



CIRAIG^{MC}

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



ADDENDA AU 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

MARS 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^e 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

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

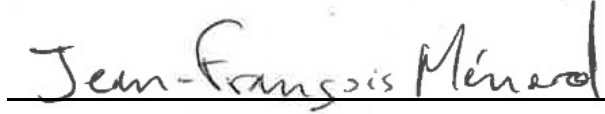
Pierre-Olivier Roy, Ph.D.

Réalisation de l'ACV



Jean-François Ménard

Support technique et révision



Collaboration

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

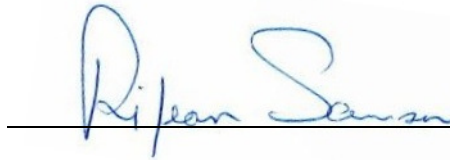
Coordination du projet

Directrice des relations industrielles de la
Chaire ICV, CIRAIG

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 Chabon Grant Thornton

1 Mise en contexte

1.1 Note au lecteur

Cet addenda, réalisé par le CIRAIG, se veut un supplément d'information au rapport « *Analyse du cycle de vie comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'évaluation québécois* ».

En ce sens, ce document s'appuie sur la même méthodologie et les mêmes hypothèses de base que celles décrites dans ce rapport.

1.2 Objectifs et hypothèses de base

Cet addenda cherche à évaluer les conséquences de l'utilisation de divers bouquets électrique pour la recharge du véhicule électrique et ses conséquences sur les conclusions de la comparaison avec un véhicule conventionnel.

Cet addenda s'appuie sur :

- Les processus de production d'électricité (bouquet électriques) de différents pays ainsi que l'électricité produite à partir de différentes filières de production d'électricité retrouvés dans la base de données *ecoinvent v3.1*;
- Les modèles de véhicules électrique et conventionnel utilisés dans le cadre de l'étude : « *Analyse du cycle de vie comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'évaluation québécois* ».
- Les indicateurs de la méthode IMPACT World + :
 - Les indicateurs dommages : *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*,
 - Les indicateurs impacts complémentaires : *Changement climatique* (intégré partiellement dans les indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*), *Épuisement des ressources fossiles* et *Épuisement des ressources minérales* ;

Cet addenda émet l'hypothèse que seul le bouquet électrique lors de la phase d'utilisation du véhicule électrique sera modifié.

Les diverses hypothèses sont présentées au Tableau A-1.

Tableau A-1 : 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, 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	Basée sur la composition d'une borne de recharge telle que développée par AddÉnergie. La borne à la maison est totalement allouée au

	vie de 15 ans)	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.

1.3 Divers bouquets électriques

La Figure A-1 illustre l’empreinte carbone de la production d’électricité selon différents contextes géographiques à travers le monde. Il présente également le contenu carbone nécessaire à un bouquet électrique afin que le résultat de l’indicateur *Changement climatique* du véhicule conventionnel selon le scénario de base soit équivalent à celui du véhicule électrique. En ce sens, près de 95 % des bouquets électriques mondiaux répertoriés dans la base de données *ecoinvent* (version 3.1) produiraient des résultats d’indicateurs *Changement climatique* inférieurs à celui du véhicule conventionnel.

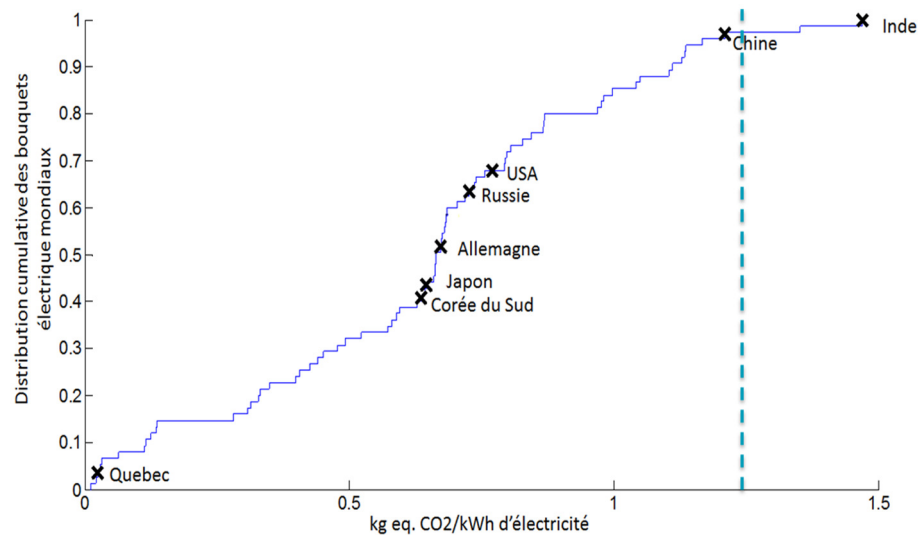


Figure A-1 : Distribution statistique des différents bouquet électriques nationaux telle que documentée dans de la base de données d’inventaire du cycle de vie *ecoinvent* (version 3.1).

