TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES 3
1.1 Énergie et secteurs de consommation 3
1.1.1 Consommation énergétique 3
1.1.2 Source d'énergie par secteur 6
1.1.3 Secteur des transports 7
1.2 Émissions associées aux différentes sources d'énergie 9
1.2.1 Combustibles fossiles 9
1.2.2 Sources d'énergie alternatives exploitées en transport 10
1.3 Analyse du cycle de vie : Outil d'évaluation des incidences environnementales.....16
1.3.1 Étapes de l'analyse de cycle de vie 17
1.3.2 Catégories d'indicateurs environnementaux 18
1.3.3 Interprétation des résultats et analyse de sensibilité..... 23

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE 25
2.1 Définition du système et caractérisation des scénarios 25
2.1.1 Détermination du système et de l'unité fonctionnelle..... 25
2.1.2 Caractérisation des scénarios 26
2.2 Bilan des flux 27
2.2.1 Sous-système « énergie » 27
2.2.2 Sous-système « véhicule » 32
2.3 Évaluation des impacts environnementaux 33
2.3.1 Approche fonctionnelle 33
2.3.2 Catégorie d'impacts..... 34
2.3.3 Catégorie de dommages 36
2.3.4 Analyse de sensibilité..... 37

CHAPITRE 3 RÉSULTATS 41
3.1 Bilan de flux 41
3.1.1 Bilan de matières et d'énergie du procédé de biométhanisation 41
3.1.2 Bilan de flux des scénarios..... 43
3.2 Évaluation des impacts environnementaux 44
3.2.1 Indicateurs environnementaux de la catégorie d'impacts 44
3.2.2 Indicateurs environnementaux de catégorie de dommages..... 47
3.3 Analyse de sensibilité.....50
3.3.1 Méthode ReCiPe 50
3.3.2 Source primaire de l'électricité 53

CHAPITRE 4 DISCUSSION 55

4.1 Évaluation des scénarios 55
4.2 Application de la valorisation des MO au parc automobile 56
4.3 Perspectives.....59

CONCLUSION.....63

ANNEXE I COMPOSITION DES GAZ.....65

ANNEXE II SUBSTANCES DE RÉFÉRENCE DE LA MÉTHODE RECIPE.....67

ANNEXE III TAUX DE TRANSFORMATION ET PROCESSUS DU LOGICIEL 69

ANNEXE IV VALEURS ABSOLUES.....71

ANNEXE V ÉTUDE D'IMPACTS.....75

ANNEXE VI SCORES UNIQUES VALEURS ABSOLUES 77

BIBLIOGRAPHIE.....79

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Consommation mondiale d'énergie primaire selon la forme pour la période 1990-2012 4

Tableau 1.2 Consommation d'énergie primaire en 2013 pour différents territoires 4

Tableau 1.3 Informations sur la consommation de carburant par une voiture au Québec 10

Tableau 1.4 Sources primaire d'électrique et leurs impacts sur l'environnement 12

Tableau 1.5 Caractéristiques des biocarburants consommés par des véhicules au Québec 14

Tableau 1.6 Caractéristiques du GNC et du bioGNC leur consommation au Québec 15

Tableau 1.7 Caractéristiques principales des outils d'analyses environnementales 16

Tableau 1.8 Caractéristiques des indicateurs environnementaux et leurs unités les facteurs de dommages et l'échelle d'influence selon la méthode IMPACT 2002+ 21

Tableau 2.1 Caractérisation des différents scénarios en fonction des deux sous-systèmes « véhicule » et « énergie » 27

Tableau 2.2 Taux de transformation des processus d'extraction et de production des scénarios de voitures présentes sur les routes 29

Tableau 2.3 Taux de transformation des processus d'extraction et de production de d'énergie des scénarios de valorisation des MO 31

Tableau 2.4 Taux de transformation des processus de distribution et d'utilisation des cinq scénarios 31

Tableau 2.5 Processus de SimaPro utilisés pour représenter les scénarios 32

Tableau 2.6 Durée de vie des voitures selon le moteur..... 34

Tableau 2.7 Substances de références des indicateurs environnementaux de la catégorie d'impacts de la méthode IMPACT 2002+..... 35

Tableau 2.8 Facteurs de dommages de la méthode IMPACT 2002+. 36

Tableau 2.9 Comparaison des catégories d'indicateurs de dommages des méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe 37

Tableau 2.10 Comparaison des catégories d'indicateur d'impacts des deux méthodes 39

Tableau 4.1 Classement des scénarios basé sur le score unique du logiciel Simapro pour les méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe 55

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Consommation énergétique par secteur d'activité économique au Canada..... 6

Figure 1.2 Consommation d'énergie du secteur des transports au Québec 7

Figure 1.3 Répartition de l'énergie consommées selon les modes de transport au Québec 8

Figure 1.4 Évolution de la relation entre la quantité de véhicules en circulation et le nombre de titulaire de permis de conduire au Québec 8

Figure 1.5 Sources d'énergie primaire pour produire de l'électricité 11

Figure 1.6 Composition des matières résiduelles générées par le secteur résidentiel au Québec 14

Figure 1.7 Étapes de l'analyse de cycle de vie 17

Figure 1.8 Méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie IMPACT 2002+ 20

Figure 1.9 Méthode ReCiPe 22

Figure 2.1 Détermination du système 26

Figure 2.2 Schéma du bilan des flux des scénarios pour le sous-système « énergie ». ... 28

Figure 2.3 Schéma du bilan des flux de la valorisation énergétique par traitement des MO 30

Figure 3.1 Bilan des flux du processus de production d'énergie provenant de la valorisation des MO 42

Figure 3.2 Bilan des flux du sous-système de l'énergie des cinq scénarios 45

Figure 3.3 Étude d'impacts d'après la méthode IMPACT 2002+ 46

Figure 3.4 Influence des processus en lien avec la batterie des scénarios de véhicules électriques dans la catégorie d'impacts: extraction minière..... 47

Figure 3.5 Études des dommages selon la méthode IMPACT 2002+..... 49

Figure 3.6 Comparaison des études de dommages selon les méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe..... 51

Figure 3.7 Étude d'impacts de la qualité de l'écosystème selon la méthode ReCiPe 52

Figure 3.8 Dommages causés par les voitures électriques utilisant différentes sources d'énergie selon la méthode IMPACT 2002+ 53

Figure 4.1 Représentation des scénarios de valorisation de la MO sur l'ensemble du parc automobile du Québec..... 58

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

14DCB	1,4- Dicholorobenzène
ACV	Analyse de cycle de vie
bioGNC	Gaz naturel comprimé fait à partir de matières organiques
C	Carbone
C_2H_4	Éthylène
CC	Changement climatique
CFC-11	Trichloroflurométhane
CH_4	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
CO_2	Dioxyde de carbone
COV	Composés organiques volatiles
E_d	Indicateurs environnementaux de la catégorie de dommages
ÉICV	Évaluation d'inventaire de cycle de vie
éq.	Équivalent
$FC_{j,i}$	Facteur de caractérisation d'impacts
FD_d	Facteur de caractérisation de dommages
Fe	Fer
GES	Gaz à effets de serre
GN	Gaz naturel
GNC	Gaz naturel comprimé
H_2O	Eau

Rapport-Gratuit.com

H_2S	Sulfure d'hydrogène
ICV	Inventaire de cycle de vie
IMPACT 2002 +	*Impact Asessment of Chemical Toxics*
M verte	Matière verte
M_j	Indicateurs environnementaux de la catégorie d'impacts
MO	Matières organiques
MR	Matières résiduelles
N	Azote
NMVOC[6]	Composés organiques volatiles sans méthane
NOx	Oxyde d'azote
Occ.	Occupation
P	Phosphore
$PM_{2,5}$	Particules fines de 2,5 micromètres et moins
PM_{10}	Particules fines de 10 micromètres et moins
PO_4^{3-}	Phosphate
SO_2	Dioxyde de soufre
trans.	Transformation
U^{235}	Uranium de masse 235
W_i	Masse de la substance

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉ DE BASE

Longueur

km kilomètre

Aire

m^2 mètre carré

km^2 kilomètre carré (= 1 000 000 m^2)

Volume

m^3 mètre cube

L litre (= 0,1 m^3)

UNITÉ DE MASSE

Masse

kg kilogramme

t tonne

masse volumique

kg/m^3 kilogramme par mètre cube

kWh kilowatt-heure

MJ mégajoule (= 10^6 J)

GJ gigajoule (= 10^9 J)

PJ petajoule (= 10^{15} J)

Mtep millions de tonnes d'équivalent pétrole

UNITÉ DE RADIOACTIVITÉ

Activité radioactive

Bq Becquerel

UNITÉ D'INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX

PDF Fraction d'espèce disparue sur un m^2 durant une année

DALY Équivalent d'années de vie perdue par année exprimée pour l'ensemble de la population

$ Dollars américains

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

INTRODUCTION

Vers la fin du XIXe siècle, les véhicules font leur entrée et viennent révolutionner les sociétés dans lesquelles ils font leur apparition. Depuis, le paysage se transforme suivant l'utilisation continuellement croissante de l'automobile (Statistique Canada, 2008). L'écosystème urbain s'adapte à la mobilité motorisée créant ainsi dans la population une dépendance à ce type de transport (Gonzalez-Feliu, Ambrosini, Henriot, & Routhier, 2013). La symbiose entre l'automobile et le pétrole qui l'approvisionne en carburant a permis au transport automobile de se développer et de devenir aussi accessible qu'omniprésent.

L'envers de la médaille de cette dépendance est l'émission de gaz à effet de serre (GES), principalement le dioxyde de carbone (CO_2) dont les quantités ne cessent de croitre. Les émissions dans l'air causées par le secteur des transports sont toujours en augmentation malgré la diminution des GES émis par chaque véhicule par kilomètre parcouru (Gonzalez-Feliu et al., 2013; Sportisse, 2008). Le parc automobile québécois est en augmentation de 2,2 % par année entre autre à cause de l'accroissement de la population et de l'étalement urbain ce qui augmente la demande en combustibles fossiles (Perreault & Bourque, 2014; SAAQ, 2013).

Afin de réduire la dépendance aux carburants fossiles pour le secteur des transports, des stratégies d'approvisionnement en énergies alternatives ont été développées. Ces énergies alternatives peuvent réduire la quantité de combustibles fossiles tout en permettant à la population de bénéficier de la même mobilité. Le soleil est la principale source d'énergie dite « renouvelable » de la planète, laquelle permet des processus climatiques et biologiques. Les processus climatiques, les vents et le cycle de l'eau, permettent de produire respectivement de l'énergie éolienne et de l'hydroélectricité. Les organismes autotrophes, tel les plantes utilisent la photosynthèse pour capter de l'énergie solaire afin de la transformer en matière. Cette croissance fait augmenter la biomasse végétale qui à son tour fait augmenter la biomasse animale. Toute la biomasse peut être ensuite exploitée sous forme d'électricité, de biogaz ou de biocarburant. L'utilisation des énergies alternatives réduit alors globalement les impacts sur

l'environnement et d'éviter le transfert des émissions atmosphériques en pollution terrestre ou aquatique.

La présente étude vise à comparer les impacts de différentes sources d'énergies nécessaire, provenant de combustibles fossiles sous forme d'essence et de gaz naturel compressé (GNC), de biomasse de déchets ou d'hydroélectricité (bioGNC et bio-électricité), pour faire fonctionner des véhicules en limitant au minimum les impacts environnementaux générés. La première hypothèse porte sur l'alimentation en énergie des voitures; les voitures alimentées en énergie provenant de la valorisation des matières organiques (MO) auront un impact plus faible sur l'environnement que l'ensemble des autres voitures, soit celles alimentées en combustibles fossiles et celles alimentées en électricité. La seconde hypothèse sur les impacts causés par la fabrication de la batterie nécessaire à l'utilisation de véhicules électriques, indique que la présence de ce système d'emmagasinage d'énergie causera plus de dommages que les voitures utilisant du bioGNC provenant des MO comme sources d'énergie

Ce présent mémoire se divise en quatre chapitres. Dans un premier temps, une revue de littérature traite de la consommation d'énergie conventionnelle et alternative dans le transport routier. Divers outils d'évaluation d'impacts environnementaux sont exposés afin d'évaluer les impacts environnementaux des voitures. Le deuxième chapitre décrit la méthodologie utilisée afin de définir les frontières et le découpage des processus du système afin de correspondre à une unité fonctionnelle permettant la comparaison entre les scénarios. Les indicateurs environnementaux de la catégorie d'impacts ou de la catégorie de dommages de la méthode IMPACT 2002+ permettent d'évaluer les divers scénarios. L'analyse de sensibilité est établie en utilisant la méthode ReCiPe et en comparant la provenance de l'électricité. Le troisième chapitre présente les résultats obtenus pour le bilan des flux, pour les évaluations des impacts et dommages environnementaux ainsi que ceux obtenus dans l'analyse de sensibilité afin de comparer les divers scénarios. Dans un quatrième temps, la discussion permet de revenir le potentiel d'application de la valorisation des MO en matière de transport et inclus des perspectives sur la mobilité.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Ce premier chapitre présente le bilan des différentes utilisations d'énergie dans le secteur des transports. Dans un premier temps, la revue de littérature traite des connaissances en matière d'énergie dans le secteur des transports. Dans un deuxième temps, les différents gisements énergétiques et leurs impacts environnementaux sont décrits. La gestion des matières organiques est aussi détaillée. Les évaluations environnementales comme méthode d'analyse terminent le chapitre.

1.1 Énergie et secteurs de consommation

L'utilisation des sources d'énergie est en constante évolution. Les sources et les quantités varient dans le temps et selon les régions et selon les secteurs d'activité. L'évolution de la consommation d'énergie du secteur des transports ainsi que ses diverses utilisations sont décrits dans les sous-sections qui suivent.

1.1.1 Consommation énergétique

Actuellement, près de 80 % de l'énergie consommée dans le monde provient des carburants fossiles tel le pétrole, le charbon et le gaz naturel (MERN, 2014; REN21, 2016). Le Tableau 1.1 représente l'évolution de l'utilisation des sources d'énergies primaires depuis les années 90. En 22 ans le charbon passe de 2 231 à 3 879 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep) (+ 74 %). Malgré la diminution de la proportion du pétrole dans la consommation mondiale (36,8 % à 31,4 %), la demande a tout de même passée de 3 232 à 4 194 Mtep, soit une augmentation de 30 %. Alors que le gaz naturel conserve la même proportion de la demande mondiale, celle-ci montre une augmentation de 71 %. Bien que peu présente dans la consommation d'énergie, l'hydroélectricité présente une hausse de 72 % entre 1990 et 2012. L'ensemble des énergies renouvelables sont passées de 12,8 % à 13,5 % de la demande d'énergie représentant 1 802 Mtep. La demande en énergie nucléaire augmente de 22 %.

Toutefois, il en résulte une diminution de la part du total de 1,2 %. La demande d'énergie primaire a augmentée de 52 % entre 1990 et 2012 passant de 8 782 à 13 361 Mtep. L'augmentation de la consommation crée, entre autres une hausse d'exploitation pétrolière posant des problèmes en causant des émissions de gaz à effet de serre (GES) responsables des changements climatiques (MERN, 2014). La consommation énergétique a presque doublé en deux décennies malgré les efforts de la communauté internationale.

Tableau 1.1 Consommation mondiale d'énergie primaire selon la forme pour la période 1990-2012
Adapté de MERN, (2014, p.5)

Formes d'énergie	**Demande mondiale [millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep)]**		**Part du total (%)**		**Variation totale 1990-2012 (%)**
	1990	**2012**	**1990**	**2012**	
Charbon	2 231	3 879	25,4	29,0	+ 74 %
Pétrole	3 232	4 194	36,8	31,4	+ 30 %
Gaz naturel	1 668	2 844	19,0	21,3	+ 71 %
Sous-total fossiles	**7 131**	**10 917**	**81,2**	**81,7**	**+ 53 %**
Hydroélectricité	184	316	2,1	2,4	+ 72 %
Autres renouvelables	941	1 486	10,7	11,2	+ 58 %
Sous-total renvouvelables	**1 125**	**1 802**	**12,8**	**13,5**	**+ 60 %**
Nucléaire	526	642	6,0	4,8	+ 22 %
Total	**8 782**	**13 361**	**100**	**100**	**+ 52 %**

Ceci étant, la part des énergies renouvelables est en croissance au cours des 25 dernières années notamment en raison de la volonté de minimiser l'exploitation des ressources fossiles (Protocole de Kyoto) qui a donné une impulsion au développement et à l'implantation de nouvelles technologies (Hydro-Québec, 2014b). La répartition des énergies consommées varie selon le pays dans le monde. Le Tableau 1.2 présente cette variabilité en matière de demande et de type d'énergie consommée.

Tableau 1.2 Consommation d'énergie primaire en 2013 pour différents territoires

		Énergie			**Source**
			Nucléaire	**Renouvelable**	

	Énergie par personne[1] (éq. kg pétrole/hab)	**Combustible fossile** (%)	(%)	**Biomasse et déchet** (%)	**Autre** (%)	
Mondial	1 894	82	5	13		(MERN, 2014)
Europe	3 605	56	14	17	13	(Eurostat, 2015)
États-Unis	6 916	83	8	2	7	(EIA, 2012)
Canada	7 202	72	10	5	13	(ONÉ, 2015)
Québec	4 901	62	0	1	37	(MERN, 2015)

Au niveau mondial, la demande de 13 361 millions de tep représente 1 894 kg équivalent pétrole par habitant. Selon les particularités de la localisation, les demandes énergétiques varient. Ainsi, au Canada, la demande énergétique (7 202 éq. kg pétrole/hab) est presque deux fois plus grande qu'en Europe (3 605 éq. kg pétrole/hab). Les pays en développement diminue la moyenne mondiale de demande énergétique (MERN, 2014). Pour l'ensemble des régions, plus de la moitié de l'énergie provient des combustibles fossiles. L'Europe mise beaucoup sur la diversification des apports énergétiques permettant d'avoir un apport en combustibles fossile plus faible (56 %), ce qui est moins le cas en Amérique du Nord. Les États-Unis, 82 % de l'énergie provient des combustibles fossiles tant dis qu'au Canada la proportion est de 72 %. Alors que l'énergie nucléaire consommée représente 6 % de la consommation mondiale, c'est le double en Europe (14 %) et 10 % au Canada. Quant au Québec, il a fermé sa seule centrale nucléaire (Gentilly-2) en 2012 (Goubau, 2013). La catégorie d'énergie renouvelable de biomasse et de déchet inclut l'utilisation de bois ou des déchets pour en faire de la chaleur, de l'électricité ou un combustible. Cette source représenté sur la consommation totale sur le continent nord-américain avec 2 % aux États-Unis, 5 % au Canada et 1% au Québec. La catégorie contenant les autres énergies renouvelables comprend, entre autres, l'hydroélectricité, le solaire et l'éolien. Au Québec, 99,8 % de l'électricité provient de l'hydroélectricité ce qui explique le 37 % de consommation d'énergies renouvelables (EIA, 2016a).

---

[1] (IEA, 2016; MERN, 2013; Université de Sherbrooke, 2016)

1.1.2 Source d'énergie par secteur

Chaque secteur d'activités économiques a des caractéristiques propres de consommation d'énergie. La Figure 1.1 permet d'introduire le bilan de la consommation énergétique selon le secteur d'activité économique au Canada.

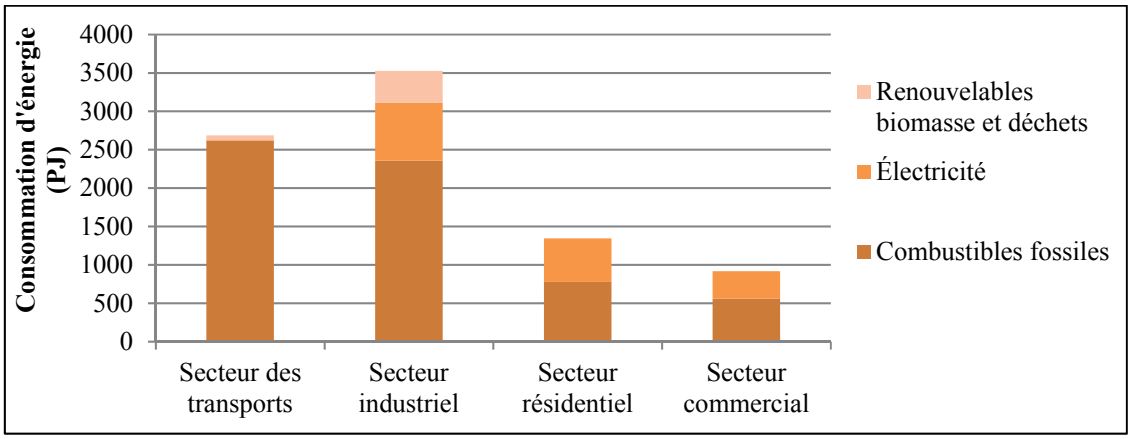

Figure 1.1 Consommation énergétique par secteur d'activité économique au Canada
Adaptée de RNCan, (2005)

Le secteur des transports comprend autant le transport maritime, ferroviaire, aérien, pipelinier que le transport routier. Il est presque basé à 98 % (2 619 PJ) sur les combustibles fossiles. Au niveau de la consommation de carburants fossiles tous secteurs d'activités confondus, le transport représente à lui seul 22 % (MERN, 2013). La consommation de produits pétroliers est supérieure à celles des autres énergies dans les secteurs industriel (2 358 PJ), résidentiel (777 PJ) et commercial (558 PJ). Le secteur industriel représente tous les types d'activités manufacturières, minières, forestières, alimentaires, des pâtes et papiers et de métallurgie. Les profils de consommation représentent donc une moyenne de l'ensemble des activités. L'énergie renouvelable utilisée par le secteur industriel est principalement dû à l'utilisation de bois par le secteur forestier (412 PJ) (RNCan, 2005). Les multilogements, les plex, les unifamiliales sont considérés dans le secteur résidentiel. Le niveau commercial, les commerces de détail de même que les institutions en santé et en éducation ainsi que le secteur de la restauration font partie de cette section. Pour ces deux derniers secteurs, seul l'électricité et les combustibles fossiles sont employés. Le choix de la source d'énergie primaire pour alimenter

un secteur d'activité influence directement les impacts de ce dernier sur l'environnement. Étant le secteur consommant le plus de combustibles fossiles, le secteur des transports est celui qui offre le meilleur potentiel afin de réduire la dépendance aux énergies fossiles.

1.1.3 Secteur des transports

L'ensemble de la consommation d'énergie de tous les moyens de déplacement utilisés est compilé dans le secteur des transports. La consommation d'énergie du secteur des transports au Québec est en augmentation constante tel que présentée dans la Figure 1.2.

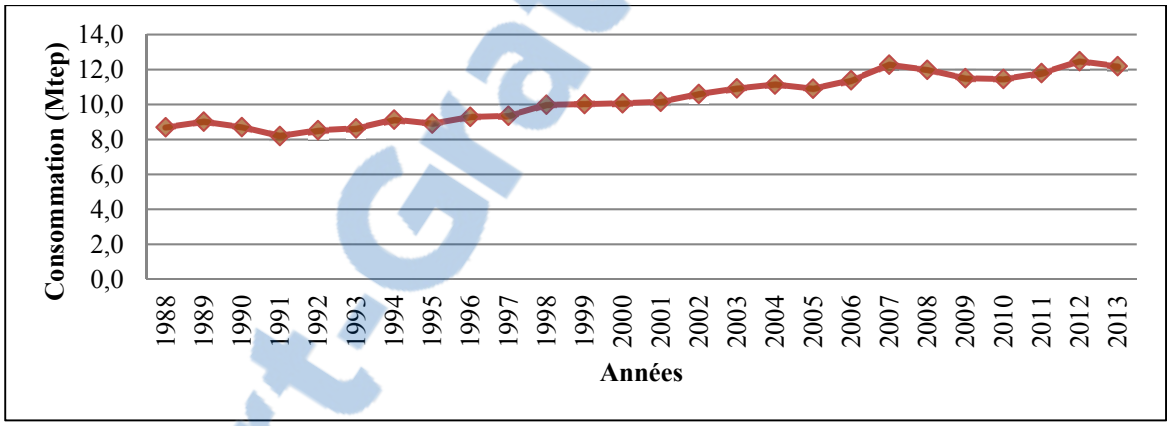

Figure 1.2 Consommation d'énergie du secteur des transports au Québec
Adaptée de MERN (2013)

La consommation d'énergie du secteur représente 12 Mtep en 2013 comparativement à 8,7 Mtep en 1988. Le secteur est responsable de 44 % des émissions de GES totales (MERN, 2015). Malgré l'augmentation des déplacements non motorisés, le vélo et la marche et des transports en commun motorisés, le choix du véhicule motorisé représente encore le mode de transport le plus utilisés (Lavoie, 2011). Le secteur des transports inclut la consommation énergétique des différents modes de déplacements motorisés comme réparti dans la Figure 1.3.

