08	1.53E-09	7.62E-10	1.08E-07
Freshwater acidification	PDF.m2,1	0.014922	0 0.006976	0.000696	0.000267	0.004551	1.59E-05	8.05E-06	2.41E-03
Terrestrial acidification	PDF.m2,1	0.133207	0 0.070205	0.006226	0.002665	0.029823	0.000158	8.00E-05	2.41E-02
Freshwater eutrophication	PDF.m2,1	0.002536	0 0.000495	1.58E-04	2.47E-04	0.000549	2.99E-06	1.60E-06	1.08E-03
Marine eutrophication	PDF.m2,1	0.001301	0 0.000588	9.58E-05	4.92E-05	9.30E-05	1.82E-06	9.33E-07	4.72E-04
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2,1	0.125831	0 0.000311	0.0002	6.08E-05	1.11E-04	3.16E-06	1.67E-06	1.25E-01
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2,1	1.635447	0 0.009883	0.001561	2.70E-04	0.005018	3.68E-05	2.06E-05	1.62E+00
Respiratory inorganics	DALY	4.05E-07	0 2.47E-07	1.90E-08	7.83E-09	5.49E-08	8.04E-10	4.04E-10	7.50E-08
Respiratory organics	DALY	1.61E-10	0 8.74E-11	7.07E-12	6.75E-12	1.77E-11	2.70E-13	1.38E-13	4.14E-11
Carcinogens, short-term	DALY	1.57E-07	0 2.42E-08	3.14E-08	1.84E-09	1.22E-08	5.87E-10	3.18E-10	8.66E-08
Carcinogens, long-term	DALY	7.90E-07	0 2.60E-07	4.12E-08	5.97E-09	4.80E-08	1.62E-09	8.84E-10	4.33E-07
Non-carcinogens, short-term	DALY	8.55E-07	0 5.45E-08	1.07E-08	3.82E-09	1.95E-08	4.43E-10	2.33E-10	7.66E-07
Non-carcinogens, long-term	DALY	1.90E-06	0 1.11E-07	1.34E-08	1.96E-09	6.48E-08	8.01E-10	4.26E-10	1.71E-06
Ionizing radiation, human health	DALY	4.26E-09	0 2.78E-09	1.42E-10	8.34E-11	1.78E-10	2.45E-10	1.21E-10	7.16E-10
Ionizing radiation, freshwater ecosystem	PDF.m2,1	1.61E-09	0 8.86E-10	5.01E-11	5.40E-11	1.18E-10	1.68E-10	8.26E-11	2.50E-10
Ozone layer depletion	DALY	2.37E-10	0 1.02E-10	2.37E-11	1.91E-11	4.33E-11	3.69E-13	1.90E-13	4.90E-11

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 p end of life battery\_pi (of project Pi202b HQ - electric car)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	end of life   Nitrogen, li Chemical, i Lime, hydr; Sulfuric aci	Electricité	Electricité, at	Shredder fraction after manual dismantling of used electronic product (GLO)	market fo		
Global warming	kg CO2 e	2.051796	0 0.723078	0.055396	0.099621	0.036959	0.003009	0.00150281	1.1322297
Land occupation, biodiversity	ha.yr ara	2.69E-06	0 1.18E-06	1.90E-07	2.09E-07	2.34E-07	9.38E-09	5.16E-09	8.61E-07
Fossil energy use	MJ depriv	13.44535	0 7.964365	0.625243	0.638451	1.578288	0.073911	0.03669053	2.5284049
Mineral resources use	kg depriv	0.023202	0 0.00406	0.004368	0.000305	0.001774	7.79E-05	4.08E-05	1.26E-02
Water use	m3 depriv	0.000209	0 0.000144	1.53E-05	1.92E-06	4.60E-06	8.22E-06	1.82E-06	3.32E-05
Terrestrial acidification	kg SO2 e	0.008269	0 0.004174	0.000393	1.53E-04	0.002123	9.30E-06	4.71E-06	1.41E-03
Aquatic eutrophication	kg PO4- e	0.001521	0 0.000771	6.19E-05	1.47E-05	1.41E-04	1.74E-06	9.30E-07	5.29E-04
marine eutrophication	kg N eq	0.00077	0 3.85E-04	5.54E-05	3.10E-05	4.06E-05	2.56E-07	1.31E-07	2.57E-04
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	1.977639	0 0.010182	0.001771	3.09E-04	0.005212	4.01E-05	2.23E-05	1.96E+00
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	0.00038	0 7.24E-05	1.44E-05	2.36E-05	1.64E-05	5.69E-07	2.96E-07	2.52E-04
Respiratory inorganics	kg PM2.5	0.000487	0 0.000297	2.29E-05	9.42E-06	6.60E-05	9.68E-07	4.86E-07	9.02E-05
Respiratory organics	kg NMVC	0.004122	0 0.002242	0.000181	0.000173	0.000453	6.92E-06	3.55E-06	1.06E-03
Carcinogens, short-term	CTUh	8.23E-08	0 2.47E-08	6.31E-09	6.78E-10	5.23E-09	1.92E-10	1.04E-10	4.52E-08
Carcinogens, long-term	CTUh	1.37E-11	0 9.82E-12	4.62E-13	1.32E-13	2.64E-13	4.40E-13	2.16E-13	2.36E-12
Carcinogens, indoor	CTUh	0	0 0	0	0	0	0	0	0
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	1.14E-14	0 9.40E-15	3.19E-16	1.24E-16	1.96E-16	2.16E-19	1.11E-19	1.33E-15
Non-carcinogens, short-term	CTUh	1.60E-06	0 1.10E-07	1.74E-08	5.01E-09	7.14E-08	8.28E-10	4.46E-10	1.40E-06
Non-carcinogens, long-term	CTUh	9.88E-10	0 7.09E-10	3.33E-11	9.54E-12	1.90E-11	3.18E-11	1.56E-11	1.70E-10
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0	0 0	0	0	0	0	0	0
Non-carcinogens, pesticides residues	CTUh	2.60E-12	0 2.18E-12	7.08E-14	2.29E-14	4.04E-14	3.31E-16	1.71E-16	2.84E-13
Ionizing radiation	Bq C-14 e	20.75512	0 13.45514	0.68712	0.399643	0.851332	1.278281	0.62785088	3.455748
Ozone Layer Depletion	kg CFC-1	1.54E-07	0 4.77E-08	9.38E-09	9.50E-09	2.15E-08	1.59E-10	8.20E-11	6.57E-08

## Train

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 kgkm Transport, freight, rail, diesel/US U AmN CIRAIG (of project Ecoinvent AmN CIRAIG)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category

Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Transport, freight, rail, diesel/US U AmN CIRAIG
Global warming, short-term, ecosystem	PDF.m2.1	9.41E-06
Global warming, long-term, ecosystem	PDF.m2.1	3.23E-05
Global warming, short-term, human health	DALY	4.23E-11
Global warming, long-term, human health	DALY	1.46E-10
Marine acidification, short-term	PDF.m2.1	8.43E-07
Marine acidification, long-term	PDF.m2.1	7.76E-06
Land occupation, biodiversity	PDF.m2.1	9.34E-07
Water use impacts, human health	DALY	6.62E-09
Water use impacts, freshwater ecosystem	PDF.m2.1	4.28E-10
Water use impacts, terrestrial ecosystem	PDF.m2.1	1.5E-10
Thermally polluted water	PDF.m2.1	9.62E-12
Freshwater acidification	PDF.m2.1	6.63E-07
Terrestrial acidification	PDF.m2.1	6.41E-06
Freshwater eutrophication	PDF.m2.1	3.71E-07
Marine eutrophication	PDF.m2.1	1.71E-07
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2.1	5.33E-08
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2.1	3.37E-07
Respiratory inorganics	DALY	2.04E-11
Respiratory organics	DALY	2.86E-14
Carcinogens, short-term	DALY	1.47E-11
Carcinogens, long-term	DALY	4.24E-11
Non-carcinogens, short-term	DALY	8.98E-12
Non-carcinogens, long-term	DALY	2.9E-12
Ionizing radiation, human health	DALY	3.86E-14
Ionizing radiation, freshwater ecosystem	PDF.m2.1	9.63E-16
Ozone layer depletion	DALY	1.5E-14

Calculation: Analyze  
Results: Impact assessment  
Product: 1 kgkm Transport, freight, rail, diesel/US U AmN CIRAIG (of project Ecoinvent AmN CIRAIG)  
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
Indicator: Characterization  
Skip categories: Never  
Exclude infrastructure processes: No  
Exclude long-term emissions: No  
Sorted on item: Impact category  
Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Transport, freight, rail, diesel/US U AmN CIRAIG
Global warming	kg CO2 e	5.29E-05
Land occupation, biodiversity	ha.yr ara	1.55E-10
Fossil energy use	MJ depriv	0.000737
Mineral resources use	kg depriv	2.38E-06
Water use	m3 depriv	1.03E-07
Terrestrial acidification	kg SO2 e	3.3E-07
Aquatic eutrophication	kg PO4-ε	2.43E-08
marine eutrophication	kg N eq	1.47E-08
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	3.89E-07
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	4.59E-09
Respiratory inorganics	kg PM2.5	2.46E-08
Respiratory organics	kg NMVC	7.33E-07
Carcinogens, short-term	CTUh	4.96E-12
Carcinogens, long-term	CTUh	1.95E-16
Carcinogens, indoor	CTUh	0
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	9.02E-22
Non-carcinogens, short-term	CTUh	7.09E-12
Non-carcinogens, long-term	CTUh	1.41E-14
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0
Non-carcinogens, pesticides residues	CTUh	1.52E-17
Ionizing radiation	Bq C-14 ε	0.000185
Ozone Layer Depletion	kg CFC-1	7.48E-12















irket for | Alloc Def, U

irket for | Alloc Def, U

r | Alloc Def, U

r | Alloc Def, U





Endpoint

Vehicule électrique

Table with 15 columns: Endpoint, Production, body and cbrakes, chassis, common fluids, final assem interior & ext, tire tires and wheel, electric motor, battery, transport, electricity, utilization, maintenance, fin de vie. Rows include Global warming, human health, marine acidification, land occupation, water use impacts, freshwater ecosystem, respiratory inorganics, carcinogens, non-carcinogens, ionizing radiation, ozone layer depletion, and various quality of ecosystems metrics.

Vehicule conventionnel

Table with 15 columns: Endpoint, Production, body and cbrakes, chassis, common fluids, final assem interior & ext, tire tires and wheel, electric motor, battery, transport, electricity, utilization, maintenance, fin de vie. Rows include Global warming, human health, marine acidification, land occupation, water use impacts, freshwater ecosystem, respiratory inorganics, carcinogens, non-carcinogens, ionizing radiation, ozone layer depletion, and various quality of ecosystems metrics.

Comparison

Summary comparison table with 15 columns: Endpoint, Vehicule électrique, Vehicule conventionnel, and total. Rows include Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Santé humaine, and Qualité des écosystèmes.







Eutrophication marine	83.75%	0.47%	9.79%
Eutrophication aquatique, court terme	2.83%	0.99%	70.17%
Eutrophication aquatique, long terme	0.41%	0.00%	99.59%
Respiration inorganique	71.45%	1.57%	26.17%
Respiration organique (long)	94.72%	2.22%	3.06%
Caractéristiques, court terme	88.32%	4.42%	6.26%
Caractéristiques, long terme	97.48%	0.03%	2.49%
Caractéristiques, véhicules	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Caractéristiques, véhicules pesticides	53.47%	29.12%	17.41%
Non-carcinogènes, court terme	0.96%	0.21%	98.83%
Non-carcinogènes, long terme	97.48%	0.03%	2.49%
Non-carcinogènes, véhicules	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Non-carcinogènes, véhicules pesticides	89.42%	4.77%	5.81%
Reduction toxique	97.24%	0.21%	2.47%
Diminution de la couche d'ozone	95.35%	1.47%	3.19%

### Transport

	véhicule	train	camion
CC	1.32E+02	2.71E+02	7.42E+00
EF	5.98E+01	3.77E+01	1.28E+02
UM	1.65E+00	1.22E+01	2.86E+01
CC	32.22%	65.98%	1.81%
EF	33.77%	64.14%	2.09%
UM	11.09%	89.29%	2.09%

### Fin de vie

	Véhicule	Bateau
CC	8.82E+02	0.14E+02
EF	4.32E+02	2.48E+01
UM	9.98E+01	4.89E+00
CC	64.14%	35.86%
EF	14.15%	85.85%
UM	18.79%	81.21%

### Collage consommables

#### Production

	Corps et portes	Peint	Chaux	Fluides com	Assemblage	Interieur & Presc	et roues	Fluides spec	Moteur à comb	Groupe mot	Traction	emission
Changement climatique	276.2488	128.2051	857.762275	19.303432	136.01081	2175.9484	38.58761	44.697022	751.8468	496.45581	439.0008	7920.88
Utilisation d'énergie fossile	28065.148	1037.647	5681.09668	451.98779	2188.0807	14268.054	5214.2201	2945.7724	757.0202	720.0206	5187.56	322817.4
Utilisation de ressources minérales	451.84246	29.07285	387.24706	0.19590226	2.4697952	129.20779	45.943911	0.63997177	130.15906	62.841303	44.56114	3069.177
Changement climatique	32.50%	1.62%	30.82%	0.24%	1.70%	27.40%	4.23%	0.56%	9.04%	6.26%	5.55%	
Utilisation d'énergie fossile	27.13%	1.19%	8.96%	0.84%	2.08%	33.37%	5.09%	2.57%	7.33%	7.08%	2.21%	
Utilisation de ressources minérales	42.33%	3.72%	11.44%	0.02%	0.23%	12.08%	4.26%	0.08%	11.44%	5.88%	4.17%	

#### Utilisation

	Emissions op	Production	Production	EMaintenance	vehic
Changement climatique	3312.121	728.2765	742.91245	4.46E+02	42930.488
Utilisation d'énergie fossile	0	5555.217	502028.71	5.07E+02	516854.4
Utilisation de ressources minérales	0	19.58834	122.20011	3.88E+00	145.6664
Changement climatique	79.54%	1.73%	17.67%	1.00%	
Utilisation d'énergie fossile	0.00%	1.44%	96.78%	1.75%	
Utilisation de ressources minérales	0.00%	13.44%	83.90%	2.60%	

### Transport

	Océan	train	camion
CC	1.24E+02	2.53E+02	6.94E+00
EF	1.88E+01	1.15E+01	1.12E+02
UM	1.54E+00	1.14E+01	2.67E+01
CC	32.22%	65.98%	1.81%
EF	33.77%	64.14%	2.09%
UM	11.09%	89.29%	2.09%



Del U



Contribution endpoint

Production des pièces de la voiture

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Changeur climatique, Changeur climatique (100-500 mm), Changeur climatique (100-500 mm), vent, etc.

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Aériation eau chaude, Aériation eau chaude, Aériation eau chaude, Aériation eau chaude, etc.

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Semelle humaine, Qualité des écoulements, Semelle humaine, Qualité des écoulements.

Bois sur le moteur électrique

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Calculateur, Résultats, Produit, Méthode, Indicateur, etc.

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Changeur climatique (100-500 mm), Changeur climatique (100-500 mm), Changeur climatique (100-500 mm), vent, etc.

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Aériation eau chaude, Aériation eau chaude, Aériation eau chaude, Aériation eau chaude, etc.

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Semelle humaine, Qualité des écoulements, Semelle humaine, Qualité des écoulements.

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Semelle humaine, Qualité des écoulements, Semelle humaine, Qualité des écoulements.

Production de la batterie

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Changeur climatique (100-500 mm), Changeur climatique (100-500 mm), Changeur climatique (100-500 mm), vent, etc.

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Aériation eau chaude, Aériation eau chaude, Aériation eau chaude, Aériation eau chaude, etc.

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Semelle humaine, Qualité des écoulements, Semelle humaine, Qualité des écoulements.

Bois sur la batterie

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Calculateur, Résultats, Produit, Méthode, Indicateur, etc.

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Semelle humaine, Qualité des écoulements, Semelle humaine, Qualité des écoulements.

Phase d'utilisation

Table with 3 columns: Component, Quantity, and Value. Rows include Changeur climatique (100-500 mm), Changeur climatique (100-500 mm), Changeur climatique (100-500 mm), vent, etc.

Changement climatique (0-100 ans), sans	1.112-04	7.952-06	1.146-05
Changement climatique (100-500 ans), sans	1.452-01	2.175-01	1.812-05
Acidification océanique (0-100 ans), sans	8.296-00	1.300-01	0.27112
Acidification océanique (100-500 ans), sans	8.642-01	1.316-02	0.470713
Occupation des terres	1.341-01	7.300-02	0.381285

Acidification spatiale	1.465-00	1.125-01	0.174853
Acidification terrestre	1.446-01	1.118-00	0.120915
Eutrophication marine	6.875-01	7.425-01	0.020254
Eutrophication terrestre	4.012-01	8.086-03	0.032867
Emission de gaz à effet de serre (0-100 ans)	7.645-01	2.065-02	0.339889
Emission de gaz à effet de serre (100-500 ans)	8.846-00	1.095-01	0.320214
Respiration humaine	1.545-08	4.775-06	4.335-05
Respiration animale	1.545-08	1.385-09	1.935-09
Carburants (0-100 ans)	1.943-04	6.465-06	9.925-05
Carburants (100-500 ans)	1.802-04	1.335-05	1.725-05
Non carburants (0-100 ans)	1.905-04	3.735-06	0.000777
Non carburants (100-500 ans)	1.832-04	1.405-06	1.135-06
Radiation solaire nette	1.175-05	7.635-09	1.135-06
Radiation solaire excédentaire	1.552-05	1.565-09	0.975-07
Démolition de la couche d'ozone	8.124-08	1.815-07	2.745-09

Sentier humaine	0.001200	6.895-05	0.000446	0.003730
Qualité des écosystèmes	641.814	8.890235	71.10185	724.8254
Sentier humaine	88.17%	1.87%	11.98%	100.00%
Qualité des écosystèmes	88.55%	1.36%	10.05%	100.00%

Transport				
Transport (Transport / Transport par camion)				
Sentier humaine	0.000021	0.001411	1.465-05	
Qualité des écosystèmes	171.515	1031.6709	7.544712	
Sentier humaine	29.23%	69.09%	1.68%	
Qualité des écosystèmes	35.80%	62.63%	1.54%	

Émissions				
Fin de vie d'un véhicule de la batterie				
Sentier humaine	0.001034	0.002035		
Qualité des écosystèmes	826.3941	278.8674		
Sentier humaine	0.754551	0.245380		
Qualité des écosystèmes	0.74885	0.25114		

**Utilité commerciale**

Production de la voiture	
Calculations:	Results:
Product:	Impact assessment
Method:	3-p/Production commercial car - pt (af project vehicle car)
Indicator:	IMPACTWorld+ (Default_Re_Endpoint 120) MAU V1.01 / IMPACT World+ (Default_Re_Endpoint 120) MAU V1.01 / IMPACT World+ (Default_Re_Endpoint 120) MAU V1.01 / IMPACT World+ (Default_Re_Endpoint 120) MAU V1.01
Step categories:	None
Exclude infrastructure processes:	Yes
Exclude long-term emissions:	No
Sort order:	Impact category
Input category:	Assembly

Sentier humaine	1.832-01	3.718-01	1.171-02	8.822-07	4.093-04	1.128-01	2.262-03	1.895-04	6.445-01	3.718-01	3.461-01	6.688-01
Qualité des écosystèmes	1.505-03	1.374-02	1.032-01	2.051-05	1.388-02	1.782-03	3.592-02	4.768-01	7.711-02	7.810-02	4.371-02	6.941-03

Sentier humaine	22.77%	2.59%	17.47%	0.11%	0.75%	16.95%	4.87%	0.28%	12.63%	6.57%	1.17%	
Qualité des écosystèmes	21.65%	1.98%	14.69%	0.29%	1.70%	24.88%	5.17%	0.68%	11.10%	11.26%	4.58%	

**Utilisation de la voiture**

Émissions (Production/production/Maintenance vehicle)				
Changement climatique (0-100 ans), sans				
Changement climatique (100-500 ans), sans	1995.195	1023.771	184.17	187.18973
Changement climatique (0-100 ans), sans	2002.73	141.739	4295.11	271.72779
Changement climatique (100-500 ans), sans	623.013	0.00065	0.00066	0.000775
Acidification océanique (0-100 ans), sans	0.64243	0.00149	0.00151	0.001241
Acidification océanique (100-500 ans), sans	585.123	4.881	111.713	120.028
Occupation des terres	567.586	77.8411	107.845	65.46385
0.2851213 76.57661 1.9050208				

Acidification spatiale	16.0057	8.75687	90.8531	1.692673
Acidification terrestre	187.131	100.468	61.4513	14.49237
Eutrophication marine	0	2.23287	202.242	14.888354
Eutrophication terrestre	6.641206	11.87748	9.71766	22.79051
Emission de gaz à effet de serre (0-100 ans)	4.02103	11.8617	18.6732	14.88314
Emission de gaz à effet de serre (100-500 ans)	0.051118	0.000512	0.002734	0.0001276
Respiration humaine	1.161-06	1.453-07	1.126-06	6.6168-06
Respiration animale	1.161-06	0.002126	0.000311	1.4466-05
Carburants (0-100 ans)	0	0.0011101	0.000171	0.000337
Carburants (100-500 ans)	7.412-05	0.002049	0.000861	0.0003054
Non carburants (0-100 ans)	0	0.138-01	0.000064	2.7771-05
Non carburants (100-500 ans)	0	1.116-05	4.85-05	2.2771-05
Radiation solaire nette	0	1.132-07	1.066-05	1.0461-06
Radiation solaire excédentaire	0	1.132-07	1.102-07	1.0461-06
Démolition de la couche d'ozone	0	1.132-07	1.102-07	1.0461-06

Sentier humaine	0.122475	0.043030	0.031388	0.0023229	0.160120
Qualité des écosystèmes	12958.51	187.8875	8126.716	305.2639	42278.32
Sentier humaine	76.30%	2.88%	10.58%	1.33%	
Qualité des écosystèmes	77.25%	2.34%	10.24%	1.19%	

Océan			
CO2	0.68042	0.00139	1.348-05
CH4	162.2983	244.0403	7.057609
N2O	29.23%	69.09%	1.68%
CFE	35.80%	62.63%	1.54%

Analyse de sensibilité

AS véhicule conventionnel endpoint

Calculation: Compare
Results: Impact assessment
Product 1: 1 p conventionnal car (of project P1202b HQ - electric car)
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)
Indicator: Characterization
Skip categories: Never
Exclude infrastructure processes: No
Exclude long-term emissions: No
Sorted on item: Impact category
Sort order: Ascending

Table with columns for Impact category, Unit, and 18 Set items (Set 1 to Set 18). Rows include Global warming, Marine acidification, Land occupation, and various impact categories.