Note : la ligne pointillée équivaut au contenu carbone du bouquet électrique qui permettrait d’être équivalent à celui du véhicule conventionnel selon le scénario de base pour l’indicateur *Changement climatique*

La Figure A-2 suivante présente le même graphique que ci-dessus mais en mettant plutôt l'évidence sur les bouquets électriques canadiens (provinces et territoires).

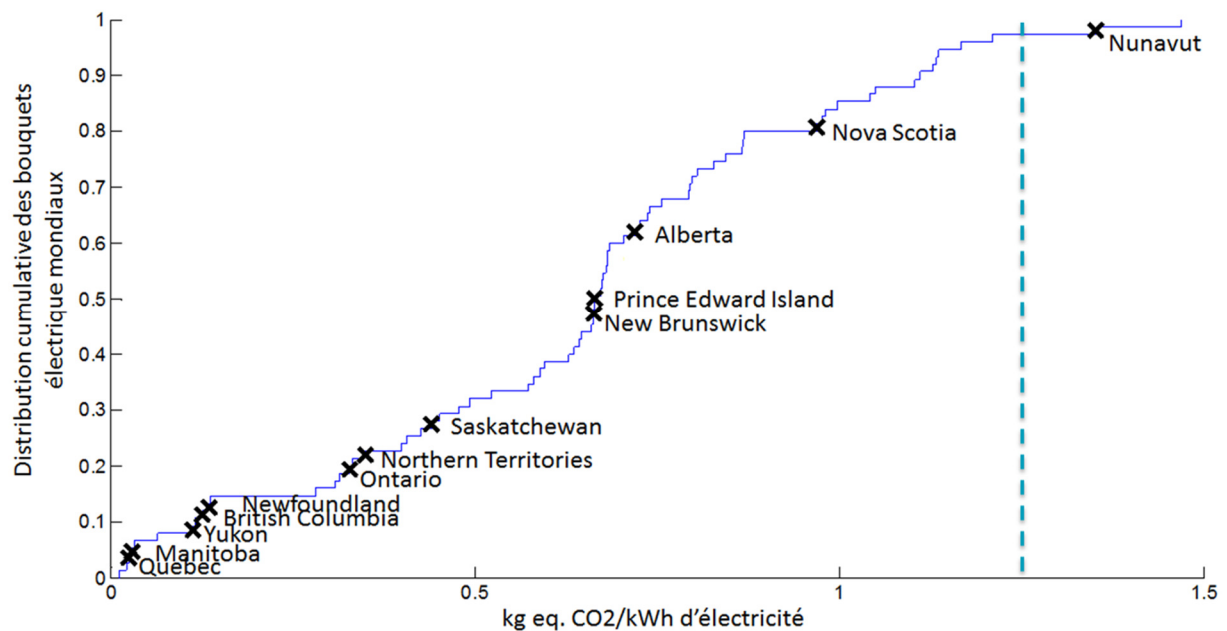


Figure A-2 : Distribution statistique des différents mix électriques telle que documentée dans la base de données d'inventaire du cycle de vie ecoinvent (version 3.1) ; mise en évidence des mix électriques des provinces canadiennes.

Note : la ligne pointillée équivaut au contenu carbone du bouquet électrique qui permettrait d'être équivalent à celui du véhicule conventionnel (scénario de base) tel qu'utilisé au Québec (pour l'indicateur *Changement climatique*)

2 Résultats

2.1 Comparaison des bouquets électrique nationaux

Les Figure A-1 et A-2 montrent une vaste gamme d'émissions de gaz à effet de serre en fonction du bouquet électrique. Cette section vise à comparer un véhicule conventionnel avec un véhicule électrique dont l'approvisionnement proviendrait de divers bouquets électriques. Considérant le nombre de bouquets électriques existants, trois archétypes ont été sélectionnés :

- Le Québec (QC) : un bouquet électrique provenant presque exclusivement d'énergies renouvelables dont les émissions de gaz à effet de serre par kWh produit sont faibles ;
- L'Allemagne (DE) : un bouquet électrique moyennement carboné et situé près de la moyenne mondiale des émissions de gaz à effet de serre par kWh produit ;
- La Chine (CN) : l'un des bouquets électriques les plus fortement carboné mondialement.

Ces archétypes permettent de représenter le spectre de variation de l'approvisionnement électrique et permet de comparer les résultats d'indicateurs du véhicule électrique et du véhicule conventionnel selon une espérance de vie, exprimée en kilométrage, allant jusqu'à 300 000 km.

