

Analyses de cycle de vie de différentes motorisations de véhicules particuliers

Dont essence, diesel, CNG, hybride, plug-in hybrid et électrique

Mémoire présenté par
Julien HENDRIX , Stanislas DE BRUYNE

en vue de l'obtention du grade de Master
Ingénieur civil mécanicien

Promoteur(s)
Hervé JEANMART, Maxime POCHET

Lecteur(s)
Contino FRANCESCO, Patricia Luis ALCONERO

Année académique 2017-2018

Remerciements

Nos plus grand remerciements vont à nos promoteur et co-promoteur, le Pr. Hervé Jeanmart et Maxime Pochet qui nous ont soutenu et encouragé tout au long de l'année. Les conseils avisés et les remarques critiques nous ont permis d'approfondir bien des sections de ce travail. De plus un tout grand merci à Maxime Pochet pour l'idée du sujet de mémoire et de nous avoir permis de le réaliser.

Merci à nos deux lecteurs, le Pr. Francesco Contino et Pr. Patricia Luis Alconero, pour la lecture de ce travail.

Un tout grand merci également à Naïma Sallem, assistante à l'EPL, pour les réponses à nos questions concernant le programme SimaPro ainsi qu'au Pr. Angélique Léonard pour ses documents explicatifs de la méthode LCA et ses bons conseils. Enfin, nous tenons à remercier le Pr. John Gallagher, du Trinity College Dublin, pour ses conseils et explications à propos des LCA.

Enfin, nous remercions nos proches, amis et familles, qui nous ont soutenus et qui furent des relecteurs assidus lors des dernières semaines.

Table des matières

Remerciements	2
Abstract	6
Liste des abréviations	8
Introduction	10
1 Méthodologie et hypothèses	12
1.1 Choix des véhicules	12
1.2 Méthodologie	14
1.2.1 Explication d'un LCA	14
1.2.2 Méthode d'analyse de cycle de vie	14
1.2.3 ReCiPe 2016	15
1.2.4 Choix de la méthode	18
1.2.5 Base de données	19
1.3 New European Driving Cycle	19
1.4 Mix énergétique	19
1.4.1 Mix énergétique pour la construction	20
1.4.2 Mix énergétique pour l'utilisation	20
1.5 Pertes du réseau électrique et rendement de charge	24
1.5.1 Pertes du réseau électrique	24
1.5.2 Rendement de charge	24
1.6 Consommation énergétique et émissions de CO_2 de la combustion	24
1.6.1 Consommation et émissions CO_2 en fonction du carburant	25
1.6.2 Emission de N_2O	27
1.6.3 Influence de l'aérodynamisme	29
1.6.4 Influence de la masse	30
1.7 Matériaux et poids respectifs	30
1.7.1 Énergie d'assemblage	30
1.8 Durée de vie	31
1.9 Batteries	31
1.10 Recyclage d'une voiture	34
1.10.1 Recyclage des batteries	34
2 Résultats	36
2.1 Résultats généraux comparatifs	36
2.1.1 Impacts climatiques	36
2.1.2 Impacts sur les ressources métalliques	37
2.1.3 Impacts sur les ressources fossiles	38
2.2 Cycle de vie par voiture	39
2.3 Batteries	42

3	Analyse de sensibilité	44
3.1	Consommations réelles	44
3.2	Mix de production d'électricité	46
3.3	Durée de vie de la batterie	47
3.4	Mix énergétique pour la production de la batterie	47
3.5	Variabilité de la consommation d'essence, de gaz et du mix énergétique	48
3.6	Mise en perspective des paramètres de l'EV	48
3.7	Etude de sensibilité des méthodes d'analyse	50
4	Comparaison avec d'autres études	52
4.1	"Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA", 2017 [1]	52
4.2	"Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles", 2015 [2]	53
4.3	"The environmental performance of current and future passenger vehicles : Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework", 2015 [3]	53
4.4	"Research on Life Cycle Energy Consumption and Environmental Emissions of Light-duty Battery Electric Vehicles", 2015 [4]	55
4.5	"A Range-Based Vehicle Life Cycle Assessment Incorporating Variability in the Environmental Assessment of Different Vehicle Technologies and Fuels", 2014 [5]	55
5	Conclusion	58
	Bibliographie	60
	Annexes	65
A	Mix énergétique	66
B	Propriétés des carburants et production de CO_2 à l'utilisation	67
C	Composition des voitures	68
C.1	ICE	68
C.1.1	Composition générale	68
C.1.2	Composition détaillé	68
C.2	PHEV	73
C.2.1	Composition générale	73
C.2.2	Composition détaillé	73
C.3	HEV	77
C.3.1	Composition générale	77
C.3.2	Composition détaillé	77
C.4	EV	82
C.4.1	Composition générale	82
C.4.2	Composition détaillé	82
D	Composition des batteries	87
E	Autres arbres de résultats	88

Abstract

Français Vu le contexte actuel du changement climatique, la société se doit d'opérer une transition vers des modes de vie décarbonés. 20% des émissions de CO_2 mondiales proviennent du transport routier, une évolution de celui-ci est primordiale. Pour tenter de réaliser cette transition, le marché du véhicule particulier est en pleine mutation, notamment vers une électrification croissante. Une analyse des impacts CO_2 sur l'ensemble du cycle de vie de différents types de véhicules existants est une approche intéressante pour réfléchir aux directions à emprunter à court, moyen et long terme.

Dans cette étude, une analyse des impacts sur le changement climatique (évalués en kg CO_2 eq), épuisement des ressources métalliques (kg Fe-eq) et fossiles (kg oil-eq) est réalisée pour plusieurs types de motorisations : essence, diesel, gaz (CNG), hybride, plug-in hybrid ainsi qu'électrique.

En prenant l'hypothèse d'un mix énergétique européen et d'une production de batteries principalement en Asie, le véhicule électrique émet 35 t CO_2 eq. pour 200.000 km, Ce qui en fait le véhicule le plus polluant, devant le plug-in hybrid. En suivant les tests NEDC pour la consommation, les véhicules à combustion interne essence et diesel émettent environ 27 t CO_2 eq. Le véhicule hybride (HEV) occasionne quant à lui une émission de 22,5 t CO_2 eq., légèrement moins que le CNG (23 t CO_2 eq.).