Rapport-Gratuit.com

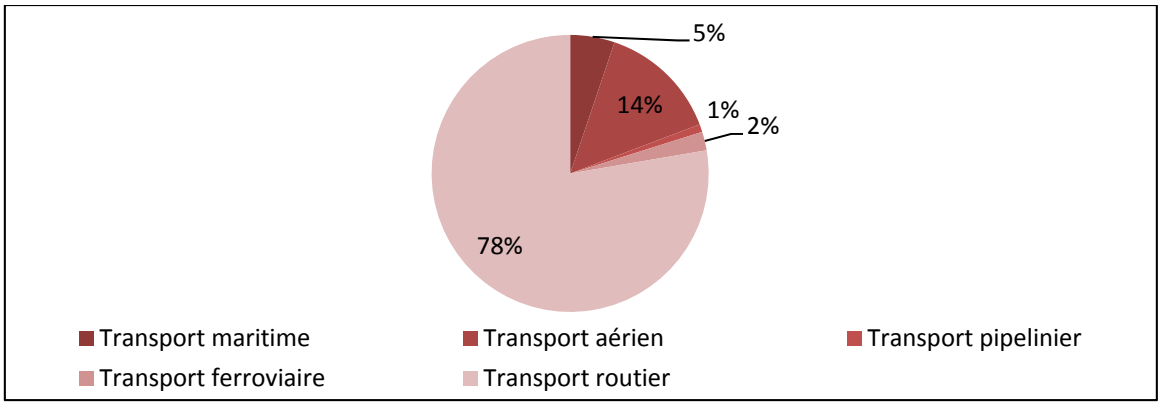

Figure 1.3 Répartition de l'énergie consommées selon les modes de transport au Québec
Adaptée de MERN (2013)

Le transport routier représente un peu plus du trois quart de toute l'énergie utilisée dans le secteur des transports (78 %). Incluant le transport des personnes et de marchandises, plusieurs types de véhicules sont employés. De façon individuelle, tous les types de véhicules routiers ont diminué leur consommation, les camions lourds transportant de la marchandise sont passés de 41,5 L/100 km à 32,2 L/100 km (MERN, 2015), alors que les petites voitures sont passée en moyenne de 10,1 L/100 km à 8,8 L/100 km entre 1992 et 2011 puis à 7,1 L/100 km en 2016 (MERN, 2015). Même si individuellement les véhicules sont plus efficaces, l'augmentation de la consommation énergétique du transport routier est présente. Elle est attribuable à la croissance du parc automobile (Perreault & Bourque, 2014; SAAQ, 2013) tel que le montre la Figure 1.4.

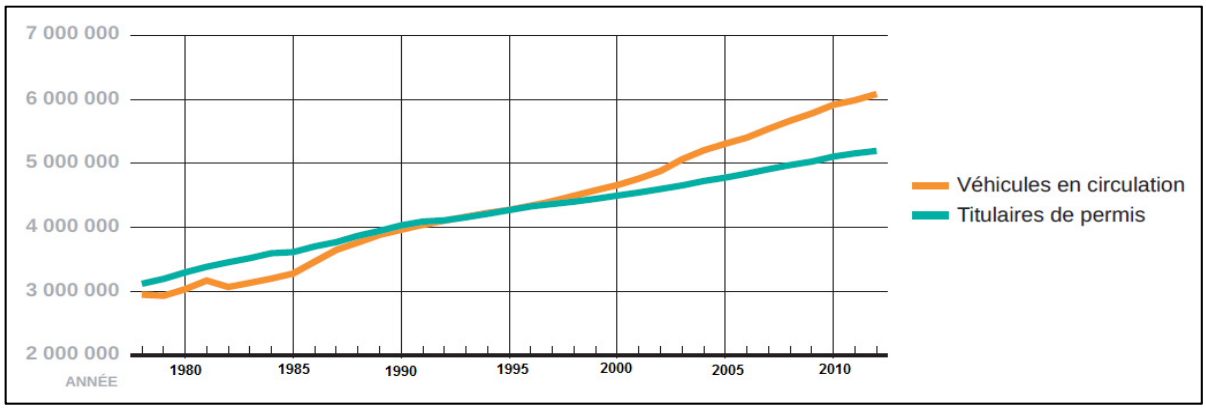

Figure 1.4 Évolution de la relation entre la quantité de véhicules en circulation et le nombre de titulaire de permis de conduire au Québec
Tirée de SAAQ (2013, p.4)

Il y avait en 2015 près de 6 310 810 véhicules sur les routes du Québec (SAAQ, 2016). De ce nombre environ 13 500 véhicules sont électriques (AVEQ & SAAQ, 2016). Le kilométrage moyen de véhicules individuels est de 20 000 km annuellement (Hydro-Québec, 2016). Le transport routier représente 69 % des émissions de GES du secteur des transports principalement sous forme de CO_2, de CH_4 et de N_2O (Statistique Canada, 2012).

1.2 Émissions associées aux différentes sources d'énergie

Les énergies consommées produisent des émissions dans l'air, l'eau et le sol. Les émissions des combustibles fossiles et des sources d'énergie alternative en transport sont abordés dans la présente section. Les émissions produites par les différentes sources d'énergie produisant l'électricité et les émissions des biocarburants et du gaz naturel comprimé (GNC) sont également présentés.

1.2.1 Combustibles fossiles

La majorité de l'énergie consommée dans le secteur des transports provient des carburants fossiles. Le Québec n'étant pas un producteur de pétrole doit s'approvisionner à l'extérieur par pipeline, par train ou par bateau afin de combler ses besoins. Les importations proviennent depuis 2014 de plus de 50 % des États-Unis, le reste provient de partout dans le monde (Whitmore & Pineau, 2015). La provenance du carburant est importante puisqu'il définit la méthode d'extraction utilisé ainsi que le mode de transport de celui-ci. Au niveau canadien, le *Règlement sur les carburants renouvelables* exige depuis 2010 que l'essence soit composée en moyenne de 5 % de carburant renouvelable (Ministère de la justice, 2013). Le Tableau 1.3 présente les émissions produites lors de la consommation de carburants utilisés en transport routier au Québec.

Les émissions de CO_2 produites par la consommation d'essence sont inférieures à celles du diesel. L'autre différence entre ces deux combustibles fossiles est la production énergétique plus grande pour le diesel.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 1.3 Informations sur la consommation de carburant par une voiture au Québec

	Énergie produite (GJ/m^3)	**Impacts environnementaux**	
		Émission de GES (éq. kg CO_2/L)	**Autres émissions**
Essence	34,66	2,3	NO_x, CH_4, $PM_{2,5\text{ -}10}$, CO, COV
Diesel	38,68	2,7	
Sources	(ONÉ, 2016)	(OEÉ, 2014)	(Cames & Helmers, 2013; Robert, Kleeman, & Jakober, 2007)

1.2.2 Sources d'énergie alternatives exploitées en transport

Actuellement, les sources alternatives d'énergie représente 9 % de la consommation mondiale d'énergie primaire (EIA, 2012). Le Protocole de Kyoto de 1997 marque le début des politiques de décarbonisation et la croissance d'utilisation d'énergies renouvelables. La décarbonisation provient autant de la réduction de la biomasse fossile que de la biomasse forestiere. L'utilisation de sources autres que les combustibles fossiles permet de diminuer les émissions de GES. L'électricité peut être produite à partir de plusieurs sources d'énergie primaire tel que le charbon, l'essence ou encore l'énergie solaire ou l'hydroélectricité. Par ailleurs, les biocarburants, le gaz naturel comprimé (GNC) et le gaz naturel comprimé produit à partir de déchets (bioGNC) sont aussi des sources d'énergies alternatives pour le transport.

Électricité

Produite à partir de diverses sources d'énergie primaires, l'électricité est utilisée comme source d'énergie pour des fins de chauffage, d'éclairage et de transport. L'électricité ne s'emmagasine pas comme de l'essence, il faut introduire un système d'emmagasinage afin de répondre à la consommation du moment opportun. Dans le secteur des transports, les batteries sont un moyen d'emmagasiner l'énergie. La Figure 1.5 présente la différence de source d'énergies primaires utilisées pour produire de l'électricité.

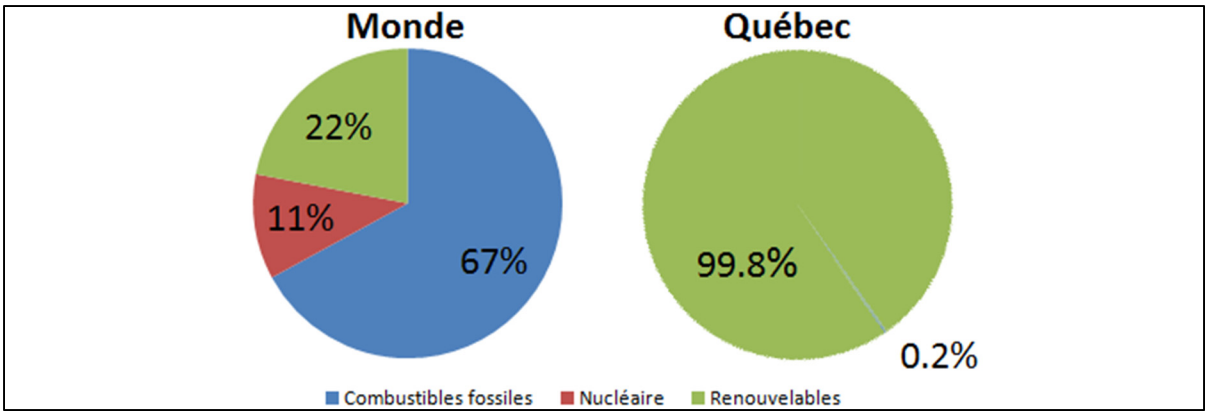

Figure 1.5 Sources d'énergie primaire pour produire de l'électricité
Adaptée de EIA, (2016a) et Whitmore & Pineau, (2015)

L'utilisation de produits pétroliers, de charbon, de gaz ou de pétrole pour produire de l'électricité est beaucoup plus présente au niveau mondial (67 %). Entrant dans les combustibles fossiles, le charbon est l'une des plus importantes sources d'énergie dans les pays en émergence ou comme énergie d'appoint afin de répondre aux fluctuations de demande électrique (MERN, 2014). L'utilisation de ses sources d'énergie primaire ne permet pas de répondre aux objectifs de diminution de la dépendance aux combustibles fossiles. Seul 22 % de l'électricité produite mondialement provient d'énergies renouvelables. Au Québec, la presque totalité de l'électricité est produite à partir d'hydroélectricité (99 %), les énergies éoliennes et solaires complètent la partie renouvelables avec 0,8 % (Whitmore & Pineau, 2015). Le plusieurs formes d'énergies renouvelables de façon directe et indirecte (Ellabban et al., 2014). La biomasse est de l'énergie solaire disponible sous forme de matière organique (MO) présente dans les secteurs industriels, agricoles et résidentiels. L'industrie forestière est la principale productrice de biomasse résiduelle végétale. Elle est la plus valorisée au Québec puisqu'elle est grandement disponible et facilement accessible, bien qu'elle les sources soit diffuses sur le territoire (Hydro-Québec, 2014a). Avec cette biomasse, il est nécessaire de recourir à 0,27 kg de bois afin de produire 1 kWh comparativement à la biomasse agricole et urbaine qui nécessite 0,68 kg pour produire la même quantité d'électricité. La biomasse agricole est influencée par les conditions géographiques et climatiques de la région. La biomasse agricole se compose des résidus végétaux et animaux ainsi que de la production agricole et des élevages (CIRAIG, 2014; Hydro-Québec, 2014a). Au niveau résidentiel, la

collecte sélective des matières résiduelles (MR) à trois voies permet la séparation de la partie recyclage (papier, carton, plastique, verre et métal), de la partie des MO urbaines et de la partie des déchets ultimes acheminés dans les sites d'enfouissement. Chaque année au Québec, chaque personne produit environ 400 kg de MR réparties selon la composition présenté dans la Figure 1.6. présente les sources primaires de l'électrique associée aux principales filières d'énergie produites dans le monde.

Tableau 1.4 Sources primaire d'électrique et leurs impacts sur l'environnement

Sources primaires	**Production de 1kWh**	**Fonctionnement**	**Impacts**	**Sources**
Hydro-électricité-(Au fil de l'eau)	Selon le débit	Énergie cinétique de l'eau	-Modifie le paysage	(CIRAIG, 2016)
Hydro-électricité-(Réservoir)	Selon le débit	Énergie cinétique de l'eau	-Modifie le paysage -Modifie la faune et la flore	(Bouvier, 2006; CIRAIG, 2016)
Charbon	0,0144 kg	Combustion	-Pollution de l'air (3,7 t éq. kg CO_2/ GJ)	(IEA, 2014; ONÉ, 2016)
Éolienne	Variable	Énergie cinétique du vent	-Perturbe la faune aviaire -Occupe des terres agricoles	(Aouachria & Haddad, 2010; MERN, 2013)
Solaire	Variable	Thermique, Énergie photovoltaïque	-Occupe des terres agricoles	(Greenpeace Canada, 2011; Hydro-Québec, 2014b).
Biomasse forestière	0,27 kg de bois	Biométhanisation, Gazéification Limiter par la régénération du milieu exploité, les conditions géographiques et climatiques	-Perte de biodiversité -Perturbe des écosystèmes	(EIA, 2016a; Gouvernement du Canada, 2013; Hydro-Québec, 2014a; Moletta, 2015; Perron, 2010; Pinard, 2011)
Biomasse agricole	0,68 kg de MO ou 0,1 m^3 de biogaz			
Biomasse urbaine				

Dans la filière d'hydroélectricité, la création d'un réservoir permet d'avoir une certaine souplesse pour répondre à la fluctuation des besoins lors des pics de consommation, cela a l'avantage d'éviter l'utilisation de batteries pour emmagasiner l'énergie des demandes

électriques (CIRAIG, 2016). Malgré son faible rendement (0,0144 kg/kWh), le charbon est largement utilisé au niveau mondial, il représente 40 % du total de l'électricité produite (EIA, 2016).

La Terre puise son énergie du soleil, une source d'énergie nécessaire à la vie. Elle provient sous forme de rayonnement créant de l'énergie thermique et lumineuse desquelles dérivent plusieurs formes d'énergies renouvelables de façon directe et indirecte (Ellabban et al., 2014). La biomasse est de l'énergie solaire disponible sous forme de matière organique (MO) présente dans les secteurs industriels, agricoles et résidentiels. L'industrie forestière est la principale productrice de biomasse résiduelle végétale. Elle est la plus valorisée au Québec puisqu'elle est grandement disponible et facilement accessible, bien qu'elle les sources soit diffuses sur le territoire (Hydro-Québec, 2014a). Avec cette biomasse, il est nécessaire de recourir à 0,27 kg de bois afin de produire 1 kWh comparativement à la biomasse agricole et urbaine qui nécessite 0,68 kg pour produire la même quantité d'électricité. La biomasse agricole est influencée par les conditions géographiques et climatiques de la région. La biomasse agricole se compose des résidus végétaux et animaux ainsi que de la production agricole et des élevages (CIRAIG, 2014; Hydro-Québec, 2014a). Au niveau résidentiel, la collecte sélective des matières résiduelles (MR) à trois voies permet la séparation de la partie recyclage (papier, carton, plastique, verre et métal), de la partie des MO urbaines et de la partie des déchets ultimes acheminés dans les sites d'enfouissement. Chaque année au Québec, chaque personne produit environ 400 kg de MR réparties selon la composition présenté dans la Figure 1.6.

La valorisation énergétique des MO répondent à l'objectif de 2020 du *Plan de Gestion des Matières Résiduelles* du gouvernement du Québec. Le *Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage* a été mis en place afin de favoriser la gestion des 1 488 900 tonnes de MO du Québec par l'ajout d'une troisième voie de collecte (Guimont, 2010; Hydro-Québec, 2014a). Les différentes collectes s'effectuent entre les résidences et le site traitements sur une distance qui varie selon les dispositions géographiques et selon la densité de la population (urbain ou rural) (ADEME, 1997).

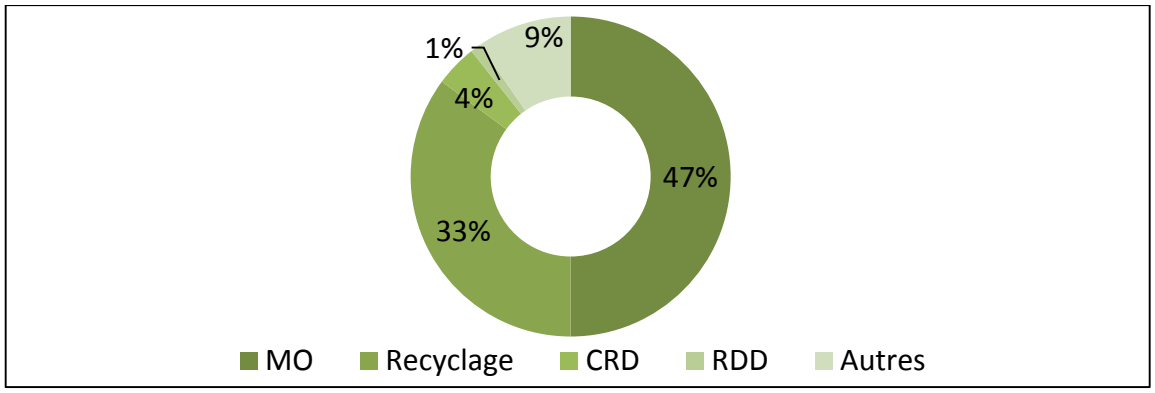

Figure 1.6 Composition des matières résiduelles générées par le secteur résidentiel au Québec
Adaptée de Recyc-Québec (2015)

Une fois les MO recueillies, la valorisation énergétique s'effectue soit par la biométhanisation qui est un procédé biochimique ou par la gazéification qui est un procédé thermique. La biométhanisation produit du gaz combustible provenant de la fermentation des MO. Une fois le CO_2 retiré, la combustion du biogaz active une turbine qui permet de produire de l'électricité (Moletta, 2015; Perron, 2010). La gazéification est un procédé de combustion de solide ou de liquide qui transforme, dans un digesteur, la biomasse en gaz combustibles, le biogaz. Ce gaz alimente ensuite une turbine qui produit de l'électricité (Hydro-Québec, 2014a). L'énergie nécessaire aux opérations et les pertes représente entre 15 et 20 % (Couturier, Berger, & Meiffren, 2001; Grosso, Nava, Testori, Rigamonti, & Viganò, 2012). Les deux procédés de valorisation produisent des résidus solides, le digestat, qui transformé en compost permet d'enrichir les terres agricoles (ADEME, 2010; Perron, 2010).

Biocarburants

Les biocarburants sont des carburants liquides issus de la transformation par processus chimiques issus des résidus agricoles, des huiles et des graisses, et des déchets de l'élevage animal. Ils sont considérés comme sources d'énergies alternatives renouvelables. Le Tableau 1.5 détaille les caractéristiques lors de la consommation des principaux biocarburants, soit l'éthanol et le biodiesel, ceci exclus la production de ces carburants.

Tableau 1.5 Caractéristiques des biocarburants consommés par des véhicules au Québec

	Matières premières	Énergie produite (GJ/m^3)	Émission de GES (éq. kg CO_2 /L)
Essence	Pétrole	34,66	2,3
Éthanol	Maïs, cellulose	23,60	-
90% Essence +10% éthanol	Mixte pétrole + maïs	33,56	2,2
Diesel	Pétrole	38,68	2,7
Biodiesel	Graisses, huiles et graisses de friture	35,59	1,7
Sources	(Groupe Conseil Nutshimit Inc., 2007)	(ONÉ, 2016)	(Degraeuwe et al., 2016; Groupe Conseil Nutshimit Inc., 2007; RNCan, 2014)

Le diesel est celui qui procure le plus d'énergie mais qui produit le plus d'émissions de gaz à effet de serre (GES). L'essence est le carburant qui produit le plus d'énergie par volume soit 34,66GJ/m^3. L'ajout d'éthanol dans l'essence diminue légèrement l'énergie produite (33,56GJ/m^3) pour un même volume et diminue la quantité d'émission de GES. L'utilisation de terre agricole afin de produire de l'énergie entre en conflit avec la nécessité de répondre aux besoins alimentaires. Son utilisation peut conduire à la déforestation des terres et à la perte de biodiversité en laissant place à des monocultures (Groupe Conseil Nutshimit Inc., 2007).

GNC et bioGNC

L'utilisation de gaz naturel dans le secteur des transports se présente sous forme de gaz naturel compressé (GNC) qui est 300 fois plus comprimé que le gaz naturel du réseau (Yang, Ge, Wan, Yu, & Li, 2014). La compression permet d'augmenter l'énergie présente pour un volume donné. L'industrie gazière est la source principale du gaz naturel exploité sous forme de GNC. Ceci étant, la biométhanisation permet de produire du biogaz qui, après décarbonisation (CO_2), désulfuration (H_2S) et déshydratation (H_2O) a des caractéristiques similaires au gaz naturel (bioGNC) (ANNEXE I, Tableau A-I- 1). Ces traitements nécessitent de l'énergie pour fonctionner et entraînent des pertes de l'ordre de 20 % (Grosso et al., 2012). Le biogaz purifié est compressé et entreposé pour être utilisé (GazMétro, 2013; Yang et al., 2014). Les émissions de GES sont présentées au Tableau 1.6.

Tableau 1.6 Caractéristiques du GNC et du bioGNC leur consommation au Québec

	Émission de GES (éq. kg CO_2 /L)	Sources
Essence	2,3	(RNCan, 2014)
GNC	1,7	(GazMétro, 2013)
bioGNC	0,23	(Table ronde sur l'utilisation du gaz naturel dans les transports, 2010)

Les émissions de polluants atmosphériques et de particules fines sont en grande partie responsables des impacts du gaz naturel sur l'environnement et sur la santé humaine (GazMétro, 2013). En revanche, l'utilisation de bioGNC participe à l'exploitation de ressources renouvelables, réduisant ainsi les impacts de l'exploitation gazière.

1.3 Analyse du cycle de vie : Outil d'évaluation des incidences environnementales

Il existe plusieurs méthodes afin d'évaluer les impacts de biens ou de services. L'objectif des méthodes est de rendre possible l'analyse afin de choisir l'option qui répond le mieux aux critères caractéristiques d'un produit donné. Les analyses environnementales permettent de déterminer l'option la moins dommageable pour l'environnement. Différentes échelles d'évaluation sont envisageables. L'échelle globale caractérise des impacts sur les changements climatiques, l'échelle régionale tient compte de l'eutrophisation des cours d'eau et l'échelle locale considère les impacts toxicologiques (Jolliet, Saadé, & Crettaz, 2010). Ces différents niveaux d'analyses peuvent être traités ensemble ou séparément. Les analyses sont parfois effectuées à l'échelle globale, parfois plus locale. Comme le présente le Tableau 1.7, d'autres outils d'analyse environnementale sont aussi utilisables.

Le cycle de vie d'un produit ou d'un service peut être analysé dans son ensemble ou en partie selon l'échelle et selon le nombre de substances étudiées. L'analyse de cycle de vie (ACV) évalue l'ensemble des émissions d'un produit de l'extraction des matières à la fin de vie de celui-ci, englobant ainsi davantage d'impacts que les analyses traitant d'une substance uniquement. L'analyse de flux d'une substance et l'analyse de flux de matière considèrent les effets d'un seul élément sur les divers milieux (eau, air, terre). De même, le bilan carbone a une vision moins globale en étudiant uniquement les effets des émissions de gaz à effet de serre et l'influence de ces gaz sur les changements climatiques.