Il apparaît que :

- Le changement d'alimentation électrique a une influence majeure sur les conclusions de l'étude pour tous les indicateurs à l'exception de *l'Épuisement des ressources minérales*, pour lequel le véhicule conventionnel s'avère préférable au véhicule électrique. À ce titre, l'extraction des minéraux entrant dans la fabrication des composantes électriques et de la batterie en est responsable ;
- Le bouquet électrique du Québec s'avère l'approvisionnement de prédilection pour la recharge du véhicule électrique : l'évaluation détaillée de ce bouquet électrique est rapportée dans le rapport « *Analyse du cycle de vie comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois* » ;
- Pour ce qui est de l'Allemagne, un bouquet électrique près de la moyenne mondiale :
 - pour la *Santé humaine* : le véhicule électrique devrait être considéré équivalent au véhicule conventionnel, et ce, au-delà de la durée de vie normale (150 000 km) du véhicule ;
 - pour la *Qualité des écosystèmes* ; le véhicule électrique devrait être considéré équivalent au véhicule conventionnel pour une durée de vie entre 50 000 km et 150 000 km ;
 - pour le *Changement climatique* ; le véhicule électrique demeure avantageux dans la plupart des conditions de type de conduite du véhicule conventionnel pour une durée de vie au-delà de 100 000 km ;
 - pour *l'Épuisement des ressources fossiles* : le véhicule électrique demeure avantageux dans la plupart des conditions de type de conduite (après 50 000 km) du véhicule conventionnel ;
 - pour *l'Épuisement des ressources minérales* : l'utilisation du bouquet électrique allemand accentue encore plus que le bouquet électrique québécois l'avantage du véhicule conventionnel sur le véhicule électrique.

- Le bouquet électrique de la Chine s'avère la pire option d'approvisionnement investiguée pour la recharge du véhicule électrique :
 - pour la *Santé humaine* : le véhicule électrique devrait être considéré équivalent au véhicule conventionnel, et ce, au-delà de la durée de vie normale (150 000 km) du véhicule ;
 - pour la *Qualité des écosystèmes* ; le véhicule électrique devrait être considéré équivalent au véhicule conventionnel et ce, au-delà de la durée de vie normale (150 000 km) du véhicule;
 - pour le *Changement climatique* ; le véhicule électrique pourrait être équivalent selon certains scénarios au véhicule conventionnel et ce, au-delà de la durée de vie normale (150 000 km) du véhicule;
 - pour l'*Épuisement des ressources fossiles* : le véhicule électrique demeure avantageux dans la plupart des conditions de type de conduite (après 50 000 km) du véhicule conventionnel ;
 - pour l'*Épuisement des ressources minérales* : l'utilisation du bouquet électrique chinois accentue encore plus que le bouquet électrique québécois ou allemand, l'avantage du véhicule conventionnel sur le véhicule électrique.

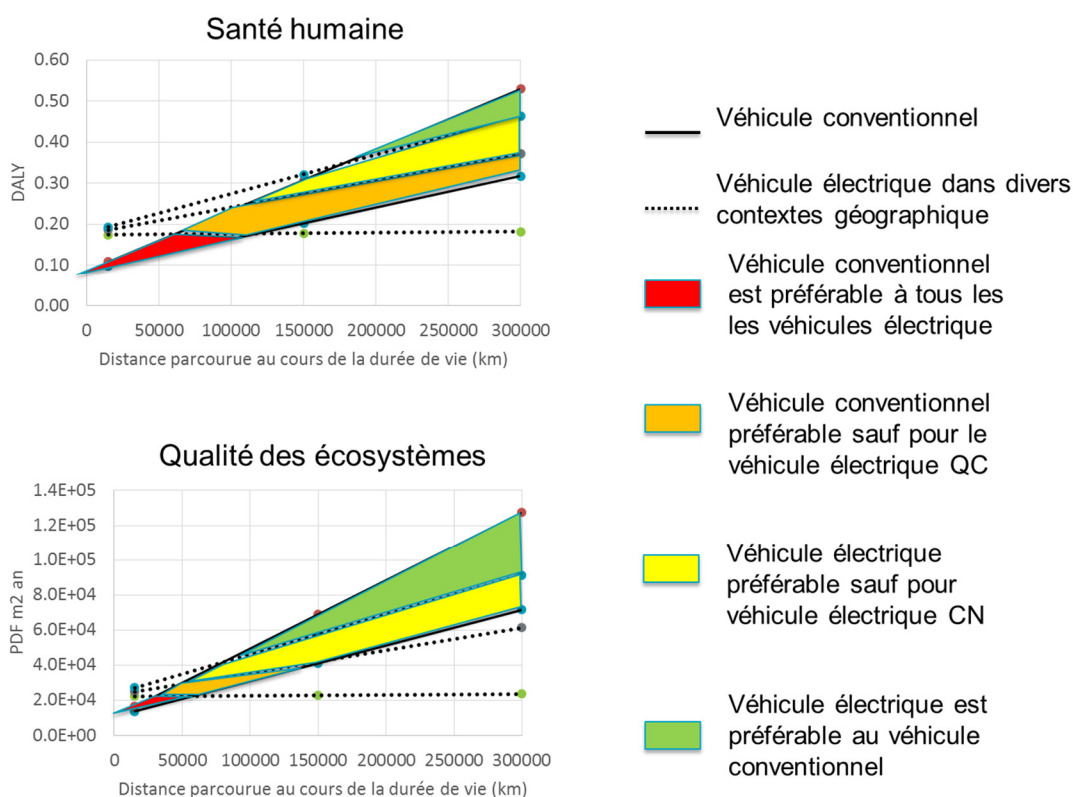


Figure A-3 : Conséquences de l'utilisation de divers bouquets électriques nationaux sur les résultats d'indicateurs de la voiture électrique (indicateurs dommage)