Le bilan carbone de la voiture électrique proviennent principalement du mix énergétique du pays où la batterie est construite et du pays où la voiture est utilisée, ainsi que de la durée de vie de la batterie. Ces paramètres vont certainement être amenés à évoluer dans les prochaines décennies, ce qui améliorera sans doute considérablement le bilan de ces véhicules. A plus court terme, d'autres solutions existent (HEV et CNG) pour diminuer les impacts sur le changement climatique des véhicules présents sur les routes.

English In the context of climate change, the society has to operate a transition to a sustainable way of living. With 20% of carbon emissions produced by road transport, improvements in this sector are imperative. To achieve this transition, the passenger car market is engaging in a deep transformation towards electrification. A life cycle analysis of various types of passenger cars is a good approach to discuss possible directions to take at short, medium and long term.

In this study, an analysis of the impacts on climate change (evaluated in kg CO_2 eq.), metal depletion (kg Fe-eq) and fossil depletion (kg oil-eq) is realised for various types of powertrains : gasoil, diesel, gas (CNG), hybrid, plug-in hybrid and electric vehicle.

Assuming an European energy mix and batteries produced in Asia, the electric vehicle emits 35 t CO_2 eq. for 200.000 km, the most polluting vehicle before plug-in hybrid. Based on the NEDC tests for consumption, the internal combustion engine vehicles, gasoil and diesel, emits around 27 t CO_2 eq. The hybrid passenger car (HEV) causes an emission of 22,5 t CO_2 eq., slightly less than CNG (23 t CO_2 eq.).

The carbone footprint of the electric vehicle mainly comes from the energy mix of the country where the battery is manufactured and the country where the car is used. The battery lifetime is also an important factor. These parameters will evolve in the coming decades, decreasing significantly the impacts of the electric car. At mid-term, other solutions exist (HEV and CNG) to reduce the impacts on climate change of passenger cars on the roads.

Liste des abréviations

Types de motorisations

ICE	Internal combustion engine
HEV	Hybrid electric vehicle
CNG	Compressed natural gas
EV	Electric vehicle
PHEV	Plug-in hybrid vehicle

Types de batteries

LMO	batterie lithium-ion $LiMn_2O_4$
NCM	batterie lithium-ion $LiNiMnCoO_2$
Ni-MH	batterie nickel metal hydride

Energie et puissance

GWh	Gigawatt-heure
kWh	kilowatt-heure
MJ	Megajoules

Organisations et institutions

UE	Union Européenne
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

Autres

REET	Greenhouse gases Regulated Emissions and Energy consumption in Transportation
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
LCA	Life cycle assessment (analyse de cycle de vie)
GWP	Global Warming Potential
NEDC	New European Driving Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
SOC	State of charge
CD	Charge depletion
CS	Charge sustainable

Introduction

Le transport routier cause une part significative (20%) des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine. Les véhicules particuliers forment la grande majorité des véhicules présents sur les routes. Depuis les débuts de l'automobile, les voitures thermiques ont quasiment eu le monopole des ventes, mais la situation change petit-à-petit. L'électrification de notre société pourrait amorcer une transition pour la production de nouveaux types de véhicules. Plusieurs motorisations alternatives sont actuellement en développement, parmi lesquelles des véhicules hybrides et électriques.

Le débat autour de l'impact environnemental de ces nouveaux véhicules est omniprésent. Les scientifiques, autant que les journalistes et les politiciens, annoncent chacun des chiffres différents. Pour les uns, l'impact des batteries renvoie la voiture électrique en dernière position, pour les autres tout est mieux que le statut quo des voitures thermiques.

Dans ce travail de fin d'étude, nous proposons une analyse et une comparaison approfondie de l'impact global de différents types de véhicules de taille moyenne. Une analyse de cycle de vie est un bon moyen de comparaison. En effet, cette analyse englobe l'extraction des matières premières et leur transport, la construction du véhicule, l'utilisation de carburant, le démantèlement et les impacts de la fin de vie. Afin de réaliser cette analyse, le logiciel SimaPro¹ est utilisé car il est leader mondial dans ce domaine. La base de donnée EcoInvent² y est associée et nous utiliserons sa mise à jour 3.1 datant de 2014 car c'est la seule à laquelle nous avons eu accès. La méthode de calcul exploitée est *ReCiPe midpoint Hierarchist*.

Le premier chapitre détaille la méthodologie ainsi que les hypothèses utilisées, notamment la liste des véhicules considérés, le mix énergétique, la demande d'énergie de construction des batteries ou encore les émissions de CO_2 par litre de carburant.

Le second chapitre présente les résultats par véhicule. Les bilans sont réalisés suivant trois critères, l'impact sur le changement climatique, l'épuisement des ressources métalliques, et l'épuisement des ressources fossiles. Cela permet en outre de comparer les véhicules entre eux.

Dans le troisième chapitre, des analyses sont effectuées quant à la sensibilité de certains paramètres critiques dont les consommations réelles, le mix énergétique, et la durée de vie de la batterie.

Le quatrième chapitre consiste en une comparaison des hypothèses et résultats de différentes études trouvées dans la littérature avec les nôtres.

1. <https://simapro.com>

2. <https://www.ecoinvent.org>

Chapitre 1

Méthodologie et hypothèses

1.1 Choix des véhicules

Pour couvrir la gamme des voitures mises sur le marché actuellement, nous avons choisi six voitures. Les modèles ont été sélectionnés de manière à être relativement homogènes au niveau du poids et de la puissance. Ils ont tous été commercialisés après 2013. Deux catégories ont été choisies, d'une part des véhicules avec uniquement une motorisation thermique (Essence, Diesel et CNG) et d'autre part avec une motorisation en partie ou complètement électrifiée (électrique, Plug-in Hybrid, Hybride).

Essence L'Audi A3 roulant à l'essence a été commercialisée en 2013. Elle pèse 1200 kg à vide. Sa consommation en cycle NEDC (explication à la section 1.3) est de 4.7 litres/100km¹. Sa puissance est de 85 kW pour un moteur 1.0 TFSI (Turbocharged Fuel Stratified Injection).

Diesel Afin d'être plus complet sur les voitures ICE (moteurs à combustion interne), nous avons analysé l'impact d'une motorisation 1.6 TDI (Turbocharged Direct Injection) diesel sur ce même modèle. En effet, la combustion du diesel et son rendement sont légèrement différents de l'essence. D'après les données constructeurs, la consommation de l'Audi A3 diesel est de 4,2 litres/100km² dans le cadre du test NEDC.