Tableau 1.7 Caractéristiques principales des outils d'analyses environnementales
Adapté de Jolliet et al. (2010)

Outil	Échelle	Substances considérés	Effets évalués	Cycle de vie

Analyse de cycle de vie	Globale	Multiples	Multiples en fonction de l'objet	Totalité du cycle de vie
Analyse de flux d'une substance	Régionale ou globale	Unique	De la substance selon le temps et la région	Cycle de la substance
Analyse de flux de matière	Régionale ou national	-	De la substance selon le temps et la région	Cycle de la substance
Bilan carbone	Globale	Carbone	Émissions de GES Changement climatiques	Global

1.3.1 Étapes de l'analyse de cycle de vie

L'ACV permet d'évaluer les impacts environnementaux globaux de toutes les étapes du cycle de vie du produit donné, de l'extraction des matières premières à l'élimination; de l'extraction des matières permettant la fabrication du produit en passant par la distribution, l'utilisation elle-même, l'entretien, le recyclage et la gestion en fin de vie. Toutes ses étapes participent à des flux de matières (ressources et déchets) et d'énergie qui sont transformés en impacts environnementaux potentiels. Les normes de la famille ISO 14000 permettent de normaliser l'utilisation de l'ACV ainsi que les étapes de celle-ci qui sont présentées à la Figure 1.7 (ISO, 2010).

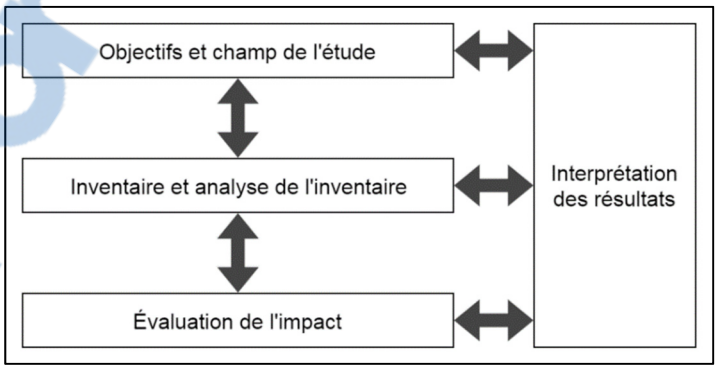

Figure 1.7 Étapes de l'analyse de cycle de vie
Tirée de CIRAIG (2016)

Afin de pouvoir comparer différents scénarios, un objectif d'étude doit être défini et rapportée sur une unité quantifiable, l'unité fonctionnelle (Jolliet et al., 2010). La fonction première d'un véhicule est de se déplacer, l'utilisation de cette fonction ainsi que de l'énergie nécessaire pour y arriver permet de fixer l'unité fonctionnelle. Daylan & Ciliz (2016) ont fixé l'unité

Rapport-Gratuit.com

fonctionnelle à 1 km parcouru avec un véhicule de taille moyenne pour chacun des carburants composés d'éthanol et d'essence à différentes concentrations utilisées de leur production à leur consommation.

L'inventaire de cycle de vie (ICV) est constitué d'après des bases de données qui associent les intrants et les extrants du bien, produit ou service à l'étude. L'ICV est dépendant de la collecte de données scientifiques provenant du milieu public et privé de divers pays (Pré Consultant, 2016). Le domaine de l'étude environnementale étant en constante évolution, d'avantage de recherche est effectué ce qui peut entrainer une interprétation différente d'un même projet d'ACV (Dandres, 2012; Thériault, 2011). C'est pourquoi les flèches de la Figure 1.7 sont dans les deux sens. Le bilan des flux inclut les intrants et les extrants du bien, produit ou service à l'étude quantifiés selon l'unité fonctionnelle s'établissent en assemblant des processus élémentaires afin de d'établir un système.

L'étape d'évaluation des impacts du cycle de vie reprend le bilan des flux de l'ICV d'un bien, produit ou service et le transforme en impacts environnementaux potentiels (CIRAIG, 2014). Cette transformation est possible grâce à des indicateurs environnementaux regroupés dans la catégorie d'impacts ou dans la catégorie de dommages. Plusieurs méthodes permettent d'utiliser ses indicateurs afin d'évaluer les impacts du cycle de vie d'un produit ou d'un service.

1.3.2 Catégories d'indicateurs environnementaux

Il existe deux grandes catégories d'indicateurs environnementaux, la catégorie d'indicateurs d'impacts et la catégorie d'indicateurs de dommages. La prise compte de l'échelle d'évaluation de chaque effets lors de l'interprétation permet de considérer la portée de chaque catégorie d'impacts et de dommages et de l'ensemble du produit (Thériault, 2011). L'évaluation d'inventaire de cycle de vie actuelle n'inclut pas dans ses impacts les éléments, dont le bruit, les odeurs de même que les champs électromagnétiques.

Les indicateurs de la catégorie d'impacts, *midpoint,* permettent d'évaluer sous l'angle des problèmes découlant de l'inventaire de cycle de vie. Il y a un plus grand nombre de catégories

et les unités sont des équivalents de substances émises. Les éléments de l'inventaire de cycle de vie (ICV) ayant un lien direct avec les effets sont évalués. Par exemple les émissions de particules fines ont des conséquences sur les effets respiratoires de la population. Par la quantité et la spécificité des catégories d'impact l'incertitude des résultats est plus faible alors que la vulgarisation s'avère plus difficile puisque les résultats ne se rapportent à aucun concept concret (Picherit, 2010; Thériault, 2011).

Les indicateurs de la catégorie de dommages, *endpoint,* regroupe les dommages en fonction des conséquences. Les effets secondaires sont considérés, la causalité des émissions est plus difficile à établir. Au lieu de parler des effets respiratoires des particules fines, la vision plus large de la catégorie de dommages parle des dommages qui affectent la santé humaine. Par exemple, les émissions de particules fines affectant le système respiratoire causent des dommages potentiels à la santé humaine. Par la relation avec un concept, concret la vulgarisation est plus facile, par exemple parler de dommages sur la qualité des écosystèmes plutôt que de détérioration de la couche d'ozone. Cependant, l'incertitude est plus grande et implique le jugement de valeur par l'attribution de valeur pour catégoriser les impacts en dommage (Thériault, 2011). Diverses méthodes de type *midpoint* ou de type *endpoint* permettent d'analyser un produit alors que certaines méthodes utilisent les deux approches.

Méthode Impact 2002+

La méthode IMPACT 2002+ V2.10 (*Impact Asessment of Chemical Toxics*) regroupe les deux types d'approches d'évaluation d'inventaire de cycle de vie (ÉICV). Cette méthode hybride est utilisée au niveau international (Humbert et al, 2012). Elle caractérise l'ICV en 14 catégories d'impacts en plus de les regrouper en quatre catégories de dommage présenté dans la Figure 1.8

Le
Tableau 1.8 présente les deux catégories d'indicateurs de la méthode IMPACT 2002+ et leurs unités ainsi que l'échelle sur laquelle les impacts sont analysés. Puisqu'il s'agit d'une méthode hybride, les deux types d'approches sont réalisables. Le tableau permet également de relier les

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

catégories d'impacts avec les catégories de dommages. Le facteur de dommage permet de passer des catégories d'impacts aux catégories de dommages.

La catégorie d'impacts de toxicité humaine regroupe les effets carcinogènes et non carcinogènes. Du côté des indicateurs de dommages, la catégorie de santé humaine est rapportée par équivalent d'années de vie perdue par année exprimée pour l'ensemble de la population (DALY). Les dommages causés sur l'écosystème de mesure en fraction d'espèce disparue sur un m^2 durant une année ($PDF \cdot m^2$).

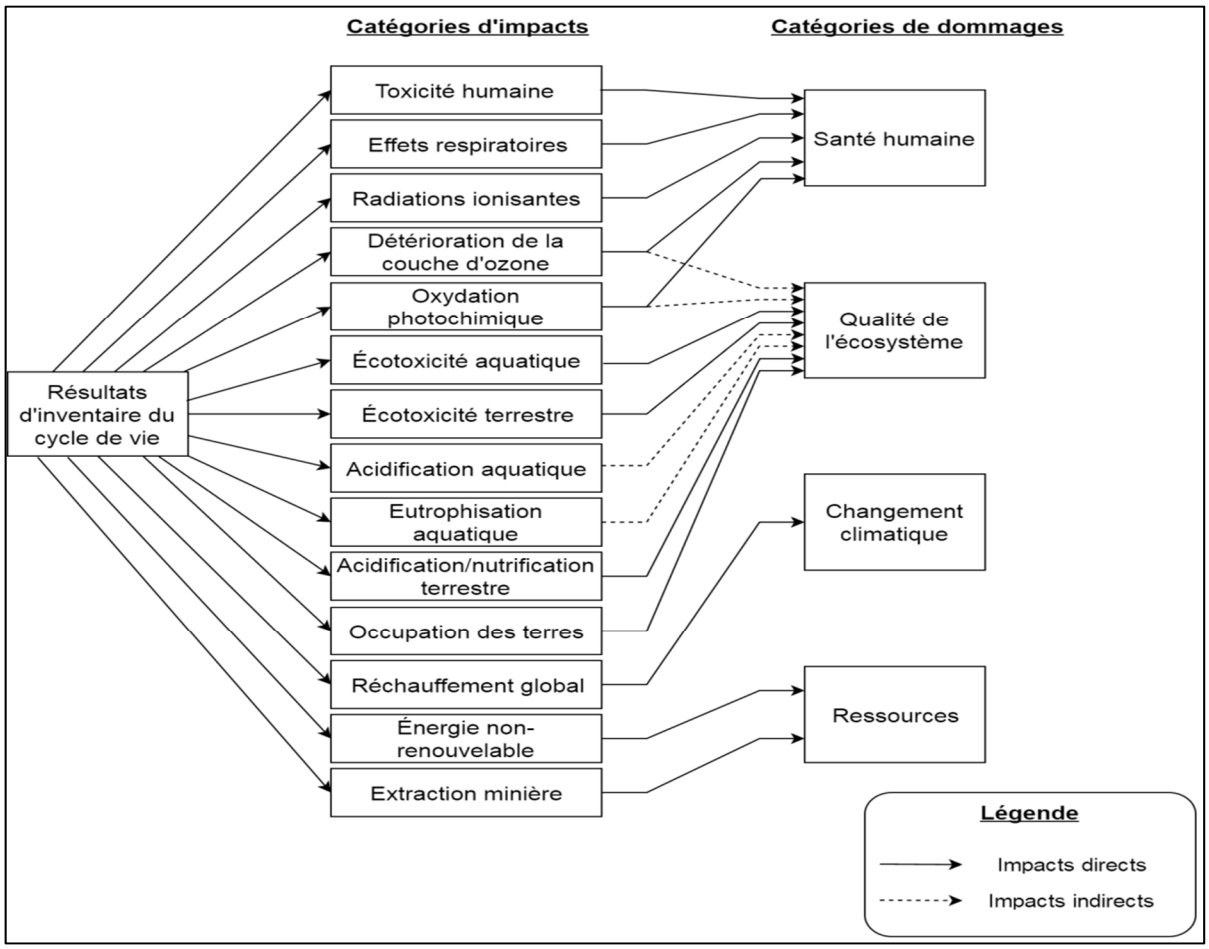

Figure 1.8 Méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie IMPACT 2002+
Adaptée de Dandres, (2012); Humbert, Schryver, Bengoa, Margni, & Jolliet, (2012) ; Jolliet (2003)

L'eutrophisation aquatique et l'acidification/nutrification terrestre sont reconnus pour avoir des impacts sur la qualité de l'écosystème, pour le moment leurs intégrations à la catégorie de

dommage sont en développement. L'indicateur de changement climatique est présenté sous la même forme que l'indicateur d'impacts du réchauffement global (kg CO_2 éq. $_{air}$). Finalement, la catégorie de dommage des ressources qui regroupe l'énergie non-renouvelable et l'extraction minière, est calculée en énergie non disponible pour utilisation ultérieure (MJ).

Tableau 1.8 Caractéristiques des indicateurs environnementaux et leurs unités les facteurs de dommages et l'échelle d'influence selon la méthode IMPACT 2002+
Adapté de CIRAIG, (2014); Humbert et al., (2012) et Jolliet et al., (2010)

Indicateur *Midpoint*	**Substances de référence**	**Facteur de dommage**	**Échelle**	**Indicateur *Endpoint***	**Unité de référence dommage**
Toxicité humaine (carcinogène et non carcinogène)	éq. kg chlorure de vinyle $_{air}$	$1{,}45 \cdot 10^{-6}$	Global et local	**Santé humaine**	DALY
Effets respiratoires	éq. kg $PM_{2,5}$ $_{air}$	$7{,}00 \cdot 10^{-4}$	Local		
Destruction de la couche d'ozone	éq. kg CFC-11$_{air}$	$1{,}05 \cdot 10^{-3}$			
Radiations ionisantes	éq. Bq C 14$_{air}$	$2{,}10 \cdot 10^{-10}$			
Oxydation photochimique	éq. kg C_2H_4 $_{air}$	$2{,}13 \cdot 10^{-6}$	Régional		
Écotoxicité aquatique	éq. kg Triéthylène glycol $_{eau}$	$5{,}02 \cdot 10^{-5}$	Local	**Qualité de l'écosystème**	PDF*m^2
Écotoxicité terrestre	éq. kg Triéthylène glycol $_{sol}$	$7{,}91 \cdot 10^{-3}$			
Acidification aquatique	éq. kg SO_2 $_{eau}$	1	Régional		
Eutrophisation aquatique	éq. kg SO_2 $_{air}$	1			*En développement*
Acidification terrestre	éq. kg PO_4^{3-} $_{eau}$	1,04			
Occupation des terres	éq. m^2 terre	1,09			PDF·m^2
Réchauffement global	éq. kg CO_2 $_{air}$	1	Global	**Changement climatique**	éq.. kg CO^2 $_{air}$
Énergie non-renouvelable	MJ d'énergie supplémentaire	$4{,}56 \cdot 10^{1}$	Global	**Ressources**	MJ
Extraction minière	éq. kg pétrole brut.	$5{,}10 \cdot 10^{-2}$			

Méthode ReCiPe

Tout comme IMPACT 2002+, la méthode ReCiPe combine deux types d'approche, de type problème et de type dommage. (Thériault, 2011). La méthode ReCiPe comporte 18 catégories d'impacts *midpoint* qui sont par la suite regroupées en trois catégories de dommages *endpoint* comme présenté à la Figure 1.9.

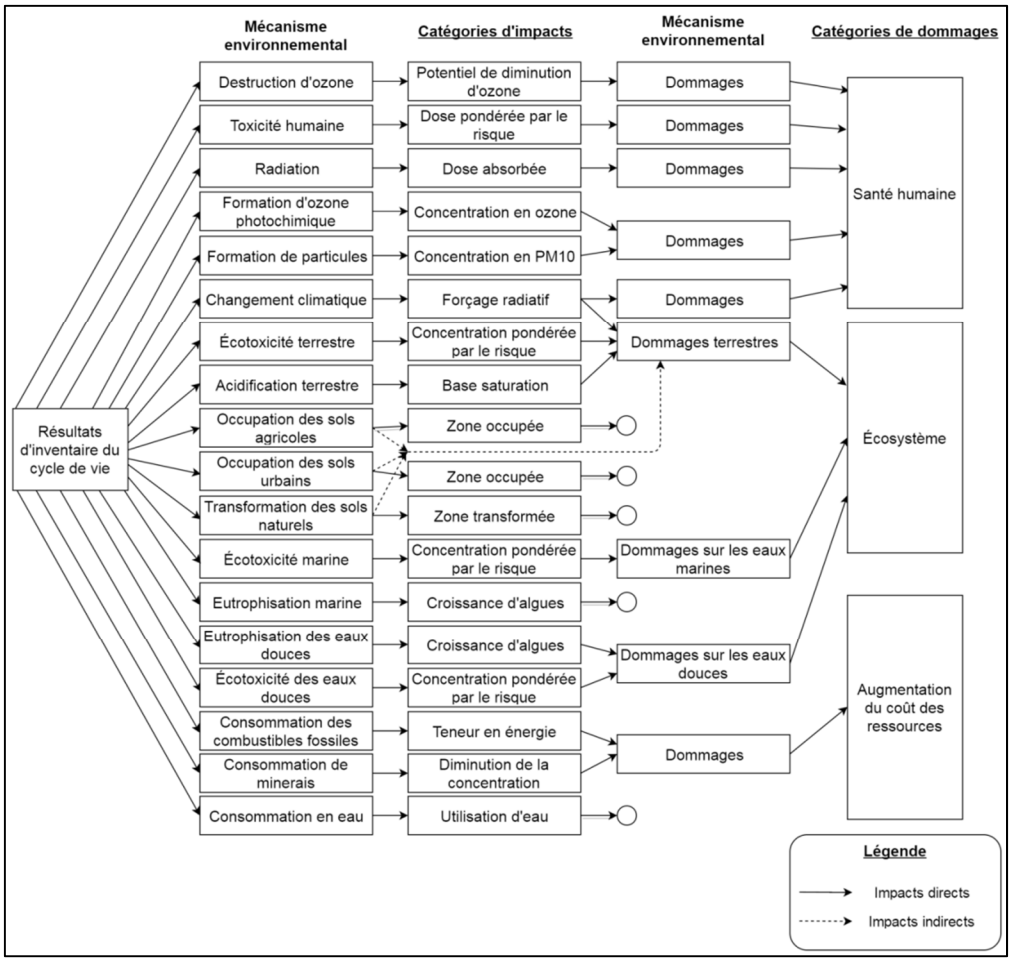

Figure 1.9 Méthode ReCiPe
Tirée de Goedkoop et al., (2009)

La méthode ReCiPe regroupent les catégories d'impacts en catégories de dommages; certaines catégories d'impacts ne sont pas reliés aux catégories de dommages (ANNEXE II, Tableau A-II- 1). Le premier indicateur est la santé humaine rapporté par équivalent d'années de vie perdue par année exprimée pour l'ensemble de la population (DALY). Les dommages sur l'écosystème se mesurent en fraction d'espèce disparue sur un m^2 durant une année ($PDF \cdot m^2$). Le dernier indicateur est l'augmentation le coût des ressources ($). La méthode ReCiPe traite les émissions de chacune des substances selon trois perspectives qui tiennent compte de la

gestion des incertitudes et de l'évolution à travers le temps (Goedkoop et al., 2009; Jolliet et al., 2010).

1.3.3 Interprétation des résultats et analyse de sensibilité

L'interprétation de l'analyse de cycle de vie permet d'établir des conclusions répondant au cadre de l'étude. Dans le cadre de l'interprétation des résultats une analyse de sensibilité permet de vérifier la fiabilité des résultats obtenus par l'ACV. L'analyse de sensibilité peut se faire sur deux volets, d'abord en variant la méthode d'évaluation des impacts environnementaux ou en variant des paramètres du système. La variation dans les intrants permet de valider la sensibilité de l'ACV effectué pour un produit (Dandres, 2012). Les résultats de l'analyse de cycle de vie sont interprétés selon une méthodologie propre au système étudié.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Le présent chapitre présente la méthodologie associée à l'évaluation environnementale comparative de différents modes d'approvisionnement énergétique d'une voiture individuelle. Ainsi, la première partie aborde la définition des différents sous-systèmes, les limites du système considéré et l'unité fonctionnelle. La deuxième partie présente quant à elle le processus associé à l'établissement du bilan des flux pour les différents sous-systèmes pris en compte. L'évaluation des impacts environnementaux selon la méthode IMPACT 2002+ et ses indicateurs environnementaux sont abordés de même que la description des paramètres faisant l'objet d'une analyse de sensibilité.

2.1 Définition du système et caractérisation des scénarios

Cette section définit les caractéristiques du système étudié. Il s'agit d'établir d'une part l'unité fonctionnelle permettant la comparaison entre les différents scénarios et, d'autre part, les frontières du système.

2.1.1 Détermination du système et de l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle utilisée dans le cadre de cette étude est basée sur un véhicule de taille moyenne de style compact. Le véhicule est caractérisé par un moteur de 2 litres à 4 cylindres consommant 7,1 L d'essence sur une distance de 100 km, par exemple une Honda civic coupé (OEÉ, 2014). Le système est constitué d'un véhicule alimenté en énergie roulant sur une distance de 100 km. Afin d'assurer cette fonction, le système repose sur deux sous-systèmes principaux « véhicule » et « énergie ». La figure 2.1 représente de façon générique le système à l'étude.

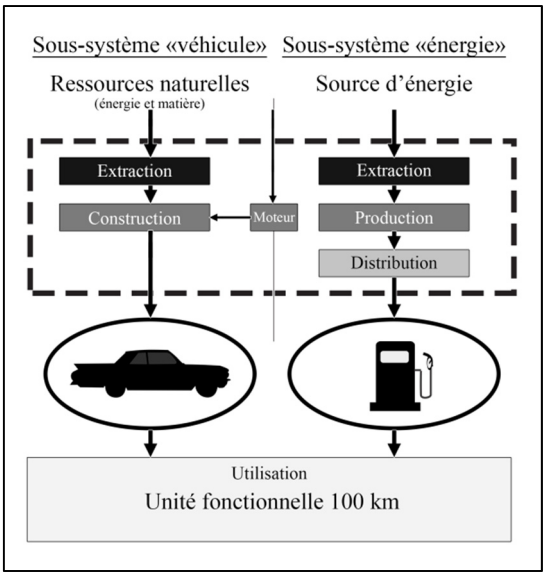

Figure 2.1 Détermination du système

Le regroupement des processus s'effectue d'après leur lien avec l'un ou l'autre des deux sous-systèmes « véhicule » et « énergie ». Ainsi, les ressources naturelles (les métaux et l'énergie) nécessaires qui sont extraites pour permettre la construction d'un véhicule sont prises en compte dans le sous-système « véhicule ». Le sous-système « énergie » inclut tous les processus pour extraire, produire et distribuer l'énergie nécessaire pour faire rouler le véhicule. Le moteur se retrouve à l'intersection des deux sous-systèmes puisque le choix de la source d'énergie définit le type de moteur qui sera fabriqué dans le sous-système « véhicule ».

2.1.2 Caractérisation des scénarios

Le système à l'étude prévoit l'évaluation environnementale de cinq scénarios associés à différentes filières d'approvisionnement énergétique: l'essence, le gaz naturel compressé (GNC), l'électrique ainsi que deux filières basées sur la valorisation des matières organiques (MO), soit sous forme de gaz naturel compressé (bioGNC) et sous forme d'électricité (bio-électrique). Dans le cas des deux derniers scénarios, ils s'appuient sur les MO, la première voiture utilisant le méthane produit par le processus de transformation de la matière en biogaz alors que la seconde est alimentée en électricité issue de la valorisation énergétique du méthane. Le

Tableau 2.1 indique les caractéristiques des cinq scénarios considérés en regard des deux sous-systèmes définis précédemment.

Tableau 2.1 Caractérisation des différents scénarios en fonction des deux sous-systèmes « véhicule » et « énergie »

Scénarios		**A**	**B**	**C**	**D1**	**D2**
		Voiture essence	**Voiture GNC**	**Voiture électrique**	**Voiture bioGNC**	**Voiture bio-électrique**
« véhicule »	**Type de moteur**	Essence	Diesel	Électrique, batterie au lithium	Diesel	Électrique, batterie au lithium
	Maintenance	Inclut les matériaux utilisés pour les réparations ponctuelles				
	Gestion de la fin de vie	Inclut la gestion de la carcasse de la véhicule, tous les matériaux vers le site d'enfouissement				
« énergie »	**Source d'énergie**	Essence	GNC	Électricité	GNC	Électricité
	Provenance	Raffinerie	Réseau GN	Réseau électrique	MO	MO

Le type de moteur du sous-système « véhicule » et la source d'énergie utilisée dans le sous-système « énergie » sont dépendant l'un de l'autre. Dès lors, la provenance de l'énergie caractérise chacun des cinq scénarios.

2.2 Bilan des flux

L'évaluation des impacts passe par l'établissement du bilan des flux pour les cinq scénarios considérés. Le bilan des flux est appliqué à un système qui considère un véhicule en fonction dans des conditions normales moyennes (les spécificités du démarrage/freinage ou les conditions extrêmes sont exclues). Ce bilan des flux est établi pour les deux sous-systèmes « véhicule » et « énergie » et ce, pour chacun des scénarios.