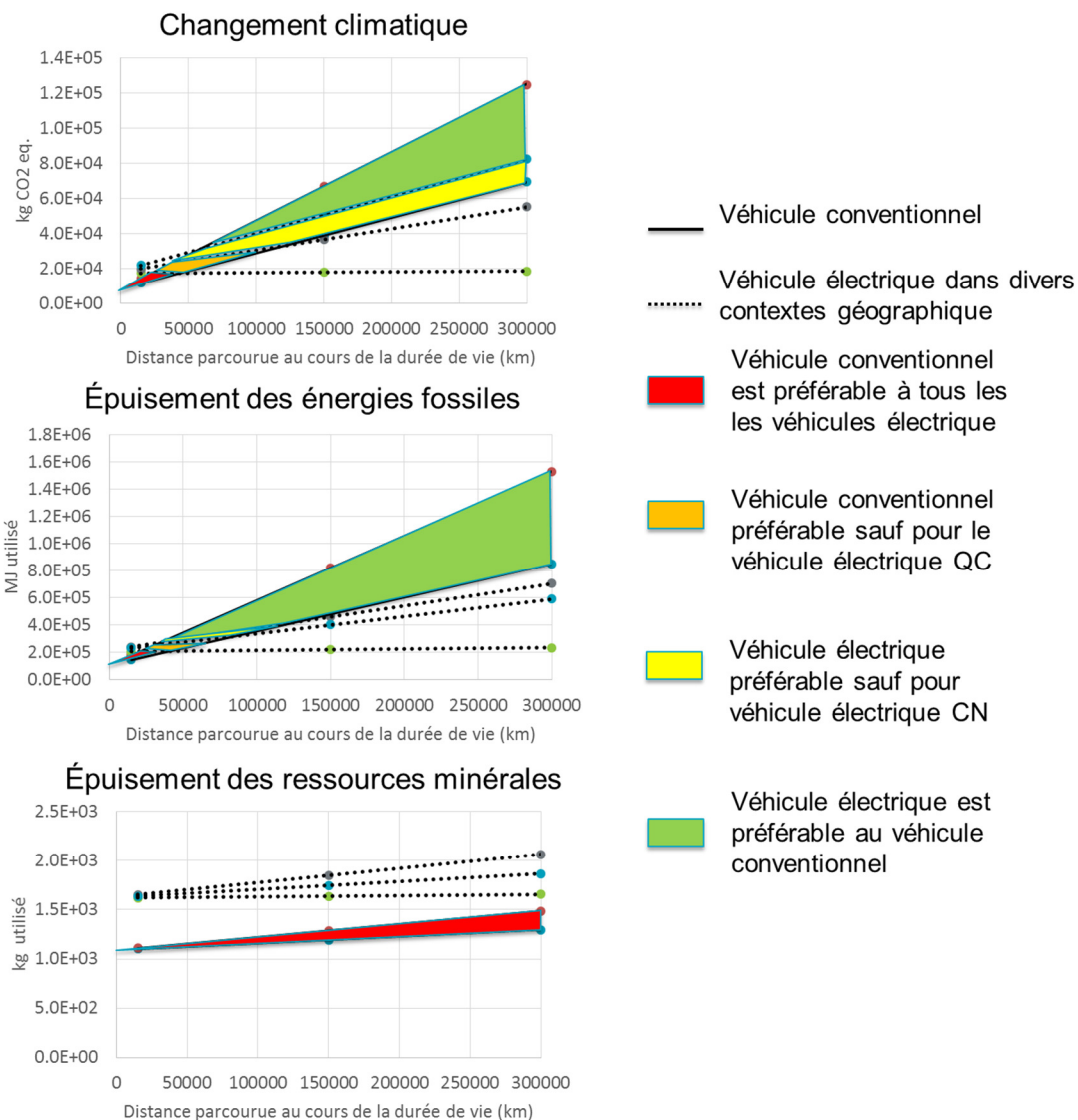


Figure A-4 : Conséquences de l'utilisation de divers bouquets électriques nationaux sur les résultats d'indicateurs de la voiture électrique (indicateurs d'impacts complémentaires)

2.2 Comparaison des bouquets électrique canadiens

La comparaison des conséquences de l'utilisation de divers bouquets électrique canadiens pour la recharge du véhicule électrique a été évaluée selon le scénario de base tel que défini dans le rapport « *Analyse du cycle de vie comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'évaluation québécois* ».