Gaz naturel comprimé (CNG) Un autre type de voiture à moteur thermique est celle fonctionnant au gaz naturel comprimé (CNG). Le gaz naturel émet moins de dioxyde de carbone lors de la combustion que l'essence ou le diesel, dû à sa composition plus riche en hydrogène. Les calculs de rendement du moteur et d'émissions CO_2 de la combustion sont réalisés dans la section 1.6.

Concernant le LPG (butane et propane liquéfiés), Nordelof et al.(2014), [6] l'incluent dans leur synthèse des études précédemment réalisée et montrent que son impact CO_2 est systématiquement plus important que celui du CNG. Nous n'avons donc pas inclus de voiture au LPG dans notre étude.

Électrique (EV) Depuis quelques années, le marché de la voiture électrique est en pleine expansion. Nous avons sélectionné dans cette catégorie la BMW I3. La batterie a une capacité de

1. Site web Audi : <https://www.fr.audi.be/be/web/fr/modeles/a3/a3-sportback/moteurs.html>, Consulté le 15 mars 2018

2. Site web Audi : <https://www.fr.audi.be/be/web/fr/modeles/a3/a3-sportback/moteurs.html>, Consulté le 15 mars 2018

27.2 kWh utilisable et une autonomie de 300 km selon le test standard NEDC. Le constructeur annonce toutefois une autonomie de 200 km en conduite réelle [7]. Il est possible d'y ajouter un range extender, c'est-à-dire un petit moteur thermique avec un réservoir de 9 litres, qui alimente la batterie et augmente l'autonomie de 100 km. Le moteur électrique a une puissance de 125 kW. La batterie est de type lithium-ion, mixte LMO/NMC, et pèse 230 kg. Les calculs de consommation sur base de la taille de la batterie et de l'autonomie sont réalisés dans la section 1.6.

Plug-In Hybrid Vehicle (PHEV) L'Audi e-tron, lancée en 2014, permet aux moteurs électriques et thermiques de fonctionner en parallèle. Le moteur essence, 1.4l TFSI (Turbocharged Fuel Stratified Injection), fournit jusqu'à 112 kW et celui électrique 75 kW [8]. En utilisation combinée, la voiture a une puissance de 152 kW. Avec son réservoir de 40 litres d'essence, son autonomie s'approche des 1000 km. Mais lors d'une utilisation purement électrique, l'autonomie n'est que de 40 km car la batterie ne peut fournir que 8.8 kWh d'électricité. La technologie est la même que la batterie de la voiture électrique : lithium-ion mixte LMO/NMC. Son poids est de 125 kg.

La consommation moyenne en usage mixte selon le test NEDC est de 1.8 L/100km³. Ce test avec des plug-in hybrid fonctionne différemment de celui des autres motorisations car la batterie peut se recharger lors de la conduite. Les valeurs sont donc à prendre avec précaution en l'absence de chiffres sur la répartition des kilomètres roulés sur batterie et sur le carburant. Nous avons préféré réaliser nos propres calculs dans la section 1.6.

Hybrid Electric Vehicle (HEV) La Prius est une référence dans le domaine des voitures hybrides non rechargeables par une source extérieure. Elle est en évolution depuis 1997, année où elle est apparue sur le marché. Nous avons choisi le modèle lancé en 2016. Le montage est en série-parallèle, ce qui permet de combiner sur le même arbre la puissance du moteur électrique (via la batterie) et du moteur thermique (via l'essence). La puissance est de 73 kW en thermique et 91 kW en combiné. La batterie Ni-MH de 1.3 kWh pèse 39 kg [9]). Elle n'est pas faite pour fonctionner en full électrique car l'autonomie de ce mode n'est que de 2 km.

Le but de ce moteur électrique complémentaire est de "lisser" les pics de puissance nécessaires lors des accélérations afin que le moteur tourne le plus proche possible de son point de fonctionnement optimal. Cela a pour effet de diminuer la consommation du moteur thermique, annoncée par le constructeur à 3 l/100km (test NEDC).

Pile à combustible Nous avons intentionnellement omis la voiture à piles à combustible hydrogène car son impact en terme d'empreinte écologique est plus élevé que celui des autres types de véhicules dans les études existantes, notamment chez Lombardi et al. (2017) [1]. De même, selon Miotti et al. (2015) [2], lorsque l'hydrogène est produit par reformage du méthane par vapeur d'eau, le bilan du véhicule est de 280 g CO_2 /km. En utilisant de l'électricité d'un mix européen, l'impact est de plus de 450 g CO_2 /km. Le cas de l'hydrogène produit par une source d'énergie renouvelable est le seul amenant un bilan CO_2 plus faible que l'ICE qui se trouve à 230 g CO_2 /km. Mais dans ce cas, le véhicule électrique pur est meilleur que celui à pile à combustible. Il y a en outre de nombreux obstacles à son utilisation massive dans les années qui viennent (sécurité et stockage, prix élevé, mise en place de stations,...) bien que la voiture Toyota Mirai

3. Site web Audi : <http://www.audi.fr/fr/web/fr/gamme/a3/a3-sportback-e-tron/moteurs.html>, consulté le 15 mars 2018

soit déjà disponible depuis 2015.

1.2 Méthodologie

1.2.1 Explication d'un LCA

Pour comparer des produits de manière intégrale et équivalente, un cadre a été développé internationalement, nommé "Analyse de cycle de vie". L'objectif est de prendre en compte, dans l'étude, l'ensemble des processus participants à l'impact du produit : matières premières, mise en forme, utilisation et fin de vie. Dans le cas d'un véhicule, on peut regrouper ces processus en trois groupes comme indiqué à la figure 1.1 : "Well to wheel", utilisation, et cycle de vie de l'équipement.