Table for Santé humaine and Qualité des écosystèmes with values for various impact categories across different set items.

Table for Scénario Route with columns for Mix and Urban percentages (55% and 7.7 L/100 km) for 18 set items.

Table for Consumption Production with columns for min/moyenne/élévée and j (japon) for various set items.

complément
Calculation: Compare
Results: Impact assessment
Product 1: 1 p conventionnal car (of project P1202b HQ - electric car)
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)
Indicator: Characterization
Skip categories: Never
Exclude infrastructure processes: No
Exclude long-term emissions: No
Sorted on item: Impact category
Sort order: Ascending

Large table for Scénario Route with columns for Mix and Urban percentages (55% and 7.7 L/100 km) for 18 set items. Includes rows for Global warming, Marine acidification, Land occupation, and various impact categories.

Table for Consumption Production with columns for min/moyenne/élévée and j (japon) for various set items.

AS véhicule conventionnel midpoint

Calculation: Compare
Results: Impact assessment
Product 1: 1 p conventionnal car (of project P1202b HQ - electric car)
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04
Indicator: Characterization
Skip categories: Never
Exclude infrastructure processes: No
Exclude long-term emissions: No
Sorted on item: Impact category
Sort order: Ascending

Table for Impact category with columns for Unit, CO2 eq, and 18 set items (Set 1 to Set 18). Rows include Global warming and Land occupation, biodiversity.

Table with 24 columns representing different impact categories and 18 columns representing various scenarios (Set 1 to Set 18). Rows include Fossil energy use, Mineral resources use, Water use, Terrestrial acidification, Aquatic eutrophication, marine eutrophication, Aquatic ecotoxicity, short-term, Aquatic ecotoxicity, long-term, Respiratory inorganics, Respiratory organics, Carcinogens, short-term, Carcinogens, long-term, Carcinogens, indoor, Carcinogens, pesticides residues, Non-carcinogens, short-term, Non-carcinogens, long-term, Non-carcinogens, indoor, Non-carcinogens, pesticides residue, Ionizing radiation, and Ozone Layer Depletion.

Scenario description table with 18 columns for different urbanization scenarios (e.g., Mix 55% urba, Mix 55% ur/urbain 7.1, etc.) and 3 rows for Route, UF, and Consumption.

complément

Calculation: Compare
Impact assessment
Product 1: 1 p conventionnal car (of project P1020b HQ - electric car)
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint)V0.04
Indicator: Characterization
Skip categories: Never
Exclude infrastructure processes: No
Exclude long-term emissions: No
Sorted on item: Impact category
Sort order: Ascending

Main data table for the first scenario, with 24 impact categories and 18 scenario sets, including rows for Global warming, Land occupation, biodiversity, Fossil energy use, etc.

Summary table for the first scenario, showing the impact of 15 different road types (Autoroute, Autoroute 5.5, etc.) across 15 scenarios (Mix, 15000, 150000, etc.).

As véhicule électrique endpoint

Compare
Impact assessment
Product 1: 1 p electric car (of project P1020b HQ - electric car)
Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 valeurs)
Indicator: Characterization
Skip categories: Never
Exclude infrastructure processes: No
Exclude long-term emissions: No
Sorted on item: Impact category
Sort order: Ascending

Main data table for the electric vehicle scenario, with 24 impact categories and 18 scenario sets, including rows for Global warming, Freshwater acidification, Terrestrial acidification, etc.





Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 p conventional car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Product 2: 1 p electric car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	conventional electric car	
Global warming, short-term, ecosys	PDF.m2.yr	8949.6934	3331.768
Global warming, long-term, ecosys	PDF.m2.yr	30557.759	10646.01
Global warming, short-term, human	DALY	0.040240856	0.014981
Global warming, long-term, human	DALY	0.13766187	0.047958
Marine acidification, short-term	PDF.m2.yr	797.88776	272.3547
Marine acidification, long-term	PDF.m2.yr	7350.2388	2508.964
Land occupation, biodiversity	PDF.m2.yr	501.97395	345.3498
Water use impacts, human health	DALY	0.064759039	0.046438
Water use impacts, freshwater ecos	PDF.m2.yr	-44.262284	-83.5524
Water use impacts, terrestrial ecos	PDF.m2.yr	1.7994993	0.247115
Thermally polluted water	PDF.m2.yr	0.004523193	0.008031
Freshwater acidification	PDF.m2.yr	217.55172	260.7803
Terrestrial acidification	PDF.m2.yr	2231.7885	2631.371
Freshwater eutrophication	PDF.m2.yr	239.97606	39.73069
Marine eutrophication	PDF.m2.yr	28.877908	37.37916
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2.yr	82.877086	118.77
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2.yr	1179.8048	3119.755
Respiratory inorganics	DALY	0.008027679	0.008877
Respiratory organics	DALY	4.65899E-06	2.84E-06
Carcinogens, short-term	DALY	0.0110319	0.013232
Carcinogens, long-term	DALY	0.030280279	0.046417
Non-carcinogens, short-term	DALY	0.008848491	0.01678
Non-carcinogens, long-term	DALY	0.007706126	0.031589
Ionizing radiation, human health	DALY	7.7791E-05	0.000118
Ionizing radiation, freshwater ecos	PDF.m2.yr	4.98918E-05	5.59E-05
Ozone layer depletion	DALY	1.77425E-05	4.43E-06

QC - endpoint

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 p conventional car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Product 2: 1 p electric car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Rec\_Endpoint 1.00) MAJ V1.01 / IMPACT World+ (Stepwise 2006 values)  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	conventional electric car	
Global warming, short-term, ecosys	PDF.m2.yr	8811.3913	2613.961
Global warming, long-term, ecosys	PDF.m2.yr	30093.561	8219.508
Global warming, short-term, human	DALY	0.039618993	0.011754
Global warming, long-term, human	DALY	0.1355707	0.037027
Marine acidification, short-term	PDF.m2.yr	785.89385	209.3917
Marine acidification, long-term	PDF.m2.yr	7239.7494	1928.941
Land occupation, biodiversity	PDF.m2.yr	487.25256	292.7698
Water use impacts, human health	DALY	0.047481595	0.027382
Water use impacts, freshwater ecos	PDF.m2.yr	-71.430965	-182.723
Water use impacts, terrestrial ecos	PDF.m2.yr	1.7950471	0.229381
Thermally polluted water	PDF.m2.yr	0.004929887	0.009454
Freshwater acidification	PDF.m2.yr	207.75519	224.1702
Terrestrial acidification	PDF.m2.yr	2133.4365	2262.099
Freshwater eutrophication	PDF.m2.yr	242.36489	37.88385
Marine eutrophication	PDF.m2.yr	27.949577	34.69236
Freshwater ecotoxicity, short-term	PDF.m2.yr	82.738396	117.3875
Freshwater ecotoxicity, long-term	PDF.m2.yr	1171.7713	3093.049
Respiratory inorganics	DALY	0.007850904	0.00822
Respiratory organics	DALY	4.55259E-06	2.4E-06
Carcinogens, short-term	DALY	0.010997648	0.013134
Carcinogens, long-term	DALY	0.029749527	0.044595
Non-carcinogens, short-term	DALY	0.008787767	0.01655
Non-carcinogens, long-term	DALY	0.007536923	0.031063
Ionizing radiation, human health	DALY	7.03096E-05	8.78E-05
Ionizing radiation, freshwater ecos	PDF.m2.yr	4.89546E-05	4.99E-05
Ozone layer depletion	DALY	1.78042E-05	3.79E-06

US - midpoint

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 p conventional car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Product 2: 1 p electric car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	conventional electric car	
Global warming	kg CO2 eq	50258.785	18428.21
Land occupation, biodiversity	ha.yr arabl	0.083497326	0.057299
Fossil energy use	MJ deprive	613907.83	218223.9
Mineral resources use	kg deprive	1206.7913	1565.01
Water use	m3 deprive	69.31561	5.16609
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	134.274	158.9555
Aquatic eutrophication	kg PO4- eq	25.270188	67.76215
marine eutrophication	kg N eq	18.768123	20.80275
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	1232.2436	3291.268
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	40.779821	45.81553
Respiratory inorganics	kg PM2.5 e	9.6573118	10.67838
Respiratory organics	kg NMVOC	119.45922	72.85436
Carcinogens, short-term	CTUh	0.003589243	0.005182
Carcinogens, long-term	CTUh	1.2634E-07	3.28E-07
Carcinogens, indoor	CTUh	0	0
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	2.53461E-08	1.49E-10
Non-carcinogens, short-term	CTUh	0.039389615	0.063093
Non-carcinogens, long-term	CTUh	9.11648E-06	2.37E-05
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0.00	0

Non-carcinogens, pesticides residue CTUh 0.00 2.84E-08  
 Ionizing radiation Bq C-14 eq 373576.05 592322.9  
 Ozone Layer Depletion kg CFC-11 0.008807268 0.002127

QC - midpoint

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 p conventional car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Product 2: 1 p electric car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Method: IMPACTWorld+ (Default\_Midpoint) V0.04  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	conventionnal electric car	
Global warming	kg CO2 eq	49486.197	14412.12
Land occupation, biodiversity	ha.yr arabi	0.081050887	0.048562
Fossil energy use	MJ deprive	606845.15	165841.9
Mineral resources use	kg deprive	1200.6921	1550.764
Water use	m3 deprive	69.082403	4.971142
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	128.49902	1.3570209
Aquatic eutrophication	kg PO4- eq	24.057263	62.98626
marine eutrophication	kg N eq	19.191051	22.05878
Aquatic ecotoxicity, short-term	CTUe	1223.9945	3263.081
Aquatic ecotoxicity, long-term	CTUe	40.76278	45.72025
Respiratory inorganics	kg PM2.5 e	9.444705	9.888716
Respiratory organics	kg NMVOC	116.73086	61.61263
Carcinogens, short-term	CTUh	0.00354018	0.005016
Carcinogens, long-term	CTUh	9.53398E-08	2.12E-07
Carcinogens, indoor	CTUh	0	0
Carcinogens, pesticides residues	CTUh	2.53467E-08	1.5E-10
Non-carcinogens, short-term	CTUh	0.039247466	0.062652
Non-carcinogens, long-term	CTUh	6.87954E-06	1.53E-05
Non-carcinogens, indoor	CTUh	0	0
Non-carcinogens, pesticides residue	CTUh	2.8969E-06	2.85E-08
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	373576.05	445902.8
Ozone Layer Depletion	kg CFC-11	0.008847581	0.00184

Efficacité de la borne

Totalité résultats

SH	0.177518	0.176607445	0.178611	0.181925	0.180104	0.184110532	0.1735513	0.17346	0.173661	0.177518	0.177277	0.17801935	0.321007352	0.462988	0.19322516	0.274014	0.370963	0.186761	0.180765
QE	22841.21	22660.17278	23058.45	23504.33	23142.26	23938.81426	22244.395	22226.29	22266.12	22841.21	22793.07	22941.49356	57466.8918	91327.59	26992.2626	42056.72	61142.72	24879.32	22475.3

UF

Consumsation	150000	1.50E+05		150000	3.00E+05		3.00E+05		3.00E+05		1.50E+04		1.50E+04		1.50E+05		1.50E+05		150000	300000	15000	150000	300000	15000	150000	300000	15000	150000			
		min	max		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max											min	max	
Production	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	japon	
Batterie	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	LINCM	
Borne	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	7.50E-02	7.50E-02	7.50E-02	7.50E-02	0.075	0	0.2	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	
Mix	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc	qc
	sc base												chine	chine	chine	chine	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande	allemande

Changement climatique 1 0.997424621 1.005365  
 Épuisement des ressources fossiles 1 0.994869618 1.010688  
 Épuisement des ressources minérales 1 0.999230144 1.001604

Méthode d'impact

Endpoint

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 p conventional car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Product 2: 1 p electric car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Method: ReCiPe Endpoint (H) V1.12 / Europe ReCiPe H/A  
 Indicator: Characterization  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Midpoint

Calculation Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 p conventional car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Product 2: 1 p electric car (of project P1202b HQ - electric car)  
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H  
 Indicator: Characterization  
 Skip category Never  
 Exclude inf No  
 Exclude Ion No  
 Sorted on Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	conventionnal electric car	
Climate change Human Health	DALY	0.07017523	0.025606
Ozone depletion	DALY	1.77425E-05	4.43E-06
Human toxicity	DALY	0.008898613	0.030356
Photochemical oxidant formation	DALY	4.65894E-06	2.84E-06
Particulate matter formation	DALY	0.013601895	0.015867
Ionising radiation	DALY	0.01%	0.01%
Climate change Ecosystems	species.yr	0.000397475	0.000145
Terrestrial acidification	species.yr	8.55606E-07	9.8E-07
Freshwater eutrophication	species.yr	3.04E-07	9.87E-07
Terrestrial ecotoxicity	species.yr	4.79E-06	2.02E-06
Freshwater ecotoxicity	species.yr	3.35E-07	1.07E-06
Marine ecotoxicity	species.yr	7.46E-08	2.23E-07
Agricultural land occupation	species.yr	3.20E-05	1.44E-05
Urban land occupation	species.yr	4.48E-06	5.46E-06
Natural land transformation	species.yr	2.53E-05	7.70E-05
Metal depletion	\$	412.12775	1104.048
Fossil depletion	\$	2303.572	772.7943

Impact cate	Unit	convention electric car	
Climate chi	kg CO2 eq	50125.53	18291.04
Ozone depl	kg CFC-11	0.006848	0.002101874
Terrestrial	kg SO2 eq	147.5095	168.8694
Freshwater	kg P eq	6.835155	22.155243
Marine eut	kg N eq	20.27189	22.09274
Human tox	kg 1,4-DB e #####	4337155%	
Photochem	kg NMVOC	119.4593	72.854461
Particulate	kg PM10 e	52.31494	61.028074
Terrestrial	kg 1,4-DB e	3.18E+01	1.34E+01
Freshwater	kg 1,4-DB e	3.90E+02	1.25E+03
Marine eco	kg 1,4-DB e	4.23E+02	1.26E+03
Ionising rac	Bq U235 e	3.71E+03	5.66E+03
Agricultura	m2a	2.06E+03	1.17E+03
Urban land	m2a	216.2918	263.57559
Natural lan	m2	14.57286	40.332905
Water depl	m3	23902	627229.29
Metal depl	kg Fe eq	5763.716	15446.431
Fossil deple	kg oil eq	13930.95	4676.0522

SH	0.092758964	0.07193	0.092759	1	0.775449																
QE	0.000465638	0.000247	0.000466	1	0.530816																
CC						50125.53	18291.04		50125.53						1	0.364905					
EF						13930.95	4676.0522		13930.95						1	0.335659					
Mine						5763.716	15446.431		15446.431						0.373142	1					

Batterie





40951.8 44686.54234 53400.933

71458.56 78928.03649 96356.81776

13495.72 13869.2 14740.64

	Autoroute			Autoroute 5.5			Autoroute 6.9 L/100 km			Autoroute			Autoroute			Autoroute		
Mix	150000	Mix 150000	Mix 150000	150000	150000	150000	Mix 300000	Mix 300000	Mix 300000	300000	300000	300000	Mix 15000	Mix 15000	15000	Mix 15000	15000	15000
minimale japon	moyenne japon	élévée japon	minimale japon	moyenne japon	élévée japon	minimale japon	moyenne japon	élévée japon	minimale japon	moyenne japon	élévée japon	minimale japon	moyenne japon	élévée japon	minimale japon	moyenne japon	élévée japon	

**Masse des véhicules**

masse	1295	kg			
Base conventionnel	Prod conve	Batterie	Transport	Utilisation	Fin de vie
Santé humaine	0.079709	0.000498342	0.001924	0.160328	0.003324
Qualité des écosystèmes	9042.052	51.10500167	453.3956	42278.32	825.3943
Changement climatique	7926.88	38.377174	384.042	42030.49	382.3477
Épuisement des ressources fossiles	102697.4	574.16059	5502.785	516814.6	431.8849
Épuisement des ressources minérales	1069.177	5.5590867	13.18963	145.6464	0.993952

Base électrique	1268	253			
Prod electr	Batterie	Transport	Utilisation	Fin de vie	
Santé humaine	0.126989	0.037441849	0.002057	0.005367	0.004405
Qualité des écosystèmes	13716.51	6105.670295	484.7307	793.3925	1102.202
Changement climatique	11116.68	4979.369504	410.5839	716.3685	596.1025
Épuisement des ressources fossiles	125260	70679.49554	5883.094	16708.04	2896.31
Épuisement des ressources minérales	1315.185	283.8101661	14.10119	21.75454	5.288958

Véhicule cc		Véhicule électrique	
base (kg)	1295	1521	
Minimum (kg)	1067	1180	
Maximum (kg)	1475	1900	

Ratio minimum	0.823938	0.775805391
Ratio maximum	1.138996	1.249178172

Variation véhicule conventionnel	1295	1067	1475
Santé humaine	0.245783	0.202510201	0.279946
Qualité des écosystèmes	52650.27	43380.56784	59968.45
Changement climatique	50762.14	41824.86364	57817.88
Épuisement des ressources fossiles	626020.8	515802.4876	713035.3
Épuisement des ressources minérales	1234.566	1017.205997	1406.166

Variation véhicule électrique	1521	1180	1900
Santé humaine	0.171855	0.133325907	0.214677
Qualité des écosystèmes	21100.31	16369.73301	26358.04
Changement climatique	17223	13361.69937	21514.6
Épuisement des ressources fossiles	218530.6	169537.2384	272983.7
Épuisement des ressources minérales	1634.851	1268.326387	2042.22

**Annexe F :**  
**Revue critique**

---



Raymond Chabot  
Grant Thornton

# Rapport – version 1

Revue critique d'une étude comparative d'analyse du cycle de vie  
entre une voiture conventionnelle et une voiture électrique

Présenté à :

**Hydro-Québec**

20 janvier 2016







# Raymond Chabot Grant Thornton

Le 20 janvier 2016

Monsieur Christian Turpin  
Conseiller- Performance environnementale  
**Hydro-Québec**  
75, boulevard René-Lévesque Ouest, 2<sup>e</sup> étage  
Montréal (Québec) H2Z 1A4

**Raymond Chabot Grant Thornton & Cie**  
S.E.N.C.R.L.  
Bureau 2000  
Tour de la Banque Nationale  
600, rue De La Gauchetière Ouest  
Montréal (Québec) H3B 4L8

Téléphone : 514 878-2691  
Télécopieur : 514 878-2127  
[www.rcgt.com](http://www.rcgt.com)

**Objet : Rapport – Revue critique d'une étude comparative d'analyse du cycle de vie entre une voiture conventionnelle et une voiture électrique**

Monsieur,

Le comité de revue critique a complété la revue de l'étude d'analyse de cycle de vie (ACV) comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois que le CIRAIG a réalisée pour le compte d'Hydro-Québec. La revue critique d'une étude ACV est un exercice ayant pour objectif d'assurer que l'étude et son rapport répondent aux exigences de la norme ISO 14044. Le travail du comité ne consiste pas à approuver ou non la divulgation de l'étude à un public externe. Cette décision revient aux mandataires de l'étude.