Il apparaît que :

- Le changement d'alimentation électrique a une influence majeure sur les conclusions de l'étude pour tous les indicateurs à l'exception de *l'Épuisement des ressources minérales* pour lequel le véhicule conventionnel s'avère préférable au véhicule électrique ;
- De toutes les provinces et territoires canadiens, le bouquet électrique du Québec s'avère la source de recharge du véhicule électrique le plus favorable, et ce, pour tous les indicateurs considérés ;
- Selon les hypothèses considérées :
 - *Santé humaine* : le véhicule électrique montre des résultats d'indicateurs inférieurs à celui du véhicule conventionnel pour : le Québec (QC), la Colombie-Britannique (BC), le Manitoba (MB), Terre-Neuve (NF), les Territoires du Nord-Ouest (NTE), l'Ontario (On), la Saskatchewan (SK) et le Yukon (Yk) ;
 - *Qualité des écosystèmes* : le véhicule électrique montre des résultats d'indicateurs inférieurs à celui du véhicule conventionnel pour : le Québec (QC), l'Alberta (Ab), la Colombie-Britannique (BC), le Nouveau-Brunswick (NB), le Manitoba (MB), Terre-Neuve (NF), les Territoires du Nord-Ouest (NTE), l'île du Prince Édouard (PE) l'Ontario (On), la Saskatchewan (SK) et le Yukon (Yk) ;
 - *Changement climatique* : le véhicule électrique montre des résultats d'indicateurs inférieurs à celui du véhicule conventionnel pour : le Québec (QC), l'Alberta (Ab), la Colombie-Britannique (BC), le Nouveau-Brunswick (NB), le Manitoba (MB), Terre-Neuve (NF), Nouvelle-Écosse (NS), les Territoires du Nord-Ouest (NTE), l'île du Prince Édouard (PE) l'Ontario (On), la Saskatchewan (SK) et le Yukon (Yk) ;
 - *Épuisement des ressources fossiles* : le véhicule électrique montre des résultats d'indicateurs inférieurs à celui du véhicule conventionnel pour : le Québec (QC), l'Alberta (Ab), la Colombie-Britannique (BC), le Nouveau-Brunswick (NB), le Manitoba (MB), Terre-Neuve (NF), Nouvelle-Écosse (NS), les Territoires du Nord-Ouest (NTE), l'île du Prince Édouard (PE) l'Ontario (On), la Saskatchewan (SK) et le Yukon (Yk) ;
 - *Épuisement des ressources minérales* : le véhicule électrique ne montre des résultats d'indicateurs inférieurs à celui du véhicule conventionnel.

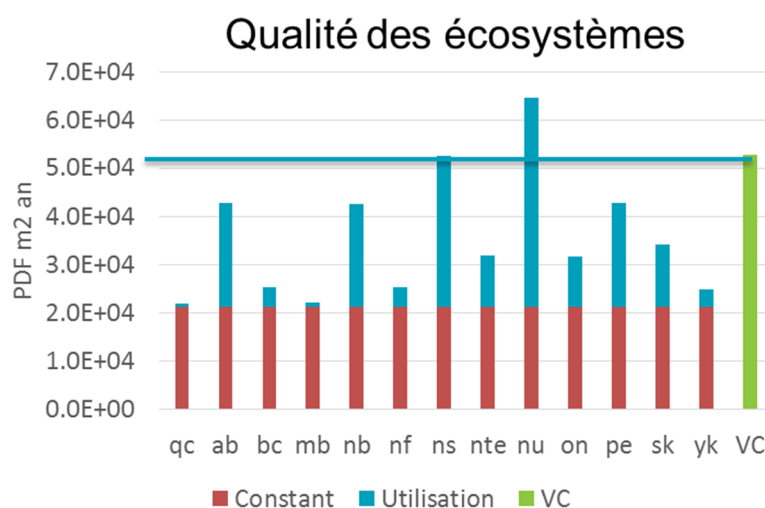
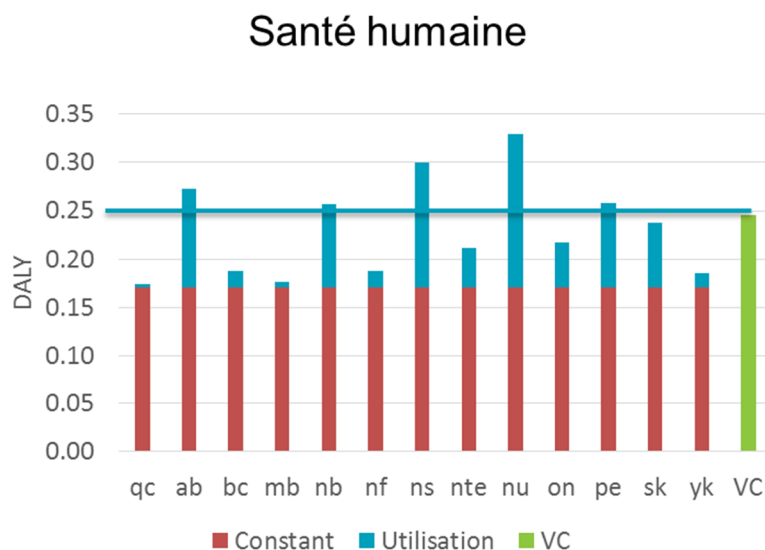