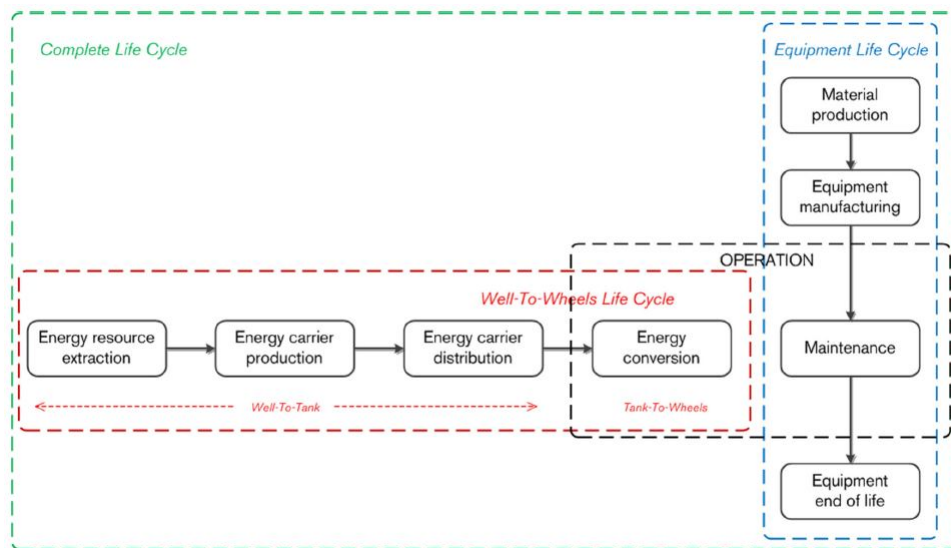


FIGURE 1.1 – Schéma des processus pris en compte dans un LCA. Source : Nordelof et al. 2014 [6].

1.2.2 Méthode d'analyse de cycle de vie

Différentes méthodes d'analyses sont implémentées dans SimaPro et c'est à l'utilisateur de choisir l'une d'elles. Ces méthodes respectent les principes de l'analyse de cycle de vie décrits dans les normes ISO 14040 et ISO 14044. Elles présentent toutes le même schéma général visible à la Figure 1.2. Les résultats de l'inventaire des flux d'entrée et de sortie du système sont compilés et rassemblés afin d'obtenir des catégories d'impacts environnementaux, nommés Midpoints. Certaines méthodes vont un pas plus loin et regroupent ces impacts en 3 grandes catégories (endpoints) : la santé humaine, l'environnement et les ressources naturelles.

Malgré une harmonisation sur le principe général, chaque méthode a ses caractéristiques, ses forces et ses faiblesses. Certaines sont meilleures pour analyser certains impacts ou dommages que d'autres. D'après M. Z. Hauschild et al. (2012) [11], pour le midpoint "changement climatique", la meilleure méthode est le GWP100 de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Celle-ci est aussi considérée comme recommandée et satisfaisante par l'International Reference Life Cycle Data System (ILCD). Pour les midpoints "resource depletion (mineral & fossil)", la meilleure méthode est le CML 2002 selon l'ILCD.

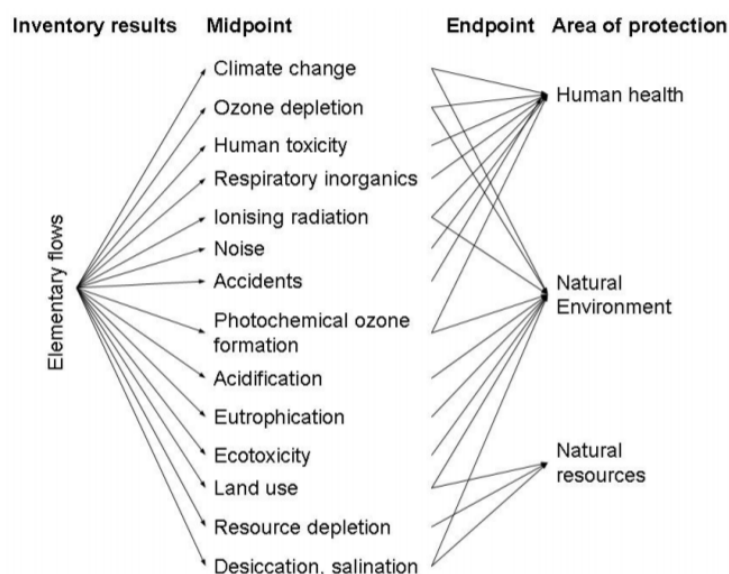


FIGURE 1.2 – Schéma représentant les liens entre les 15 catégories d’impacts (midpoints) et les 3 enjeux (endpoints). Les bilans proviennent toujours de des flux élémentaires. Tiré de [10].

Pour choisir la méthode la plus adaptée, plusieurs étapes sont nécessaires. La première est de voir quelles méthodes correspondent à l’étendue géographique de l’analyse. Certaines ont une limitation territoriale, généralement continentale, tandis que d’autres sont valables partout. La seconde étape est la définition des objectifs et donc des catégories à évaluer (quels midpoints et/ou endpoints).

Notre étude a une étendue internationale et transcontinentale car les matériaux et combustibles proviennent de partout dans le monde. Trois domaines vont être analysés : l’impact sur le changement climatique, l’utilisation des ressources métalliques ainsi que l’utilisation des ressources fossiles. L’impact sur le changement climatique est le plus étudié et le plus important dans le cadre de cette étude. Nous avons opté pour la méthode ReCiPe 2016 car l’analyse des impacts climatiques se base sur le modèle GPW 2013 de l’IPCC et que celui-ci est recommandé et satisfaisant [11]. Elle permet aussi d’analyser la rareté des ressources fossiles et métalliques. De plus, ReCiPe est adaptée pour une étude d’étendue géographique transcontinentale.

1.2.3 ReCiPe 2016

ReCiPe 2016 existe sous différentes variantes en fonction du niveau analysé (midpoints ou endpoints) ainsi que la durée sur laquelle se fait l’analyse (20 ans, 100 ans ou 1000 ans). Le schéma de fonctionnement général de ReCiPe se trouve à la Figure 1.3. Les explications des variantes temporelles et des niveaux d’analyse proviennent du rapport de caractérisation de ReCiPe 2016 [12].

Étendue dans le temps

ReCiPe offre trois possibilités d’évaluation en fonction de l’échelle de temps. Les midpoints ainsi que les endpoints peuvent être analysés au travers de trois zones temporelles : 20 ans, 100 ans et 1000 ans.

- Individualist (I) : court termiste (20 ans), vision optimiste qui part du principe qu’il n’y aura pas de problème avec la technologie. C’est un modèle à perspective "humaine", et il ne prend en compte que les impacts qui sont certains.