2.2.1 Sous-système « énergie »

Rapport-Gratuit.com

Le sous-système « énergie » définit les processus permettant l'approvisionnement d'énergie au véhicule. Les différents processus considérés dans le sous-système « énergie » varient en fonction du scénario d'approvisionnement en énergie (Figure 2.2).

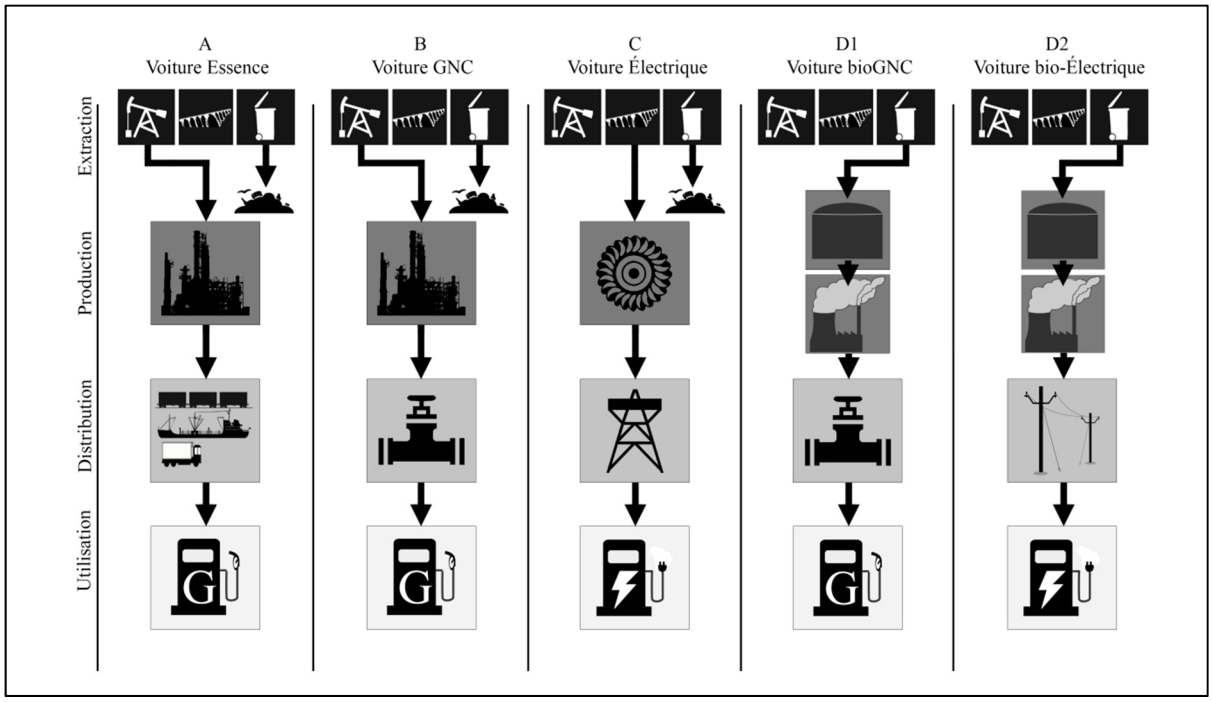

Figure 2.2 Schéma du bilan des flux des scénarios pour le sous-système « énergie ».

Tous les scénarios comportent les quatre même processus soit l'extraction, la production, la distribution et l'utilisation. Toutes les MO collectées sont acheminées vers un site de traitement, qui permet de disposer les MO collectées et non traitées des scénarios A (voiture essence), B (voiture GNC) et C (voiture électrique) et d'y disposer les rejets de la biométhanisation. Le site de traitement inclut également le biométhanisateur qui permet de valoriser les MO en énergie pour les scénarios D1 (voiture bioGNC) et D2 (voiture bio-électrique). Ce site inclut l'emplacement d'approvisionnement en énergie pour les véhicules (la station-service). Le

Tableau 2.2 présente le taux de transformation des processus d'extraction et de production des scénarios A, B et C.

Dans le processus d'extraction, les scénarios utilisant les énergies fossiles ou l'hydroélectricité incluent le transport de MO au même titre que les scénarios D1 et D2 qui valorisent les MO. La quantité moyenne de MO des scénarios D1 et D2 est utilisée.

Tableau 2.2 Taux de transformation des processus d'extraction et de production des scénarios de voitures présentes sur les routes

Processus		**Description**	**Intrants**	**Taux de transformation**	**Extrants**	**Sources**
Extraction et Production	**A** **B** **C**	Collecte par camion 26 t·km	kg de MO collectées	1	kg de MO enfouies	(ADEME, 1997)
	A	ANNEXE III, Tableau A-III- 1	L d'essence	1	L d'essence	(Écoinvent 2.2 2010)
	B		kg de gaz naturel du réseau	1	kg de GNC	
	C		kWh d'électricité du réseau	1	kWh d'électricité	

L'extraction des produits pétroliers des scénarios A et B est représentée par des industries de raffinage des États-Unis. Selon le *Règlement sur les carburants renouvelables,* l'essence consommée au Québec doit contenir 5 % d'éthanol. Le processus disponible dans le logiciel de Pré Consultant (2016) se rapprochant le plus de la réalité québécoise contient 4 % d'éthanol (ANNEXE III, Tableau A-III- 1). Le scénario C utilise l'hydroélectricité produite au Québec est représentée par l'aménagement de barrages permettant l'accumulation d'eau dans un bassin. Les processus d'extraction et de production d'énergie par valorisation énergétique servant aux scénarios D1 (voiture bioGNC) et D2 (voiture bio-électrique) sont présentés à la Figure 2.3.

La quantité de MO est collectée pour produire l'énergie nécessaire pour répondre à la demande énergétique de la voiture pour parcourir sur une distance de 100 km. À cette production initiale s'ajoute 16 % d'énergie pour répondre aux besoins des processus de production ainsi que de pallier aux pertes. Le processus de production débute par la biométhanisation qui produit du digestat, des matières à composter ainsi que le biogaz.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

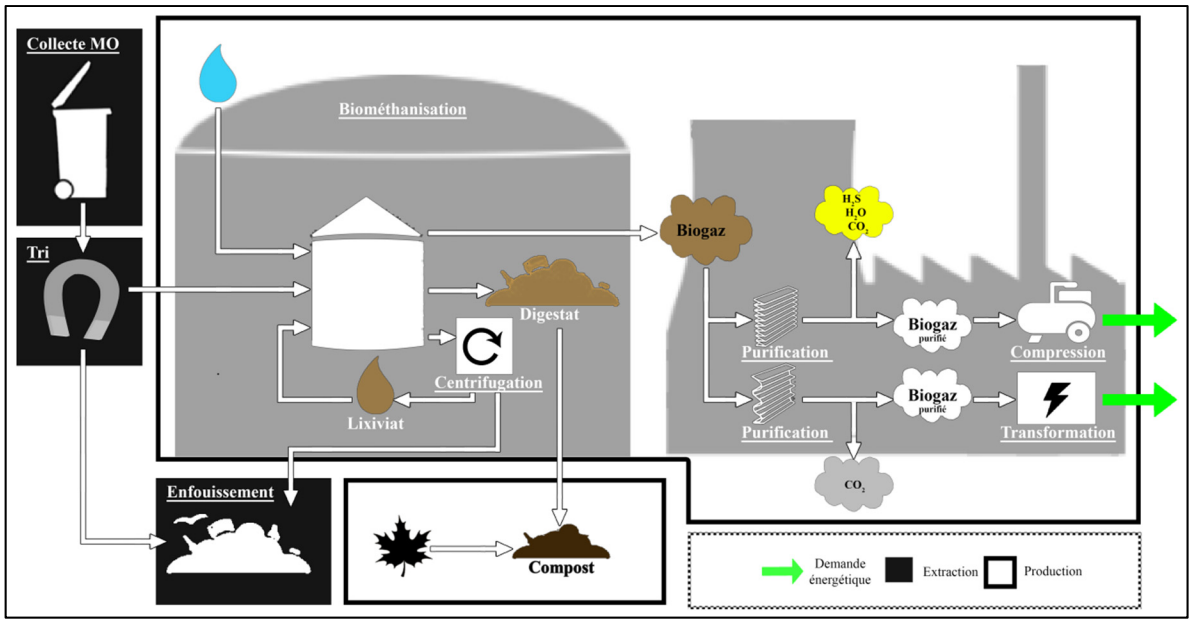

Figure 2.3 Schéma du bilan des flux de la valorisation énergétique par traitement des MO

Le digestat est centrifugé afin de permettre d'un côté de réduire la quantité de rejet enfouis et de l'autre de diminuer la quantité d'eau ajouté au procédé de biométhanisation. Malgré la réinjection du lixiviat, l'ajout d'eau est nécessaire. Des matières carbonées vertes sont ajoutées aux matières à composter afin d'obtenir un compost. Le biogaz est ensuite utilisé selon les scénarios. Comparativement à la voiture alimentée par bioGNC (scénario D2) qui nécessite un biogaz sans impuretés, la voiture bio-électrique (scénario D1) transforme ce biogaz en électricité, donc seul le CO_2 est retiré. Ce sont les taux de transformation qui permettent de déterminer toutes les quantités de matières nécessaires au fonctionnement du sous-système. Le Tableau 2.3 présente les taux de transformation des différentes étapes des processus menant directement à la production d'énergie des scénarios de valorisation des MO de la Figure 2.3.

Pour les scénarios alimentés à partir de la MO, le processus d'extraction consiste à collecter les MO afin de les acheminer au site de traitement. Le taux de transformation des étapes accessoires du processus de production, c'est-à-dire les étapes ne menant pas à la formation de biogaz, tel la centrifugation du digestat et le compostage sont présenté dans l'ANNEXE III (Tableau A-III- 2).

Tableau 2.3 Taux de transformation des processus d'extraction et de production de d'énergie des scénarios de valorisation des MO

		Étapes-description	Intrants	Taux de transformation	Extrants	Sources
Extraction	**D1 D2**	Collecte avec camions 26 t·km	kg de MO collectées	1	kg de MO collectées	(ADEME, 1997)
	D1 D2	Tri	kg de MO collectées	0,95	kg de MO	(Gouvernement du Canada, 2013)
Production	**D1 D2**	Biométhanisation	kg de MO	0,18	kg de biogaz	(Grosso et al., 2012; Perron, 2010)
	D1	Purification	kg de biogaz	0,60	kg de biogaz purifié	(Gouvernement du Canada, 2013; Grosso et al., 2012)
		Compression	kg de biogaz pur	1	kg bioGNC	(Moletta, 2015)
	D2	Transformation	kg de biogaz	0,50	kWh bioélectricité	(Gouvernement du Canada, 2013; Grosso et al., 2012)

Ces étapes accessoires permettent d'obtenir la quantité de compost produit à partir des matières à composter provenant de la biométhanisation ainsi que des matières carbonées vertes provenant d'une collecte indépendante. L'étape de centrifugation permet de minimiser l'ajout d'eau en réinjectant de lixiviat dans la biométhanisation. Les processus employés dans le logiciel SimaPro pour chacune des étapes des processus sont présentés à l'ANNEXE III. Le Tableau 2.4 présente les taux de transformation des processus de distribution et d'utilisation des cinq scénarios permettant aux voitures de rouler sur une distance de 100 km.

Pour chacun des scénarios, les infrastructures de la station-service ne sont pas considérées. Puisque l'essence, le GNC et l'électricité sont produits hors du site de traitement, ils nécessitent des transports pour pouvoir alimenter la voiture. La distribution de l'essence s'effectue par train, par bateau et par pipeline à la station-service permettant d'alimenter la voiture.

Tableau 2.4 Taux de transformation des processus de distribution et d'utilisation des cinq scénarios

Processus		Description	Intrants	Taux de trans.	Extrants	Sources

Distribution et Utilisation	A	Par train, bateau et pipeline	L d'essence	7,1	100 km	(Hydro-Québec 2016a)
	B	Connecté au réseau et compressé	kg de GNC	4,9	100 km	(Écoinvent 2.2 2010)
	C	Connecté au réseau	kWh d'électri-cité	18	100 km	(Hydro-Québec 2016a)
	D1	Produit directement sur place	kg de bioGNC	4,9	100 km	(Écoinvent 2.2 2010)
	D2	Produit directement sur place	kWh de bio-électricité	18	100 km	(Hydro-Québec 2016a)

Le GNC et l'électricité proviennent directement d'un réseau d'approvisionnement en place. Les scénarios utilisant l'énergie produite directement sur le site de traitement à partir de la valorisation énergétique ne nécessite aucun transport. L'établissement du bilan des flux du sous-système « énergie » permet, par la suite, d'établir les émissions des contaminants dans l'air, dans l'eau et dans le sol en considérant les facteurs de transformation associés.

2.2.2 Sous-système « véhicule »

Le bilan des flux du sous-système « véhicule » défini les différents processus permettant l'assemblage d'une voiture pouvant rouler. Ainsi, l'ensemble des émissions produites par un véhicule roulant sur une distance de 100 km doivent être de comptabiliser les émissions produites par ce véhicule. Puisque ce n'est pas le type d'énergie qui influence le sous-système « véhicule » la compilation d'émissions s'effectue d'après la base de données d'inventaire de cycle de vie d'Écoinvent 2.2 (2010).

Les processus sont regroupés selon les fonctions qu'ils occupent soit la fabrication, l'opération et la maintenance. Le Tableau 2.5 montre les processus du logiciel SimaPro (Pré Consultant, 2016) .

Tableau 2.5 Processus de SimaPro utilisés pour représenter les scénarios

Scénarios	Nom du processus dans SimaPro
A	*Transport, passenger car, petrol, 4% vol. ETBE with ethanol from biomass, EURO4/CH U*
B	*Transport, passenger car, natural gas/CH U*

C	*Transport, passenger car, electric, LiMn2O4/CH U*
D1	*Transport, passenger car, natural gas/CH U*
D2	*Transport, passenger car, electric, LiMn2O4/CH U*

Le choix de chacun des processus dans Simapro est basé sur les caractéristiques offert par de la base de données de Écoinvent, (2010) afin d'être le plus près de la réalité québécoise. Por chacun des scénarios, certains processus de la base de données ne sont pas considérés c'est le cas des infrastructures routières, leur maintenance et leur disposition en fin de vie. Les émissions produites par les différents processus sont regroupés selon les fonctions qu'ils occupent. Ainsi, la fonction de fabrication tient compte des processus d'extraction incluant l'acquisition des matières premières et de leurs transformations en matériaux utilisables, l'utilisation des matériaux et leur assemblage. La fonction d'opération tient compte des émissions produites par l'usure du véhicule. Enfin, la fonction de maintenance inclut la maintenance ponctuelle regroupant la disposition des huiles, des pneus et autres composantes devant être changés selon la durée de vie de chacun des matériaux ainsi que la gestion en fin de vie de la carcasse du véhicule.

2.3 Évaluation des impacts environnementaux

L'utilisation du logiciel SimaPro de Pré Consultant (2016), avec la base de données européenne d'inventaire de cycle de vie (ICV) de Écoinvent, (2010), a été retenue pour l'étude. La méthode hybride IMPACT 2002+ V2.1.0 permettant de procéder à l'évaluation d'inventaire de cycle de vie (ÉICV) selon les approches *midpoint* et *endpoint* a été choisie. Par ailleurs, l'évaluation des impacts a fait l'objet d'une analyse de sensibilité basée sur la méthode hybride ReCiPe en utilisant la même base de données de Écoinvent (2010). La variation de la provenance de l'énergie fait partie du deuxième volet de l'analyse de sensibilité.

2.3.1 Approche fonctionnelle

L'approche fonctionnelle permet d'organiser les processus de manière à quantifier les émissions des processus des sous-systèmes « véhicule » et « énergie » selon les tâches effectuées. L'approche fonctionnelle permet de distinguer l'influence de l'énergie utilisée; lors de l'opération par rapport à la fabrication du véhicule ou à sa maintenance. La fabrication du

moteur est également prise en compte dans la fonction fabrication alors que son usure entre dans l'opération. La fonction d'opération est dépendante du type de moteur et de l'énergie utilisée, elle inclut l'ensemble des processus du sous-système « énergie ». C'est ainsi que les trois fonctions sont représentées pour chacun des scénarios. La durée de vie des voitures présentée au Tableau 2.6 permet de répartir chacune des fonctions la distance parcourue. Cette répartition selon la durée de vie permet de répartir les émissions de chacune des fonctions équitablement sur l'ensemble les kilomètres parcourus.

Tableau 2.6 Durée de vie des voitures selon le moteur

Moteur	Durée de vie de la voiture	Source
À essence	200 000 km	(Écoinvent, 2010)
Diesel (au GNC)	200 000 km	
Électrique	100 000 km pour la batterie / 200 000 km	

2.3.2 Catégorie d'impacts

Dans la méthode IMPACT 2002+, les indicateurs environnementaux selon l'approche par problèmes (*midpoint)* permettent de regrouper les impacts en 14 catégories. Les indicateurs environnementaux de la catégorie d'impacts (M_j) sont basés sur les résultats d'émissions de l'inventaire de cycle de vie (ICV) Écoinvent (2010) et sont calculés selon l'équation (2.1).

$$M_j = \sum_j (W_i \times FC_{j,i}) \tag{2.1}$$

où *i* représente l'inventaire de cycle de vie de la base de donnée de (Écoinvent, 2010)) et *j* l'une des 14 catégories d'impacts.

Pour chaque substance du système, la masse de la substance (W_i) est identifiée selon le bilan des flux et l'ICV. Cette masse est multipliée par son facteur de caractérisation ($FC_{j,i}$) afin d'obtenir le score en kg-équivalent d'une substance de référence. Le $FC_{j,i}$ est unique en fonction de la substance étudiée et selon le *midpoint*. Les $FC_{j,i}$ sont déterminés par la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV), ici IMPACT 2002+. La somme des pointages de toutes les substances du système permet d'établir le score du *midpoint* exprimé en kg-équivalent d'une substance de référence (

Tableau 2.7).

Le poids (W_i) d'une substance multiplié par son $FC_{j,i}$ donne un résultat en substances de références. L'ensemble de toutes les substances émises rapporté en substance de référence permet d'obtenir le pointage de chacun des indicateurs environnementaux.

Simons, (2016) a signalé une anomalie dans la base d'inventaire de cycle de vie au niveau des émissions produites dans le sol provenant de l'opération des voitures au GNC. Cette anomalie empêche la comparaison des véhicules GNC aux autres types de véhicules. C'est la variation de la méthode utilisée pour quantifier l'usure des pneus causant les émissions au sol qui en est l'origine. La catégorie d'impact de l'écotoxicité est affectée de même que les catégories de toxicité humaine et d'écotoxicité aquatique. Comme la source d'énergie n'est pas à la base de ses variations, des scénarios corrigés des voitures GNC (B*) et bioGNC (D1*) sont réalisés en remplaçant les valeurs d'émissions dans le sol par les valeurs de la voiture à l'essence. L'ANNEXE V présente les résultats avant et après la correction (Figure-A-V 1).

Tableau 2.7 Substances de références des indicateurs environnementaux de la catégorie d'impacts de la méthode IMPACT 2002+
Adapté de CIRAIG, (2014); Humbert et al. (2012) et Jolliet et al. (2010)

Catégorie d'impacts	Substances de référence	Échelle
Toxicité humaine	éq. kg chlorure de vinyle $_{air}$	Global et local
Effets respiratoires	éq. kg $PM_{2,5\ air}$	Local
Destruction de la couche d'ozone	éq. kg CFC-11 $_{air}$	Local
Radiations ionisantes	éq. Bq C14 $_{air}$	Local
Oxydation photochimique	éq. kg $C_2H_{4\ air}$	Régional
Écotoxicité aquatique	éq. kg Triéthylène glycol $_{eau}$	Local
Écotoxicité terrestre	éq. kg Triéthylène glycol $_{sol}$	Local
Acidification aquatique	éq. kg $SO_{2\ air}$	Régional
Eutrophisation aquatique	éq. kg $SO_{2\ air}$	Régional
Acidification /nutrification terrestre	éq. kg $PO_4^{3-}{}_{eau}$	Régional
Occupation des terres	éq. m^2 terre	Régional
Réchauffement global	éq. kg $CO_{2\ air}$	Global
Énergie non-renouvelable	MJ d'énergie supplémentaire	Global
Extraction minière	éq. kg pétrole brut	Global

2.3.3 Catégorie de dommages

La méthode IMPACT 2002+ regroupe les indicateurs d'impacts en quatre indicateurs de dommages. Tout *endpoint* (E_d) se calculent d'après l'équation (2.2) permettant de créer le lien avec *midpoint* (M_i).

$$E_d = \sum_d (M_i \times FD_d) \tag{2.2}$$

où *d* représente la catégorie de dommages.

Les quatre *endpoint* se calculent de la même façon, soit en additionnant l'ensemble des dommages causés par chacun des *midpoint* (M_i) et en multipliant par les facteurs de dommages (FD_d). Le Tableau 2.8 indique les FD_d de la méthode IMPACT 2002+.

La catégorie d'impacts est multiplié par son FD_d donne un résultat en unité de référence selon la catégorie de dommages. La somme de tous ces résultats permet d'obtenir le pointage de chacune des catégories de dommages.

Tableau 2.8 Facteurs de dommages de la méthode IMPACT 2002+.
Adapté de CIRAIG, (2014), Humbert et al., (2012) et Jolliet et al., (2010)

Catégorie d'impacts	FD_d	Catégorie de dommages	Unité de référence
Toxicité humaine	$1{,}45 \cdot 10^{-6}$	**Santé humaine**	DALY
Effets respiratoires	$7{,}00 \cdot 10^{-4}$		
Destruction de la couche d'ozone	$1{,}05 \cdot 10^{-3}$		
Radiations ionisantes	$2{,}10 \cdot 10^{-10}$		
Oxydation photochimique	$2{,}13 \cdot 10^{-6}$		
Écotoxicité aquatique	$5{,}02 \cdot 10^{-5}$	**Qualité de l'écosystème**	$PDF \cdot m^2$
Écotoxicité terrestre	$7{,}91 \cdot 10^{-3}$		
Acidification aquatique	1		
Occupation des terres	1,09		
Réchauffement global	1	**Changement climatique**	éq. kg $CO_{2\ 'air}$
Énergie non-renouvelable	$4{,}56 \cdot 10^{1}$	**Ressources**	MJ
Extraction minière	$5{,}10 \cdot 10^{-2}$		

2.3.4 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité se déroule en deux volets. Le premier consiste à utiliser la méthode d'évaluation de cycle de vie ReCiPe afin de comparer avec la méthode IMPACT 2002+. La deuxième consiste à comparer les mix énergétique associé à la production électrique. Le

Tableau 2.9 présente les différences dans les catégories d'indicateurs de dommages des deux méthodes. Pour les catégorie d'indicateurs de dommages de la santé humaine et de qualité d'écosystème, les unités utilisées sont les même pour les deux méthodes. Le *endpoint* changement climatique n'existe pas pour la méthode ReCiPe. L'évaluation de la perte des ressources n'est pas effectuée sur la base de la même unité. La méthode IMPACT 2002+ attribue la perte de ressources en fonction de l'énergie qui n'est plus disponible (MJ) alors que la méthode ReCiPe quantifie cette perte de ressources selon l'augmentation du coût des ressources.

Tableau 2.9 Comparaison des catégories d'indicateurs de dommages des méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe

Endpoint	**Méthodes**	
	IMPACT 2002+	**ReCiPe**
Santé humaine	Années équivalente de vie perdue (DALY)	Années équivalente de vie perdue (DALY)
Qualité d'écosystème	Perte d'espèce durant 1 an ($PDF \cdot m^2$)	Perte d'espèce durant 1 an ($PDF \cdot m^2$)
Changement climatique	éq. kg $CO_{2\ air}$	-
Ressources	MJ	$ supplémentaire

Comme les catégories d'indicateurs de dommages sont influencés par les catégories d'indicateurs d'impacts, la comparaison des *midpoint* permet d'identifier davantage de différences entre les méthodes (Tableau 2.10).

Bien que les *midpoint* relatifs à la santé humaine soient semblables, les substances de références sont différentes laissant donc place à des variations entre les deux méthodes. Au niveau de la qualité de l'écosystème, la méthode ReCiPe possède des *midpoint* plus spécifique.