Ce rapport de revue critique émet un certain nombre de commentaires en lien avec la première version du rapport de l'étude ACV (version octobre 2015). De manière générale, le comité de revue critique s'entend pour dire qu'il s'agit d'une étude bien montée et étoffée. Toutefois, le comité considère que les auteurs de l'étude devraient porter une attention particulière à l'interprétation des résultats qui est faite dans l'étude. Le comité considère qu'à plusieurs égards, les auteurs devraient raffiner davantage l'interprétation des résultats et surtout, préciser les limites de validité des conclusions. À titre d'exemple, les analyses montrent clairement qu'il existe des distances minimales à parcourir avant qu'une voiture électrique engendre moins d'impacts environnementaux qu'une voiture conventionnelle. Or, une telle précision ne figure pas clairement dans le sommaire ni dans la conclusion. Le comité considère également que les auteurs doivent, à défaut de comparer des véhicules couramment vendus au Québec, préciser davantage les raisons permettant de faire des similitudes entre les voitures comparées, et avec les plus vendues au Québec. Si les analyses de sensibilité peuvent démontrer que les conclusions demeurent inchangées en faisant varier des paramètres de conduite des véhicules (et donc des types de véhicules), il n'en demeure pas moins que cette nuance apparaît tardivement dans l'étude et qu'il n'est pas donné à tout lecteur de pouvoir comprendre que les analyses de sensibilité peuvent être une solution de remplacement à l'absence de données spécifiques au contexte québécois.

Vous trouverez dans ce rapport des commentaires généraux de même que des commentaires plus spécifiques que le comité de revue critique fait aux auteurs de l'étude. Les commentaires sont codifiés selon que des corrections sont requises, recommandées ou suggérées et que ces corrections ont une incidence directe, indirecte ou aucune incidence sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14044. Finalement, ce rapport se termine par une analyse de la conformité de l'étude et de son rapport à la norme ISO 14044 (Annexe 1).

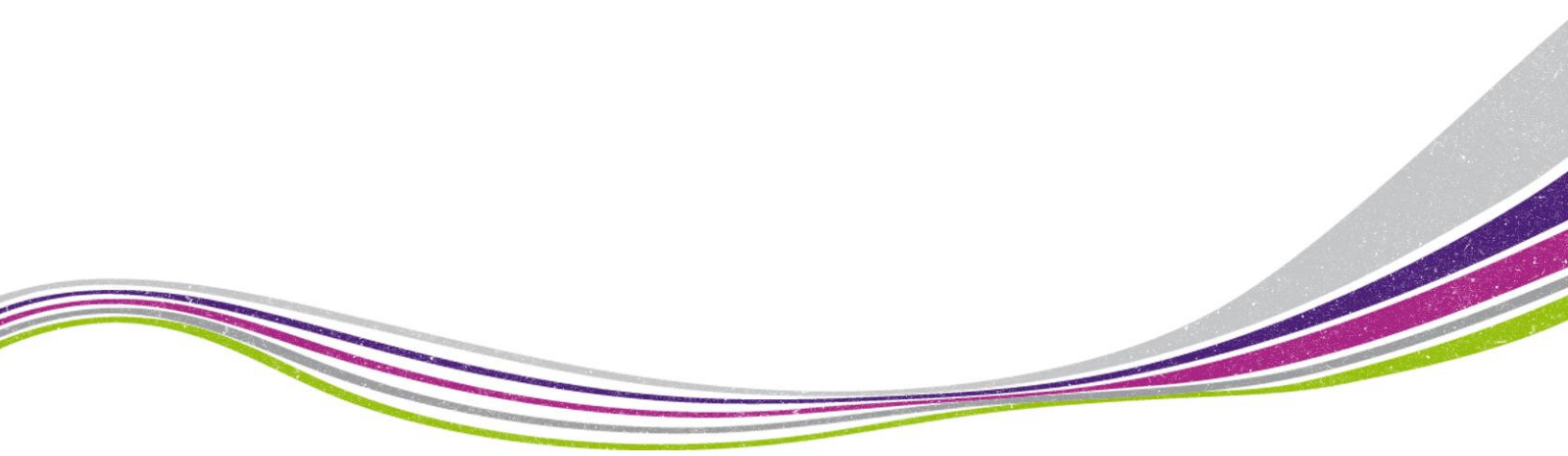
Compte tenu de ces points et des autres présentés dans ce rapport, le comité de revue critique juge que l'étude dans sa première version ne répond pas aux exigences de la norme ISO 14044. Néanmoins, le comité est confiant qu'il est possible de répondre de manière satisfaisante à ces commentaires, ce qui rendrait l'étude conforme à cette norme.

Pour toute information supplémentaire, n'hésitez pas à communiquer avec la soussignée au 514 390-4158 ou avec le président du comité de revue critique, monsieur Gontran Bage, au 514 393-4849.

Veillez agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments distingués.

*Raymond Chabot Grant Thornton & Cie S.E.N.C.R.L*

Johanne Gélina  
Associée – Groupe-conseil stratégie et performance



# *Une relation d'affaires basée sur la confiance, le savoir-faire et la collaboration*

## **Table des matières**

1. Décision du comité de revue critique .....	1
1.1 Résumé de la décision du comité.....	1
1.2 Composition du comité de revue critique .....	1
2. Codification des commentaires .....	2
3. Commentaires généraux .....	3
4. Commentaires spécifiques .....	6
Annexe 1 Évaluation de la conformité à la norme ISO 14044	

# Rapport



# 1. Décision du comité de revue critique

## 1.1 Résumé de la décision du comité

<b>TITRE DE L'ÉTUDE RÉVISÉE</b>	Analyse du cycle de vie comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte québécois
<b>DATE DU RAPPORT</b>	Octobre 2015
<b>AUTEUR DE L'ÉTUDE</b>	CIRAIG
<b>COMMANDITAIRE</b>	Hydro-Québec
<b>DATE DE LA REVUE CRITIQUE</b>	Janvier 2016
<b>DÉCISION DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE</b>	<input type="checkbox"/> Étude est conforme aux exigences de la norme ISO 14044 <input type="checkbox"/> Étude requiert des <u>corrections mineures</u> conformément aux exigences de la norme ISO 14044 <input checked="" type="checkbox"/> Étude requiert des <u>corrections majeures</u> conformément aux exigences de la norme ISO 14044

## 1.2 Composition du comité de revue critique

<b>PRÉSIDENT DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE</b>	Gontran Bage, ing., Ph.D. Directeur, Groupe-conseil Stratégie et performance, Raymond Chabot Grant Thornton
<b>RÉVISEURS</b>	Jacques Duval Chroniqueur automobile Pierre Beaudoin Directeur principal, services techniques, CAA-Québec Victor Poudelet, ing.jr, M.Sc.A. Conseiller principal, Groupe-conseil Stratégie et performance, Raymond Chabot Grant Thornton

Conformément à la section 6.3 de la norme ISO 14044, une étude doit faire l'objet d'une revue critique par un comité des parties prenantes si les résultats de l'étude peuvent être utilisés en support à une affirmation comparative destinée à être divulguée au public. Dans ce contexte, le travail des réviseurs est de s'assurer que l'étude est transparente et cohérente, que les données utilisées sont appropriées et en relation avec les objectifs de l'étude, que l'interprétation des résultats est en accord avec ces objectifs, que l'interprétation des résultats reflète les limites de l'étude telles qu'identifiées par ses auteurs, et que les méthodes employées par les auteurs de l'étude sont scientifiquement valables, adéquates par rapport aux objectifs de l'étude et en accord avec la norme ISO 14044. Il est important de rappeler qu'une décision du comité quant au respect par l'étude des exigences de la norme ISO 14044 ne signifie pas que le comité endosse la divulgation des résultats. Une telle divulgation reste sous la décision et la responsabilité des propriétaires de l'étude.

## 2. Codification des commentaires

Afin de guider les auteurs de l'étude dans les corrections à apporter à l'étude selon les commentaires des réviseurs, ces commentaires ont été codifiés selon la légende suivante :

- une correction, une modification, une adaptation ou une justification est obligatoire. Cet aspect de l'étude a une incidence sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14044 et sur les résultats de l'étude;
- ◉ une correction, une modification, une adaptation ou une justification est recommandée. Cet aspect peut avoir une incidence indirecte sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14044 et pourrait influencer les résultats de l'étude;
- une correction, une modification, une adaptation ou une justification est suggérée, mais non obligatoire. Cet aspect n'a pas ou peu d'incidence sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14044 et ne devrait pas influencer les résultats de l'étude.

## 3. Commentaires généraux

- 3.1** Le choix des véhicules sélectionnés pour représenter les véhicules électriques et les véhicules conventionnels est très peu justifié dans un contexte d'utilisation québécoise.

Beaucoup d'informations sont fournies dans la mise en contexte sur les différentes caractéristiques (batterie, autonomie, impact du froid, etc.), cependant il est très difficile pour le lecteur de comprendre comment ces paramètres sont venus influencer le choix des véhicules (Leaf et Mercedes Classe B). De plus, trois paramètres de comparaison sont présentés dans la section 2.4.1 (taille, masse, puissance), mais aucun détail relatif à ces paramètres n'est fourni dans le tableau 2-9, lorsque des « modèles de véhicules comparables » sont fournis. Exemple, selon les trois paramètres fournis précédemment, il est surprenant de pouvoir affirmer qu'une BMW Série 1, une Audi A3 et une Toyota Corolla sont comparables. Le raisonnement pour démontrer le choix des produits ne tient donc pas la route.

La Nissan Leaf est-elle le modèle de véhicule électrique le plus courant au Québec ? La Mercedes Classe B est-elle le modèle de véhicule conventionnel le plus vendu au Québec ? Des réponses à ces questions auraient été des arguments permettant de justifier l'applicabilité de l'étude dans un contexte québécois.

Dans le sommaire, les auteurs mentionnent que les véhicules retenus ne sont que des exemples représentatifs de véhicules offrant un niveau de confort et de performance comparable. La notion de confort est très subjective et difficilement quantifiable pour affirmer que la Nissan Leaf et la Mercedes Class B sont similaires. La performance quant à elle, peut se décliner en plusieurs caractéristiques telles que la performance du moteur, la capacité de chargement, la vitesse d'accélération, la distance possible avec un plein d'essence ou une charge complète et bien d'autres. Or, aucune comparaison de la sorte n'est faite entre les deux modèles de voiture pour supporter cette affirmation d'équivalence de la performance.

- 3.2** La fonction de rouler 150 000 km avec un véhicule au Québec durant 10 ans donne l'impression que les véhicules présentent une telle durée de vie. Or, selon l'Association des recycleurs de pièces d'autos et de camions (ARPAC), le kilométrage moyen des véhicules au Québec est de l'ordre de 135 000 km et les véhicules en fin de vie soumis au recyclage affichent 300 000 km.

Il est suggéré dans ce contexte de parler d'une distance parcourue durant les 10 premières années de vie du véhicule afin d'éviter toute confusion ou mauvaise interprétation par le lecteur. Cette correction devrait être apportée tout au long du rapport.

À titre d'exemple, les auteurs présentent au tableau 2-10 l'étude de Fayçal-Siddikou et al. qui considère une durée de vie des véhicules de 230 500 km, ce qui est plus représentatif du contexte québécois.

- 3.3** Les auteurs doivent faire une interprétation plus poussée des résultats, notamment ceux des analyses de sensibilité. Actuellement, les auteurs dressent une liste d'observations en lien avec les résultats obtenus. L'analyse doit aller au-delà de cette énumération et doit guider le lecteur sur les conclusions à tirer quant à la préférence entre une voiture électrique ou une voiture conventionnelle et dans quelles limites ces conclusions sont valides. En l'absence d'une telle

interprétation, les auteurs courent le risque que les lecteurs fassent des interprétations erronées de cette étude, ce qui limiterait la portée de l'étude.

À la page 56, il y a un très bon exemple d'une absence d'interprétation des résultats par les auteurs. Ces derniers mentionnent qu'il faut utiliser au minimum la voiture électrique durant 119 000 km avant qu'elle ne présente des bénéfices environnementaux en lien avec la santé humaine sur la voiture conventionnelle. Or, les auteurs ne font aucune mise en perspective de ce que peut représenter 119 000 km. Avec les hypothèses du début de l'étude, c'est 7,9 années d'utilisation de la voiture électrique. Considérant une durée de vie de 10 ans, les bénéfices environnementaux pour la santé humaine n'arriveraient que dans le dernier 20 % d'utilisation de la voiture. Est-ce donc dire que la voiture électrique ne présente pas ou très peu de gains environnementaux sur le plan de la santé humaine ?

Toujours en page 56, pour que la voiture électrique présente des bénéfices environnementaux en lien avec la qualité des écosystèmes, les changements climatiques et l'épuisement des ressources fossiles, comparativement à une petite voiture conventionnelle de faible consommation d'essence, il faut parcourir un minimum de 60 000 km. Ceci représente quatre années d'utilisation de la voiture électrique. Peut-on conclure dans ce contexte que l'utilisation de la voiture électrique dans un contexte de location à long terme (3-4 ans) n'est pas avantageuse, car si la voiture trouve un deuxième propriétaire, le premier propriétaire par son choix de remplacer son véhicule imposera la production d'un nouveau véhicule (possiblement électrique) qui engendrera de nouveaux impacts environnementaux ?




- 3.4** La conclusion de l'étude est à revoir. Les auteurs terminent la conclusion en mentionnant que plus « la durée de vie du véhicule électrique sera élevée, plus le bénéfice environnemental associé à celui-ci sera élevé ». Or, cette affirmation laisse à penser que la voiture électrique est toujours meilleure que la voiture conventionnelle et que cet avantage ne fait que s'accroître avec la distance parcourue. Pourtant les auteurs ont démontré dans le rapport qu'il y a une distance minimale non négligeable à parcourir avec la voiture électrique avant d'avoir des bénéfices environnementaux sur la voiture conventionnelle. Par souci de transparence et d'impartialité, les auteurs se doivent de faire mention de cette nuance importante dans la conclusion, mais également dans le sommaire de l'étude.

L'absence d'une telle nuance donne la voiture électrique comme étant toujours meilleure que la voiture conventionnelle (à l'exception de l'indicateur sur l'épuisement des ressources minérales), ce qui est à l'avantage du mandataire de l'étude, Hydro-Québec. Ceci pourrait donner l'impression au lecteur que l'étude est biaisée en faveur de son mandataire.









- 3.5** Selon les réviseurs, peu de batteries de véhicules électriques, de véhicules hybrides branchables, de véhicules hybrides, se sont avérées défectueuses au cours des premiers 160 000 kilomètres. Les cas de batteries défectueuses rapportées pour des véhicules hybrides branchables et hybrides étaient une résultante de véhicules immobilisés pour de longues périodes, sans que le moteur du véhicule n'ait été démarré. Les manufacturiers recommandent de faire fonctionner le moteur du véhicule selon des périodicités bien précises.
- 3.6** Au moment de publier ce rapport, la Nissan Leaf 2016 présente une autonomie nettement améliorée que celle de 2013 considérée dans l'étude. Sans changer l'étude, les auteurs doivent s'assurer qu'il est bien clair pour le lecteur qu'il s'agit d'une Nissan de 2013 qui n'a pas les





















mêmes caractéristiques de performance que ce qu'un nouvel acheteur de voiture électrique pourrait avoir.

- 3.7** Le rapport fait par le CIRAIG est exhaustif et donne une vision relativement complète du sujet. Toutefois, il s'agit d'un rapport qui est difficilement accessible pour un lecteur non familier avec l'approche d'analyse du cycle de vie. Selon l'usage que le mandataire souhaitera faire de l'étude, ce dernier devrait garder en tête que sous le format actuel, la publication d'un tel rapport pourrait rendre la compréhension des résultats obtenus difficile. 
- 3.8** Une caractéristique des véhicules électriques a été omise par les auteurs de l'étude. Il y a une différence dans le type de pneus qui équipent une voiture électrique comparativement à une voiture conventionnelle. Afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie pour le déplacement de la voiture, les modèles électriques sont équipés de pneus à faible résistance de roulement. Or, ces pneus ne sont efficaces que sur des routes sèches et non enneigées. Dès lors que la chaussée est humide, la voiture consomme beaucoup plus d'énergie pour parcourir la même distance que sur une chaussée sèche. 
- 3.9** Tel que présenté dans différents commentaires spécifiques, le comité de revue critique se questionne quant à la pertinence de certaines simplifications dans la modélisation faite par les auteurs de l'étude. Par exemple, la phase d'entretien des deux types de véhicules est jugée équivalente alors qu'il y a beaucoup moins d'entretien pour un véhicule électrique que pour un véhicule conventionnel. Également, seulement l'aluminium est pris en considération pour les bornes de recharge tandis que les données couramment employées pour les stations-service dans les modélisations en ACV prennent en considération beaucoup plus de composantes. Les auteurs doivent faire la démonstration que ces simplifications ne portent pas un biais pour la voiture électrique. Cette démonstration doit être clairement présentée dans l'étude afin d'éviter tout questionnement chez le lecteur quant à ces simplifications. 

## 4. Commentaires spécifiques

- 4.1 Page iv Pour un lecteur non familier avec l'approche ACV, il faudrait préciser ce que signifie un score dans un profil environnemental. Il faut préciser si un score élevé représente un avantage ou un désavantage d'un point de vue environnemental. 
- 4.2 Page iv Il est mentionné que l'objectif est la réalisation d'une « analyse comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel ». Cependant, dans la section 3.1 (p. 18), l'objectif est de réaliser une « analyse comparative des profils d'impacts environnementaux ». Il faudrait uniformiser la description de l'objectif de l'étude pour éviter que cela porte à confusion. 
- 4.3 Page iv Il faudrait préciser quelles données relatives aux véhicules datent de 2013. Est-ce les données d'inventaires sont extraites de la littérature ? 
- 4.4 Page 1 Les auteurs doivent revoir la référence exacte pour les informations apportées dans la phrase suivante : « En date de septembre 2015, plus de 7 000 véhicules hybrides ou électriques étaient en circulation au Québec. De ce nombre, 56 % sont des véhicules hybrides rechargeables, tandis que 44 % sont des véhicules 100 % électrique ». 
- 4.5 Page 1 Les 4 500 000 automobiles et camions légers en circulation au Québec en 2014 n'incluent que des véhicules de promenade et aucun véhicule utilisé à titre professionnel. Plusieurs des véhicules 100 % électrique que l'on retrouve actuellement au Québec font partie de cette seconde catégorie. Les auteurs sont invités à préciser que les valeurs présentées dans cette introduction ne font référence qu'aux véhicules de promenade. 
- 4.6 Page 1 Les auteurs présentent un portrait des émissions de GES dans le secteur des transports qui n'est pas représentatif du contexte de l'étude. L'étude porte exclusivement sur le transport automobile léger alors qu'ils ne font aucune distinction dans les émissions associées au transport au Québec. Ils présentent des proportions d'émissions de GES pour l'ensemble du secteur du transport qui inclue également le transport aérien, le transport ferroviaire et le transport maritime interne en plus du transport routier lourd.
- L'augmentation des émissions de GES pour le transport routier léger (automobiles) entre 1990 et 2013 est, selon le rapport d'inventaire des émissions de GES d'Environnement Canada, de 13 %.
- 4.7 Page 1 Donner une référence pour l'affirmation « L'entreprise dispose d'un réseau pouvant déjà répondre à la demande en recharge d'un million de véhicules électriques ». 
- 4.8 Page 1 Mettre à jour les chiffres sur le nombre de bornes en fonction sur le réseau du Circuit électrique, ou mettre une date pour les valeurs avancées dans le rapport, car en date de la lecture du rapport par le comité, l'organisme prétendait déjà avoir davantage de bornes que ce qui est rapporté par les auteurs. 
- 4.9 Page 1 Il est mentionné que « Hydro-Québec a contribué à mettre en place le premier et le plus important réseau de bornes électriques de recharges publiques pour véhicules électriques du Canada ». 