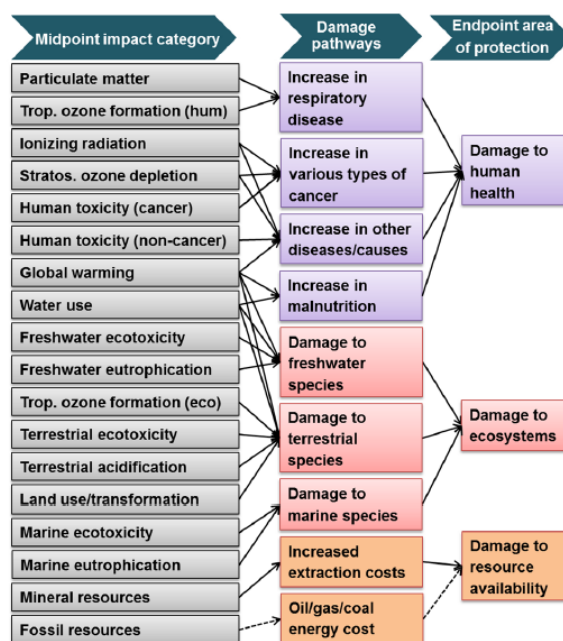


FIGURE 1.3 – Schéma de la méthode ReCiPe 2016 représentant les liens entre les 18 catégories d'impacts (midpoints) et les 3 enjeux (endpoints). Les bilans proviennent toujours des flux élémentaires. Tiré du rapport ReCiPe. [12].

- Hierarchist (H) : Modèle de consensus scientifique au vu de la durée dans le temps (100 ans) et de la plausibilité des mécanismes d'impacts.
- Egalitarian (E) : vision à long terme (1000 ans ou plus), modèle pessimiste qui prend le plus de précautions. Il prend en compte l'ensemble des chemins causes-effets possibles pour lesquelles des données sont disponibles.

Chaque perspective temporelle attribue une valeur différente à l'indicateur de caractérisation en fonction de son influence dans le temps ainsi qu'une valeur différente à chaque facteur de caractérisation (Figure 1.4 et 1.5) et facteur de transformation Midpoints-to-Endpoints. L'utilisation des ressources fossiles est la seule ne possédant pas de valeur différente en fonction de la perspective temporelle. C'est pourquoi il n'y a pas de table récapitulative.

	Individualist	Hierarchist	Egalitarian
Climate change			
Time horizon ¹	20 years	100 years	1,000 years
Climate-carbon feedbacks non-CO ₂	No	Yes	No
Future socio-economic developments ²	Optimistic	Baseline	Pessimistic
Adaptation potential ²	Adaptive	Controlling	Comprehensive

FIGURE 1.4 – Choix de valeurs des facteurs de caractérisation dans la modélisation des effets des gaz à effet de serre en fonction de la portée temporelle de l'analyse, ReCiPe 2016, tiré de [12].

Midpoints

Dans chaque catégorie d'impact il y a un indicateur d'impact avec une certaine unité qui sert à exprimer un facteur de caractérisation adimensionnel. Ce facteur est adimensionnel car il

Choice category	Individualist	Hierarchist	Egalitarian
Future production	Reserves	Ultimate recoverable resource	Ultimate recoverable resource

FIGURE 1.5 – Choix des valeurs des facteurs de caractérisation dans la modélisation de l'utilisation des ressources métalliques en fonction de la portée temporelle de l'analyse, ReCiPe 2016, tiré de [12].

représente l'impact d'une substance par rapport à la substance de référence. La manière dont est calculé chaque facteur de caractérisation à partir de son indicateur d'impact diffère selon les cas.

Changement climatique Le facteur de caractérisation du midpoint sur le changement climatique est le Global Warming Potential (GWP). Celui-ci représente l'augmentation, intégré sur le temps, de la réflexion des infra-rouges sur l'atmosphère pour l'émission d'un kilogramme du Gaz à Effet de Serre (GES) par rapport à un kg de CO_2 émis sur le même délai de temps. La quantité de réflexion d'infra-rouges sur un certain laps de temps est désigné comme l'AGWP, la valeur absolue du potentiel d'effet de serre, calculé en $[Wm^{-2}yrkg^{-1}]$. L'indicateur et le facteur de caractérisation pour le midpoint de la catégorie d'impact "changement climatique" sont explicités à la Figure 1.6.

Impact category	Indicator	Unit	CF _m	Abbr.	Unit
climate change	Infra-red radiative forcing increase	W×yr/m ²	global warming potential	GWP	kg CO ₂ to air

FIGURE 1.6 – Synthèse de l'indicateur et facteur de caractérisation pour le changement climatique, ReCiPe 2016, tiré de [12].

Le facteur de caractérisation GWP de n'importe quel GES x sur un interval de temps TH peut être calculé comme suit :

$$GWP_{x,TH} = \frac{AGWP_{x,TH}}{AGWP_{CO_2,TH}} \left[\frac{kgCO_2eq}{kgGES} \right] \quad (1.1)$$

Les valeurs et détails de calcul concernant l'AGWP se trouvent dans le rapport de caractérisation de ReCiPe 2016 [12]. Dans la Figure 1.7 se trouvent les GWPs des quatre GES les plus fréquents.

Name	Formula	Individualist (20 years)	Hierarchist (100 years)	Egalitarian (1,000 years)
Carbon dioxide	CO ₂	1	1	1
Methane	CH ₄	84	34	4.8
Fossil methane	CH ₄	85	36	4.9
Nitrous oxide	N ₂ O	264	298	78.8

FIGURE 1.7 – Valeurs des GWPs calculés au moyen de l'équation 1.1 pour les quatre GES les plus fréquents, ReCiPe 2016, tiré de [12].

Utilisation des ressources métalliques Le facteur de caractérisation de l'épuisement des ressources métalliques est exprimé en Surplus Ore Potential (SOP). Avec la diminution du taux de métal dans le minerai extrait, il faudra, dans le futur, extraire plus de minerai pour une même

quantité de métal. Le SOP représente l'extraction supplémentaire de minerai nécessaire pour l'obtention de 1 kilogramme de la ressource x dans le futur, en considérant toutes les extractions futures (R) par rapport à l'extraction supplémentaire de minerai afin de produire 1 kg de cuivre dans le futur. R représente les réserves de ce minerai. Ce qui donne comme formule :

$$SOP_{x,R} = \frac{ASOP_{x,R}}{ASOP_{Cu,R}} \left[\frac{kgCu_{eq.}}{kgx} \right] \quad (1.2)$$

ASOP est le surplus potentiel de minerai extrait pour l'extraction de 1 kg d'une certaine ressource x. Il est exprimé en $kg - minerai/kgx$ comme défini dans [12] page 97-98. Trois exemples de valeurs de SOPs en fonction des perspectives temporelles apparaissent à la Figure 1.8.