Rapport-Gratuit.com

Les substances de références sont également différentes. La méthode IMPACT 2002+ traite de l'occupation des terres arables seulement alors que la méthode ReCiPe traite autant des terres agricoles, urbaines que de la transformation de terres naturelles. La méthode ReCiPe considère les changements climatiques comme un *midpoint* inclus dans les *endpoint* relatifs à la santé humaine et dans celui de l'écosystème alors qu'il s'agit d'un indicateur de dommages pour la méthode IMPACT 2002+. Au niveau des ressources, les deux méthodes ne se ressemblent pas; les *midpoint* sont différents de même que le *endpoint.* La méthode ReCiPe du logiciel SimaPro présente 17 *midpoint* et trois *endpoint;* les indicateurs d'impacts d'épuisement de l'eau et l'eutrophisation marine ne sont pas analysés alors que l'indicateur de changement climatique est séparé en deux *midpoint*, soit la santé humaine et la qualité de l'écosystème (Pré Consultant, 2016).

Le second volet de l'analyse de sensibilité consiste à faire varier la provenance de l'électricité dans le système. L'ajout d'une voiture utilisant l'électricité produite à partir du charbon permet de représenter le type d'électricité majoritairement produite aux États-Unis (EIA, 2016b). Les scénarios présentent un mix énergétique incluant seulement une source d'énergie à la fois. C'est pourquoi 100 % de l'électricité est considérée produite à partir du charbon. Selon le logiciel SimaPro, l'utilisation d'électricité produite à partir de charbon au Texas a permis de représenter ce nouveau scénario (Tableau A-III- 2). Le bilan des flux et l'évaluation des impacts environnementaux obtenus en utilisant la méthodologie présentée sont exposés au le prochain chapitre.

Tableau 2.10 Comparaison des catégories d'indicateur d'impacts des deux méthodes

Méthode IMPACT 2002+			Méthode ReCiPe		
Endpoint	***Midpoint***	**Substances de référence**		***Midpoint***	***Endpoint***
Santé humaine	**Toxicité humaine**	éq. kg chlorure de vinyle $_{air}$	éq. kg 14DCB $_{air\ urbain}$	**Toxicité humaine**	**Santé humaine**
	Effets respiratoires	éq. kg $PM_{2,5\ air}$	éq. kg $PM_{10\ 'air}$	**Formation de particules**	
	Destruction couche d'ozone	éq. kg CFC-11$_{air}$	éq. kg CFC-11$_{'air}$	**Destruction couche d'ozone**	
	Radiations ionisantes	éq. Bq C 14 $_{air}$	éq. kg U^{235} $_{air}$	**Radiations ionisantes**	
	Oxydation photochimique	éq. kg C_2H_4 $_{air}$	éq. kg $NMVOC^6$ $_{air}$	**Oxydation photochimique**	
Qualité de l'écosystème	**Écotoxicité aquatique**	éq. kg $C_6H_{14}O_4$ $_{eau}$	éq. kg 14DCB $_{eau\ douce}$	**Écotoxicité eaux douces**	**Qualité de l'écosystème**
			éq. kg 14DCB$_{eau\ marine}$	**Écotoxicité marine**	
	Écotoxicité terrestre	éq. kg $C_6H_{14}O_4$ $_{eau}$	éq. kg 14DCB $_{sols}$	**Écotoxicité terrestre**	
	Acidification/ nutrification aquatique	éq. kg $SO_{2.\ air}$	-	-	
	Eutrophisation aquatique	éq. kg $SO_{2.air}$	éq. kg P $_{eau}$	**Eutrophisation eaux douces**	
			éq. kg N $_{eau}$	**Eutrophisation marine**	
	Acidification terrestre	éq. kg PO_4^{3-} $_{eau}$	éq. kg $SO_{2.\ air}$	**Acidification terrestre**	
	Occ. des terres	éq. m^2 de terre	éq. m^2 de terre	**Occ. terres agricoles**	
			éq. m^2 de terre	**Occ. terres urbaines**	
	-	-	éq. m^2 de terre	**Trans. des t. naturelles**	
CC	**Réchauffement global**	éq. kg CO_2 $_{air}$	éq. kg CO_2 $_{air}$	**CC**	**Santé humaine/ Écosystème**
Ressources	**Énergie non-renouvelable**	MJ énergie supp.	-	-	**Ressources**
	Extraction minière	éq. kg pétrole brut	éq. kg Fe	**Détérioration des minerais**	
			éq. kg pétrole	**Détérioration des produits fossiles**	
	-	-	éq. m^3 H_2O	**Épuisement de l'eau**	-

en gris : non considéré par la méthode ReCiPe par le logiciel SimaPro

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats de l'étude. La première partie aborde le bilan des flux des processus de valorisation des matières organiques (MO) et à l'ensemble du système pour les cinq scénarios considérés. La deuxième partie montre l'évaluation de l'inventaire de cycle de vie (ÉICV), d'abord selon les catégories d'indicateurs environnementaux des impacts *midpoint* en accord avec la méthode IMPACT 2002+, puis l'ÉICV selon les catégories de dommages *endpoint* en identifiant les proportions de chacune des fonctions. L'analyse de sensibilité d'après la méthode ReCiPe est également inclue selon la catégorie d'indicateurs environnementaux. La troisième partie expose les analyses de sensibilité selon la source primaire d'électricité et selon la quantité de MO disponible.

3.1 Bilan de flux

Le bilan des flux des processus de valorisation des matières organiques (MO) est d'abord présenté. La quantification de ce procédé permet d'intégrer les flux de MO aux flux permettant la mobilité des voitures. La section se poursuit par le bilan des flux de l'ensemble des processus organisés selon les différents scénarios proposés.

3.1.1 Bilan de matières et d'énergie du procédé de biométhanisation

Le bilan des flux est présenté de manière à répondre à la demande énergétique. Elle représente la quantité qu'il faut produire pour qu'une voiture de catégorie compacte du style se déplace sur 100 km en considérant également l'énergie nécessaire pour le processus de production lui-même. Ce bilan des flux spécifique au processus de production d'énergie permet d'identifier les différences entre les deux scénarios (D1* et D2) produisant de l'énergie à partir de la MO sans l'utiliser sous la même forme. Le scénario D1* utilise la MO pour produite les 4,9 kg bioGNC nécessaire pour alimenter la voiture. Le scénario D2, quant à lui, doit produire 18 kWh

pour répondre aux besoins déplacement de la voiture. La Figure 3.1 présente le bilan des flux du processus de production des scénarios de valorisation des MO.

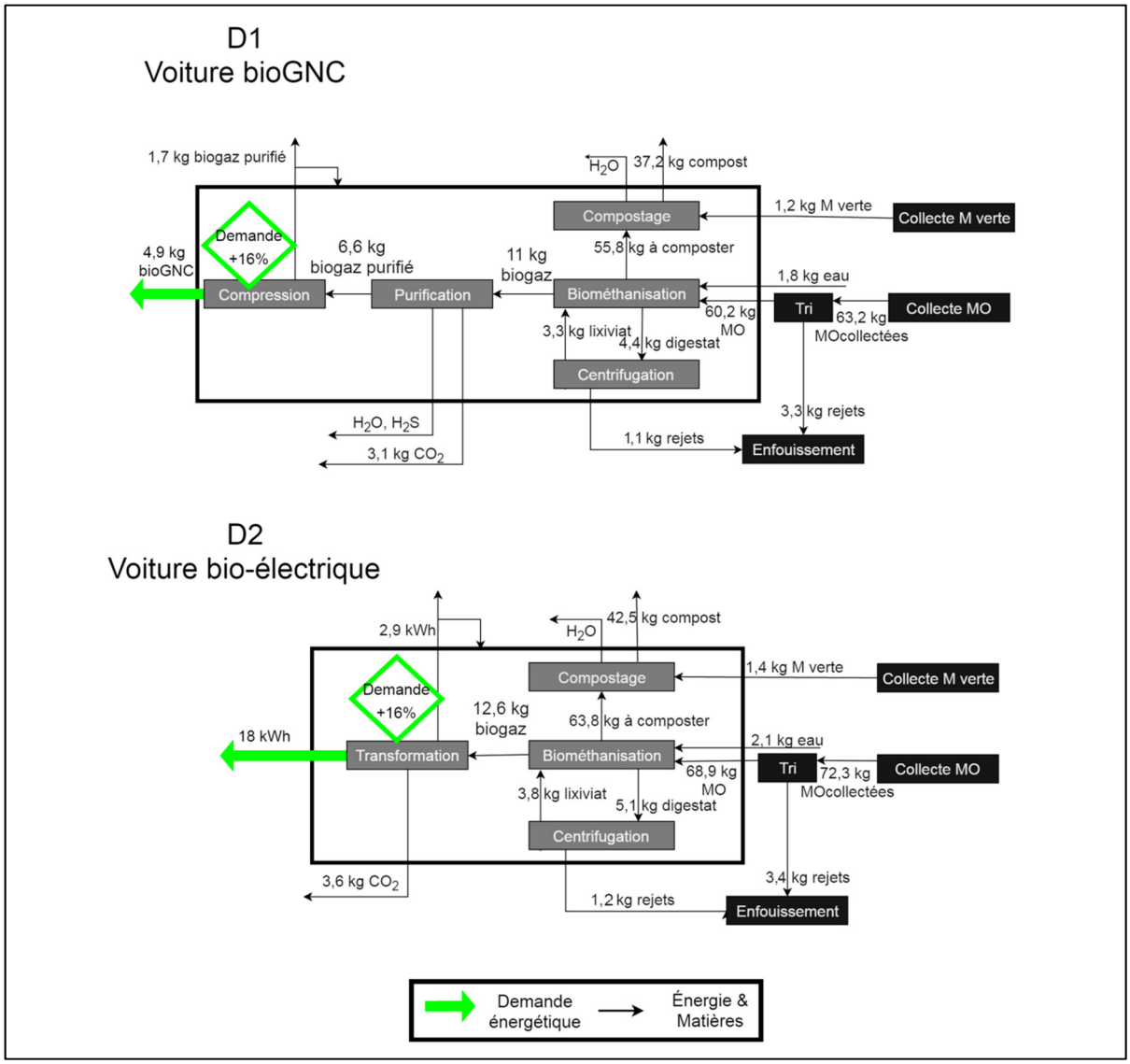

Figure 3.1 Bilan des flux du processus de production d'énergie provenant de la valorisation des MO

Pour répondre à la demande de la voiture bioGNC (scénario D1* : de 4,9 kg bioGNC), il est nécessaire de produire 11 kg de biogaz qui une fois purifié donne 6,6 kg de biogaz pur. La production de biogaz inclut l'ajout de 16 % à la demande énergétique de manière à combler les pertes et suffire à la demande de consommation du processus de production. Pour la voiture bio-électrique (scénario D2), il est nécessaire de produire plus de biogaz (12,6 kg) afin qu'une

fois transformé il en résulte alors une production de 18 kWh. La transformation du biogaz en électricité est un processus moins efficient dans le contexte de l'alimentation en énergie des véhicules. Pour produire le biogaz nécessaire aux demandes énergétiques il est nécessaire de collecter 9,1 kg MO de plus que pour alimenter la voiture en bioGNC que la voiture bio-électrique, ce qui représente près de 13 % d'écart entre les deux scénarios. Cette différence se reflète dans la même proportion sur la quantité de rejets, de digestat et de compost produits par le scénario. Ce bilan des flux spécifique permet d'identifier les flux et les transformations d'énergie et de matières spécifiques à la valorisation des MO.

3.1.2 Bilan de flux des scénarios

Le bilan des flux associés aux différents processus impliqués est établi pour chacun des scénarios afin de répondre à l'unité fonctionnelle qui correspond à une voiture de catégorie compacte du style Honda Civic coupé se déplaçant sur 100 km (Figure 3.2)[2].

Contrairement aux scénarios D1* et D2 qui utilisent les MO comme source d'énergie, les scénarios A, B et C utilisent cette matière permettant ainsi de réduire les matières destinées à l'enfouissement. Comparativement aux scénarios A, B* et C qui mène à l'enfouissement de 67,8 kg de MO chacun, les scénarios D1* et D2 rejette respectivement 4,4 kg et 5,1 kg évitant ainsi d'enfouir un peu plus de 60 kg. Les émissions de CO_2 sont l'une des émissions atmosphériques déterminée par la source d'énergie utilisée. Les émissions de CO_2 sont plus importantes dans le scénario (D1*) de transformation biogaz en électricité (3,6 kg) que dans le scénario (B*) de purification (3,1 kg). Le système émet différents rejets dans l'air, l'eau et le sol dont les quantités varient selon les scénarios. Ces rejets font partis de l'inventaire du cycle de vie des différents processus du système. Une fois les processus quantifiés, l'inventaire du cycle est évalué afin d'en déterminé les impacts associés.

---

[2] Les scénarios B* et D1* utilisent les valeurs corrigées d'après les informations recueillies d'après l'article de Simons (2016) concernant la comparaison des voitures GNC par rapport aux voitures à essence.

3.2 Évaluation des impacts environnementaux

L'évaluation des impacts environnementaux sont calculés selon la méthode IMPACT 2002+. Les résultats obtenus pour chaque scénario sont présentés d'une part, selon les 14 indicateurs de la catégorie d'impacts (*midpoint*) et, d'autre part, selon les quatre indicateurs de dommages (*endpoint*).

3.2.1 Indicateurs environnementaux de la catégorie d'impacts

Cette section traite de la comparaison de l'impact sur l'environnement des cinq scénarios. La Figure 3.3 présente les impacts possibles, d'après les *midpoint* de la méthode IMPACT 2002+. Le regroupement de l'ensemble des catégories d'impacts sur unité équivalente, l'échelle relative (%), permet de les comparer les uns avec les autres. Les scénarios sont comparés avec celui de référence (scénario A) (100 %) qui correspond à la voiture à essence. Les valeurs absolues des résultats calculés sont présentées à l'ANNEXE IV (Tableau A-IV- 1).

Plusieurs constats ressortent des résultats présentés à la Figure 3.3. Le scénario A (voiture à essence) a majoritairement plus d'impact sur l'environnement en ayant le pointage le plus grand dans dix des 14 catégories. L'ensemble de voitures roulant avec des produits pétroliers (scénarios A et B*) obtient un pointage supérieur aux autres scénarios (C, D1* et D2) dans 12 catégories.

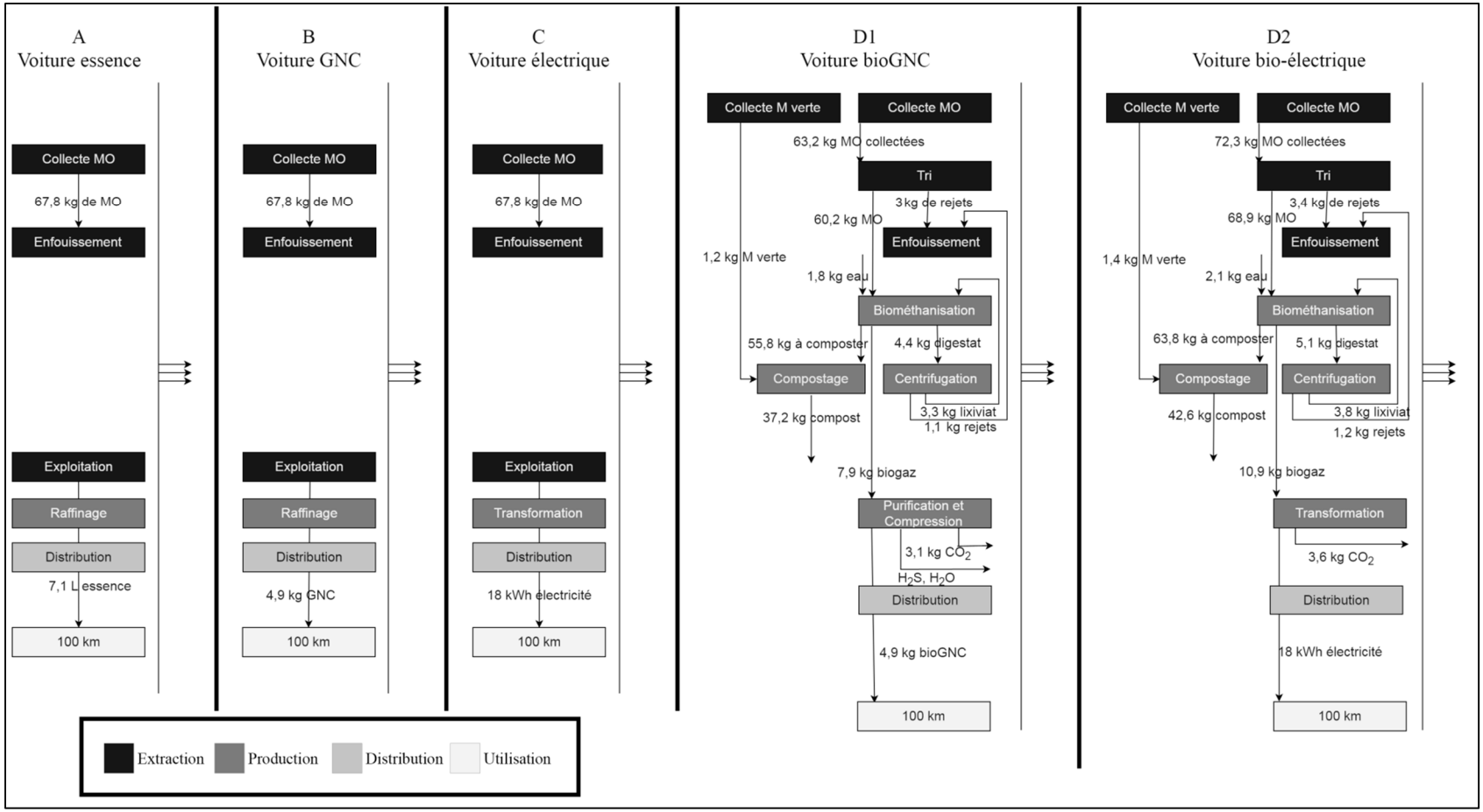

Figure 3.2 Bilan des flux du sous-système de l'énergie des cinq scénarios

Au niveau des effets respiratoires, de l'extraction minière et de l'eutrophisation aquatique le pointage élevé des deux voitures à moteur électrique s'explique par l'influence de la batterie dans le système.

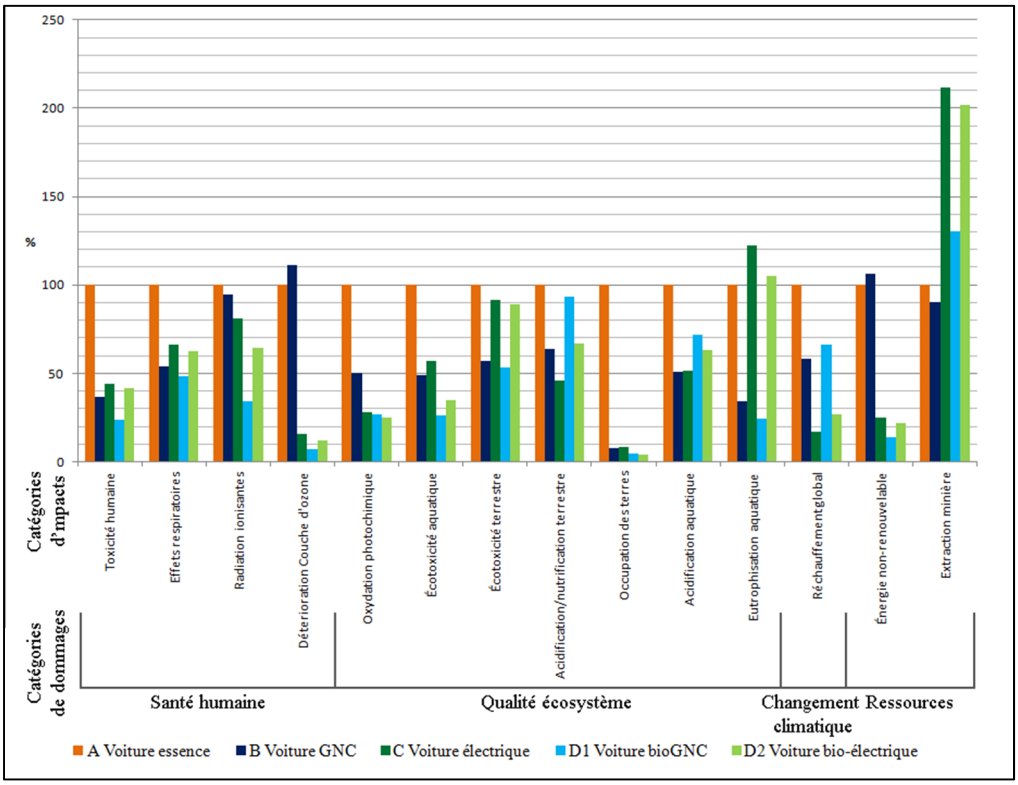

Figure 3.3 Étude d'impacts d'après la méthode IMPACT 2002+[3]

La Figure 3.4 présente l'influence de chacune des fonctions ainsi que l'apport de la batterie sur le système dans la catégorie d'impacts de l'extraction minière. C'est pour cette catégorie que la batterie à le plus d'influence.

L'influence de la batterie représente 60 % (20 % maintenance et 40 % fabrication) des impacts fait par les scénarios de véhicules électrique. Les autres processus (opération, fabrication et maintenance) représentent ensemble le 40 % restant. D'après l'analyse, la fabrication de la

[3] Les résultats avant la correction prévue d'après Simon (2016) sont présentés dans ANNEXE V Figure-A-V 1

batterie nécessite l'utilisation de matériaux rares : le lithium, le plomb et le cadmium. Leur extraction nécessite davantage de ressources.

Également, l'indicateur d'occupation des terres du scénario de référence met en évidence un écart considérable (10 fois plus grand) comparativement aux autres scénarios. Cette différence s'explique par l'ajout de 5 % d'éthanol dans l'essence. Cet éthanol provient de la culture de seigle dans les champs qui implique une utilisation de terres arables.

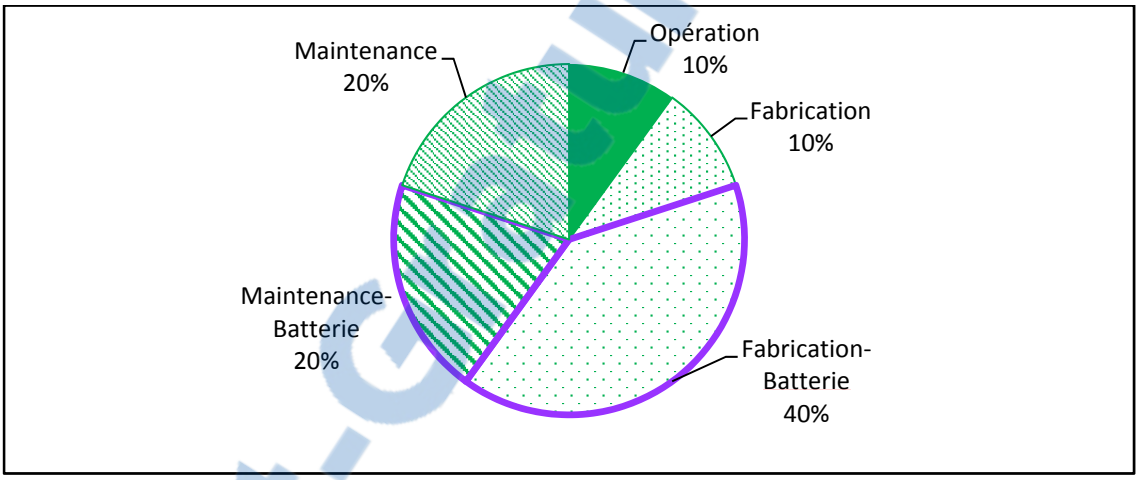

Figure 3.4 Influence des processus en lien avec la batterie des scénarios de véhicules électriques dans la catégorie d'impacts: extraction minière

Les catégories d'impacts d'extraction minière, d'acidification aquatique et l'acidification/nutrification terrestre de la voiture bioGNC sont influencées par le processus de purification du biogaz. Le recours aux ressources fossiles (essence et gaz naturel) entraîne la détérioration de la couche d'ozone. Les autres scénarios (C, D1*, D2) ont cinq fois moins d'impacts. Les scénarios se basant sur des énergies provenant de sources renouvelables peuvent s'alimenter sans endommager l'environnement, alors que les énergies non renouvelables n'existent plus une fois utilisées par les scénarios A et B*. Ces deux catégories d'impacts permettent de réaliser que l'implantation de voitures utilisant des sources d'énergie renouvelables cause malgré tout 20 % des impacts de la voiture de référence.