- Par souci de transparence et d'équilibre, serait-il possible d'indiquer les caractéristiques des autres principaux réseaux de recharges présents au Québec ?
- 4.10** Page 3 Tableau 2-1 : Les proportions pour le transport ne représentent pas uniquement le transport routier léger dont il est question dans cette étude comparative d'ACV. 
- 4.11** Page 3 Tableau 2-1 : Revoir les proportions données dans le tableau. Certaines ne correspondent pas à ce qui est présenté dans la référence. 
- 4.12** Page 4 Tableau 2-2 : Comment faut-il interpréter les pertes de transport et de distribution de 7,5 % dans un contexte de bouquet électrique ? Est-il pertinent de présenter cette valeur ici ? Il ne s'agit pas d'une distinction sur la proportion des différentes sources de production d'énergie électrique au Québec. 
- 4.13** Page 5 Il est mentionné que la vie utile d'une batterie est définie en nombre de cycles. Cependant, aucun parallèle n'est fait entre le nombre de cycles et le kilométrage parcouru par un véhicule durant sa vie utile, kilométrage qui sert pourtant de référence pour la durée de vie des véhicules. 
- Au minimum, la démonstration du nombre de kilomètres possible devrait être fournie dans le rapport, en fonction du nombre de cycles possibles et des conditions de froid. Cela permettrait de confirmer le flux de référence choisi pour le véhicule électrique.
- 4.14** Pages 5-6 Aucune interprétation de la figure 2-2 n'est faite par les auteurs de l'étude. Est-ce que la batterie considérée dans l'étude ACV est celle ayant le meilleur score ? Si ce n'est pas le cas, quelle serait la performance de la voiture électrique avec la batterie ayant le meilleur score ? De plus, les auteurs ne mentionnent pas laquelle de ces batteries figure dans la Nissan Leaf. 
- Tel que présenté actuellement dans le rapport, la section sur les batteries des voitures électriques dans le chapitre 2 n'apporte pas d'information sur celles qui sont réutilisées par les auteurs dans l'étude, soit pour la modélisation des systèmes, soit pour la validation des hypothèses ou encore pour l'interprétation des résultats.
- 4.15** Page 7 La Figure 2-3 n'apporte aucune précision dans l'étude. Les auteurs devraient la retirer si elle n'est pas utilisée. 
- 4.16** Page 7 Les conclusions rapportées de l'étude d'Hydro-Québec 2013, ne correspondent pas aux résultats présentés au tableau 2-4 à la page 8. La meilleure consommation énergétique dans ce tableau est durant l'été. Or, en page 7, les auteurs affirment que « l'autonomie du véhicule diminue de 5 km lorsque la température extérieure varie de 18°C à 23°C en raison de l'utilisation du climatiseur ». 
- 4.17** Page 7 L'étude citée d'Hydro-Québec était sur une utilisation d'une Mitsubishi i-MiEv, un véhicule plus petit que la Nissan Leaf. Les auteurs sont invités à préciser en quoi les conclusions de cette étude peuvent être applicables au contexte de l'étude comparative ACV actuelle qui pour sa part considère la Nissan Leaf pour le volet électrique. 
- 4.18** Page 8 Tableau 2-4 : Les saisons durent 3 mois et non 4 comme il y en a 4 sur une période de 12 mois. 
- 4.19** Page 8 Tableau 2-5 : Les unités sont manquantes pour les valeurs présentées dans le tableau. 

- 4.20** Page 9 Tableau 2-6 : L'autonomie de la Nissan Leaf est surestimée par rapport aux valeurs officielles. L'agence américaine EPA établit à 120,7 km (75 miles) l'autonomie pour un modèle de 2013 et à 135,2 km (84 miles) pour un modèle de 2015. De plus, les valeurs présentées dans ce tableau pour la Nissan Leaf donnent une consommation énergétique de 15 kWh/100 km ce qui est nettement inférieur aux valeurs présentées précédemment dans le rapport. Les auteurs sont invités à présenter des valeurs uniformes, représentatives et comparables dans l'étude ou à discuter des écarts dans les valeurs présentées. 
- 4.21** Page 9 La démonstration est faite tout au long de la section 2.2.1 que les conditions de températures (paramètre important dans un contexte québécois) influencent beaucoup les performances. Cependant, l'autonomie de la Nissan Leaf présentée dans le tableau 2-6 et utilisée dans le reste de l'étude ne semble pas en tenir compte. 
- 4.22** Page 9 Il est expliqué que les émissions de GES lors de la phase d'utilisation du véhicule électrique dépendent « largement » des méthodes de production d'électricité considérées. Aucune explication n'est fournie pour les autres impacts environnementaux. Est-il alors possible d'affirmer que « les conséquences environnementales de l'étape d'utilisation du véhicule électrique sont largement influencées par la nature de l'approvisionnement électrique utilisé » ? 
- 4.23** Page 11 Bien qu'« il ne semble pas y avoir de consensus actuellement pour les technologies de recyclage des batteries », est-il possible d'affirmer qu'une méthode est plus favorisée ou pratiquée qu'une autre au Québec, afin de justifier son choix dans le périmètre de l'étude (cryogénisation) ? 
- 4.24** Page 11 Les réviseurs proposent aux auteurs de l'étude de détailler davantage les impacts que peuvent avoir sur la santé humaine les différentes émissions de substances (COV, particules fines, CO) dans l'air. 
- 4.25** Page 12 Tableau 2-7 : Les auteurs doivent préciser la manière dont les véhicules présentés au tableau 2-7 ont été sélectionnés. Le choix de ces véhicules est important et sensible, car les auteurs font la moyenne de la consommation d'essence de ces véhicules et l'utilise par la suite dans la modélisation. Selon la dernière étude de l'OEE 2012 que les auteurs utilisent ailleurs dans l'étude ACV, en 2008, la consommation moyenne d'essence pour les véhicules légers était au Canada de 10,8 litres/100 km et un peu moins, 9,8 l/100 km, au Québec. 
- 4.26** Page 13 Les auteurs écrivent « Le kilométrage parcouru par ces véhicules est d'approximativement 150 000 km... ». En lien avec un commentaire général relativement à cette étude, il faudrait dire qu'il s'agit d'une distance parcourue durant les 10 premières années d'utilisation du véhicule. 
- 4.27** Page 13 Tableau 2-8 : La distribution de l'âge moyen des véhicules au Québec ne provient pas de l'OEE 2012. La référence citée est de l'OEE 2010 et la ventilation de la distribution du nombre de véhicules en fonction de l'âge n'est pas autant ventilée dans cette référence.   
La valeur de la distance annuelle parcourue par un véhicule au Québec n'est pas celle qui est donnée dans l'étude citée.  
Les hypothèses retenues sont en contradiction avec les sources et données présentées dans le tableau 2-8. Les données de provenance datent de 2007. Il aurait fallu obtenir des données plus récentes auprès de la SAAQ. De plus, dans la référence de Recyc-Québec

(2015), il est fait mention que l'âge moyen du parc de véhicule est de 7,3 ans en 2007, et que la durée de vie d'un véhicule est de 300 000 km en 2010. La durée moyenne considérée dans l'étude ACV n'est que la moitié de cette valeur. Si les auteurs poussent la durée de vie de la voiture pour faire 300 000 km, il faut valider que la batterie permet de faire le nombre de charges-décharges requis. Les auteurs devraient clarifier ces grandes variations entre les différentes sources de données.

Il est important que les auteurs fassent une distinction entre l'origine d'une marque automobile et le lieu de fabrication des voitures. Bien que la Nissan Leaf soit d'origine japonaise, cette voiture est produite aux États-Unis pour le marché nord-américain.

**4.28** Page 16 Tableau 2-9 : Les auteurs ne font pas la démonstration que les véhicules présentés au tableau 2-9 sont comparables. Cette comparaison doit se faire à la lumière de l'unité fonctionnelle qui est retenue pour cette étude et des paramètres de comparaison présentés en amont du tableau.

De plus, les auteurs sont invités à préciser pourquoi ces véhicules ont été retenus. En plus d'être comparables, il serait attendu que le choix de ces véhicules reflète le choix des consommateurs québécois en 2013 afin d'être cohérent avec l'objectif de l'étude. Ceci est très important, car, bien que les auteurs ne fassent pas de lien direct entre le tableau 2-9 et le tableau 2-7, les mêmes véhicules sont présentés et leurs données de consommation de carburant sont utilisées pour établir une consommation moyenne. Le choix des véhicules apparaissant au tableau 2-9 (et au tableau 2-7) a donc une incidence directe et très importante sur les résultats de l'étude.









**4.29** Page 17 À la fin de cette page, les auteurs mentionnent que les études répertoriées favorisent le véhicule électrique relativement aux changements climatiques, à l'épuisement des ressources fossiles et à la formation de smog alors que la voiture conventionnelle est préférée relativement à l'épuisement des ressources minérales, la toxicité humaine et l'écotoxicité. Toutefois, au tableau 2-10 à la page précédente, seule une étude sur les six études répertoriées est qualifiée de favorable à la voiture électrique. Les cinq autres études ne faisant pas de favori net.

Les auteurs sont invités à préciser de quelle manière ils peuvent tirer les conclusions présentées à la page 17 à la lumière du résumé des études présentées au tableau 2-10.

**4.30** Page 18 Le choix de l'unité fonctionnelle ne permet pas de déterminer que les deux véhicules comparés permettent de remplir la même fonction. Un véhicule sert à se déplacer du point A au point B de manière régulière. Il faut s'assurer que les deux véhicules permettent de faire ce déplacement de manière similaire, c'est-à-dire dans un laps de temps similaire et des conditions comparables. Par la suite, l'idée de faire 150 000 km avec le véhicule apporte un deuxième volet à la fonction, soit celui de permettre ce déplacement du point A au point B un certain nombre de fois sur la durée de vie de la voiture.

Les auteurs sont invités à revoir l'unité fonctionnelle de l'étude afin qu'elle permette de faire une réelle comparaison entre deux voitures similaires d'un point de vue de leur capacité de déplacement et de leur durée de vie respectives.









Par ailleurs, l'idée déjà évoquée précédemment que cette unité fonctionnelle devrait être présentée comme étant pour les premières années de vie du véhicule devrait également être considérée ici.

- 4.31** Page 18 La revue critique n'a pas pour but « d'assurer la validité complète des résultats », mais bien de la méthodologie et de l'approche suivie. Telle que définie dans la norme ISO 14044, la revue critique a pour objectif d'assurer la cohérence entre l'étude ACV et les exigences et principes de la norme. 
- 4.32** Page 18-19 Aucune description des flux de référence considérés pour chaque véhicule n'est faite. 
- 4.33** Page 22 Les auteurs doivent préciser si la batterie que l'on retrouve dans la Nissan Leaf 2013 est bien une LiFePO<sub>4</sub> ou une LiNCM. Aucune information sur ce type de batterie pour la Nissan Leaf 2013 n'a été donnée jusqu'à présent et les auteurs ont présenté dans le chapitre 2 un schéma montrant des différences significatives sur la performance environnementale des différentes batteries. 
- 4.34** Page 22-24 Dans certains cas, des données d'arrière-plan sont exclues (ex. : les matières résiduelles et l'assemblage dans la fabrication des pneus), alors que parfois des processus similaires sont inclus pour d'autres processus (ex. : l'assemblage, le transport et les matières résiduelles inclus dans la fabrication de l'intérieur et de l'extérieur). Les auteurs doivent harmoniser l'approche ou en justifier les divergences. 
- 4.35** Page 24 Les auteurs doivent préciser si le transport du carburant est inclus dans le processus de production de pétrole et d'éthanol à l'échelle mondiale. 
- 4.36** Page 24 Il est erroné de dire que l'entretien des deux véhicules sera similaire durant les 150 000 km. Sur une telle période, il y a environ 35 % d'économie en entretien sur un véhicule électrique comparativement à un véhicule à essence. Il s'agit ici d'une différence significative souvent rapportée lorsqu'il est question des avantages des voitures électriques. Les auteurs devraient prendre ceci en considération dans la modélisation. 
- 4.37** Page 25 La comparabilité de la Mercedes Classe B avec la Classe A n'a jamais été démontrée dans l'étude. 
- 4.38** Page 26 Tableau 3-2 : 
- Préciser ce qu'est la distance d'un déplacement afin de pouvoir faire la démonstration que les deux véhicules peuvent faire le trajet de manière similaire et que le nombre de cycles charge-décharge de la Nissan Leaf permet de faire les 150 000 km prévus durant sa vie utile.
  - Les lieux de production sont à revoir (malgré l'analyse de sensibilité). Il y a une usine de production Nissan à Smyrna au Tennessee qui produit des Leaf. La Mercedes Class-B vendue au Canada n'est pas non plus assemblée au Japon, mais plutôt en Europe. Les distances de transport des véhicules doivent être revues en fonction de la réalité québécoise des véhicules achetés ici.
  - Revoir les hypothèses de transport selon les changements apportés aux lieux de production des véhicules.










- Le tableau pour la référence à la consommation d'électricité du véhicule électrique est le tableau 2-4 et non le tableau 2-5.
  - La consommation énergétique de la Nissan Leaf utilisée dans l'étude est en fait celle du test fait par Hydro-Québec avec une Nissan i-MiEV. En l'absence d'une démonstration d'une équivalence entre les deux véhicules, les auteurs devraient prendre les valeurs de consommation énergétiques présentées au tableau 2-5 pour la Nissan Leaf de 2013 (21.1 kWh/100 km pour l'utilisation combinée selon le rapport 2013 de Ressources naturelles Canada).
  - Seul l'aluminium utilisé dans la fabrication des bornes électriques est considéré (exclusion de la structure en béton, etc.) alors que l'entièreté des stations-service est considérée.
  - Préciser si le scénario de base pour la fin de vie de la batterie est valable pour toutes les batteries des deux véhicules.
- 4.39** Page 29 Les auteurs doivent justifier pourquoi les trois catégories d'impact ont été considérées en plus des catégories de dommages.
- 4.40** Page 31 Au premier point, il est mentionné que les voitures sont mises en marché en 2013 ou en 2015. Or, l'unité fonctionnelle en page 18 ne précise qu'une seule mise en marché en 2013. Les auteurs font ensuite l'hypothèse que les modèles n'ont pas évolué significativement entre 2013 et 2015. Toutefois, l'unité fonctionnelle est bien pour une mise en marché en 2013. Ce premier point devrait être corrigé pour éviter toute confusion chez le lecteur.
- 4.41** Page 32 Une référence à un tableau n'est pas faite adéquatement.
- 4.42** Page 33 Choix des analyses de sensibilité :
- Scénario 2 : une démonstration est requise que le véhicule électrique peut atteindre 300 000 km de durée de vie en fonction du nombre de cycles de charge-décharge que sa batterie peut faire. Il se pourrait qu'une nouvelle batterie doive être prise en considération pour atteindre cette distance d'utilisation.
  - Scénario 2 : Considérant que la consommation de la Nissan Leaf 2013 est selon Ressources naturelles Canada de 21,1 kWh/100 km (et non de 18 kWh/100 km comme présentée dans l'étude), la plage de variation de la consommation électrique est trop favorable à la voiture électrique puisqu'elle ne considère que des consommations moindres. Il faudrait que les auteurs revoient la plage pour la consommation de la voiture électrique dans un contexte hivernal pour augmenter la consommation maximale dans cette simulation. Même en conservant la consommation du scénario de base à 18 kWh/100 km, la borne maximale de la plage de variation est trop faible (22 kWh/100 km), car elle ne représente qu'une augmentation de 22 % alors que les auteurs mentionnent que les essais faits par Hydro-Québec donnent une perte d'autonomie de 40 % en hiver.
  - Scénario 5 : Tel que mentionné précédemment, le lieu de production de la Nissan Leaf est au Tennessee. Ceci devrait être le scénario de base. La Mercedes Classe B vendue en Amérique du Nord est produite en Europe. Toutefois, plusieurs









véhicules conventionnels parmi les plus achetés au Canada sont produits aux États-Unis ou en Asie. L'analyse de sensibilité qui devrait être faite serait de maintenir le lieu de production de la Nissan Leaf au Tennessee et de regarder la variation des résultats pour une voiture conventionnelle produite aux États-Unis et en Asie. Dans un second temps, il faudrait regarder la variation dans les résultats pour une Nissan Leaf produite au Japon et une voiture conventionnelle produite en Amérique du Nord, voire même au Canada (Ontario).

- 4.43** Page 35 à 43 Le niveau de détail dans les principaux contributeurs (processus et matériaux) n'est pas le même pour les résultats présentés. Exemple : il est possible de savoir que la production d'aluminium est le principal contributeur dans la production du moteur du véhicule électrique (p. 35), sauf que les auteurs ne précisent pas les principaux contributeurs aux impacts de la production des composants de la batterie (p. 38). 
- De manière générale, très peu de détails sont donnés à propos des principaux contributeurs, en termes d'impacts, des différents processus considérés pour le véhicule conventionnel, par rapport à la présentation des résultats du véhicule électrique.
- Les auteurs sont invités à revoir l'uniformité du niveau de détail présenté dans cette section selon les objectifs visés par l'étude.
- 4.44** Page 41 Il est mentionné que l'ensemble « corps et frein » contribue à 27 % de la catégorie Santé humaine, alors que partout ailleurs, les freins sont distingués du groupe « corps et portes ». 
- 4.45** Page 41 L'analyse des résultats traite la production de la batterie de la voiture électrique de la même manière que celle de la voiture conventionnelle. Or, ceci laisse à penser qu'il n'y a pas de batterie acide-plomb dans la Nissan Leaf alors qu'il y en a une également. Les auteurs sont invités à confirmer qu'ils ont pris en considération la production de la batterie acide-plomb dans la voiture électrique et à revoir le mode de présentation des résultats pour éviter de faire une comparaison des impacts de la production de la batterie. 
- 4.46** Page 43 Étape de production du véhicule : Selon le graphe à la figure 4-4, l'étape de production du véhicule conventionnel contribue plus que 10 % aux changements climatiques et plus que 12 % à l'épuisement des ressources fossiles. 
- 4.47** Page 43 Étape d'utilisation du véhicule : Selon le graphe à la figure 4-4, la phase d'utilisation du véhicule contribue moins que 89 % à l'impact changements climatiques et moins que 87 % à celui sur l'épuisement des ressources fossiles. 
- 4.48** Page 43 Étape d'utilisation du véhicule : La contribution de 13 % à l'indicateur d'épuisement des ressources minérales est mentionnée deux fois dans la même phrase. 
- 4.49** Pages 39 et 44 Le graphique principal présente les catégories « Épuisement des ressources fossiles » et « Épuisement des ressources minérales » tandis que les graphiques secondaires présentent les catégories « Utilisation d'énergie fossile » et « Utilisation de ressources minérales ». Les auteurs sont invités à uniformiser les appellations et à employer les termes officiels des catégories d'impact. 
- 4.50** Page 45 Les auteurs font référence à la figure 4-5 dans l'encadré « À noter » sans toutefois apporter une interprétation pour le lecteur de ce qu'il doit conclure de cette information additionnelle. Les auteurs doivent fournir une interprétation de cette information pour le lecteur ou retirer la figure et sa référence. Par exemple : quel est le profil des importations québécoises de 



- pétrole? Est-ce qu'il y a un écart important entre ce qui est considéré actuellement dans la base de données ecoinvent utilisée dans l'étude et le profil québécois ?
- 4.51** Page 47 Les auteurs mentionnent que les émissions de CO<sub>2</sub> lors de l'étape d'utilisation sont les principaux contributeurs à la santé humaine. Lorsqu'il est question de santé humaine en lien avec l'utilisation de l'automobile, le public a plus rapidement en tête les émissions de particules fines, de monoxyde de carbone, de COV comme étant dommageables pour la santé humaine plutôt que le CO<sub>2</sub>. Les auteurs sont invités à préciser la raison d'un tel résultat afin de dissiper toute ambiguïté chez le lecteur. 
- 4.52** Page 48 Dans l'énumération des différences d'impacts entre la voiture conventionnelle et la voiture électrique, il faudrait rappeler la contribution de chaque étape au profil environnemental de la voiture. On mentionne que les indicateurs de santé humaine et de qualité des écosystèmes sont de 7 % supérieurs pour la voiture électrique dans l'étape du transport de la voiture. Or cette étape représente moins de 2 % des impacts sur le cycle de vie de la voiture. Au final donc, la différence est très négligeable sur ces deux indicateurs pour l'étape du transport de la voiture. 
- 4.53** Page 50 « Dans les deux cas, l'étape de production des véhicules s'avère le principal responsable ». Il n'est pas clair dans cette affirmation à quoi les auteurs font référence par « dans les deux cas ». Est-ce qu'il s'agit des deux types de véhicules comparés ? 
- 4.54** Page 51 Pour le troisième point de l'encadré « Globalement on retient que... », les auteurs sont invités à revoir la deuxième phrase. Dans le contexte québécois, la production des pièces et de la batterie n'est pas négligeable bien au contraire.   
Il faudrait également préciser que l'on parle de la batterie pour le système de traction de la voiture afin de faire une distinction avec la batterie acide-plomb.
- 4.55** Page 52 Les auteurs doivent revoir l'analyse de la qualité des données d'inventaire. L'interprétation de l'analyse qui est faite ici est trop vague. Les auteurs parlent de « certains processus » et que des données sont « suspectées avoir une faible contribution ». Le lecteur doit pouvoir se faire une meilleure idée de la qualité des données qui ont été utilisées dans l'étude sans avoir à consulter et analyser lui-même l'annexe D. 
- 4.56** Page 54 La première phrase de la section 4.4.2.1 « Durée de vie des véhicules » est à revoir. 
- 4.57** Page 54 La variation de la durée de vie des véhicules ne tient pas compte de leur vie utile. Par exemple : une augmentation significative du kilométrage (300 000 km) doit avoir une influence sur le nombre de batteries nécessaire pour le véhicule électrique. Pourquoi cela n'influence donc pas le flux de référence ? Pourtant elle contribue de 17 % à 32 % aux indicateurs. 
- 4.58** Page 58 La référence de l'OMS 2006 ne figure pas à la fin de l'étude. 
- 4.59** Page 58 Les auteurs sont invités à revoir la phrase « Par conséquent, selon l'OMS, le facteur d'effets du modèle USEtox... ». En effet, si l'OMS s'est prononcée sur le caractère non toxique du Cr(III) comparativement au Cr(VI), elle ne l'a pas faite par rapport au modèle USEtox. Il s'agit de l'interprétation sur le modèle USEtox que font les auteurs de l'étude ACV des propos de l'OMS sur le chrome. 