Mineral resource	Chemical element	Individualist	Hierarchist	Egalitarian
Aluminium	Al	1.01E-01	1.69E-01	1.69E-01
Antimony	Sb	1.03E+00	5.72E-01	5.72E-01
Arsenic*	As	8.89E-02	1.31E-01	1.31E-01

FIGURE 1.8 – Valeurs des SOPs calculées au moyen de l'équation 1.2 pour 3 éléments du tableau périodique des éléments, ReCiPe 2016, tiré de [12].

Les résultats exprimés dans ce travail en matière d'épuisement des ressources le sont en [kg Fe eq.], selon le même calcul que pour le cuivre. Le SOP est adimensionnel, mais en multipliant par le nombre de kilogrammes de métal nécessaire dans le produit, l'unité est bien le kg Fe eq.

Utilisation des ressources fossiles L'indicateur pour l'utilisation des ressources fossiles s'exprime en Fossil Fuel Potential (FFP) d'une ressource fossile x. L'unité correspondante est le kg oil-eq./unité de ressource.

$$FFP_x = \frac{HHV_x}{HHV_{oil}} \quad (1.3)$$

FFP_x est le rapport de la valeur calorifique maximum (HHV : Higher Heating Value) de la ressource fossile x et du HHV du brut de pétrole. Les HHV des différentes ressources fossiles sont disponible dans la base de données EcoInvent 3.1. Dans la Figure 1.9 se trouve les FFV de 5 carburants fossiles.

Fossil resource	Unit	Characterization factor
Crude oil	oil-eq/kg	1
Natural gas	oil-eq/Nm ³	0.84
Hard coal	oil-eq/kg	0.42
Brown coal	oil-eq/kg	0.22
Peat	oil-eq/kg	0.22

FIGURE 1.9 – Valeurs des FFVs calculées au moyen de l'équation 1.3 pour cinq carburants fossiles, ReCiPe 2016, tiré de [12].

Endpoints

Chaque endpoint est un bilan des dommages causés par plusieurs catégories d'impacts (midpoints), le schéma visible à la Figure 1.3 illustre cela. Les endpoints ne nous permettant pas d'analyser les impacts avec des unités appropriées et précises, nous ne les utiliserons pas dans cette étude.

1.2.4 Choix de la méthode

La méthode choisie dans ce travail est la *ReCiPe midpoint Hierarchist* pour avoir des indicateurs (midpoints) suffisamment précis (avec des unités compréhensibles) qui correspondent

à nos besoins, et une échelle de temps moyenne (100 ans). La méthode choisie utilise GWP100 (Hierarchist) de l'IPCC pour le calcul des impacts lié au changement climatique. Une étude de sensibilité entre les différentes méthodes est présente à la section 3.7.

1.2.5 Base de données

Les données présentent dans le programme SimaPro, que nous avons utilisé, viennent de la base de données EcoInvent [13]. Elle est reconnue dans le monde entier et utilisée par de nombreuses organisations et universités. Nous avons eu accès à la version 3.1 qui date de 2014. L'association qui gère et met à jour cette base de donnée ne réalise pas de profits.

1.3 New European Driving Cycle

Le test NEDC (New European Driving Cycle)⁴ est un cycle de conduite qui permet d'évaluer les émissions de CO_2 ainsi que la consommation de carburant pour des véhicules légers. Ce test fût créé pour des voitures à essence mais est utilisé aussi pour des véhicules diesels, hybrides ou électriques. Il tend à être remplacé par le Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure (WLTP) qui est plus représentatif d'une conduite réelle sur route.

Le test NEDC est constitué de 4 cycles de conduite de type urbaine suivi d'un cycle de conduite de type extra-urbaine comme cela est visible à la Figure 1.10.

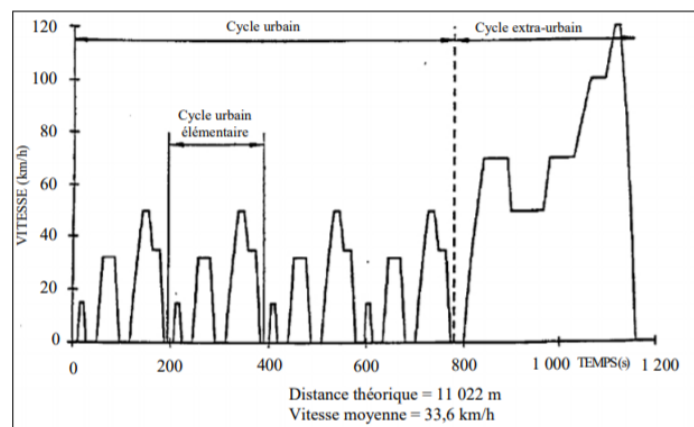


FIGURE 1.10 – Séquence d'essai composée de quatre cycles urbains élémentaires et d'un cycle extra urbain. Source : UN Vehicle Regulations [14].

Le test NEDC sous-estime la consommation réelle sur route des véhicules. Mais cela varie en fonction des véhicules, y compris parmi les véhicules de même motorisation. Il est donc difficile de simplement ajouter un facteur de correction. A noter que la différence de consommation entre le test NEDC et réalité est généralement moindre pour une motorisation diesel que pour l'essence. Malgré ses défauts, la consommation NEDC permet d'avoir une valeur produite par un test normé et équivalent pour les différentes motorisations.

1.4 Mix énergétique

Le mix énergétique pour la production d'électricité est un facteur déterminant pour les résultats de l'étude et doit être choisi avec précaution. Les EV s'alimentant exclusivement à l'électricité, les rejets de CO_2 durant l'utilisation sont directement liés à la manière dont l'électricité

4. Site web de : United Nations Economic Commission for Europe, <http://www.unece.org/trans/main/welcwp29.html>, Consulté le 17 mars 2018

est produite, c'est-à-dire principalement la source utilisée (fossile, renouvelable, nucléaire, etc). Ce paramètre est aussi présent pour les PHEV car elles peuvent se recharger sur le réseau. De plus, le mix énergétique influence les rejets de CO_2 lors de la construction des voitures, principalement par la construction de la batterie.

Avant de détailler nos hypothèses, la Table 1.1 indique la quantité de dioxyde de carbone généré par kWh en fonction de la source de l'électricité. Les valeurs sont prise de la base de données EcoInvent au travers du programme SimaPro. Sans surprise, la combustion du charbon et du pétrole, et dans une moindre mesure du gaz, sont fort générateurs de gaz à effet de serre.