Figure A-5 : Conséquences de l'utilisation de divers bouquets électriques canadiens sur les résultats d'indicateurs de la voiture électrique selon les bouquets électriques retrouvés dans *ecoinvent* v 3.1 (indicateurs dommage)¹

¹ la partie rouge représente toutes les étapes du cycle de vie du véhicule, de l'extraction des ressources, de la fabrication du véhicule et sa fin de vie et exclut la phase utilisation. Cette phase est représentée sous la section bleue et représente les impacts relatifs à l'utilisation et la recharge du véhicule électrique.

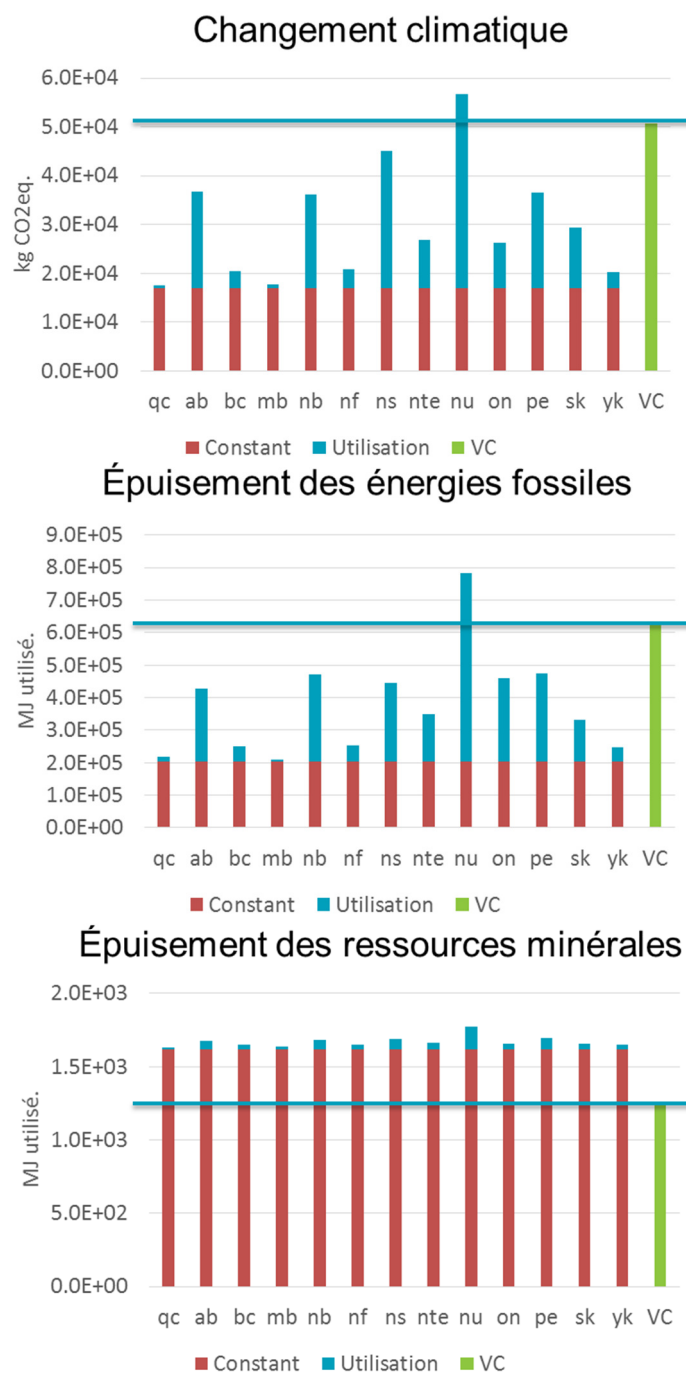


Figure A-6 : Conséquences de l'utilisation de divers bouquets électrique canadiens sur les résultats d'indicateurs de la voiture électrique selon les bouquets électriques retrouvés dans écoinvent v 3.1² (indicateurs d'impact complémentaires)

² la partie rouge représente toutes les étapes du cycle de vie du véhicule, de l'extraction des ressources, de la fabrication du véhicule et sa fin de vie et exclue la phase utilisation. Cette phase est représentée sous la section bleue et représente les impacts relatifs à l'utilisation et la recharge du véhicule électrique.