- 4.60** Page 60 L'interprétation des résultats est à revoir pour l'impact du changement prématuré d'une batterie dans le véhicule électrique. Par exemple, les auteurs mentionnent que pour la qualité des écosystèmes, le véhicule électrique demeure avantageux dans la plupart des scénarios par rapport au véhicule conventionnel. En comparant les résultats de la figure 4-10 à ceux de la figure 4-12, la distance à parcourir avec la voiture électrique, pour que sa préférence à la voiture conventionnelle soit absolue peu importe, le type de conduite passe d'environ 50 000 km à 100 000 km. Il est difficile de dire dans un tel contexte que la voiture électrique demeure préférable à la voiture conventionnelle dans tous les scénarios. 
- 4.61** Page 64 Les auteurs doivent revoir le graphe du bas à la figure 4-14. Aucune des deux barres du graphe pour l'épuisement des ressources minérales n'atteint 100 %. 
- 4.62** Page 69 Les auteurs doivent revoir les conclusions des analyses de sensibilité à la lumière des modifications demandées pour les analyses.   
Le recadrage de l'unité fonctionnelle pour les 10 premières années de vie de la voiture doit également être mentionné au scénario 0.
- 4.63** Page 73 Parmi les perspectives d'amélioration de la comparaison des systèmes, les auteurs pourraient ajouter que l'usage du type de bornes de recharge pourrait être considéré dans une prochaine (ACV), considérant que certains types de bornes, particulièrement les bornes rapides (400 volts) pourront avoir un impact sur la durée des batteries des véhicules électriques. 
- 4.64** Annexe B L'annexe B n'est pas complète et des informations sur la Nissan Leaf sont manquantes pour permettre la comparaison des véhicules (ex. : poids). 
- 4.65** Annexe C Les modules 1.0 Battery pack et 1.2 Battery cells n'ont pas de valeur pour l'électricité consommée durant la production. Les auteurs doivent faire la correction s'il s'agit d'une erreur ou préciser ce que le lecteur doit comprendre de cette absence de valeur. 

# Annexes



## **Annexe 1**

### **Évaluation de la conformité à la norme ISO 14044**

# Évaluation de la conformité à la norme ISO 14044

## 1— EXIGENCES GÉNÉRALES

1.A- Les résultats et conclusions de l'ACV doivent être communiqués de manière complète et précise au public concerné sans parti pris

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Besoin de présenter sommairement dans la conclusion les informations concernant les analyses de sensibilités et les principales incertitudes. Par ailleurs, on indique dans la conclusion que les résultats sont tributaires des conditions d'utilisation, sans venir clarifier les seuils à partir desquels les résultats sont influencés.

1.B- Les résultats, données, méthodes, hypothèses et limites doivent être transparents et présentés de manière suffisamment détaillée pour permettre au lecteur de comprendre les complexités et les compromis inhérents à l'ACV

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

1.C- Le rapport doit permettre d'utiliser les résultats et l'interprétation de manière cohérente avec les objectifs de l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

L'applicabilité au contexte québécois est difficile à observer ou à confirmer en raison des différentes hypothèses et des sources de données étrangères. Il aurait fallu justifier le choix des véhicules dans le contexte québécois. Il faut également mieux positionner les plages de validité des conclusions.

## 2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION

### 2.A ASPECTS GÉNÉRAUX

2.A.1- Identification du commanditaire et réalisateur de l'étude ACV

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Commanditaire : page de couverture (Hydro-Québec)  
Réalisation : page iii (CIRAIG)

2.A.2- Date du rapport

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Page de couverture : Octobre 2015

2.A.3- Indication précisant que l'étude a été réalisée en conformité avec les exigences de la norme ISO 14044

**2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION**

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Il n'est pas mentionné clairement dans le rapport que l'étude a été préparée en conformité avec les exigences de la norme ISO 14044.

**2.B OBJECTIF DE L'ÉTUDE**

## 2.B.1- Raisons ayant conduit à l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

L'objectif de l'étude est décrit, mais pas les raisons de l'étude. Il est mentionné en introduction les différentes recherches effectuées par Hydro-Québec, mais cela ne suffit pas à justifier l'étude.

## 2.B.2- Applications envisagées de l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Divulgence publique par Hydro-Québec.

## 2.B.3- Public concerné

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

« Les résultats de l'étude sont prévus à des fins de divulgation publique par Hydro-Québec » (section 3.1).

## 2.B.4- Indication précisant si l'étude va appuyer des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Section 3.1

**2.C CHAMP DE L'ÉTUDE****2.C.1 FONCTION**

## 2.C.1- La fonction est clairement définie

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Section 3.2

## 2.C.1.i- Des indications quant aux caractéristiques de performance de la fonction sont données

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

La fonction, telle que décrite manque de précision. Le « déplacement d'un ou des passagers » peut nécessiter des véhicules très différents, en fonction du nombre de passagers, ce qui ultimement aura une influence sur les flux de matières.

**2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION**

2.C.1.ii- Toute omission de fonctions supplémentaires dans les comparaisons est traitée

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Section 3.3

**2.C.2 UNITÉ FONCTIONNELLE**

2.C.2 - L'unité fonctionnelle est clairement définie

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Il est assumé qu'un véhicule a une durée de vie de 150 000 km dans l'unité fonctionnelle, ce qui nuit au calcul des flux de référence. Il faudrait que l'UF mentionne une distance annuelle parcourue ou simplement « une distance totale de 150 000 km sur une période de 10 ans ».

2.C.2.i –Le choix de l'unité fonctionnelle est cohérent avec les objectifs et le champ de l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

La fonction faisait référence au déplacement de passagers, sauf qu'aucune considération d'un nombre de passagers n'est faite dans l'unité fonctionnelle. De plus, le choix de l'unité fonctionnelle n'est pas représentatif de l'usage qui est fait du véhicule. Un véhicule est utilisé plusieurs fois pour des trajets qui totalisent sur la durée de vie du véhicule 150 000 km (ou toute autre valeur). En omettant de préciser ce type de trajet dans l'unité fonctionnelle, il n'est pas possible de s'assurer que les systèmes comparés sont équivalents.

2.C.2.ii –Les flux de référence pour chaque scénario sont clairement établis et en accord avec la définition de l'unité fonctionnelle

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Il n'est pas mentionné des flux de référence. Aucune démonstration n'est faite, au-delà de la mise en contexte de l'étude, pour démontrer les flux de référence associés à l'UF, en fonction de la durée de vie des véhicules et des paramètres qui influencent cette dernière.

**2.C.3 FRONTIÈRES DU SYSTÈME**

2.C.3 –Les frontières du système doivent être clairement définies

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Section 3.4.1

2.C.3.i –Les omissions d'étapes du cycle de vie, de processus ou de données sont clairement discutées

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les processus exclus, repris dans le tableau 3-1, ne sont pas justifiés. Il est dur de comprendre la logique derrière ces choix. Par exemple, les matières résiduelles et l'assemblage sont parfois inclus, parfois exclus. Est-ce que les exclusions résultent d'un manque de données ?

2.C.3.ii –Les intrants et extrants énergétiques et matériels sont définis et quantifiés

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Aucune présentation des intrants énergétiques n'est faite dans l'étude de manière suffisamment transparente et accessible pour que le lecteur puisse apprécier la définition des systèmes à l'étude.

**2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION**

2.C.3.iii – Les hypothèses sur la production d'énergie sont présentées et adéquates par rapport aux frontières du système de l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les processus pour lesquels le bouquet électrique québécois a été considéré sont précisés (section 3.5 p.27).

**2.C.4 CRITÈRES D'ALLOCATION**

2.C.4- Les critères d'allocation (massique, énergétique et environnemental) et les hypothèses pour l'introduction initiale des intrants et des extrants sont définis

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Aucune allocation n'est faite.

2.C.4.i- L'effet de la sélection des critères d'allocation sur les résultats est discuté

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

**2.D INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE**

2.D.1- La méthodologie utilisée pour la collecte de données est expliquée

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les références utilisées pour la collecte sont mentionnées, cependant aucune mention n'est faite sur l'adaptation de ces données au contexte québécois ni au changement de véhicules (Classe A vs. Classe B).

2.D.2- Une description qualitative et quantitative des processus élémentaires est faite

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

La description quantitative des processus, fournie dans l'annexe C, semble incomplète.

2.D.3- Les sources de la documentation consultée sont données

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Tableau 3-1 et section 3.5

2.D.4- Le mode de calcul de l'inventaire est présenté

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Il est mentionné que l'analyse de l'inventaire n'apporterait pas de valeur ajoutée à l'étude. Celle-ci n'est donc pas faite (section 3.7.1). Il est également mentionné que l'inventaire a été monté en utilisant le logiciel SimaPro.

2.D.5- La qualité des données utilisées est évaluée



**2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION**

<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	<p>Une explication est fournie sur l'évaluation de la qualité et le résultat de l'analyse est fourni en Annexe D.</p>
<p>2.D.6- Une explication est fournie sur la manière dont les données manquantes sont traitées</p>	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	<p>Il est mentionné que lorsque « des données étaient manquantes, une analyse de sensibilité a été effectuée pour vérifier l'effet des hypothèses et des approximations employées » (section 3.7.4 p 31). Il serait bon de mentionner dans le texte quels sont les processus, pour lesquels des données sont manquantes, car aucune mention n'en est faite, ni dans la section sur l'analyse de sensibilité ni dans celle sur le périmètre.</p>
<p>2.D.7- Une analyse de sensibilité est faite afin de raffiner les frontières du système</p>	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	<p>Présentation des diverses analyses de sensibilité dans le tableau 3-3 et présentation des résultats de ces analyses dans la section 4.4.</p>
<p>2.D.8- Les règles d'allocation sont documentées et justifiées</p>	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	<p>Aucune règle suivie.</p>
<p>2.D.9- Les règles d'allocation sont appliquées de manière uniforme</p>	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
<p><b>2.E ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE</b></p>	
<p>2.E.1- Les modes opératoires, les calculs et les résultats de l'évaluation du cycle de vie sont présentés</p>	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	<p>Méthode Impact World+ (section 3.6)  Les résultats sont fournis (de façon illisible) dans l'annexe E</p>
<p>2.E.2- Les résultats de l'ÉICV respectent les objectifs et le champ de l'étude</p>	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	<p>Les résultats sont présentés individuellement pour chaque scénario et de manière comparée (section 4.2).</p>
<p>2.E.3- La relation entre les résultats de l'ÉICV et les objectifs et le champ de l'étude est discutée</p>	

**2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION**

<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Les principaux contributeurs sont indiqués et les analyses de sensibilité sont effectuées (section 4.1, 4.2 et 4.4)
2.E.4- La relation entre les résultats de l'ÉICV et les résultats de l'inventaire est discutée	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Non, car aucune analyse de l'inventaire n'est faite. Toutefois, la justification de ne pas faire l'analyse de l'inventaire est faite. Il n'y a donc pas de correctif attendu ici de la part des auteurs.
2.E.5- Les catégories d'impacts et les catégories d'indicateurs sont définies, justifiées et référencées	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Les catégories de dommages et d'impacts sont définies (section 3.6), mais aucune justification n'est donnée sur la sélection des catégories d'impacts choisis « dans le but de compléter le profil environnemental ». Une justification devrait être fournie sachant que les catégories choisies font déjà partie d'une catégorie de dommage.
2.E.6- Une description de tous les modèles de caractérisation, des facteurs de caractérisation et des méthodes utilisées, y compris toutes les hypothèses et les limites, est donnée	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	La référence pour avoir de la documentation sur Impact World+ est fournie en note de bas de page, p. 28.
2.E.7- Une description de tous les choix de valeurs utilisés en rapport avec les catégories d'impact, les modèles de caractérisation, les facteurs de caractérisation, la normalisation, le regroupement, la pondération et ailleurs dans l'ÉICV est faite de même qu'une justification de leur utilisation et de leur influence sur les résultats, les conclusions et recommandations	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	De manière générale, les références et les sources pour les catégories d'impacts sont données et sont celles couramment employées. Les auteurs font également une analyse de sensibilité avec le type de méthode d'évaluation des impacts pour démontrer que les choix d'approche ne changent pas les conclusions.
2.E.8- Une indication est faite que les résultats de l'ÉICV soient des expressions relatives et qu'ils ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, les marges de sécurité ou les risques	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Mention faite dans la section 3.6 (p. 29)

**2.F INTERPRÉTATION DU CYCLE DE VIE**

2.F.1- Les résultats sont clairement présentés et interprétés	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'interprétation des principaux contributeurs manque de rigueur entre les différents indicateurs présentés. Parfois, ils sont détaillés, mais pas toujours.

## 2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION

2.F.2- Les hypothèses et les limites associées à l'interprétation des résultats sont présentées en relation avec la méthodologie et les données

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Les limites de l'étude sont présentées en section 4.6

2.F.3- Les résultats sont interprétés en fonction d'une évaluation de la qualité des données

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Annexe D

2.F.4- L'interprétation fait état d'une transparence totale en termes de choix de valeurs, de justifications et d'appréciations d'experts

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

L'interprétation devrait être davantage nuancée pour faire ressortir les conditions où la voiture électrique n'est pas avantagée par rapport à la voiture conventionnelle. Considérant que le mandataire de l'étude est un producteur d'électricité, il est important de démontrer la plage de valider des résultats en toute transparence.

## 2.G REVUE CRITIQUE

2.G.1- Les noms et les affiliations des réviseurs sont clairement identifiés

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Non applicable comme il s'agit de la version pré revue critique. Ceci devra être ajouté au rapport final.

2.G.2- Le(s) rapport(s) du comité de revue critique est (sont) annexé(s) au rapport de l'étude

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Non applicable comme il s'agit de la version pré revue critique. Ceci devra être ajouté au rapport final.

2.G.3- Les réponses des auteurs aux commentaires du comité de revue critique sont annexées au rapport de l'étude

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Non applicable comme il s'agit de la version pré revue critique. Ceci devra être ajouté au rapport final.

### 3- EXIGENCES ADDITIONNELLES EN MATIÈRE DE COMMUNICATION DANS LE CAS D'UNE AFFIRMATION COMPARATIVE DESTINÉE À ÊTRE DIVULGUÉE AU PUBLIC

<p>3.A.- Une analyse des flux de matière et d'énergie est faite afin d'en justifier leurs inclusions ou exclusions</p> <p><input type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input checked="" type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Aucune information sur les flux de matières n'est fournie.</p>
<p>3.B - Une évaluation de la précision, de la complétude et de la représentativité des données utilisées est faite</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Oui. Annexe D</p>
<p>3.C.- Une description de l'équivalence des systèmes comparés est faite</p> <p><input type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input checked="" type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Différents critères sont présentés dans la mise en contexte pour caractériser les véhicules, mais aucune comparaison des deux modèles n'est réellement faite pour justifier l'équivalence, selon ses critères. Les fiches descriptives des véhicules (incomplètes) sont fournies à titre de justification.</p>
<p>3.D.- Le processus de revue critique est décrit</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Section 3.8</p>
<p>3.E.- Une évaluation de la complétude de l'ÉICV est faite</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Section 4.3 et Annexe D</p>
<p>3.F.- Une mention est faite de l'acceptation internationale des indicateurs de catégorie utilisée, de même qu'une justification de leur utilisation</p> <p><input type="checkbox"/> Exigence respectée  <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Cette mention devrait être faite au sujet d'Impact World+ dans la section 3.6</p>
<p>3.G - Une explication est donnée quant à la validité scientifique et technique de même que la pertinence environnementale des indicateurs de catégories utilisés</p> <p><input type="checkbox"/> Exigence respectée  <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Cette explication n'est pas donnée dans le rapport</p>

### 3- EXIGENCES ADDITIONNELLES EN MATIÈRE DE COMMUNICATION DANS LE CAS D'UNE AFFIRMATION COMPARATIVE DESTINÉE À ÊTRE DIVULGUÉE AU PUBLIC

3.H - Les résultats d'une analyse d'incertitude et d'une analyse de sensibilité sont présentés

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Aucune donnée n'est fournie sur l'analyse d'incertitude, en raison de problèmes intrinsèques à la base de données, hormis l'analyse de sensibilité avec RECIPE (voir section 3.7.6).

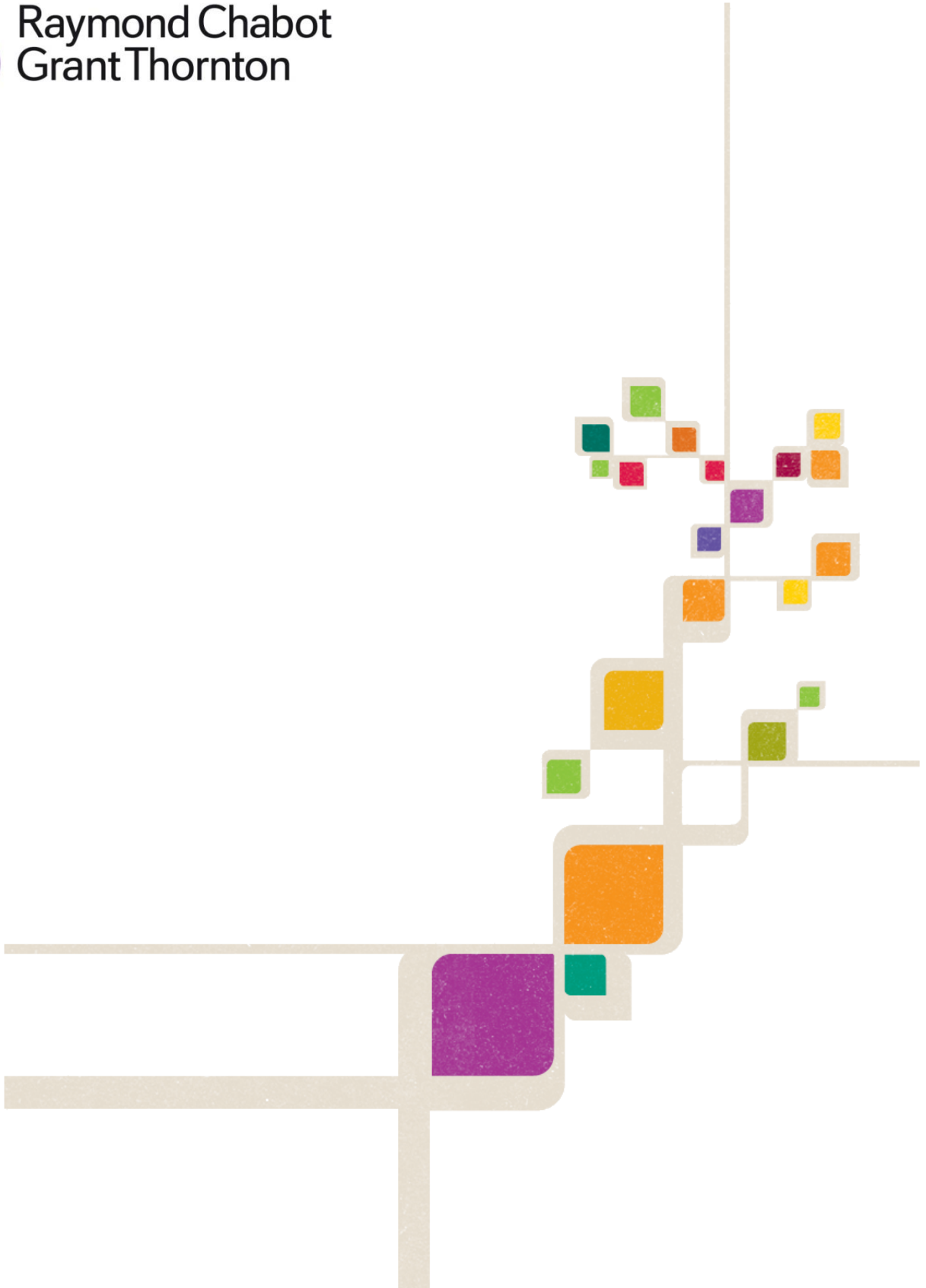
3.I - Si des différences sont trouvées par rapport aux résultats d'autres études similaires, une évaluation de la signification de ces différences est faite

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Les résultats des études similaires sont présentés sommairement dans le tableau 2-10 (p. 16), mais aucune comparaison des résultats de cette analyse n'est faite par rapport à la littérature.