Source	Facteur d'émission [g CO ₂ eq/kWh]
Charbon (Allemagne)	1370
Pétrole (Allemagne)	1180
Gaz naturel (BEL)	550
nucléaire (BEL)	16
photovoltaïque (BEL)	128
Eolien onshore (BEL)	22
Eolien offshore (BEL)	19
Hydro rivière (FR)	5
Moyenne UE	534,8

TABLE 1.1 – Emission de $CO_{2eq.}/kWh$ en fonction des sources d'électricité.

1.4.1 Mix énergétique pour la construction

La dépense énergétique principale à la construction vient des batteries dans le cas des voitures PHEV, EV, et dans une moindre mesure HEV. Le choix d'un mix énergétique représentant au maximum la réalité est important. Les batteries sont produites dans différents pays à travers le monde avec des mix énergétiques très différents. Pour pallier cela, un mix énergétique moyen a été créé pour les principaux producteurs mondiaux de batteries dans la section 1.9.

1.4.2 Mix énergétique pour l'utilisation

Au vu de l'interconnexion grandissante des réseaux électriques européens, le choix se porte vers un mix de sources d'électricité qui est une moyenne de l'ensemble des pays de l'UE. D'autres cas sont aussi étudiés dans l'analyse de sensibilité, section 3, tel qu'un mix Belge avec une grande proportion d'énergie nucléaire, ainsi que le cas d'une personne produisant son électricité à partir de panneaux solaires privés.

Mix UE L'UE a eu une production brute de 3234 TWh ([15]) durant l'année 2015. 42,8% de la production fut faite à partir de sources fossiles fortement émettrices de CO_2 , principalement du gaz et du charbon. La Figure 1.11 précise les chiffres de chaque source.

L'ensemble des mix énergétiques des pays européens ne sont pas présents dans la base de données Ecoinvent 3.1 disponible dans SimaPro. Nous avons fait le choix de sélectionner les 22 pays les plus producteurs d'électricité en UE. La somme de ces pays nous donne 98,7% de la production totale européenne, une proportion largement représentative. La liste détaillée des pays avec leur production d'électricité est disponible en annexe A.

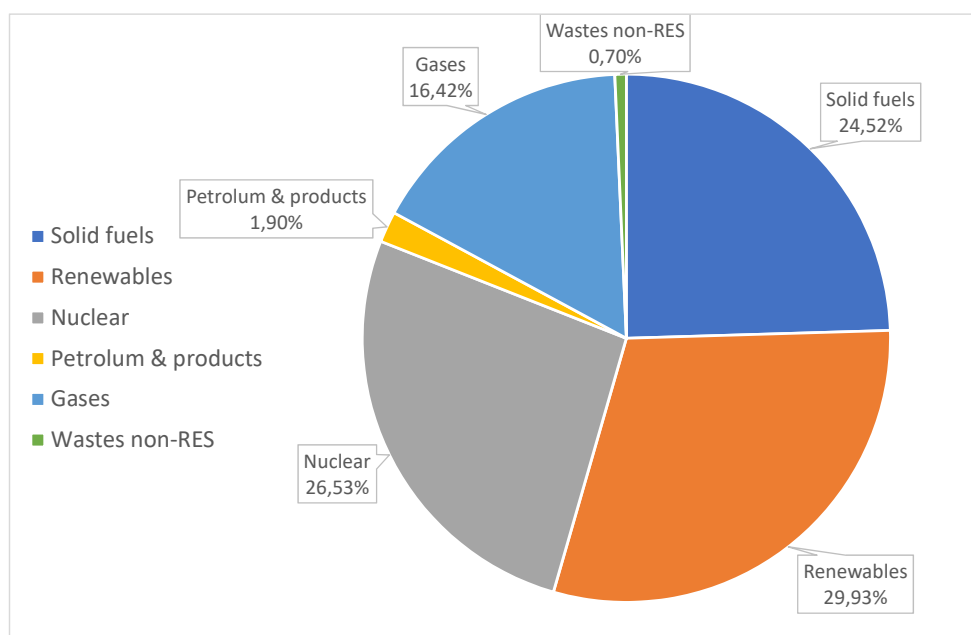


FIGURE 1.11 – Production brute d'électricité par source en 2015 pour l'UE. Source : Commission européenne [15].

Dans la Figure 1.12 est représentée la quantité de CO_2 émise pour la production de 1 kWh d'électricité par chacun des pays repris dans notre étude. Dans un but de comparaison, les émissions de CO_2 par kWh des pays producteurs de batteries (en jaune) sont représentées à la Figure 1.12 ainsi que la moyenne européenne (en rouge).

Pour finir, la Table 1.2 donne la contribution de chaque pays dans l'émission des GES due à la production d'électricité. La production de chaque pays en pourcentage de la génération totale d'électricité en Europe est aussi indiquée.

Mix Belge La production brute d'électricité pour 2015 en Belgique était de 70,65 TWh ([15]). Les deux composantes principales de la production sont l'énergie nucléaire et la combustion du gaz naturel, suivi des énergies renouvelables comme cela est visible à la Figure 1.13. Cela en fait un mix énergétique beaucoup moins émetteur de CO_2 que le mix européen moyen. A noter que la production d'électricité nucléaire a baissé en 2015 avant de remonter en 2016 et 2017. En 2017, le nucléaire comptait pour 58% de la production d'électricité en Belgique⁵. Pour notre simulation, nous avons, comme pour le mix européen, pris les données d'EcoInvent 3.1 repris dans le logiciel SimaPro.

Production locale photovoltaïque Le dernier mix énergétique utilisé dans cette étude n'est pas un mix lié à un pays mais à une situation bien précise. C'est le cas d'un particulier ayant installé des panneaux photovoltaïques sur son toit afin de recharger la batterie de sa voiture. La base de donnée Ecoinvent 3.1 prend en compte l'énergie grise et les émissions en amont qui ont servi à la fabrication des panneaux. C'est évidemment de loin la situation la moins émettrice de CO_2 de nos trois hypothèses.

La question qui peut évidemment être soulevée est celle de la crédibilité d'une telle situation.