3.2.2 Indicateurs environnementaux de catégorie de dommages

Rapport-Gratuit.com

Les résultats des impacts des différents scénarios exprimés selon les indicateurs de dommages de la méthode IMPACT 2002+ sont présentés dans cette section. Chacune des catégories est présentées selon sa propre échelle afin d'observer chacune des fonctions d'opération, de fabrication et de maintenance incluent dans chacun des scénarios (Figure 3.5). Cette représentation des résultats en *endpoint* permet d'avoir un regard global sur les scénarios en regroupant les *midpoint*. Les valeurs absolues sont présentées à l'ANNEXE IV . La catégorie de la santé humaine regroupe quatre *midpoint.*

La fonction d'opération de la voiture à essence est plus dommageables que l'ensemble des fonctions des autres scénarios. Sur la voiture de référence, la fonction d'opération cause est responsable de 75 % des dommages à la santé humaine dû l'utilisation de combustibles fossiles. Les résultats des fonctions de fabrication et de maintenance sont les mêmes pour toutes les voitures excepté les voitures électriques. La fabrication et la maintenance de composantes du moteur électrique et de la batterie expliquent que les impacts des voitures à moteur électrique (C et D2) affectent la santé humaine.

L'*endpoint* de la qualité de l'écosystème est quantifié en fraction d'espèce disparue sur un m^2 durant une année ($PDF \cdot m^2$). Il regroupe sept *midpoint* : l'oxydation photochimique, écotoxicité aquatique, écotoxicité terrestre, acidificatio/nitrification terrestre, occupation des terres, acidification aquatique et eutrophisation aquatique. Comme pour la santé humaine, la fonction d'opération de la voiture à essence surpasse l'ensemble des fonctions des autres scénarios. L'influence de la batterie se démontre principalement par l'influence de l'écotoxicité terrestre sur la catégorie de dommage. Les scénarios A, B* et D1* se révèlent être près de cinq fois plus dommageables que les voitures à moteur électrique dans la catégorie de changement climatique.

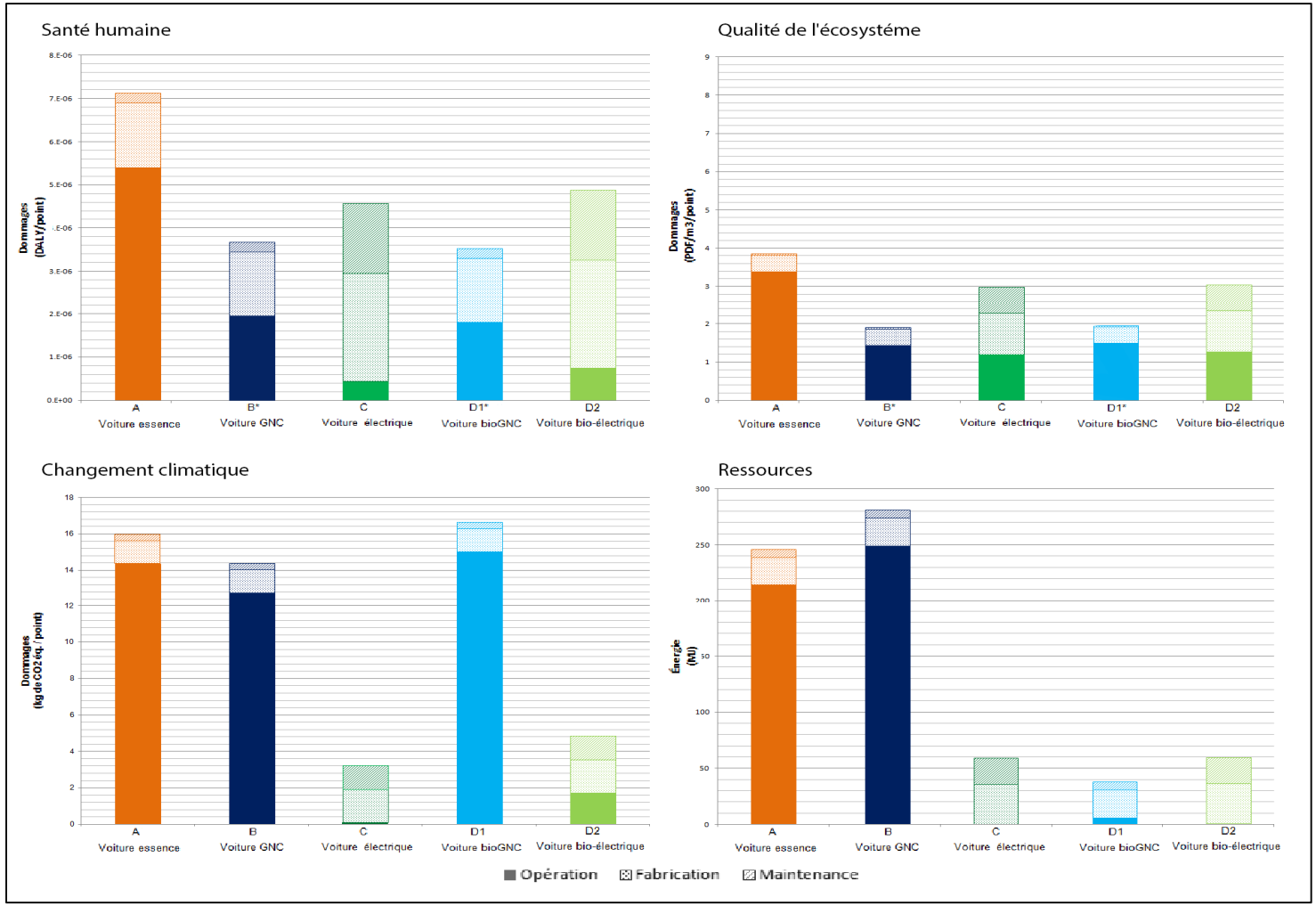

Figure 3.5 Études des dommages selon la méthode IMPACT 2002+

L'opération des voitures utilisant du carburants qu'il soit combustibles (scénario A et B*) ou de source renouvelable (scénario D1*) sont plus dommageables sur la catégorie de changement climatique. L'opération de la voiture bioGNC (scénario D1*) inclut en plus la purification du biogaz ce qui explique le résultat important de ce scénario. Les voitures électriques présentent des fonctions de fabrication et de maintenance plus importantes.

Finalement, la catégorie de dommage des ressources quantifiée en énergie non disponible pour utilisation ultérieure (MJ) représente le scénario ayant des besoins plus importants au niveau d'énergie non-renouvelable et de matière première minière. Les fonctions de fabrication et de maintenance de la voiture électrique tiennent comptent de la batterie ce qui les rend plus importantes. Du côté de l'opération, les véhicules utilisant des carburants à base de produits pétroliers sont ceux qui contribuent d'avantage à l'appauvrissement des ressources.

3.3 Analyse de sensibilité

La première partie de l'analyse de sensibilité porte sur la comparaison de la méthode d'évaluation des impacts. La deuxième partie de l'étude porte sur la source primaire de production d'électricité. L'étude permet de représenter le caractère spécifique de la production d'électricité au Québec comparativement à d'autres sources d'énergie. Ensuite, l'étude du nombre de véhicules pouvant être alimenté avec les MO est représentée.

3.3.1 Méthode ReCiPe

La comparaison de la méthode IMPACT 2002+ avec la méthode ReCiPe permet de réaliser une analyse de sensibilité des résultats (Figure 3.6). L'échelle relative (%) permet de comparer les différentes catégories de dommages des deux méthodes. La voiture à essence est la voiture de référence qui est équivalente à 100 % des dommages.

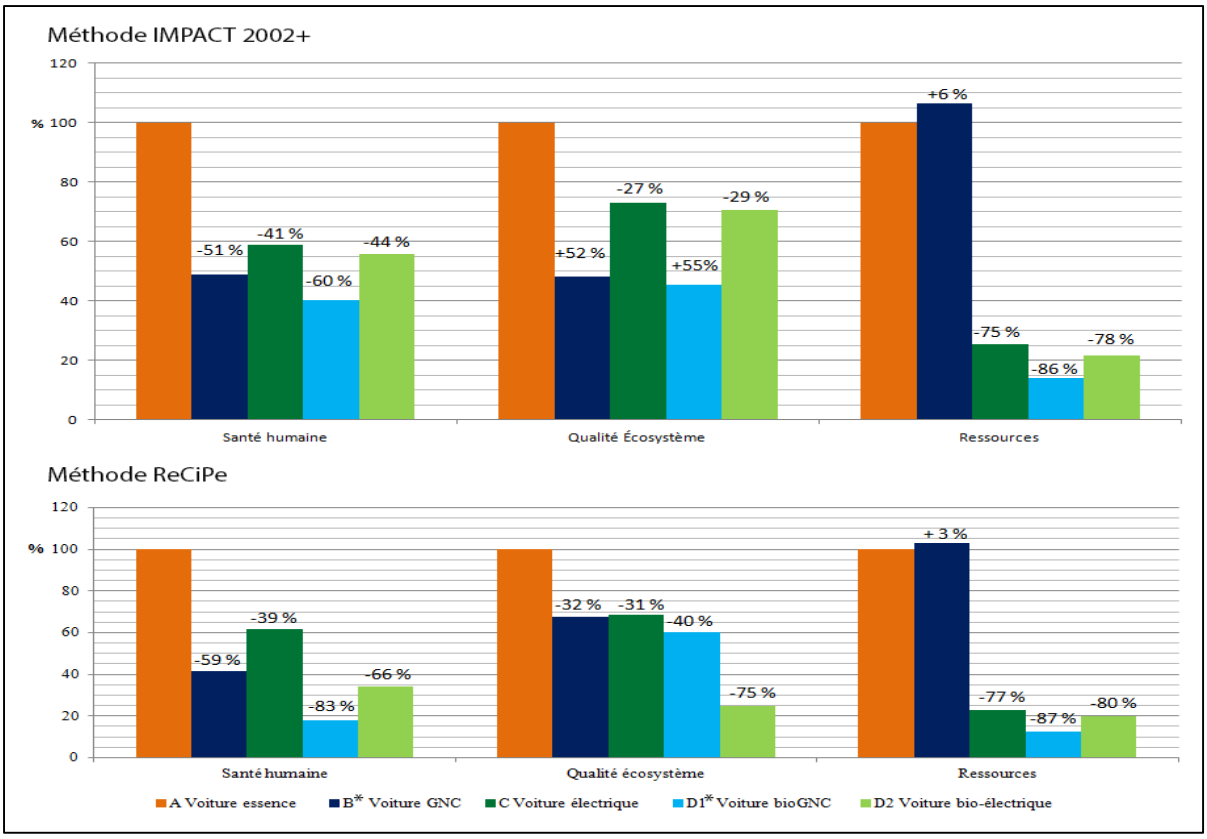

Figure 3.6 Comparaison des études de dommages selon les méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe

Pour l'indicateur de santé humaine, les deux méthodes sont semblables malgré des différences un peu différentes. Selon la méthode IMPACT 2002+, la voiture qui cause le plus de dommage est celle à essence (scénario A), suivi celle électrique (scénario C) qui cause 41 % moins de dommages. La méthode ReCiPe indique quant à elle une différence de 39 % pour ce même scénario. La méthode IMPACT 2002+ présente ensuite, dans l'ordre, les scénarios de voiture bio-électrique (scénario D2) et de voiture GNC (scénario B*) alors que la méthode ReCiPe les places dans l'ordre contraire. Selon la méthode IMPACT 2002+, la voiture causant le moins de dommages à la santé humaine est la voiture bioGNC (scénario D1*) avec une différence de 56 %, alors que la méthode RePiCe indique une différence plus marquée de 83 % avec le scénario de référence (scénario A). Au niveau de la catégorie de la qualité de l'écosystème, les voitures utilisant du GNC et du bio-GNC présentent des résultats dans le même ordre de grandeur selon les deux méthodes.

Les deux méthodes présentent des variations au niveau des voitures électriques et bio-électrique. La méthode IMPACT 2002+ indique des dommages semblables pour les voitures électriques et bio-électrique alors que la méthode ReCiPe indique que la voiture électrique cause davantage de dommages (-31 %) que la voiture bio-électrique (-75 %). La voiture bio-électrique est celle qui cause le moins de dommages dans la catégorie de la qualité de l'écosystème. Les indicateurs d'impacts associés à cette catégorie de dommages sont présentés à la Figure 3.7, selon l'échelle relative (%) par rapport à la voiture à essence, la voiture de référence qui est équivalente à 100 %.

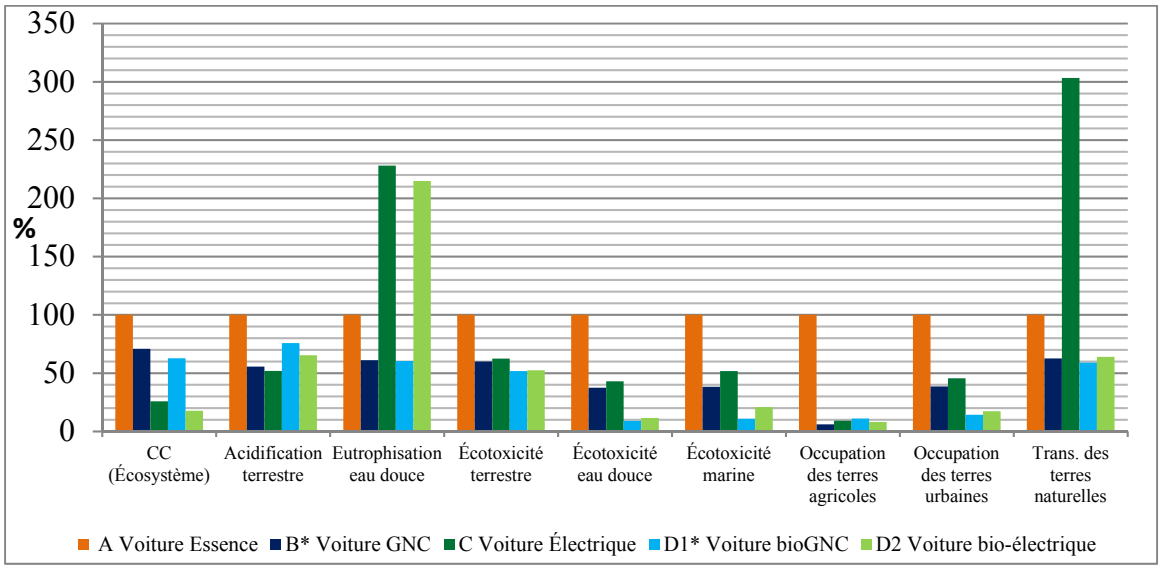

Figure 3.7 Étude d'impacts de la qualité de l'écosystème selon la méthode ReCiPe

Le *midpoint* de transformation des terres naturelles tient compte des terres utilisées pour les réservoirs d'eau des barrages hydroélectriques ce qui cause trois fois plus d'impacts pour cette méthode. La méthode IMPACT 2002+, qui considère uniquement l'occupation des terres arables afin de quantifier la perte d'espèces sur un territoire représente des dommages de 27 % pour la voiture électrique et 29 % pour la bio-électrique. L'analyse du *midpoint* de l'occupation des terres agricoles selon la méthode ReCiPe, des résultats sont comparables à la méthode IMPACT 2002+ sur l'utilisation de 4 % d'éthanol dans l'essence en affichant des résultats 10 fois plus grands. L'utilisation de batterie dans les scénarios B* et D1* est responsable des impacts au niveau de l'eutrophisation de l'eau douce.

Les *endpoint* des ressources des méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe arrivent à la même conclusion malgré l'utilisation d'unités différentes, soit respectivement selon énergie non disponible pour utilisation ultérieure(MJ) ou selon l'augmentation du coût des ressources ($). L'influence de la batterie sur les scénarios de voiture électrique et bio-électrique (scénario B* et D1*) produit près de six fois plus d'impacts au niveau de la détérioration des minerais inclus dans l'indicateur des ressources comme présentée dans l'ANNEXE V (Figure-A-V 2). La voiture GNC est la plus dommageable avec 6 % et 3 % de plus selon la méthode que la voiture de référence. Les voitures électriques (scénarios B* et D1*) causent 75 à 80 % moins de dommages que la voiture de référence. La voiture au bioGNC (scénario D1*) est la moins dommageable, soit 86 % de moins que la voiture à essence (scénario A).

3.3.2 Source primaire de l'électricité

La comparaison de différentes sources primaire pour produire de l'électricité permet d'observer les particularités régionales de même que l'influence de la fonction d'opération sur l'ensemble du système. La Figure 3.8 présente ainsi les résultats obtenus pour la voiture alimentée à l'hydroélectricité, celle à bio-électricité et une alimentée avec de d'électricité produite 100 % à partir du charbon. Les valeurs absolues sont présentées à l'ANNEXE IV.

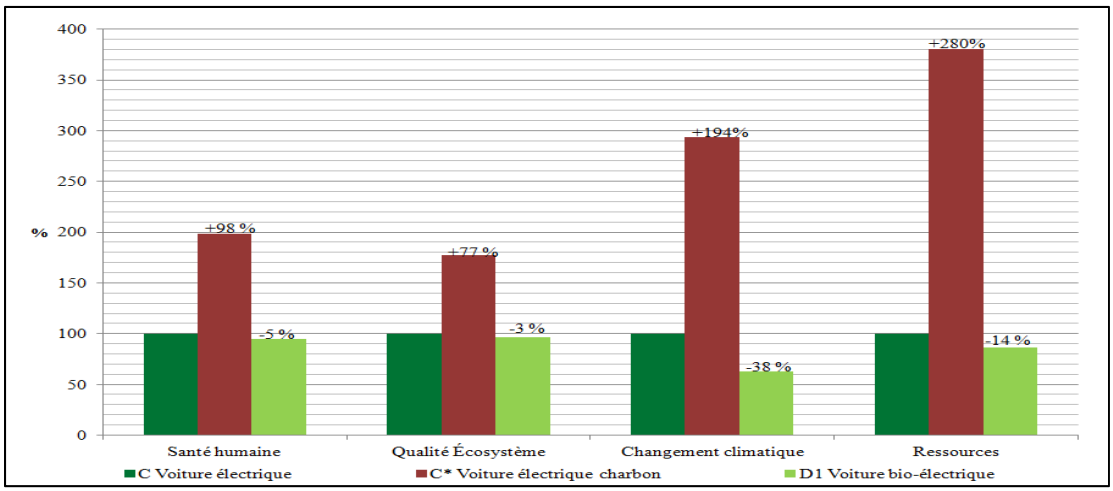

Figure 3.8 Dommages causés par les voitures électriques utilisant différentes sources d'énergie selon la méthode IMPACT 2002+

Le scénario de voiture électrique au charbon (scénario C*) cause des dommages plus importants pour tous les indicateurs de dommages. L'électricité produite à partir de charbon (scénario C*) est plus nocive (+98 %) pour la santé humaine que l'hydroélectricité (scénario C). Les dommages sont supérieurs au niveau de la qualité de l'écosystème (+77 %), au niveau de l'indicateur de changement climatique (+194 %) et au niveau des ressources (+280 %). L'application des scénarios fictifs de valorisation des MO permet d'observer l'influence qu'ils pourraient avoir sur la consommation énergétique du transport routier.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Ce dernier chapitre aborde d'abord l'évaluation des scénarios. Puis, l'application de la valorisation des matières organiques (MO) par biométhanisation selon le système est proposée sur l'ensemble du parc automobile. Finalement, quelques pistes de réflexion et perspectives sont également présentées.

4.1 Évaluation des scénarios

Les évaluations environnementales permettent de répertorier les dommages selon chacun des indicateurs. L'utilisation d'un score unique permet de déterminer les effets causés par chacun des scénarios sur une valeur. Le Tableau 4.1 présente le classement des scores uniques de la méthode IMPACT 2002+ et de la méthode ReCiPe selon les valeurs présentés à l'ANNEXE VI.

Tableau 4.1 Classement des scénarios basé sur le score unique du logiciel Simapro pour les méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe

	A	**B***	**C**	**C***	**D1***	**D2**
	Voiture à essence	**Voiture GNC corrigée**	**Voiture électrique**	**Voiture électrique au charbon**	**Voiture bioGNC corrigée**	**Voiture bio-électrique**
IMPACT 2002+	6	4	2	5	3	1
ReCiPe	6	3	4	5	1	2

où 1 ayant le plus petit score, le plus petit impact et 6 ayant le plus grand score, le plus grand impact

Le score unique permet de hiérarchiser les scénarios du plus dommageables au moins dommageables. Selon les deux méthodes, la voiture à essence (scénario A) est celle qui cause le plus d'impacts toutes catégories confondues. La voiture électrique utilisant du charbon est la seconde. Ensuite, l'ordre varie en fonction de la méthode d'évaluation des impacts choisie. La méthode IMPACT 2002+ indique que les voitures GNC, avec les valeurs corrigées

(scénarios B* et D1*), se retrouvent respectivement troisième et quatrième. Les voitures électriques (C et D2) sont des meilleurs choix pour protéger toutes les sphères de l'environnement. La méthode ReCiPe conclue que les voitures utilisant la valorisation des MO comme source énergétique sont les moins dommageables.

La hiérarchisation des scénarios varient d'une méthode à l'autre. L'utilisation de deux méthodes d'évaluation d'inventaire de cycle de vie permet de nuancer les résultats obtenus. La variation de substances de références et les facteurs associés à chaque indicateur d'impact et de dommages, de même que les quantités d'indicateurs, sont responsables de cette nuance. Les conclusions restent cependant similaires : l'utilisation de produits pétroliers cause plus de dommages à l'environnement que les autres sources d'énergie.

Les processus dynamiques des scénarios sont analysés de façon statique par la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV). Il s'agit donc par la suite de reprendre les résultats du processus linéaire de l'ACV et de les appliquer au système des scénarios. Les scénarios proposés considèrent de façon statique la maintenance, la fabrication et l'opération sur tous les kilomètres parcourus. Le premier 100 km n'est pas équivalent au dernier 100 km parcouru sur une voiture, c'est-à-dire que la maintenance et l'usure du véhicule augmente avec le temps. Cette méthode utilise une base de données d'inventaire de cycle de vie qui ne permet pas de représenter les aspects spécifiques locaux. L'hydroélectricité, présente au Québec, est un aspect local qui a pu être ajusté, comparativement à la production de gaz naturel comprimé (GNC) qui demeure générique. La base de données provenant de partout dans le monde est constamment en évolution par l'ajout de nouveaux processus, matières ou émissions. Cette évolution peut entraîner éventuellement certaines incohérences entres les résultats réaliser à différents moment dans les diverses analyses. Pour cette raison, les résultats des voitures GNC et bioGNC ont été corrigés afin de devenir comparable aux autres scénarios.

4.2 Application de la valorisation des MO au parc automobile

Le parc automobile est composé à 98 % de voiture utilisant les combustibles fossiles comme source d'énergétique (Gouvernement du Canada, 2005). L'intégration d'énergie produite à

partir d'énergies renouvelables permet de réduire cette dépendance pour le secteur des transports. Ce changement de source énergétique permettrait à l'ensemble de la population de diminuer son exposition aux différents impacts provenant de la combustion de produits fossiles.

La valorisation des MO par biométhanisation est un procédé priorisé par le *Plan de Gestion des Matières Résiduelles* du gouvernement québécois. Le potentiel énergétique de la filière est dépendant de la quantité de MO pouvant être valorisée. Le secteur résidentiel présente un potentiel de près 1,5 millions de tonnes de MO à l'échelle du territoire du Québec pouvant être valorisé afin de produire de l'énergie (Recyc-Québec, 2015). En considérant aussi les secteurs agricoles, agroalimentaire, industriels, commerciaux et institutionnels, la quantité totale atteint 6,6 millions de tonnes (Recyc-Québec, 2014; Solinov, s. d.).

La Figure 4.1 présente l'application des scénarios de valorisation des MO sous forme de bioGNC et de bio-électricité, dans l'optique d'utiliser de toutes ses MO comme source d'énergie pour alimenter le parc automobile du Québec. L'utilisation de tout le potentiel des MO permet d'alimenter en énergie les voitures du parc automobile en considérant qu'elles roulent en moyenne 20 000 km par année. Les MO du secteur résidentiel alimentent en bioGNC 1,9 % du parc automobile du Québec alors que la bio-électricité en alimente 1,7 %. Le potentiel énergétique des MO de l'ensemble des secteurs d'activités économiques montre que les scénarios bioGNC et bio-électricité produisent assez d'énergie pour alimenter respectivement 8,5 % et 7,5 % du parc automobile québécois.