2.3 Comparaison de bouquets électriques improbables

L'électricité distribuée par des réseaux électriques interconnectés est généralement composée d'électricité produite par divers types de centrales exploitées sur un territoire donné, et d'électricité importée des territoires voisins. Il arrive parfois dans des réseaux autonomes, soit des réseaux alimentant en électricité des communautés isolées, que l'électricité ne soit produite qu'à partir d'un seul type de centrale électrique. Au Québec, l'électricité des réseaux autonomes est produite par des centrales au mazout ou hydroélectriques.

Il est à noter que cette comparaison des bouquets est improbable : il est peu probable de retrouver dans un réseau autonome une centrale nucléaire ou un parc éolien comme seule source de production d'électricité, notamment en raison du caractère intermittent de cette dernière source.

Les Figures A-6 et A-7 comparent diverses sources de production électrique, basées sur un seul type d'énergie (p. ex. 100 % mazout), pour l'alimentation du véhicule électrique. Cette comparaison a été effectuée selon le scénario de base tel que défini dans le rapport « *Analyse du cycle de vie comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois* ».

Il apparaît que

- Un approvisionnement à partir de l'hydroélectricité soit préférable à un approvisionnement à partir de l'éolien, du nucléaire, du gaz naturel, du mazout et du charbon, respectivement, pour la plupart des indicateurs ;
- Selon les hypothèses considérées:
 - *Santé humaine* : un réseau autonome entièrement alimenté par du nucléaire, de l'hydroélectricité, du gaz naturel ou de l'éolien présenterait des résultats d'indicateurs, pour le véhicule électrique, inférieurs à celui du véhicule conventionnel ;
 - *Qualité des écosystèmes* : un réseau autonome entièrement alimenté par du nucléaire, de l'hydroélectricité, du gaz naturel, du mazout ou de l'éolien présenterait des résultats d'indicateurs, pour le véhicule électrique, inférieurs à celui du véhicule conventionnel ;
 - *Changement climatique* : un réseau autonome entièrement alimenté par du nucléaire, de l'hydroélectricité, du gaz naturel, du mazout ou de l'éolien présenterait des résultats d'indicateurs, pour le véhicule électrique, inférieurs à celui du véhicule conventionnel ;
 - *Épuisement des ressources fossiles* : un réseau autonome entièrement alimenté par du nucléaire, de l'hydroélectricité, du gaz naturel, du mazout, du charbon ou de l'éolien présenterait des résultats d'indicateurs, pour le véhicule électrique, inférieurs à celui du véhicule conventionnel ;
 - *Épuisement des ressources minérales* : un réseau autonome entièrement alimenté par n'importe quelle source d'énergie présenterait des résultats d'indicateurs, pour le véhicule électrique, supérieurs à celui du véhicule conventionnel.

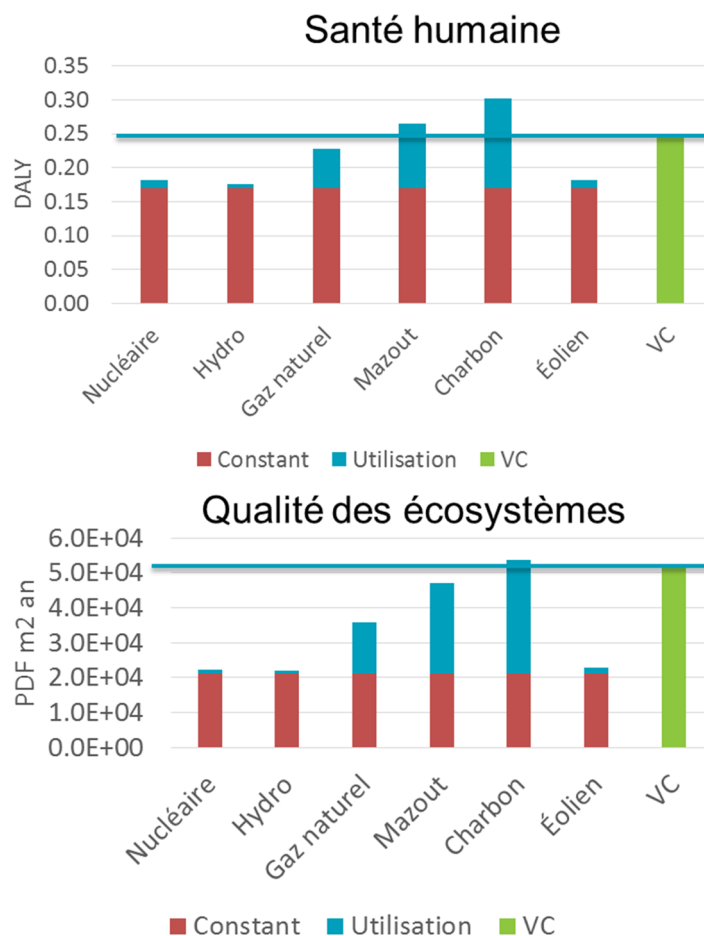


Figure A-6 : Conséquences de l'utilisation de divers bouquets électriques fictifs basés uniquement sur un type d'énergie (indicateurs dommage).³

³ la partie rouge représente toutes les étapes du cycle de vie du véhicule, de l'extraction des ressources, de la fabrication du véhicule et sa fin de vie et exclut la phase utilisation. Cette phase est représentée sous la section bleue et représente les impacts relatifs à l'utilisation et la recharge du véhicule électrique.