Raymond Chabot  
Grant Thornton



## Réponses aux réviseurs

### Revue critique de l'étude « ANALYSE DU CYCLE DE VIE COMPARATIVE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POTENTIELS DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE ET DU VÉHICULE CONVENTIONNEL DANS UN CONTEXTE D'UTILISATION QUÉBÉCOIS »

<b>Auteurs</b>	CIRAIG Pierre-Olivier Roy, Ph.D. Jean-François Ménard
<b>Date</b>	Janvier 2016

Le présent document présente les réponses du CIRAIG aux commentaires des réviseurs sur le rapport « Analyse du cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois ».

Les réponses sont présentées dans l'ordre, et identifiées par les numéros de commentaires du comité de revue (rapport du 20 janvier 2016). Se référer à ce rapport pour connaître la teneur des questions et commentaires.

No	Réponse du CIRAIG – Commentaires généraux
3.1	<p>La comparaison des véhicules ne vise pas deux modèles de véhicules précis. Tel que stipulé dans la première version du rapport, « les véhicules se veulent des exemples (ou modèles) représentatifs de véhicules comparables ». Il s'agit donc avant tout d'une comparaison entre un véhicule conventionnel X et un véhicule électrique Y.</p> <p><u>L'objectif n'est donc pas de comparer la Nissan Leaf avec la Mercedes-Benz classe A mais bien de comparer des véhicules aussi similaires que possible retrouvés au Québec.</u></p> <p>Nous avons donc amélioré la description des caractéristiques des divers véhicules conventionnels et 100 % électriques retrouvés au Québec. Les autres types de véhicules électriques sont à l'extérieur des objectifs de l'étude.</p> <p>Nous avons tenté de représenter le plus fidèlement possible le contexte québécois : avec les spécificités rapportées de modèles de véhicules : modèles les plus vendus ou immatriculés. Toutefois, les données détaillées d'inventaire nécessaires à l'étude, particulièrement pour l'étape de production, proviennent de l'étude de Hawkins qui s'est basée sur la Nissan Leaf et la Mercedes-Benz classe A (un modèle qui n'est pas vendu au Québec). Dans un tel contexte, il ne serait pas surprenant de voir des données d'inventaire différer entre les divers types de modèles, mais il est considéré que les données de Hawkins s'avèrent tout de même représentatives.</p> <p><b>Action : Le texte du rapport a été amendé afin de mieux représenter cette réalité. Certaines informations techniques non essentielles à la compréhension de l'étude ont été retirées. Certaines spécifications des véhicules ont été présentées ainsi que leur popularité sur le marché québécois.</b></p>
3.2	<p>La durée de vie peut effectivement excéder 150 000 km. Tel que nous l'avions rapporté au Tableau 2-8, 80 % des véhicules en circulation au Québec ont moins de 10 ans (et ont donc parcouru moins de 150 000 km) tandis que 20 % ont dépassé cette limite. La distance parcourue de 150 000 km équivaut au kilométrage moyen parcouru par un véhicule après 10 ans. Cette distance parcourue correspond également à une perte de capacité de la batterie de 80%.</p>

No	Réponse du CIRAIG – Commentaires généraux
	<p><b>Action : L'unité fonctionnelle a été modifiée elle peut maintenant se lire comme suit :</b>  <i>Se déplacer au Québec sur 150 000 km avec un véhicule mis sur le marché en 2013.</i></p> <p><b>Cette unité fonctionnelle aurait donc un flux de référence de : 1 véhicule 100 % électrique et conventionnel. Pour cette distance, le véhicule aurait en moyenne 10 ans en considérant une distance annuellement parcourue de 15 000 km. À ce moment, la capacité de recharge de la batterie serait équivalente à près de 80%.</b></p>
3.3	<p><b>Action : l'interprétation des résultats a été révisée</b></p>
3.4	<p><b>Action : la conclusion de l'étude a été révisée afin de bien mettre en évidence que le bénéfice environnemental du véhicule électrique augmente avec la durée de vie, mais qu'il y a une distance minimale à atteindre pour que le bénéfice environnemental soit réalisé.</b></p>
3.5	<p>Ce commentaire réfère à l'analyse de sensibilité effectuée sur la durée de vie des batteries. Cette analyse de sensibilité a été présentée uniquement dans le but de répondre à la question « oui, mais si la batterie n'avait pas la durée de vie indiquée ». De plus, elle permet de voir l'effet d'ajouter une batterie sur la durée de vie du véhicule électrique (300 000 km).</p> <p><b>Action : Un texte explicatif a été ajouté afin de faire comprendre au lecteur que cette analyse de sensibilité représente un changement de la batterie au cours de la durée de vie du véhicule électrique.</b></p>
3.6	<p>Effectivement, selon les informations disponibles, l'autonomie des véhicules électriques va augmenter tandis que la consommation de carburant des véhicules conventionnels devrait être réduite.</p> <p><b>Action : Une analyse/explication plus poussée a été ajoutée afin de détailler les habitudes de déplacement des automobilistes et de l'autonomie des véhicules électriques. De plus, il a été précisé que les conclusions de l'étude ne sont pas représentatives des modèles de véhicules dont les caractéristiques diffèrent significativement des véhicules investigués.</b></p> <p><b>Une mention a également été faite à la section « limites de l'étude ».</b></p>
3.7	<p>Le CIRAIG et le mandataire de la présente étude reconnaissent les défis associés à la communication et à la vulgarisation des résultats d'ACV. Un tel rapport technique devrait idéalement être accompagné d'outils de communication,</p> <p><b>Action : Le mandataire de l'étude, en collaboration avec le CIRAIG, pourra identifier des moyens de communication et de diffusion des résultats afin d'en faciliter la compréhension par un public non-spécialisé en ACV.</b></p>
3.8	<p>Bien qu'elle n'ait pas été mentionnée spécifiquement, la résistance de roulement des pneus, comme plusieurs autres caractéristiques pouvant affecter la consommation électrique ou de carburant, a été considérée implicitement dans le rapport.</p> <p>En effet, les valeurs de consommation énergétique rapportées par Ressources Naturelles Canada, particulièrement celles de 2015, tiennent compte des conditions plus réelles de conduite des automobilistes. La consommation énergétique a été ajustée en conséquence.</p> <p>De plus, l'étude d'Hydro-Québec présentant la consommation énergétique de nombreux véhicules électriques (iMiev), testés au Québec en situation réelle, tenait compte de la caractéristique des pneus et de toutes les autres caractéristiques qui n'ont pas été explicitement mentionnées, et ce sur une période de 1 an.</p> <p>De plus, considérant que la consommation énergétique du véhicule électrique n'a que très peu d'influence sur les conclusions de la comparaison entre les deux véhicules, l'omission d'une caractéristique qui aurait pour effet d'augmenter la consommation du véhicule électrique ne nous apparaît pas importante dans un contexte d'utilisation québécois, en raison des faibles impacts potentiels du bouquet électrique québécois.</p> <p><b>Action : Une note explicative a été ajoutée à cet effet.</b></p>
3.9	<p>Il est vrai qu'il y a une différence importante au niveau de l'entretien d'un véhicule électrique et conventionnel.</p> <p>Ainsi, contrairement à l'étude réalisée par Hawkins et coll., le CIRAIG a considéré les changements d'huile pour le véhicule conventionnel (le tableau 3-1 précise une consommation d'huile de 0,8 L/1000 km). Les autres éléments associés à l'entretien des véhicules ont été considérés équivalents. Considérant que cette</p>



No	Réponse du CIRAIG – Commentaires généraux
	<p>étape contribue très faiblement aux impacts potentiels totaux, il est présumé que les éléments d'entretien autres que les changements d'huile présenteraient des impacts négligeables.</p> <p>Pour ce qui est de la borne de recharge, il est vrai que toutes ses composantes n'ont pas été considérées, faute d'informations supplémentaires, et ce point a été clairement identifié comme une limite à l'étude. Des efforts de collecte supplémentaire ont été effectués afin de mieux représenter la borne dans cette nouvelle version. Dans les deux versions du rapport, la borne de recharge ne contribue que marginalement aux impacts potentiels.</p>

No	Réponse du CIRAIG – Commentaires spécifiques
4.1	<b>Action : le terme « score d'impact » a été retiré du rapport au profit du terme « impact potentiel », « résultat d'indicateur de catégorie d'impact », « résultat d'indicateur de catégorie » ou « résultat d'indicateur » selon le contexte afin d'alléger le texte.</b>
4.2	<b>Action : le texte a été uniformisé : « analyse comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique et du véhicule conventionnel »</b>
4.3	<b>Action : la mention de l'âge des données (2013) a été retirée du sommaire afin de mettre en évidence la volonté de comparer un véhicule électrique Y et un véhicule conventionnel X.</b>
4.4	<b>Action : la citation ainsi que la référence ont été modifiées</b>
4.5	<b>Action : À la suite du changement de référence et de citations, il ne semble plus nécessaire d'inclure une spécification quant à la statistique présentée auparavant. Cette dernière a donc été retirée.</b>
4.6	<b>Action : les données GES spécifiques au transport routier ont été retirées de l'introduction. Le détail de la consommation énergétique par élément du secteur du transport a toutefois été ajouté au Tableau 2-1.</b>
4.7	<b>Action : la référence a été ajoutée</b>
4.8	<b>Action : une date de référence a été ajoutée</b>
4.9	<b>Action : une référence a été ajoutée</b>
4.10	Le tableau n'avait effectivement pas la prétention de ne présenter que le transport routier léger. Suivant la recommandation du comité, le tableau a été modifié. <b>Action : la part de la consommation énergétique du transport routier a été ajoutée aux statistiques présentées.</b>
4.11	Les valeurs ne correspondent effectivement pas directement aux valeurs fournies par le MERN 2013 puisqu'il s'agit de résultats de calculs basés sur les statistiques du MERN. <b>Action : une mention à cet effet a été ajoutée au titre du tableau.</b>
4.12	<b>Action : Les pertes d'électricité sur le réseau de transport et de distribution ont été retirées du tableau, mais ont néanmoins été prises en compte dans l'étude.</b>
4.13	Un amendement a été apporté au rapport en fonction d'une information récemment publiée à savoir que le nombre de cycles établis (près de 2000) représentent une perte de la capacité de charge de 20-25% de la batterie. Cette dernière pourrait toutefois encore permettre la plupart des déplacements de la population québécoise. <b>Action : Une section a été ajoutée sur les habitudes de déplacement des Québécois ainsi que de plus amples informations sur la perte de capacité de la batterie. En fonction de ces informations, il apparaît que la durée de vie de la batterie pourrait être établie au-delà de 150 000 km et même au-delà de 300 000 km si la distance moyenne parcourue quotidiennement se limite à moins de 40 km (c.-à-d. la distance moyenne parcourue quotidiennement par les Québécois).</b>
4.14	La figure présente une appréciation qualitative des divers types de batteries disponibles. Aucune des caractéristiques rapportées n'étant prises en compte dans l'étude ACV, cette figure et le texte accompagnateur ont été retirés du rapport. Ne cherchant pas à représenter un modèle de véhicule particulier, nous avons étudié l'utilisation potentielle de deux types de batteries soit la batterie «LiNCM » dans le scénario de base et la batterie « LiFePO4 » en analyse de sensibilité. <b>Action : La figure et le texte accompagnateur ont été retirés du texte.</b>
4.15	<b>Action : La figure a été retirée selon la suggestion du comité de revue</b>
4.16	Il y a une perte d'autonomie l'été de 5 km correspondant à une consommation électrique moyenne de 14 kWh/100 km Il y a une perte d'autonomie au printemps et à l'automne de 13 km correspondant à une consommation électrique moyenne 18 kWh/100 km

No	Réponse du CIRAIG – Commentaires spécifiques
	<p>Il y a finalement une perte d'autonomie l'hiver de 40 % correspondant à une consommation électrique moyenne de 22 kWh/100 km</p> <p>La plus faible perte d'autonomie est associée à la plus faible consommation énergétique. Il n'y a aucune incohérence entre ces valeurs saisonnières.</p> <p><b>Action : Des précisions ont été apportées au texte de la section 2.2.1.</b></p>
4.17	<p>L'objectif de présenter les conclusions de l'étude menée par Hydro-Québec est de démontrer l'influence des conditions réelles d'utilisation sur la performance du VÉ au Québec. Cette étude, bien que réalisée avec la i-Miev, corrobore l'hypothèse de consommation accrue d'énergie par le VÉ dans des conditions réelles (par rapport à une consommation annoncée). Cette hypothèse de consommation plus élevée est appliquée au VÉ « générique » utilisé dans le cadre de la présente étude (idem pour le VC).</p> <p><b>Action : Une précision a été apportée au texte afin de mieux expliquer la raison de ces informations. Toutefois, nous avons reconnu que les tests réalisés par Hydro-Québec ne sont pas avec le même modèle de véhicule. C'est pourquoi nous avons présenté le Tableau 2-5 présentant les valeurs de divers véhicules et que nous avons utilisé la plage de valeurs de consommation correspondant aux divers véhicules électriques et non pas uniquement les valeurs associées à la Mitsubishi i-MiEv ou à la Nissan Leaf.</b></p> <p><b>La comparaison des véhicules ne vise pas des véhicules électriques spécifiques, mais bien un véhicule électrique Y. La consommation électrique de 13 à 24 kWh/100 km couvre l'étendue des valeurs répertoriées pour les différents modèles de véhicules et obtenues dans des conditions d'utilisation réelles.</b></p>
4.18	<b>Action : Les saisons durent 3 mois</b>
4.19	<b>Action : les unités ont été ajoutées</b>
4.20	<b>Action : La notion d'autonomie du véhicule a trait aux habitudes de déplacement des Québécois qui ont été décrites dans cette nouvelle version du rapport. Une note à cet effet a été ajoutée.</b>
4.21	<p>Il est généralement accepté en ACV de fonctionner avec un scénario de base comprenant les meilleurs estimés pour les divers paramètres. En effet, la consommation électrique du véhicule électrique a été fixée en scénario de base, mais plusieurs valeurs ont été testées en analyse de sensibilité.</p> <p><b>Action : une note, dans la section modèle ACV, a été ajoutée afin mettre en évidence la différence entre le scénario de base et les scénarios alternatifs.</b></p>
4.22	<p>Aucune autre affirmation n'est fournie pour les autres catégories d'impacts puisque les résultats pour ces catégories (dans plusieurs contextes géographiques) n'ont pas été calculés par les auteurs des études citées. Par conséquent, seuls les résultats pour les émissions de GES sont présentés dans la section revue de littérature.</p> <p><b>Action : une mention sur l'absence des autres catégories d'impacts a été ajoutée</b></p>
4.23	<p>Depuis la production de l'étude et sa remise au Comité de revue critique, la Commission de coopération environnementale a publié, en décembre 2015, une importante étude intitulée <i>Gestion écologiquement rationnelle des batteries en fin de cycle de vie provenant des véhicules à propulsion électrique en Amérique du Nord</i>.</p> <p>Comme son titre l'indique, cette étude dresse un portrait exhaustif de la gestion actuelle des batteries de véhicule électrique au Canada. Il est maintenant plus facile d'identifier un scénario de gestion des batteries en fin de vie.</p> <p><b>Action : À ce titre, nous avons remplacé le scénario de gestion en fin de vie par un procédé de traitement par hydrométallurgie dans une usine située en Colombie-Britannique.</b></p> <p><b>De plus, en analyse de sensibilité, nous avons remplacé le scénario « enfouissement » par un scénario par cryogénération et pyrométallurgie, couvrant ainsi les trois technologies de recyclage des batteries spécifiées par le US EPA.</b></p>
4.24	<b>Action : aucune</b>
4.25	<p>Les données de l'étude de l'OEE 2012, datant de 2008, sont critiquables puisque : 1) la récente percée en terme d'efficacité énergétique déployée dans les dernières années n'est pas prise en considération et 2)</p>

No	Réponse du CIRAIG – Commentaires spécifiques
	<p>il n'est pas précisé dans le document ce qui est considéré comme « véhicule léger » et cette catégorie potentiellement inclut des véhicules qui ne sont en rien comparables avec les véhicules électriques (p. ex. mini-fourgonnette, modèle plus gros et plus luxueux, utilitaire-sport?)</p> <p><b>Action : les véhicules considérés sont ceux qui ont été le plus vendus au Québec ou le plus immatriculés. Ceci exclut les véhicules qui ne seraient pas 100% électriques et les véhicules de type camionnette, mini-fourgonnette, VUS, etc.</b></p>
4.26	<p><b>Action : la phrase a été reformulée pour dire que près de 80 % des véhicules ont parcouru moins de 150 000 km et 20 % plus de 150 000 km en moyenne.</b></p>
4.27	<p>Pour ce qui est du lieu d'origine des véhicules, il n'est pas associé à la marque, mais au lieu de fabrication. De plus, l'étude visant la comparaison de deux modèles de véhicule génériques, il nous apparaît plus judicieux de sélectionner le lieu de provenance des véhicules retrouvés au Québec (provenant majoritairement du Japon et des États-Unis) plutôt que des lieux de production de modèles spécifiques.</p> <p><b>Action : les références ont été revues. Certaines données avaient été corrélées avec de mauvais documents de références. De plus, si des documents un plus récents étaient disponibles ils ont été utilisés (p. ex. SAAQ 2015 plutôt que SAAQ 2014)</b></p>
4.28	<p><b>Action : Les données du marché des véhicules ont été présentées dans un nouveau tableau afin de tenter de représenter les caractéristiques des véhicules les plus vendus au Québec (ou immatriculés).</b></p>
4.29	<p>Pour pouvoir conclure qu'un produit est avantagé (ou favorisé) par rapport à un autre, il faut que TOUTES les catégories d'impacts environnementaux considérées favorisent ledit produit. Si une seule catégorie d'impact est considérée, cette situation ne peut se produire d'où le fait qu'une étude peut arriver à favoriser le véhicule électrique.</p> <p>Dans le cas des autres études, tel que stipulé, les diverses catégories d'impacts favorisent l'un ou l'autre type de véhicule.</p> <p><b>Action : une note explicative à cet effet a été ajoutée</b></p>
4.30	<p>Il est de notre avis que l'unité fonctionnelle telle que légèrement remaniée permet effectivement de faire une réelle comparaison des véhicules :</p> <p><b><i>Se déplacer au Québec sur 150 000 km avec un véhicule mis sur le marché en 2013.</i></b></p> <p>De plus, cette unité fonctionnelle est à peu de choses près identique à toutes les unités fonctionnelles rapportées dans la littérature portant sur la comparaison de véhicules conventionnels et électriques.</p> <p>De plus, en ACV, il est nécessaire que l'unité fonctionnelle puisse être fournie par les produits étudiés, mais les conditions et les circonstances dans lesquelles la fonction est réalisée peuvent différer. Il est vrai que l'autonomie par plein d'énergie (essence ou électricité) et le temps nécessaire pour faire le plein d'énergie des véhicules font en sorte que la fonction ne peut être réalisée de manière identique par les deux véhicules.</p> <p><b>Action : un paragraphe a été ajouté pour présenter les habitudes de déplacements des automobilistes, l'autonomie des véhicules de même que les habitudes de recharge des véhicules électriques.</b></p> <p><b>Les commentaires du comité de revue critique peuvent facilement être répondus sans qu'ils soient considérés dans l'unité fonctionnelle en tant que telle.</b></p> <p><b>En effet :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Considérant que la vitesse maximale du véhicule électrique va au-delà des limites de vitesses sur les routes québécoises (valeurs ajoutées dans le rapport), le temps de déplacement sera approximativement le même.</b></li> <li>• <b>Tel que spécifié dans les hypothèses de travail, le trajet effectué par un déplacement en voiture est inférieur à l'autonomie de la batterie.</b></li> <li>• <b>La somme de tous les déplacements équivaut à 150 000 km.</b></li> </ul>
4.31	<p><b>Action : le texte a été modifié selon les commentaires du comité de revue critique</b></p>
4.32	<p><b>Action : sans spécifier exactement qu'ils étaient des flux de références, de nouvelles informations ont été ajoutées sous l'unité fonctionnelle spécifiant :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Le trajet effectué lors d'un déplacement en voiture est inférieur à l'autonomie de la batterie ;</b></li> </ul>