Rapport-Gratuit.com

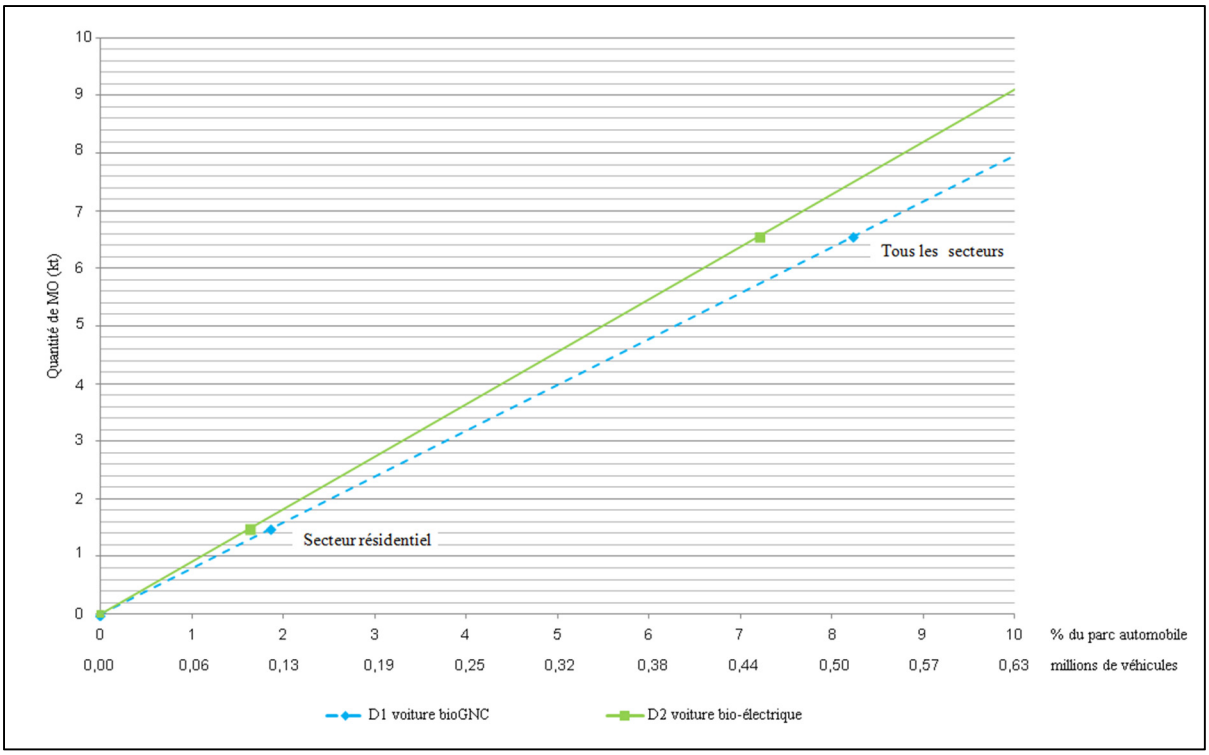

Figure 4.1 Représentation des scénarios de valorisation de la MO sur l'ensemble du parc automobile du Québec

Selon le système évalué, adapté au contexte québécois, la valorisation énergétique par la biométhanisation ne permet pas de combler les besoins énergétiques rattachés aux 6,3 millions de véhicules du parc automobile québécois. La biométhanisation permet toutefois d'employer des ressources qui autrement se retrouveraient à l'enfouissement. Différentes filières de valorisation énergétique peuvent permettre d'augmenter la productivité. Tout comme le faisait la biométhanisation, la gazéification permet de produire du biogaz qui est ensuite transformé selon les besoins en bioGNC ou en bio-électricité. Cette filière permet de respecter les principes de la politique québécoise. La gazéification peut valoriser le papier/carton ainsi que le plastique exclut de la filière de récupération en plus des MO ce qui augmente la quantité disponible. Une approche multifilière incluant des procédés de biométhanisation et de gazéification pour la valorisation de l'ensemble des MO et des boues d'épuration pourrait être bénéfique (Lacroix, 2014).

L'objectif d'utiliser les MO est de profiter leur potentiel énergétique. L'importation de déchets pour produire de l'énergie réduit l'efficience même de la valorisation des déchets. L'Allemagne, la Norvège et la Suède utilisent déjà les déchets pour produire de l'énergie en mettant davantage d'efforts dans la valorisation plutôt que dans l'enfouissement (Parlement européen, 2015). Comptant sur ce type de matières, ils doivent maintenant importer des MO afin de faire fonctionner leurs installations et de combler les besoins énergétiques de la population.

D'autres types de produits provenant de la valorisation des MO peuvent aussi être produits. La production d'éthanol à partir des MO est un exemple. La production d'éthanol avec ce genre de matière peut remplacer l'essence ou encore remplacer l'éthanol produit à partir des cultures céréalières. Comme les normes canadiennes exigent que 5 % de l'essence soit de l'éthanol, le remplacement de la matière première permet de diminuer l'occupation des terres en plus de diminuer l'utilisation de combustibles fossiles. Ce changement est possible sans changer les habitudes de la population et sans modifier le parc automobile. Peu importe la méthode de valorisation utilisée la proportion reste en deçà des besoins à combler. L'implantation de ce genre toutes les infrastructures afin de traiter les MO demande des investissements importants et des infrastructures spécialisées sans pour autant combler tous les besoins.

Afin de continuer à transformer les sources énergétiques du secteur des transports certains pays ou régions proposent des incitatifs économiques à la population. Comme en Norvège leur parc automobile est maintenant constitué d'une voiture électrique pour 100 habitants, alors qu'au Québec la proportion est de une voiture pour 850 habitants (AVEQ & SAAQ, 2016; Bert, 2015; Institut de la Statistique du Québec, 2016; Wold & Ølness, 2016). Le remboursement de taxe, la gratuité des payages ainsi que des places réservés ont permis de créer un intérêt au véhicule électrique. L'apparition de nouvelles sources énergétique peut entraîner des changements comparables au niveau de l'ensemble des secteurs d'activité économique et pas uniquement le secteur des transports.

4.3 Perspectives

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

L'implantation de la collecte de MO ainsi que des sites de traitements spécialisés sont nécessaires afin de transformer les MO en énergies utilisables par les voitures, que ce soit en bioGNC, en bio-électricité ou en éthanol. Chaque énergie nécessite un site de traitement adapté en plus d'un réseau d'approvisionnement qui pour se mettre en place nécessite un contexte politique favorable. Comme la production de bioGNC ou d'électricité à partir de la valorisation des MO ne permettent pas de produire assez d'énergie pour répondre aux besoins du secteur des transports de la population l'utilisation de sources renouvelables autres que les MO est nécessaire.

L'utilisation de nouvelles sources d'énergies renouvelables réduit la dépendance à énergie fossile. Étant hors du territoire terrestre, les énergies provenant de source extraterrestre, le soleil, ne causent aucuns dommages environnementaux. Le vent est un autre exemple d'énergie renouvelable pouvant être exploité. Si l'énergie n'est pas utilisée immédiatement elle doit être emmagasinée afin de ne pas être perdue. L'utilisation de batterie permet d'emmagasiner cette énergie et ce même si elle provient de plusieurs sources. L'implantation d'incitatifs à l'achat d'une voiture électrique et l'implantation de sites de valorisation des MO peuvent s'effectuer en parallèle. Cette démarche est possible en transformant le type de voiture sans modifier la mobilité de la population et en augmentant la valorisation des MO.
Bien que du point de vue du carburant, les énergies renouvelables sont bénéfiques, la problématique peut provenir de la fabrication des équipements de captage et d'emmagasinement. Le changement de sources énergétiques doit être effectué avec prudence afin d'éviter le transfert des émissions entre eux des sphères de l'air, de l'eau et du sol.

L'usage de minerais et de produits pétroliers dans la création de panneaux solaires ou la fabrication d'éolienne est un exemple des émissions produites par le captage d'énergie renouvelable. La fabrication de la batterie permettant l'emmagasinement de l'énergie nécessite l'extraction de minerais. Le développement de techniques permettant de transmettre et de l'emmagasiner sans utiliser de pétrole libérerait l'utilisation d'énergies renouvelables de la dépendance à l'énergie fossile. L'amélioration ou l'élimination de la batterie permettrait de réduire les impacts de ses fonctions. Toutefois, la mise en place de nombreuses bornes

d'alimentation à travers la province ainsi que d'un réseau de ravitaillement entraînerait une hausse des émissions générées par ce scénario. Bien que le biogaz purifié ait les mêmes caractéristiques que le gaz naturel, le réseau de distribution est plus restreint. L'amélioration de l'exploitation de la source d'énergie du véhicule entraîne des progrès au niveau des fonctions de fabrication et de maintenance. L'analyse de cycle de vie (ACV) permet de diagnostiquer les transferts possibles d'incidence de chacune des sources énergétiques incluant leurs captations et leur emmagasinements.

La valorisation énergétique des MO permet de produire de l'énergie sous forme assimilable pour le secteur des transports, sous forme de carburant ou d'électricité. L'énergie produite avec cette valorisation ne peut être exploité par ce secteur.

CONCLUSION

L'augmentation du parc automobile est causée par l'accroissement de la population et l'étalement urbain fait augmenter la demande énergétique, principalement en combustibles fossiles. Cette étude vise l'évaluation comparative de différents scénarios de source d'énergie afin d'alimenter une voiture en limitant les effets dommageables sur l'environnement. Cinq scénarios ont pu être comparés en regard des deux catégories d'indicateurs environnementaux de l'analyse de Cycle de vie (ACV). Les résultats ont démontrés que les voitures utilisant des combustibles fossiles impliquent davantage de dommages à l'environnement. Les voitures utilisant de l'énergie provenant de la valorisation des MO présentent moins d'influence sur l'environnement, confirmant ainsi les hypothèses de départ. D'après la modélisation proposée, la voiture à bioGNC s'avère la moins dommageable pour l'environnement. Ce scénario est valide en considérant l'implantation d'une borne d'alimentation directement au site de production. Du côté de la valorisation en électricité l'utilisation du réseau déjà en place sur une grande superficie du Québec, faciliterait l'implantation du réseau d'alimentation et des bornes électriques. La voiture électrique arrive au milieu du classement, mais est considéré comme une option favorable aux voitures à carburants fossiles. La voiture électrique arrive au milieu du classement, mais est considérée comme une option plus favorable que les voitures mues par les carburants fossiles.

Cette étude consiste à évaluer l'utilisation des MO comme source d'énergie dans le secteur des transports. Les contextes économique et technique doivent encore être analysés. La mise en œuvre actuelle des sites de traitement et l'implantation de la collecte de MO dans les grandes villes tel Montréal laisse entendre que le contexte politique parait favorable. La sensibilisation de la population face à la gestion des MO constitue actuellement un facteur d'incidence important. En effet, l'implantation de site de traitement est tributaire de la participation de la population à la collecte à trois voies : déchets, matières recyclables et matières organiques. Ce changement est au cœur d'un questionnement dans notre société dont l'enjeu est de préserver la santé de la population et de protéger toutes les sphères de l'environnement biotiques et abiotiques.

Les travaux effectués permettent d'arriver à la conclusion que l'utilisation d'énergie provenant des MO s'avère être une solution pertinente, qui doit être jumelée à d'autres sources énergétiques renouvelables afin d'éliminer la dépendance aux combustibles fossiles. La solution de modifier la source d'énergie ressemble plus à un bandage qu'à une évolution du secteur des transports en ne permettant pas un réel changement relié à la consommation énergétique de la population. Il est souhaitable que des changements au niveau des sources énergétiques et une amélioration de l'efficience énergétique puissent révolutionner, comme lors de l'arrivée des véhicules motorisés, l'écosystème urbain.

ANNEXE I

COMPOSITION DES GAZ

Tableau A-I- 1 Composition des gaz

	Biogaz	**Gaz naturel Biogaz purifié**	**Dioxyde de carbone**
Composition du gaz	60 % CH_4	97,0 % CH_4	100 % CO_2
	33 % CO_2	2,2 % CO_2	
	0,2 % N_2	0,4 % N_2	
	0 % O_2	0,1 % C_{4+}	
	0,4 % H_2S	0 % H_2S	
	+ H_2O	-	
Masse volumique (kg/m^3)	1,21	0,73	1,87
Énergie	-	37,3 kJ/m^3 (ONÉ, 2016)	-
Source	(Moletta, 2015)		

ANNEXE II

SUBSTANCES DE RÉFÉRENCE DE LA MÉTHODE RECIPE

Tableau A-II- 1 Substances de références des *midpoint* et des *endpoint* de la méthde ReCiPe
Adapté de Jolliet et al. (2010)

Méthode ReCiPe			
Midpoint	**Substances de référence**	***Endpoint***	**Substances de référence**
Toxicité humaine	éq. kg 14DCB $_{\text{air urbain}}$	**Santé humaine**	Années équivalente de vie perdue
Formation de particules	éq. kg $PM_{10\ air}$		
Destruction de l'ozone	éq. kg CFC-11$_{air}$		
Radiations ionisantes	éq. kg $U^{235}{}_{air}$		
Formation d'oxydant photochimique	éq. kg $NMVOC^{6}{}_{air}$		
Écotoxicité des eaux douces	éq. kg 14DCB $_{\text{eau douce}}$	**Écosystème**	Perte d'espèce durant 1 an
Écotoxicité marine	éq. kg 14DCB $_{\text{eau marine}}$		
Écotoxicité terrestre	éq. kg 14DCB $_{\text{sols industriels}}$		
Eutrophisation eaux douces	éq. kg P $_{eau}$		
Acidification terrestre	éq. kg $SO_{2.'air}$		
Occupation t. agricoles	éq. m^2 terre		
Occupation t. urbaines	éq. m^2 terre		
Trans. des t. naturelles	éq. m^2 terre		
Eutrophisation marine	éq. kg N $_{eau}$	**-**	-
Changement climatique	éq. kg $CO^{2}{}_{air}$	**Santé humaine et Écosystème**	-
Épuisement des ressources minières	éq. kg Fe	**Augmentation du coût des ressources**	$ supplémentaire
Épuisement des ressources fossiles	éq. kg pétrole		
Épuisement de l'eau	éq. m^3 eau	**-**	-

* En gris non représenté dans le logiciel SimaPro

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE III

TAUX DE TRANSFORMATION ET PROCESSUS DU LOGICIEL

Tableau A-III- 1 Nom des processus pour représenter les processus des cinq scénarios

Processus	Scénario	Étapes	Nom Processus de Pré Consultant, (s. d.)	Modifications
Extraction	**A, B, C, D1, D2**	Transport des MO	*Transport, municipal waste collection, lorry 21t/CH S*	-
Production	**A, B, C, D1, D2**	Eau	*Drinking water, water purification treatment, production mix, at plant, from surface water RER S*	-
Production Centrifugation	**D1, D2**	Rejets vers enfouissement	*Disposal, municipal solid waste, 22.9 % water, to sanitary landfill/CH U*	-
Utilisation	**A**	Essence	*Petrol, 4% vol. ETBE additive, EtOH f. biomass, prod. RER, at service station/CH U*	Station enlevée
Utilisation	**B**	Gaz naturel	*natural gas, production mix, at service station/kg/CH*	Station enlevée
Utilisation	**C**	Électricité	*Electricity, hydropower, at reservoir power plant, non alpine regions/RER U*	-
Utilisation	**D1**	Biogaz	*biogas, from biowaste, at storage/m3/CH*	Les intrants sont ceux des scénarios
Utilisation	**D2**	Biogaz	*96 vol-%, from biogas, at purification/m3/CH*	
Utilisation	**C*** Charbon	Électricité produite à partir du charbon au Texas	*Electricity, hard coal, at power plant/ERCOT U*	-

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau A-III- 2 Taux de transformation des étapes accessoires dans le processus de production de biogaz dans des scénarios de valorisation des MO

Processus		**Étapes- description**	**Intrants**	**Taux de trans.**	**Extrants**	**Sources**
Extraction	**D1 D2**	Tri – vers enfouissement	MO collectées	0,05	Rejets	(ADEME, 1997; David, 2013; Grosso et al., 2012)
Production	**D1 D2**	Biométhanisation – 10% de la matière à composter moins lixiviat produit	Eau	0,03	-	
		Biométhanisation	MO	0,074	Digestat	
			MO	0,93	Matières à composter	
	D1 D2	Centrifugation – retour biométhanisation	Digestat	0,75	Lixiviat	
		Centrifugation – vers enfouissement		0,25	Rejets	
	D1 D2	Compostage	M. à composter	0,66*	Compost	
			M. verte	0,02*	Compost	
	D1	Purification – rejeté dans l'air	Biogaz	0,4	CO_2	
	D2	Transformation – rejeté dans l'air	Biogaz	0,4	CO_2	

* : quantifié selon les MO entrante dans l'étape de biométhanisation

ANNEXE IV

VALEURS ABSOLUES

Tableau A-IV- 1 Valeurs absolues de l'étude d'impacts de la méthode IMPACT 2002+

	A	B*	C	D1*	D2
	Voiture essence	**Voiture GNC**	**Voiture électrique**	**Voiture bioGNC**	**Voiture bio-électrique**
Toxicité humaine	1,01	0,373	0,443	0,240	0,420
Effets respiratoires	0,008	0,005	0,006	0,004	0,005
Radiation ionisantes	128	121	100	43,34	82,1
Détérioration couche d'ozone	2,12E-06	2,36E-06	3,38E-07	1,54E-07	2,60E-07
Oxydation photochimique	1,17E-02	0,006	3,27E-03	0,003	2,96E-03
Écotoxicité aquatique	2600	1270	1470	683	904
Écotoxicité terrestre	405	232	370	216	360
Acidification/ nutrification terrestre	0,183	0,116	0,084	0,170	0,122
Occupation des terres	0,731	0,054	0,062	0,034	0,028
Acidification aquatique	0,063	3,19E-02	0,032	4,54E-02	0,040
Eutrophisation aquatique	0,005	1,71E-03	0,006	1,21E-03	0,005
Réchauffement global	28,6	19,0	7,80	16,6	4,87
Énergie non-renouvelable	273	291	68,8	37,7	59,1
Extraction minière	0,205	0,184	0,433	0,267	0,414

Tableau A-IV- 2 Valeurs absolues de l'étude de dommages selon la méthode IMPACT 2002+

			Opération	Fabrication	Maintenance
Santé humaine	**A**	**Voiture essence**	5,40E-06	1,50E-06	2,28E-07
	B*	**Voiture GNC**	1,95 E -06	1,50E-06	1,50E-06
	C	**Voiture électrique**	4,42E-07	2,51E-06	1,61E-06
	D1*	**Voiture bioGNC**	1,88 E -06	1,50E-06	1,50E-06
	D2	**Voiture bio-électrique**	7,53E-07	2,51E-06	1,61E-06
Qualité écosystème	**A**	**Voiture essence**	3,40	0,424	0,041
	B*	**Voiture GNC**	1,44	0,424	0,041
	C	**Voiture électrique**	1,21	1,08	0,697
	D1*	**Voiture bioGNC**	1,50	0,424	0,041
	D2	**Voiture bio-électrique**	1,27	1,08	0,697
Changement climatique	**A**	**Voiture essence**	14,4	1,26	0,348
	B*	**Voiture GNC**	12,8	1,26	0,348
	C	**Voiture électrique**	0,093	1,83	1,306
	D1*	**Voiture bioGNC**	15,0	1,26	0,348
	D2	**Voiture bio-électrique**	1,73	1,83	1,31
Ressources	**A**	**Voiture essence**	214	24,6	7,19
	B*	**Voiture GNC**	249	24,6	7,19
	C	**Voiture électrique**	0,726	35,3	23,3
	D1*	**Voiture bioGNC**	6,19	24,6	7,19
	D2	**Voiture bio-électrique**	1,00	35,3	23,3

Tableau A-IV- 3 Valeurs absolues des dommages selon la méthode d'évaluation d'ACV

		A	**B***	**C**	**D1***	**D2**
		Voiture essence	**Voiture GNC corrigé**	**Voiture électri-que**	**Voiture bioGNC corrigé**	**Voiture bio-électrique**
IMPACT 2002+	**Santé humaine**	8,75E-06	4,26E-06	5,15E-06	3,54E-06	4,88E-06
	Qualité écosystème	4,32	8,32	3,15	1,96	3,05
	CC	2,86E+1	1,90E+1	7,80	1,66E+1	4,87E+00
	Ressources	2,74E+2	2,91E+2	6,92E+1	3,80E+1	5,95E+01
ReCiPe	**Santé humaine**	8,62E-04	3,60E-04	5,33E-04	1,53E-04	2,94E-04
	Qualité écosystème	5,71E-07	3,87E-07	3,92E-07	3,45E-07	1,43E-07
	Ressources	9,93E+1	1,02E+2	2,24E+1	1,26E+1	1,96E+01

Tableau A-IV- 4 Valeurs absolues selon la méthode ReCiPe des indicateurs d'impacts

	A	B	C	D1	D2
	Voiture essence	**Voiture GNC**	**Voiture électrique**	**Voiture bioGNC**	**Voiture bio-électrique**
Santé humaine et CC	8,59E-05	6,08E-05	2,21E-05	5,38E-05	1,51E-05
Détérioration de la couche d'ozone	5,61E-09	6,26E-09	9,11E-10	4,08E-10	7,05E-10
Toxicité humaine	7,72E-04	2,96E-04	5,08E-04	9,67E-05	2,75E-04
Oxydation photochimique	2,34E-09	1,18E-09	9,41E-10	6,86E-10	6,68E-10
Formation particules fines	4,55E-06	2,70E-06	3,21E-06	2,66E-06	3,18E-06
Radiation ionisante	2,01E-08	1,91E-08	1,62E-08	6,78E-09	1,28E-08
Écosystème et CC	4,58E-07	3,24E-07	1,18E-07	2,87E-07	8,06E-08
Acidification terrestre	7,64E-10	4,25E-10	3,96E-10	5,79E-10	4,99E-10
Eutrophisation eau douce	1,08E-10	6,56E-11	2,45E-10	6,49E-11	2,31E-10
Écotoxicité terrestre	6,65E-09	3,98E-09	4,15E-09	3,44E-09	3,49E-09
Écotoxicité eau douce	4,00E-10	1,50E-10	1,72E-10	3,62E-11	4,63E-11
Écotoxicité marine	9,25E-10	3,54E-10	4,79E-10	1,00E-10	1,93E-10
Occupation des terres agricoles	1,14E-08	6,80E-10	1,04E-09	1,24E-09	9,25E-10
Occupation des terres urbaines	5,72E-09	2,21E-09	2,60E-09	8,17E-10	9,86E-10
Occupation des terres naturelles	8,75E-08	5,47E-08	2,65E-07	5,16E-08	5,60E-08
Détérioration des minerais	7,28E-02	6,77E-02	4,34E-01	8,43E-02	4,30E-01
Détérioration des produits fossiles	9,92E+01	1,02E+2	2,20E+1	1,25E+1	1,91E+01

Tableau A-IV- 5 Valeurs des voitures selon la provenance de l'énergie d'après la méthode IMPACT 2002+

	C	**C***	**D1**
	Voiture électrique hydroélectricité	**Voiture électrique charbon**	**Voiture bio-électrique**
Santé humaine	5,15E-06	1,02E-05	4,88E-06
Qualité écosystème	3,15	5,59	3,05
Changement climatique	7,80	22,9	4,87
Ressources	69,2	263,	59,5