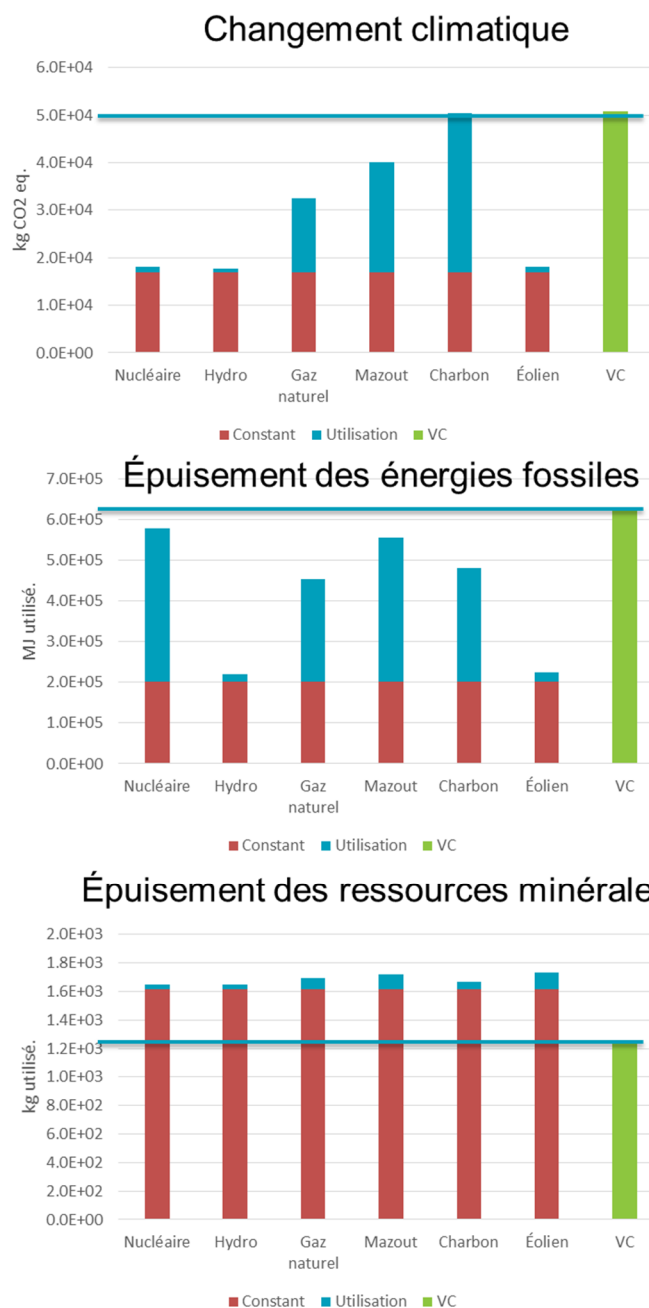


Figure A-7 : Conséquences de l'utilisation de divers bouquets électrique fictifs basés uniquement sur un type d'énergie (indicateurs impact complémentaires).⁴

⁴ la partie rouge représente toutes les étapes du cycle de vie du véhicule, de l'extraction des ressources, de la fabrication du véhicule et sa fin de vie et exclue la phase utilisation. Cette phase est représentée sous la section bleue et représente les impacts relatifs à l'utilisation et la recharge du véhicule électrique.

3 Conclusion

Ce complément d'information du rapport « *Analyse du cycle de vie comparative du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois* » a permis d'évaluer l'influence de l'approvisionnement électrique provenant de divers bouquets électriques à l'échelle mondiale et canadienne sur les résultats d'indicateurs dommage et d'impact complémentaires du véhicule électrique.

Cette analyse a montré que le changement d'alimentation électrique pouvait avoir une influence majeure sur les conclusions de l'étude pour tous les indicateurs investigués à l'exception de *l'Épuisement des ressources minérales* pour lequel le véhicule conventionnel s'avère préférable au véhicule électrique.

L'analyse a également montré que le bouquet électrique du Québec, notamment à cause de sa production d'hydroélectricité, s'avérait l'approvisionnement de prédilection pour tous les indicateurs (à l'exception de *l'Épuisement des ressources minérales*) afin de recharger le véhicule électrique, et ce, à la fois à l'échelle mondiale et canadienne.