No	Réponse du CIRAIG – Commentaires spécifiques
	<p>ce qui semble plausible considérant que la moyenne des déplacements quotidiens des Québécois se situe à près de 40 km/jour. Le déplacement ne considère donc pas le temps nécessaire à la recharge du véhicule qui sera effectuée au préalable à la maison ou au travail;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La somme de tous les déplacements quotidiens équivaut à des déplacements annuels de 15 000 km. Ainsi, la distance de 150 000 km serait atteinte après une période d'utilisation du véhicule équivalente à près de 10 ans;</li> <li>• Au terme des déplacements équivalents à 150 000 km, la batterie du véhicule électrique aura une capacité de 80% (comparativement à la capacité originale);</li> <li>• Les limites de vitesse en vigueur au Québec seront respectées; ce faisant le temps de déplacement sera approximativement le même pour les deux véhicules puisque les vitesses maximales atteintes par les véhicules sont supérieures aux limites de vitesse;</li> <li>• Le même nombre de passagers (de même masse) déplacés.</li> </ul>
4.33	<p>L'objectif de l'étude n'est pas de présenter une comparaison directe de la Nissan Leaf et de toutes ses spécifications précises, mais bien un éventail de possibilités représentatives des véhicules électriques. Dans une telle éventualité, la spécification de la batterie utilisée dans la Nissan Leaf n'est pas nécessaire. Toutefois, Hawkins et coll. ont utilisé une batterie LiFePO4 dans leur inventaire détaillé de la Nissan Leaf bien qu'ils y rapportent certaines lacunes en termes de données. C'est pourquoi nous avons privilégié l'inventaire de la batterie LiNCM pour lesquelles les données d'inventaires seraient de meilleures qualités dans notre scénario de base.</p> <p><b>Action : aucune</b></p>
4.34	<p><b>Action : Le vocabulaire a été modifié. Plutôt que de dire que le processus a été exclu (des données primaires), nous avons spécifié ce qui provenait directement de l'étude de Hawkins de ce qui provenait de la base de données <i>ecoinvent</i></b></p>
4.35	<p>La distance moyenne de transport du pétrole est incluse dans l'évaluation.</p> <p><b>Action : le tout a été spécifié</b></p>
4.36	<p>Il est évident que considérer le même processus d'entretien pour les deux types de véhicules est erroné. Le 35% d'économie, stipulé par le comité de revue, fait probablement référence, en grande partie, aux changements d'huile; processus qui avait déjà été considéré dans le cas du véhicule conventionnel (mais évidemment pas dans le cas du véhicule électrique).</p> <p>Outre le changement d'huile, le pire cas pour le véhicule électrique serait d'avoir le même entretien que le véhicule conventionnel. En l'absence de données plus précises sur les données d'inventaire de l'entretien spécifique au véhicule électrique, ce pire cas a été considéré. Toutefois, considérant que la contribution de l'étape d'entretien s'est avérée faible pour le véhicule conventionnel et le véhicule électrique, ce pire cas ne s'avère donc pas problématique.</p> <p><b>Action : une note à cet effet a été ajoutée au rapport</b></p>
4.37	<p>Une telle comparaison n'est pas nécessaire puisque nous ne comparons pas la Mercedes Benz Classe A ou B avec la Nissan Leaf.</p> <p><b>Action : aucune</b></p>
4.38	<p>Plusieurs des commentaires font référence à une comparaison directe entre la Nissan Leaf et la Mercedes Benz classe A. La nouvelle version du présent rapport présente les véhicules électrique et conventionnel de façon plus générique. Plusieurs des commentaires ont également été traités auparavant. Nous ne répondons ici qu'à ceux qui n'ont pas encore été traités.</p> <p>Il existe une limitation importante, tel que stipulé avec transparence, pour ce qui est de la borne de recharge. Nous avons contacté, par l'intermédiaire d'Hydro-Québec, les fournisseurs officiels des bornes retrouvés au Québec et la seule donnée d'inventaire qu'ils nous ont transmis est la masse totale de la borne. Nous n'avons aucune appréciation des composantes.</p> <p><b>Action : une note à cet effet a été ajoutée.</b></p> <p>Pour la fin de vie des batteries, nous n'avons trouvé aucune contre-indication quant à l'utilisation du processus de fin de vie</p> <p><b>Action : Aucune</b></p>

No	Réponse du CIRAIG – Commentaires spécifiques
	<p>Mauvais numéro de tableau</p> <p><b>Action : le numéro du tableau de référence a été ajusté</b></p>
4.39	<p>Tel que stipulé, il s'agit de catégories d'impacts utilisées afin de compléter l'évaluation des impacts. À l'heure actuelle, il n'y a pas de catégorie de dommage pour les ressources dans IMPACT World +. Ainsi pour donner un aperçu de cette problématique nous les avons incluses.</p> <p>Pour ce qui est du changement climatique, tel que stipulé, le fait d'inclure ses effets dans la modélisation des impacts potentiels sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes et d'agréger cette catégorie d'impact au sein des deux catégories de dommages empêche une comparaison avec les résultats rapportés pour cette catégorie d'impact par d'autres études et/ou empêche de ne connaître que les impacts associés au changement climatique; un élément non négligeable lorsqu'il est question d'énergie.</p> <p><b>Action : Aucune.</b></p>
4.40	<p><b>Action : la référence à l'année 2015 a été retirée</b></p>
4.41	<p><b>Action : la référence au tableau a été corrigée</b></p>
4.42	<p><b>Action : la nouvelle version du rapport présente une évaluation théorique de la distance parcourue en fonction de la perte de capacité permettant de satisfaire les déplacements d'une majorité de la population québécoise, et ce, au-delà de 300 000 km</b></p>
4.43	<p><b>Action : le niveau de détail a été uniformisé</b></p>
4.44	<p>Il s'agit d'une erreur. Il s'agit de l'appellation corps et porte</p> <p><b>Action : l'appellation a été corrigée</b></p>
4.45	<p>Il existe bien une batterie plomb-acide dans la Nissan Leaf. Toutefois, il n'existe pas de mention à l'effet qu'une batterie acide-plomb se retrouve d'emblée sur les autres types de véhicules électriques. Considérant que nous ne comparons pas directement la Nissan Leaf, nous ne l'avons pas considéré.</p> <p>Même si nous devons l'intégrer, la batterie Pb-acide a été montré comme étant un contributeur très marginal pour le véhicule conventionnel et n'aurait ainsi aucune incidence sur les conclusions de l'étude.</p> <p><b>Action : Aucune</b></p>
4.46	<p><b>Action : la correction a été apportée</b></p>
4.47	<p><b>Action : la correction a été apportée</b></p>
4.48	<p><b>Action : La répétition a été retirée</b></p>
4.49	<p><b>Action : Les termes ont été uniformisés</b></p>
4.50	<p>La figure comportait à la base un trait hachuré présentant les émissions de GES considérés par le cycle de vie du pétrole moyen mondial dans la base de données <i>ecoinvent</i>. Ce trait hachuré ne semble pas être visible dans la version reçue par le comité de revue critique.</p> <p><b>Action : le trait hachuré est maintenant visible et une interprétation sommaire a été ajoutée.</b></p>
4.51	<p><b>Action : Une explication à cet effet a été ajoutée</b></p>
4.52	<p><b>Action : le pourcentage d'impact du cycle de vie a été ajouté au texte</b></p>
4.53	<p><b>Action : la phrase a été modifiée</b></p>
4.54	<p><b>Action : le point a été modifié</b></p>
4.55	<p><b>Action : l'interprétation a été modifiée</b></p>
4.56	<p><b>Action : la phrase a été modifiée</b></p>
4.57	<p>Il a été montré qu'il était théoriquement possible que la durée de vie de la batterie puisse aller au-delà de la durée de vie du véhicule. L'évaluation des conséquences d'un changement de la batterie a toutefois été évaluée dans une analyse de sensibilité.</p> <p><b>Action : Aucune</b></p>

No	Réponse du CIRAIG – Commentaires spécifiques
4.58	<b>Action : La référence a été ajoutée</b>
4.59	<p>Nous ne tirons aucune conclusion par nous-mêmes. Nous ne faisons que mentionner que les résultats du modèle USEtox laissent sous-entendre des problèmes toxicologiques associés aux émissions de Chrome (VI) tandis que l’OMS juge que le Chrome (VI) n’a pas d’effet toxicologique. Dans un tel cas, les résultats ACV seraient affectés tels que présentés dans l’étude.</p> <p><b>Action : Une reformulation de phrase a été effectuée</b></p>
4.60	<b>Action : L’interprétation des résultats a été revue</b>
4.61	<b>Action : le graphe a été revu</b>
4.62	<b>Action : les conclusions des analyses de sensibilité ont été revues en fonction des commentaires du comité de revue critique.</b>
4.63	<b>Action : la perspective d’amélioration a été ajoutée</b>
4.64	<b>Action : l’Annexe B a été éliminée</b>
4.65	<p>Il ne s’agit pas d’une erreur ou d’une omission. La valeur de l’électricité pour le processus « 1.0 Battery pack » et « 1.2 Battery cells » sont présents. L’indentation des valeurs ne sont toutefois pas la même que dans le cas des autres valeurs pouvant donner l’illusion qu’il n’y a pas de valeurs pour l’électricité. En effet, le fichier n’a pas reconnu la formule (avec raison) comme une valeur.</p> <p><b>Action : Aucune</b></p>



Raymond Chabot  
Grant Thornton

# Rapport final

Revue critique d'une étude comparative d'analyse du cycle de vie  
entre une voiture conventionnelle et une voiture électrique

Présenté à :

**Hydro-Québec**

19 avril 2016







# Raymond Chabot Grant Thornton

Le 19 avril 2016

Monsieur Christian Turpin  
Conseiller- Performance environnementale  
**Hydro-Québec**  
75, boulevard René-Lévesque Ouest, 2<sup>e</sup> étage  
Montréal (Québec) H2Z 1A4

**Raymond Chabot Grant Thornton & Cie**  
S.E.N.C.R.L.  
Bureau 2000  
Tour de la Banque Nationale  
600, rue De La Gauchetière Ouest  
Montréal (Québec) H3B 4L8

Téléphone : 514 878-2691  
Télécopieur : 514 878-2127  
[www.rcgt.com](http://www.rcgt.com)

**Objet : Rapport – Revue critique d'une étude comparative d'analyse du cycle de vie entre une voiture conventionnelle et une voiture électrique**

Monsieur,

Le comité de revue critique a complété la revue de l'étude d'analyse de cycle de vie (ACV) comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois que le CIRAIG a réalisée pour le compte d'Hydro-Québec. La revue critique d'une étude ACV est un exercice ayant pour objectif d'assurer que l'étude et son rapport répondent aux exigences de la norme ISO 14044. Le travail du comité ne consiste pas à approuver ou non la divulgation de l'étude à un public externe. Cette décision revient aux mandataires de l'étude.

Le comité salue le travail fait par les auteurs de l'étude pour répondre aux questions et commentaires du comité à la suite de la lecture de la première version du rapport de cette étude. La version d'avril 2016 de ce rapport fait état d'une analyse approfondie des enjeux environnementaux en lien avec le cycle de vie d'une voiture à moteur conventionnel et d'une voiture entièrement électrique. Si les résultats de l'étude sont dépendants de plusieurs hypothèses faites par les auteurs, les nombreuses analyses de sensibilité permettent d'apporter un éclairage adéquat sur la limite de validité des résultats advenant des variations dans ces hypothèses. Dans un contexte où, autant pour la voiture conventionnelle que la voiture électrique, la multitude des modèles disponibles sur le marché et la grande variabilité dans les habitudes de conduite de la population font en sorte qu'il est difficile d'établir un binôme unique voiture conventionnelle/voiture électrique, ces analyses de sensibilité donnent tous les sens à l'étude.

Le comité considère que dans sa version d'avril 2016, le rapport de l'étude ci-dessus mentionnée respecte les exigences de la norme ISO 14044. Vous trouverez en annexe à notre rapport la grille d'analyse du rapport de l'étude en lien avec les exigences de cette norme.

Finalement, nous apportons dans notre rapport un certain nombre d'éléments que nous considérons qui devraient être modifiés avant l'utilisation du rapport pour des fins publics. Selon le comité, ces modifications ne devraient pas apporter de changements significatifs aux résultats de la présente

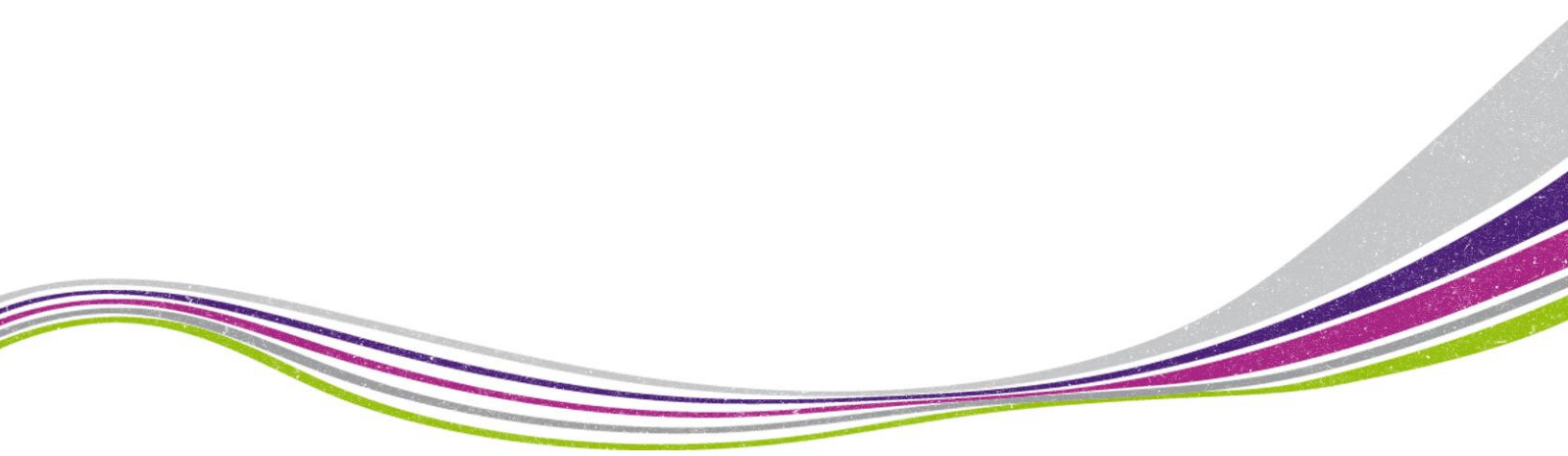
version du rapport. Toutefois, ces modifications permettront de mieux camper le contexte de l'étude. C'est pourquoi nous recommandons fortement que les auteurs de l'étude procèdent à ces modifications.

Pour toute information supplémentaire, n'hésitez pas à communiquer avec la soussignée au 514 390-4158 ou avec le président du comité de revue critique, monsieur Gontran Bage, au 514 393-4849.

Veuillez agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments distingués.

*Raymond Chabot Grant Thornton & Cie S.E.N.C.R.L*

Johanne Gélina  
Associée – Groupe-conseil stratégie et performance



# *Une relation d'affaires basée sur la confiance, le savoir-faire et la collaboration*

## **Table des matières**

1. Décision du comité de revue critique .....	1
1.1 Résumé de la décision du comité.....	1
1.2 Composition du comité de revue critique .....	1
2. Codification des commentaires .....	2
3. Commentaires généraux .....	3
4. Commentaires spécifiques .....	4
Annexe 1 Évaluation de la conformité à la norme ISO 14044	

# Rapport



# 1. Décision du comité de revue critique

## 1.1 Résumé de la décision du comité

<b>TITRE DE L'ÉTUDE RÉVISÉE</b>	Analyse du cycle de vie comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte québécois
<b>DATE DU RAPPORT</b>	Avril 2016
<b>AUTEUR DE L'ÉTUDE</b>	CIRAIG
<b>COMMANDITAIRE</b>	Hydro-Québec
<b>DATE DE LA REVUE CRITIQUE</b>	Avril 2016
<b>DÉCISION DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Étude est conforme aux exigences de la norme ISO 14044 <input type="checkbox"/> Étude requiert des <u>corrections mineures</u> conformément aux exigences de la norme ISO 14044 <input type="checkbox"/> Étude requiert des <u>corrections majeures</u> conformément aux exigences de la norme ISO 14044

## 1.2 Composition du comité de revue critique

<b>PRÉSIDENT DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE</b>	Gontran Bage, ing., Ph.D. Directeur, Groupe-conseil Stratégie et performance Raymond Chabot Grant Thornton
<b>RÉVISEURS</b>	Jacques Duval Chroniqueur automobile  Pierre Beaudoin Directeur principal, services techniques, CAA-Québec  Victor Poudelet, ing.jr, M.Sc.A. Conseiller principal, Groupe-conseil Stratégie et performance Raymond Chabot Grant Thornton



Conformément à la section 6.3 de la norme ISO 14044, une étude doit faire l'objet d'une revue critique par un comité des parties prenantes si les résultats de l'étude peuvent être utilisés en support à une affirmation comparative destinée à être divulguée au public. Dans ce contexte, le travail des réviseurs est de s'assurer que l'étude est transparente et cohérente, que les données utilisées sont appropriées et en relation avec les objectifs de l'étude, que l'interprétation des résultats est en accord avec ces objectifs, que l'interprétation des résultats reflète les limites de l'étude telles qu'identifiées par ses auteurs, et que les méthodes employées par les auteurs de l'étude sont scientifiquement valables, adéquates par rapport aux objectifs de l'étude et en accord avec la norme ISO 14044. Il est important de rappeler qu'une décision du comité quant au respect par l'étude des exigences de la norme ISO 14044 ne signifie pas que le comité endosse la divulgation des résultats. Une telle divulgation reste sous la décision et la responsabilité des propriétaires de l'étude.

## 2. Codification des commentaires










Afin de guider les auteurs de l'étude dans les corrections à apporter à l'étude selon les commentaires des réviseurs, ces commentaires ont été codifiés selon la légende suivante :

- une correction, une modification, une adaptation ou une justification est obligatoire. Cet aspect de l'étude a une incidence sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14044 et sur les résultats de l'étude;
- ⊙ une correction, une modification, une adaptation ou une justification est recommandée. Cet aspect peut avoir une incidence indirecte sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14044 et pourrait influencer les résultats de l'étude;
- une correction, une modification, une adaptation ou une justification est suggérée, mais non obligatoire. Cet aspect n'a pas ou peu d'incidence sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14044 et ne devrait pas influencer les résultats de l'étude.

## 3. Commentaires généraux

- 3.1** Les auteurs avancent l'idée que la batterie acide-plomb n'est pas présente dans tous les types de véhicules électriques. Il s'agit ici d'une interprétation avec laquelle le comité de revue critique n'est pas d'accord. Les voitures électriques ont également une batterie acide-plomb de 12 volts. Les auteurs doivent corriger ceci et présenter de manière très distincte 1) les résultats entre la batterie principale de la voiture électrique et l'absence d'une telle batterie dans la voiture conventionnelle et 2) les résultats pour la batterie acide-plomb 12 volts que l'on retrouve alors dans tous les véhicules comparés. 
- 3.2** Les auteurs avancent l'idée qu'une grande majorité des véhicules conventionnels conduits au Québec sont produits au Japon. Il s'agit ici d'une interprétation avec laquelle le comité de revue critique n'est pas d'accord. La référence citée par les auteurs est interprétée différemment par le comité. Il s'agit plutôt de l'origine des marques de véhicules conduits au Québec et non pas le lieu de production. Les véhicules de marques asiatiques conduits au Québec sont principalement fabriqués aux États-Unis, au Mexique et en Ontario. Les auteurs doivent valider leurs sources ou apporter les corrections requises dans les simulations. Toutefois, le comité considère que ceci n'apportera pas de modification dans l'interprétation des résultats, car en analyse de sensibilité, la production aux États-Unis a été considérée sans variation dans les conclusions de l'étude. Toutefois, afin d'avoir une étude représentative de la situation au Québec, le comité considère que cette correction est essentielle à défaut de pouvoir faire la démonstration que les véhicules conduits au Québec sont produits principalement au Japon. 