ANNEXE V

ÉTUDE D'IMPACTS

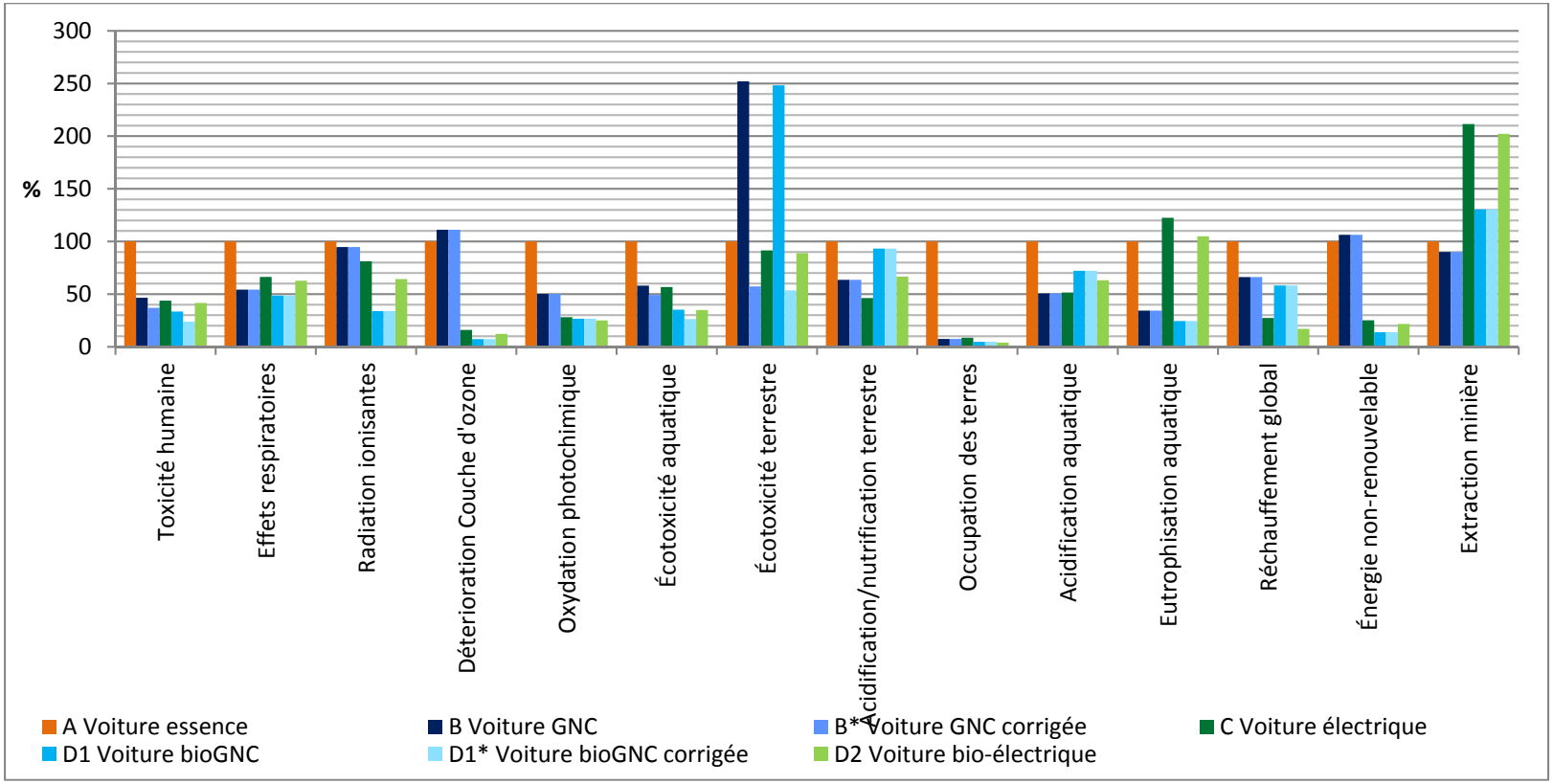

Figure-A-V 1 Étude d'impacts avec les valeurs corrigées selon la méthode Impact 2002+

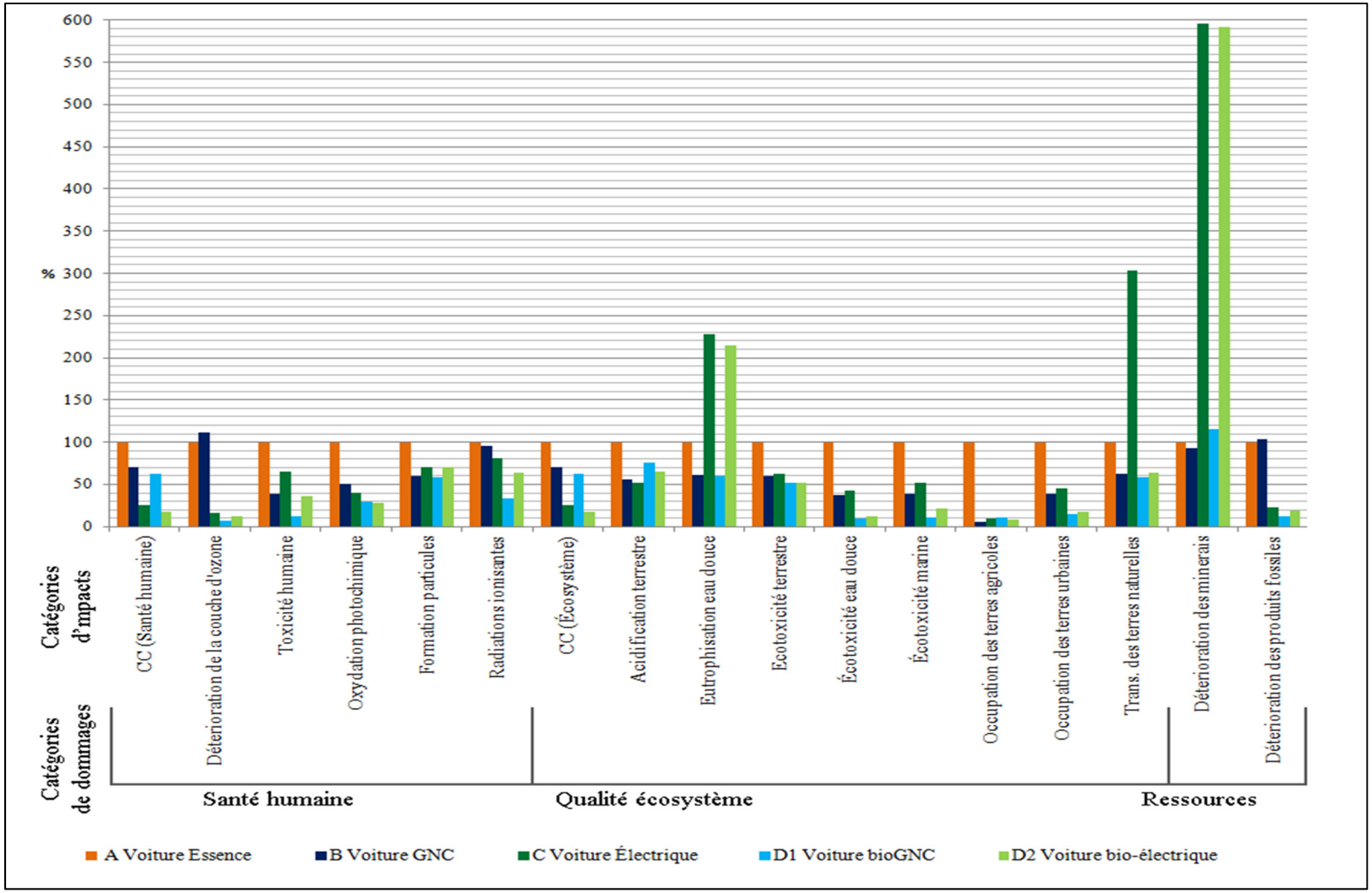

Figure-A-V 2 Étude d'impacts selon la méthode ReCiPe

ANNEXE VI

SCORES UNIQUES VALEURS ABSOLUES

Tableau A-VI- 1 Valeurs absolues du score unique de chacun des indicateurs de dommages des cinq scénarios selon la méthode IMPACT 2002+

	A	B*	C	C*	D1*	D2
	Voiture à essence	Voiture GNC corrigée	Voiture électrique	Voiture électrique au charbon	Voiture bioGNC corrigée	Voiture bio-électrique
Santé humaine	0,00123	0,00060	0,00073	0,00144	0,00050	0,00069
Qualité de l'écosystème	0,00032	0,00015	0,00023	0,00041	0,00014	0,00022
Changement climatique	0,00289	0,00191	0,00079	0,00231	0,00168	0,00049
Ressources	0,00180	0,00191	0,00046	0,00173	0,00025	0,00039
Total	**0,00624**	**0,00458**	**0,00220**	**0,00590**	**0,00257**	**0,00179**

Tableau A-VI- 2 Valeurs absolues du score unique de chacun des indicateurs de dommages des cinq scénarios selon la méthode ReCiPe

	A	B*	C	C*	D1*	D2
	Voiture à essence	Voiture GNC corrigée	Voiture électrique	Voiture électrique au charbon	Voiture bioGNC corrigée	Voiture bio-électrique
Santé humaine	8,40	3,50	5,19	7,71	1,491	2,86
Qualité de l'écosystème	0,853	0,574	0,586	0,896	0,511	0,214
Ressources	0,741	0,763	0,168	0,724	0,094	0,146
Total	**9,99**	**4,84**	**5,95**	**9,33**	**2,10**	**3,22**

Rapport-Gratuit.com

BIBLIOGRAPHIE

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'Énergie (ADEME). (1997). *La logistique et le transport des déchets ménagers, agricoles et industriels* (ADEME Éditions). Paris, France: ADEME Éditions.

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'Énergie (ADEME). (2010). La méthanisation des déchets ménager et industriels. *Les Avis de l'ADEME*, p. 2.

Aouachria, Z., & Haddad, L. (2010). Energie éolienne: Aspects et impacts environnementaux. *Revue des Énergie Renouvelables*, 27‑36.

Association des véhicules électrique du Québec et Société d'assurance automobile du Québec (AVEQ, & SAAQ). (2016). Statistiques SAAQ-AVÉQ sur l'électromobilité au Québec en date du 30 avril 2016 [Association]. Consulté 5 septembre 2016, à l'adresse http://www.aveq.ca/1/post/2016/05/statistiques-saaq-aveq-sur-lelectromobilite-au-quebec-en-date-du-30-avril-2016-infographique.html

Bert, D. (2015). Les défis de l'électrification, L'exemple norvégien. *La Presse+*, p. 4.

Bouvier, A.-L. (2006). *L'évolution de l'évaluation des impacts depuis le début des années 1970: le cas des grands barrages hydroélectriques au Québec* (Mémoire). Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. Consulté à l'adresse http://www.archipel.uqam.ca/1977/

Cames, M., & Helmers, E. (2013). Critical evaluation of the European diesel car boom - global comparison, environmental effects and various national strategies. *Environmental Sciences Europe*, *25*(1), 15. https://doi.org/10.1186/2190-4715-25-15

Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). (2014). *Comparaison des filières de production d'électricité et des bouquets d'énergie électrique* (Rapport technique) (p. 102). Montréal, Québec: CIRAIG. Consulté à l'adresse http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/pdf/comparaison-filieres-et-bouquets.pdf

Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). (2016). *Analyse du cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicle électrique et du véhicle conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois* (Rapport technique) (p. 249). Montréal, Québec: CIRAIG.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Consulté à l'adresse http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/pdf/analyse-comparaison-vehicule-electrique-vehicule-conventionnel.pdf

Couturier, C., Berger, S., & Meiffren, I. (2001). *La digestion anaérobie des boues urbaines, état des lieux, état de l'art* (p. 36). Toulouse, France: Agence de l'eau Adour-Garonne et Solagro.

Dandres, T. (2012). *Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie conséquentielle prospective macroscopique: évaluation d'une politique de bioénergie dans l'Union Européenne à l'horizon 2025* (Thèse). École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec. Consulté à l'adresse http://publications.polymtl.ca/881/

David, A. (2013). *Document technique sur la gestion des matières organiques municipales.* Consulté à l'adresse http://site.ebrary.com/lib/ualberta/Doc?id=10766689

Daylan, B., & Ciliz, N. (2016). Life cycle assessment and environmental life cycle costing analysis of lignocellulosic bioethanol as an alternative transportation fuel. *Renewable Energy*, *89*, 578‑587. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.059

Degraeuwe, B., Thunis, P., Clappier, A., Weiss, M., Lefebvre, W., Janssen, S., & Vranckx, S. (2016). Impact of passenger car NOx emissions and NO2 fractions on urban NO2 pollution – Scenario analysis for the city of Antwerp, Belgium. *Atmospheric Environment*, *126*, 218‑224. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.042

Écoinvent. (2010). LCI database (Version 2.2). Suisse.

Energy Information Administration (EIA). (2012). *Annual Energy Review 2011* (Rapport annuel No. DOE/EIA-0384(2011)) (p. 390). Pittsburghm PA: Government Printing Office. Consulté à l'adresse https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/pdf/aer.pdf

Energy Information Administration (EIA). (2016a). *International Energy Outlook 2016* (No. DOE/EIA-0484(2016)) (p. 290). Washington, DC: EIA. Consulté à l'adresse https://www.eia.gov/outlooks/ieo/electricity.cfm

Energy Information Administration (EIA). (2016b). International Energy Outlook 2016. Consulté 3 janvier 2017, à l'adresse http://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf

Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *39*, 748‑764. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113

Eurostat. (2015). Consommation brute d'énergie intérieure par type de combustible. Consulté 7 janvier 2016, à l'adresse http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdcc320&language=fr

GazMétro. (2013). Transport au gaz naturel (GNL et GNC).

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2009). *ReCiPe 2008* (p. 132). Pays-Bas: Ministerie van Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Consulté à l'adresse http://sites.google.com/site/lciarecipe/file-cabinet/ReCiPemainreportfinal_27-02-2009_web.pdf

Gonzalez-Feliu, J., Ambrosini, C., Henriot, F., & Routhier, J.-L. (2013). La logistique urbaine à l'épreuve du facteur 4. *Recherche Transports Sécurité*, *2012*(02), 88‑100. https://doi.org/10.1007/s13547-012-0031-y

Goubau, M. (2013). Fermeture de Gentilly-2 : un an plus tard. *Radio-Canada.ca*. Consulté à l'adresse http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/647517/gentilly-2-fermeture-un-an

Gouvernement du Canada. (2013). *Document technique sur la gestion des matières organiques municipales* (Rapport technique). Ottawa, Canada: Environnement Canada. Consulté à l'adresse http://epe.lac-bac.gc.ca/100/201/301/liste_hebdomadaire/2013/electronique/w13-12-U-F.html/collections/collection_2013/ec/En14-83-1-2013-fra.pdf

Greenpeace Canada. (2011). *Le potentiel des énergies solaires au Québec*. Consulté à l'adresse http://www.greenpeace.org/canada/Global/canada/report/2011/09/Le%20potentiel%20des%20%C3%A9nergies%20solaires%20au%20Qu%C3%A9bec.pdf

Grosso, M., Nava, C., Testori, R., Rigamonti, L., & Viganò, F. (2012). The implementation of anaerobic digestion of food waste in a highly populated urban area: an LCA evaluation. *Waste Management & Research*, *30*(9 suppl), 78–87.

Groupe Conseil Nutshimit Inc. (2007). *Production de biocarburants et de bioproduits, avantages et impacts pour le secteur agricole* (Rapport final No. P558002) (p. 45). Mashteuiatsh, Québec: Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois.

Guimont, J. (2010). *La collecte à trois voies au Québec : Qu'attendons-nous?* (Essai). Université de Sherbrooke, Montréal, Québec. Consulté à l'adresse https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2010/Guimont_J__25-06-2010_.pdf

Humbert, S., Schryver, A., Bengoa, X., Margni, M., & Jolliet, O. (2012). IMPACT 2002+: User Guide versin Q2.21. Quantis.

Hydro-Québec. (2014a). *L'énergie de la biomasse*. Hydro-Québec. Consulté à l'adresse http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/pdf/fiche-biomasse.pdf

Hydro-Québec. (2014b). *L'énergie solaire*. Québec: Hydro-Québec. Consulté à l'adresse http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/pdf/fiche-solaire.pdf

Hydro-Québec. (2016). Électrification des transports. Consulté 10 février 2017, à l'adresse http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/transport-individuel/cout-energie.html

International Energy Agency (IEA). (2014). *Emissions Reduction through Upgrade of Coal-fired Power Plants- Learning from Chinese Experience* (Partner country series) (p. 58). Paris, France: OECD/IEA. Consulté à l'adresse https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/PartnerCountrySeriesEmissionsReductionthroughUpgradeofCoalFiredPowerPlants.pdf

International Energy Agency (IEA). (2014). (2016). Statistic Search. Consulté 6 avril 2017, à l'adresse http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/

Institut de la Statistique du Québec. (2016). Population du Québec, 1971-2016. Consulté 17 mars 2017, à l'adresse http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/qc_1971-20xx.htm

ISO. (2010). Environmental management - The ISO 14000 family of International Standards. Consulté 7 février 2017, à l'adresse https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:pub:PUB100238

Jolliet, O. (2003). IMPACT 2002+ : A New Life Cycle Assessment Methodology. *Int J LCA*, *8*(6), 324‑330.

Jolliet, O., Saadé, M., & Crettaz, P. (2010). *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. PPUR Presses polytechniques.

Lacroix, N. (2014). *Analyse du couplage digestion anaérobie-gazéification pour le traitement des boues d'épuration* (Mémoire). École de technologie supérieure, Montréal, Québec. Consulté à l'adresse http://espace.etsmtl.ca/1306/

Lavoie, M.-C. (2011). *Étude de faisabilité et d'impacts portant sur l'implantation d'un réseau de transport en commun alternatif* (Mémoire). École de technologie supérieure, Montréal, Québec. Consulté à l'adresse http://espace.etsmtl.ca/881/1/LAVOIE_Marie-Claude.pdf

Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2013). Consommation d'énergie par secteur. Consulté 30 décembre 2016, à l'adresse https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-consommation-secteur.jsp

Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2014). *Politique energétique 2016-2025, Tendances mondiales et continentales*. Québec, Québec: MERN.

Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) (2015). *Politique énergétique 2016-2025, Décarbonisation du transport routier*. Québec, Québec: MERN. Consulté à l'adresse http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2437477

Ministère de la justice. (2013, octobre 25). Lois codifiées Règlements codifiés. Consulté 23 mars 2017, à l'adresse http://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-2010-189/page-1.html

Moletta, R. (2015). *La méthanisation* (3e éd.). Lavoisier.

Office de l'efficacité énergétique (OEÉ). (2014). *Guide de consommation de carburant 2014*. Consulté à l'adresse http://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oee/pdf/transports/outils/cotescarburant/FCG2014WCAG_f.pdf

Office national de l'Énergie (ONÉ). (2015). Aperçu de la situation énergétique au Canada 2014 - Note d'information sur l'énergie. Consulté 27 janvier 2017, à l'adresse https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/vrvw/2014/index-fra.html#fn1

Office national de l'Énergie (ONÉ).. (2016, décembre 1). Tables de conversion d'unités d'énergie. Consulté 30 janvier 2017, à l'adresse https://www.neb-one.gc.ca/nrg/tl/cnvrsntbl/cnvrsntbl-fra.html

Parlement européen. (2015). *Valorisation énergétique des déchets -Opportunités et défis* (No. PE 554.208) (p. 8). Paris, France. Consulté à l'adresse http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/554208/EPRS_BRI(2015)554208_FR.pdf

Perreault, & Bourque. (2014). *Évolution du transport routier au Québec, La crise d'un paradigme* (p. 65). Montréal, Québec: Institut de recherche en économie contemporaine. Consulté à l'adresse http://www.irec.net/upload/File/rapportinfrastructureroutiereavril2014.pdf

Perron, F. (2010). *Potentiel énergétique et gains environnementaux générés par la biométhanisation des matières organiques résiduelles au Québec* (Essai). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Consulté à l'adresse http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7384

Picherit, M.-L. (2010). *Evaluation environnementale du véhicule électrique: méthodologies et application* (Thèse). Saint-Etienne, EMSE, Saint-Étienne. Consulté à l'adresse http://www.theses.fr/2010EMSE0578

Pinard, É. (2011). *Mise en valeur du biogaz des usines de biométhanisation de Montréal: perspectives, analyses et recommandations* (Essai). Université de Sherbrooke, Montréal, Québec. Consulté à l'adresse http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7392

Pré Consultant. (2016). SimaPro (Version 8.1.1.16). Pays-Bas.

Recyc-Québec. (2014). *Bilan de la gestion des matières résiduelles au Québec 2012*. Recyc-Québec. Consulté à l'adresse https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2012.pdf

Recyc-Québec. (2015). *Caractérisation des matières résiduelles du secteur résidentiel 2012-2013*. Québec, Québec: Recyc-Québec. Consulté à l'adresse http://www.ecoentreprises.qc.ca/documents/pdf/caracterisation_2012-2013_rapport_synthese_fr_final.pdf

REN21. (2016). *Global Status Report* (REN21 éd.). Paris, France. Consulté à l'adresse http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/

Ressources naturelles Canada (RNCan). (2005). Tableaux d'analyse de l'évolution de l'efficacité énergétique (Canada). Consulté 10 novembre 2016, à l'adresse http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/analyse/tableaux.cfm

Ressources naturelles Canada (RNCan). (2014). *Le bon sens au volant -Les faits : Les émission de votre véhicule*. Consulté à l'adresse http://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oee/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_9_f.pdf

Robert, M. A., Kleeman, M. J., & Jakober, C. A. (2007). Size and Composition Distributions of Particulate Matter Emissions: Part 2—Heavy-Duty Diesel Vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *57*(12), 1429‑1438. https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.12.1429

Société d'assurance automobile du Québec (SAAQ). (2013). *Données et statistiques 2012* (Rapport annuel) (p. 32). Québec, Québec: Société de l'assurance automobile du Québec. Consulté à l'adresse https://saaq.gouv.qc.ca/fileadmin/documents/publications/donnees-statistiques-2012.pdf

Société d'assurance automobile du Québec (SAAQ). (2016). *Rapport annuel de gestion 2015* (Rapport annuel) (p. 184). Montréal, Québec: Société de l'assurance automobile du Québec. Consulté à l'adresse https://saaq.gouv.qc.ca/fileadmin/documents/publications/rapport-annuel-gestion-2015.pdf

Simons, A. (2016). Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in ecoinvent v3. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(9), 1299‑1313. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0642-9

Solinov. (2013). *Portrait-gisement-residus-organiques-industrie-agroalimentaire.pdf* (No. RT01-40412) (p. 146). St-Jean-sur-Richelieu: Solinov. Consulté à l'adresse http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/matieres/valorisation/Portrait-gisement-residus-organiques-industrie-agroalimentaire.pdf

Sportisse, B. (2008). *Pollution atmosphérique: Des processus à la modélisation* (Springer Science & Business Media). Paris, France: Springer Science & Business Media.

Statistique Canada. (2008). Tendances sociales canadiennes : Dépendance à l'automobile dans les quartiers urbains. Consulté 19 janvier 2017, à l'adresse http://www.statcan.gc.ca/pub/11-008-x/2008001/article/10503-fra.htm

Statistique Canada. (2012). Émissions de gaz à effet de serre provenant des véhicules privés au Canada, 1990 à 2007. Consulté 5 octobre 2016, à l'adresse http://www.statcan.gc.ca/pub/16-001-m/2010012/part-partie1-fra.htm

Table ronde sur l'utilisation du gaz naturel dans les transports. L'utilisation du gaz naturel dans le secteur du transport canadien (2010). Consulté à l'adresse http://www.nrcan.gc.ca/sites/oee.nrcan.gc.ca/files/pdf/transports/carburants-remplacement/ressources/pdf/plan-action.pdf

Thériault, N. (2011). *Dans le cadre d'une ACV, conception d'un outil d'aide à la sélection d'un jeu de catégories d'impact pour les entreprises européennes et nord-américaines du secteur textile* (Essai). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Consulté à l'adresse http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7480

Université de Sherbrooke. (2016). Consommation d'énergie (kg de pétrole par habitant - équivalence), Canada. Consulté 3 janvier 2016, à l'adresse http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?langue=fr&codePays=CAN&codeStat=EG.USE.PCAP.KG.OE&codeStat2=x

Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2015). *État de l'énergie au Québec*. Montréal, Québec: Chaire de gestion du secteur de l'Énergie HEC Montréal.

Wold, M. F., & Ølness, S. (2016). *An empirical analysis of drivers for electric vehicle adoption : evidence from Norway 2010-2014* (Mémoire). Norwegian school of economics, Norwegian. Consulté à l'adresse https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2432988

Yang, L., Ge, X., Wan, C., Yu, F., & Li, Y. (2014). Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *40*, 1133‑1152. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.008

Rapport-Gratuit.com