## 4. Commentaires spécifiques

- 4.1 Page 10 Les références dans le Tableau 2-4 sont à revoir. Le document de RECYC-QUÉBEC est indiqué pour 2015 et pour 2010 alors que dans les faits, le comité considère qu'il n'y a qu'un seul document sous ce titre chez RECYC-QUÉBEC et qu'il date de 2008. 
- 4.2 Page 13 On parle beaucoup dans le rapport d'une perte de capacité des batteries et les auteurs avancent le chiffre d'une batterie ayant 80 % de sa capacité. Or ici on parle d'une perte de capacité de 70 %, ce qui veut dire que la batterie n'a plus que 30 % de sa capacité. Pour s'assurer que le lecteur comprenne bien cette différence, les auteurs pourraient ajouter entre parenthèses qu'il s'agit alors d'une batterie n'ayant plus que 30 % de sa capacité. 
- 4.3 Page 27 Pour le temps de déplacement, pour pouvoir dire qu'il est équivalent entre les deux systèmes considérés, il faut spécifier que le temps de recharge de la batterie sur le véhicule électrique n'est pas pris en considération. 
- 4.4 Page 56 Les auteurs devraient nuancer un peu l'affirmation selon laquelle « l'étape de combustion, le plus important contributeur de l'étape de production, émet toutefois une quantité similaire de GES ». Selon la figure à la page 57, plusieurs sources de pétrole émettent en phase de combustion moins de GES par unité que ce qui est considéré dans l'étude. 
- 4.5 Page 59 La comparaison au deuxième sous point du premier point ne peut pas être faite. Il s'agit de deux batteries ayant des fonctions totalement différentes dans les véhicules. On ne peut pas comparer les impacts de la batterie principale d'une voiture électrique aux impacts de la batterie acide-plomb de 12 volts. De plus, comme mentionné dans les commentaires généraux, le comité de revue critique n'est pas en accord avec l'interprétation des auteurs voulant que les voitures électriques n'aient pas également une batterie acide-plomb de 12 volts. 
- 4.6 Page 63 Une référence doit être ajoutée pour le tableau 5-1. 
- 4.7 Page 90 Les pourcentages présentés dans la conclusion doivent être revus. Ils sont légèrement différents de ce qui est présenté dans le reste de l'étude. 
- 4.8 Page 91 Il serait pertinent de préciser dans la dernière phrase du dernier paragraphe que ceci est valide pour une utilisation de plus de 150 000 km pour une voiture et que cette distance est tout à fait réaliste. 
- 4.9 Page 94 Retirer la référence à une nouvelle parue sur le site de TVA. Elle n'est pas utilisée dans l'étude et les auteurs devraient s'appuyer sur des références plus robustes. 



# Annexes



## **Annexe 1**

### **Évaluation de la conformité à la norme ISO 14044**

# Évaluation de la conformité à la norme ISO 14044

## 1— EXIGENCES GÉNÉRALES

1.A- Les résultats et conclusions de l'ACV doivent être communiqués de manière complète et précise au public concerné sans parti pris

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les conclusions de l'étude et les résultats intermédiaires sont adéquatement présentés et mis en contexte par rapport aux hypothèses faites.

1.B- Les résultats, données, méthodes, hypothèses et limites doivent être transparents et présentés de manière suffisamment détaillée pour permettre au lecteur de comprendre les complexités et les compromis inhérents à l'ACV

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

1.C- Le rapport doit permettre d'utiliser les résultats et l'interprétation de manière cohérente avec les objectifs de l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les différentes analyses de sensibilité font en sorte qu'il est possible d'interpréter les résultats de l'étude dans le contexte québécois et permet ainsi de contextualiser l'étude pour l'utilisation au Québec des voitures.

## 2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION

### 2.A ASPECTS GÉNÉRAUX

2.A.1- Identification du commanditaire et réalisateur de l'étude ACV

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Commanditaire : page de couverture (Hydro-Québec)  
Réalisation : page iii (CIRAIG)

2.A.2- Date du rapport

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Page de couverture : Avril 2016

## 2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION

2.A.3- Indication précisant que l'étude a été réalisée en conformité avec les exigences de la norme ISO 14044

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Il n'est pas mentionné clairement dans le rapport que l'étude a été préparée en conformité avec les exigences de la norme ISO 14044. Toutefois, le rapport souligne que l'approche ACV est normée ISO 14044. Le comité considère que c'est suffisant.

### 2.B OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

2.B.1- Raisons ayant conduit à l'étude

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Le but de l'étude et ce que l'étude ne vise pas sont clairement précisés en introduction.

2.B.2- Applications envisagées de l'étude

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Divulgence publique par Hydro-Québec.

2.B.3- Public concerné

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

« Les résultats de l'étude sont prévus à des fins de divulgation publique par Hydro-Québec » (section 3.1).

2.B.4- Indication précisant si l'étude va appuyer des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Section 3.1

### 2.C CHAMP DE L'ÉTUDE

#### 2.C.1 FONCTION

2.C.1- La fonction est clairement définie

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Section 3.2

2.C.1.i- Des indications quant aux caractéristiques de performance de la fonction sont données

- Exigence respectée
- Exigence partiellement respectée
- Exigence non respectée
- Exigence non applicable

Une série de précisions est donnée en section 3.2

**2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION**

2.C.1.ii- Toute omission de fonctions supplémentaires dans les comparaisons est traitée

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Section 3.3

**2.C.2 UNITÉ FONCTIONNELLE**

2.C.2 - L'unité fonctionnelle est clairement définie

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les précisions de 3.2 viennent renforcer la clarté de l'unité fonctionnelle.

2.C.2.i –Le choix de l'unité fonctionnelle est cohérent avec les objectifs et le champ de l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les précisions de 3.2 viennent renforcer la clarté de l'unité fonctionnelle.

2.C.2.ii –Les flux de référence pour chaque scénario sont clairement établis et en accord avec la définition de l'unité fonctionnelle

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Le comité considère qu'il est difficile, pour ce type d'étude avec des produits comparés faisant intervenir autant de composantes, de définir spécifiquement des flux de référence. La définition des systèmes est considérée par le comité comme étant une description des flux de référence.

**2.C.3 FRONTIÈRES DU SYSTÈME**

2.C.3 –Les frontières du système doivent être clairement définies

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Section 3.4.1

2.C.3.i –Les omissions d'étapes du cycle de vie, de processus ou de données sont clairement discutées

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Tableau 3-1

2.C.3.ii –Les intrants et extrants énergétiques et matériels sont définis et quantifiés

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Le comité considère qu'il est difficile, pour ce type d'étude avec des produits comparés faisant intervenir autant de composantes, de présenter l'ensemble des intrants et extrants énergétiques et massiques de manière claire. La définition des systèmes et les informations disponibles en annexe font aux yeux du comité office de cette présentation.

**2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION**

2.C.3.iii – Les hypothèses sur la production d'énergie sont présentées et adéquates par rapport aux frontières du système de l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les processus pour lesquels le bouquet électrique québécois a été considéré sont précisés (section 3.5).

**2.C.4 CRITÈRES D'ALLOCATION**

2.C.4 - Les critères d'allocation (massique, énergétique et environnemental) et les hypothèses pour l'introduction initiale des intrants et des extrants sont définis

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Aucune allocation n'est faite.

2.C.4.i - L'effet de la sélection des critères d'allocation sur les résultats est discuté

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

**2.D INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE**

2.D.1- La méthodologie utilisée pour la collecte de données est expliquée

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

2.D.2- Une description qualitative et quantitative des processus élémentaires est faite

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

2.D.3- Les sources de la documentation consultée sont données

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Tableau 3-1 et section 3.5

2.D.4- Le mode de calcul de l'inventaire est présenté

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Il est mentionné que l'analyse de l'inventaire n'apporterait pas de valeur ajoutée à l'étude. Celle-ci n'est donc pas faite (section 3.5). Il est également mentionné que l'inventaire a été monté en utilisant le logiciel SimaPro.

## 2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION

2.D.5- La qualité des données utilisées est évaluée

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Une explication est fournie sur l'évaluation de la qualité et le résultat de l'analyse est fourni en Annexe D.

2.D.6- Une explication est fournie sur la manière dont les données manquantes sont traitées

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Il est mentionné que lorsque « des données étaient manquantes, une analyse de sensibilité a été effectuée pour vérifier l'effet des hypothèses et des approximations employées » (section 3.7.4). Le Tableau 3-3 présente les analyses de sensibilité faites. Le lecteur peut donc déduire les données qui sont moins fiables ou manquantes et remplacées par des hypothèses.

2.D.7- Une analyse de sensibilité est faite afin de raffiner les frontières du système

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Présentation des diverses analyses de sensibilité dans le tableau 3-3 et présentation des résultats de ces analyses dans la section 4.4.

2.D.8- Les règles d'allocation sont documentées et justifiées

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Aucune règle suivie.

2.D.9- Les règles d'allocation sont appliquées de manière uniforme

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

## 2.E ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE

2.E.1- Les modes opératoires, les calculs et les résultats de l'évaluation du cycle de vie sont présentés

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Méthode Impact World+ (section 3.6)

2.E.2- Les résultats de l'ÉICV respectent les objectifs et le champ de l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les résultats sont présentés individuellement pour chaque scénario et de manière comparée (section 4.2).

2.E.3- La relation entre les résultats de l'ÉICV et les objectifs et le champ de l'étude est discutée

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les principaux contributeurs sont indiqués et les analyses de sensibilité sont effectuées (section 4.1, 4.2 et 4.4)

## 2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION

2.E.4- La relation entre les résultats de l'ÉICV et les résultats de l'inventaire est discutée

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Non, car aucune analyse de l'inventaire n'est faite. Toutefois, la justification de ne pas faire l'analyse de l'inventaire est faite. Il n'y a donc pas de correctif attendu ici de la part des auteurs.

2.E.5- Les catégories d'impacts et les catégories d'indicateurs sont définies, justifiées et référencées

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

2.E.6- Une description de tous les modèles de caractérisation, des facteurs de caractérisation et des méthodes utilisées, y compris toutes les hypothèses et les limites, est donnée

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

La référence pour avoir de la documentation sur Impact World+ est fournie en note de bas de page.

2.E.7- Une description de tous les choix de valeurs utilisés en rapport avec les catégories d'impact, les modèles de caractérisation, les facteurs de caractérisation, la normalisation, le regroupement, la pondération et ailleurs dans l'ÉICV est faite de même qu'une justification de leur utilisation et de leur influence sur les résultats, les conclusions et recommandations

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

De manière générale, les références et les sources pour les catégories d'impacts sont données et sont celles couramment employées. Les auteurs font également une analyse de sensibilité avec le type de méthode d'évaluation des impacts pour démontrer que les choix d'approche ne changent pas les conclusions.

2.E.8- Une indication est faite que les résultats de l'ÉICV soient des expressions relatives et qu'ils ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, les marges de sécurité ou les risques

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Mention faite dans la section 3.6.

## 2.F INTERPRÉTATION DU CYCLE DE VIE

2.F.1- Les résultats sont clairement présentés et interprétés

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

2.F.2- Les hypothèses et les limites associées à l'interprétation des résultats sont présentées en relation avec la méthodologie et les données

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Les limites de l'étude sont présentées en section 5.5



**2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION**

2.F.3- Les résultats sont interprétés en fonction d'une évaluation de la qualité des données

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Annexe D

2.F.4- L'interprétation fait état d'une transparence totale en termes de choix de valeurs, de justifications et d'appréciations d'experts

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

L'interprétation est bien nuancée et indique clairement les limites de validité des résultats.

**2.G REVUE CRITIQUE**

2.G.1- Les noms et les affiliations des réviseurs sont clairement identifiés

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

2.G.2- Le(s) rapport(s) du comité de revue critique est (sont) annexé(s) au rapport de l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

2.G.3- Les réponses des auteurs aux commentaires du comité de revue critique sont annexées au rapport de l'étude

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

**3- EXIGENCES ADDITIONNELLES EN MATIÈRE DE COMMUNICATION DANS LE CAS D'UNE AFFIRMATION COMPARATIVE DESTINÉE À ÊTRE DIVULGUÉE AU PUBLIC**

3.A.- Une analyse des flux de matière et d'énergie est faite afin d'en justifier leurs inclusions ou exclusions

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

Aucune information sur les flux de matières n'est fournie. Toutefois, le comité considère que cette information n'apporterait pas d'élément supplémentaire pour l'interprétation des résultats en lien avec les objectifs de l'étude. Le comité ne requiert aucun changement malgré ce non-respect.

3.B - Une évaluation de la précision, de la complétude et de la représentativité des données utilisées est faite

- Exigence respectée  
 Exigence partiellement respectée  
 Exigence non respectée  
 Exigence non applicable

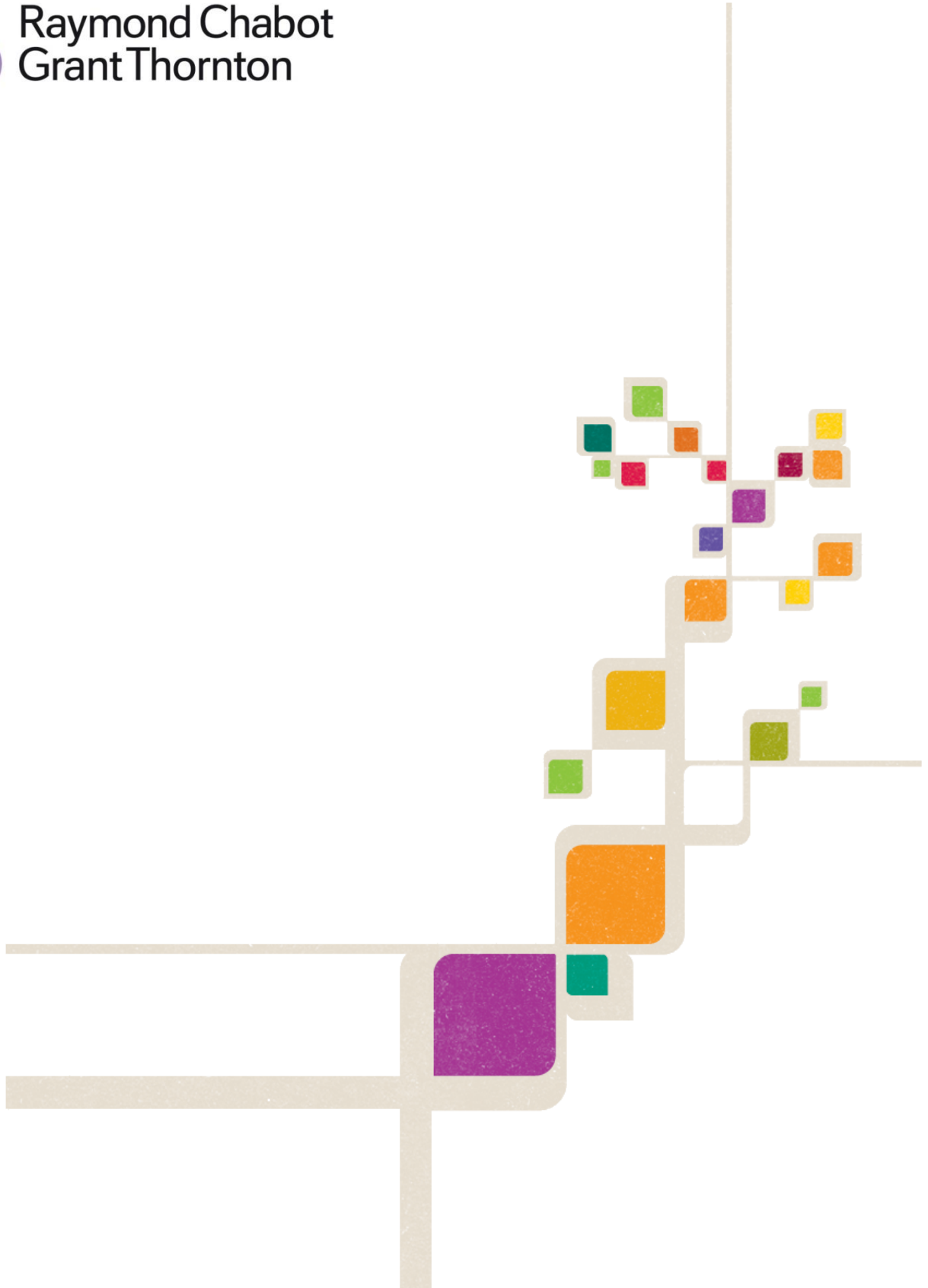
Oui. Annexe D

### 3- EXIGENCES ADDITIONNELLES EN MATIÈRE DE COMMUNICATION DANS LE CAS D'UNE AFFIRMATION COMPARATIVE DESTINÉE À ÊTRE DIVULGUÉE AU PUBLIC

<p>3.C.- Une description de l'équivalence des systèmes comparés est faite</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Les analyses de sensibilité font en sorte que les systèmes comparés sont équivalents.</p>
<p>3.D.- Le processus de revue critique est décrit</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Section 3.8</p>
<p>3.E.- Une évaluation de la complétude de l'ÉICV est faite</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Annexe D</p>
<p>3.F.- Une mention est faite de l'acceptation internationale des indicateurs de catégorie utilisée, de même qu'une justification de leur utilisation</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Implicite à la section 3.6</p>
<p>3.G - Une explication est donnée quant à la validité scientifique et technique de même que la pertinence environnementale des indicateurs de catégories utilisés</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Implicite à la section 3.6</p>
<p>3.H - Les résultats d'une analyse d'incertitude et d'une analyse de sensibilité sont présentés</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée  <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Aucune donnée n'est fournie sur l'analyse d'incertitude, en raison de problèmes intrinsèques à la base de données, hormis l'analyse de sensibilité avec RECIPE (voir section 3.7.6).</p>
<p>3.I - Si des différences sont trouvées par rapport aux résultats d'autres études similaires, une évaluation de la signification de ces différences est faite</p> <p><input type="checkbox"/> Exigence respectée  <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non respectée  <input type="checkbox"/> Exigence non applicable</p>	<p>Les résultats des études similaires sont présentés sommairement dans le tableau 2-10 (p. 16), mais aucune comparaison des résultats de cette analyse n'est faite par rapport à la littérature. Le comité considère toutefois que ceci n'est pas requis en fonction des différences identifiées dans les études déjà publiées et le cadre de la présente étude.</p>



Raymond Chabot  
Grant Thornton



## Réponses aux réviseurs

### Revue critique de l'étude « ANALYSE DU CYCLE DE VIE COMPARATIVE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POTENTIELS DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE ET DU VÉHICULE CONVENTIONNEL DANS UN CONTEXTE D'UTILISATION QUÉBÉCOIS »

---

<b>Auteurs</b>	CIRAIG Pierre-Olivier Roy, Ph.D. Jean-François Ménard
<b>Date</b>	Avril 2016

---

Le présent document présente les réponses du CIRAIG aux commentaires des réviseurs sur le rapport « Analyse du cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois ».

Les réponses sont présentées dans l'ordre, et identifiées par les numéros de commentaires du comité de revue (rapport du 19 avril 2016). Se référer à ce rapport pour connaître la teneur des questions et commentaires.

No	Réponse du CIRAIG – Commentaires généraux
3.1	<b>Action : la batterie acide-plomb a été ajoutée au véhicule électrique. L'ajout ne change en rien les conclusions de l'étude</b>
3.2	<b>Action :</b> <b>La mention de la provenance des véhicules, présentée au Tableau 2-4, selon la référence de Recyq-Québec a été retirée pour éviter toute confusion.</b> <b>Les informations fournies par « Le Guide de l'auto » portant sur le lieu d'assemblage des véhicules ont été spécifiées au Tableau 2-3. Selon ces informations, nous avons modifié le lieu d'assemblage des véhicules ; les États-Unis pour le scénario de base et le Japon pour l'analyse de sensibilité.</b>

No	Réponse du CIRAIG – Commentaires spécifiques
4.1	<b>Action : la double référence de Recyq-Québec a été ajustée et en date de 2008</b>
4.2	<b>Action : la précision a été ajoutée</b>
4.3	<b>Action : la mention suivante a été ajoutée</b> <i>« La recharge du véhicule électrique a été réalisée au préalable (à la maison ou à une borne de recharge) permettant ainsi d'effectuer le déplacement pendant un laps de temps similaire »</i>
4.4	<b>Action : la phrase a été retirée</b>
4.5	<b>Action : la phrase qui se retrouvait à la fin du paragraphe a été mise à l'avant-plan afin d'expliquer que les batteries ne sont pas comparable.</b>
4.6	<b>Action : les références de Hawkins et coll. Ainsi qu'IMPACT World + ont été ajoutées au Tableau</b>
4.7	<b>Action : les pourcentages ont été ajustés selon les nouvelles valeurs</b>
4.8	<b>Action : la précision a été ajoutée dans cette phrase à la conclusion ainsi que dans le sommaire</b>
4.9	<b>Action : la référence a été retirée</b>