5. Site web du forum nucléaire belge : <https://www.forumnucleaire.be/actus/nouvelle/mix-energetique-belge-en-2017>, consulté le 10 avril 2018

	g CO2 eq/kWh	%	Production dans le mix UE [%]
Total	534,80	100%	100
Allemagne	124,33	23,25%	18,57%
France	18,31	3,42%	15,83%
Grande-Bretagne	75,32	14,08%	10,91%
Italie	64,89	12,13%	10,27%
Espagne	41,35	7,73%	8,37%
Pologne	55,21	10,32%	4,77%
Suède	3,04	0,57%	4,58%
Pays-Bas	24,82	4,64%	3,78%
Belgique	9,23	1,73%	2,93%
Finlande	11,73	2,19%	2,90%
Autriche	8,78	1,64%	2,22%
République Tchèque	17,19	3,21%	2,08%
Grèce	21,00	3,93%	1,92%
Portugal	9,86	1,84%	1,66%
Roumanie	10,19	1,90%	1,56%
Hongrie	9,19	1,72%	1,35%
Danemark	5,90	1,10%	1,12%
Bulgarie	7,63	1,43%	1,04%
Irlande	6,85	1,28%	0,9%
Slovaquie	4,60	0,86%	0,9%
Croatie	3,08	0,58%	0,5%
Slovenie	2,32	0,43%	0,5%

TABLE 1.2 – Contribution de chaque pays repris dans cette étude quant à ses émissions de GES (1ère colonne), en rapport avec le total européen (2ème colonne) et sa contribution en quantité d’électricité produite par rapport à la totalité de l’UE (3ème colonne).

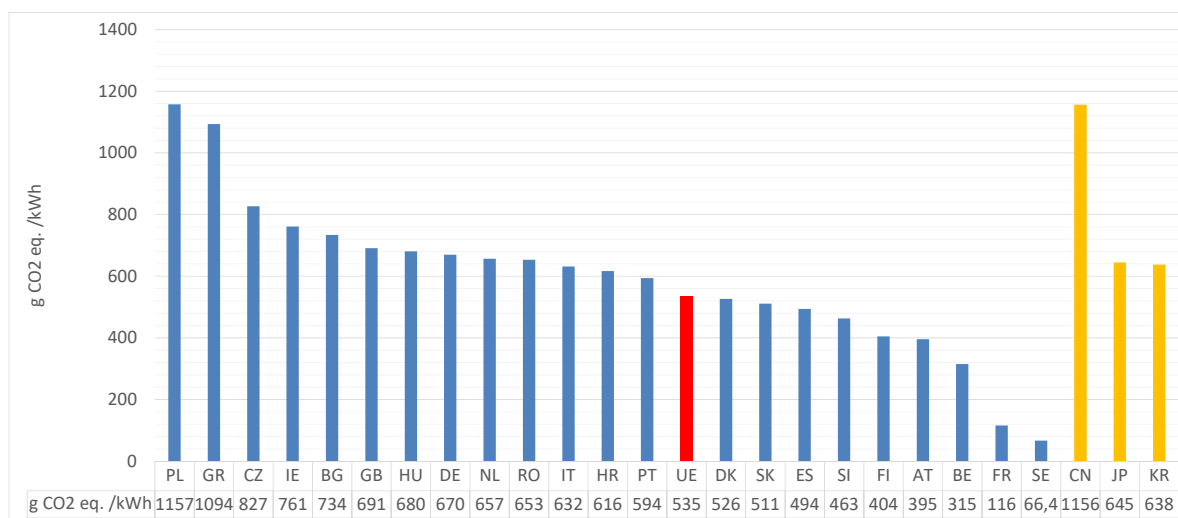


FIGURE 1.12 – Emission de CO_2 par pays par kWh d'électricité produite. Les pays producteurs de batteries sont en jaune et la moyenne européenne en rouge. Source : EcoInvent 3.1.

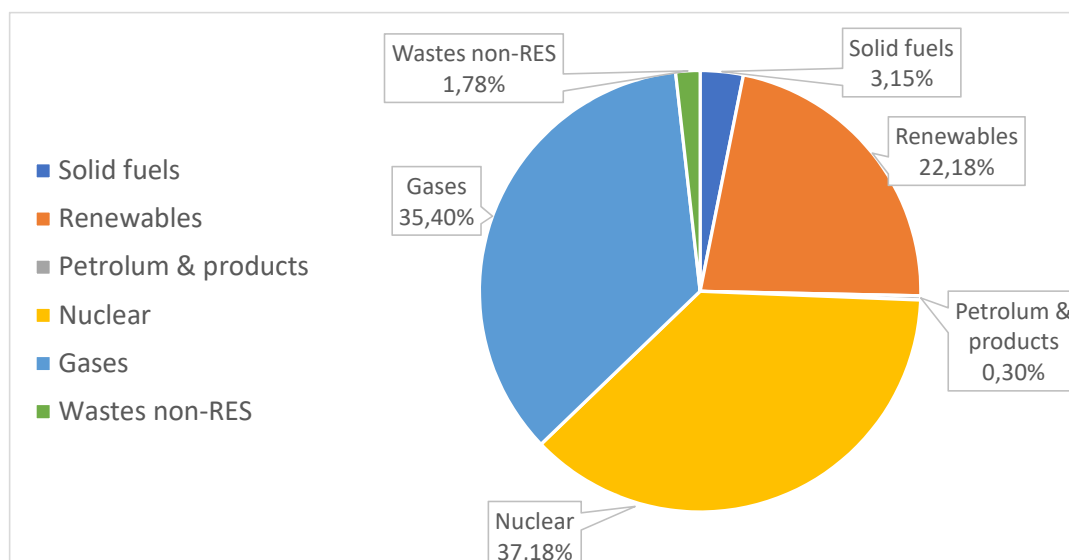


FIGURE 1.13 – Production brute d'électricité par source en 2015 pour la Belgique. Source : Commission européenne [15].

En admettant un rendement du panneau photovoltaïque de 15% et une énergie solaire reçue en Belgique de $960 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$ ⁶, cela donne une production de $144 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$. Sachant que notre

6. Cours d'énergie renouvelable "LENVI2007", École Polytechnique de Louvain, UCL, 2017-2018

voiture électrique consomme environ 18 kWh/100km (voir section 1.6), il faut environ 25m² de panneaux. Mais ce calcul ne prend pas en compte la différence de production d'électricité entre l'été et l'hiver où la production est bien plus faible. Il faut alors soit augmenter la taille des installations, soit installer d'importantes batteries de stockage.

Cette hypothèse est donc une indication de l'impact de la production d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques, et non une simulation de situation réelle.

1.5 Pertes du réseau électrique et rendement de charge

1.5.1 Pertes du réseau électrique

Les pertes du réseau sont directement liées à l'intensité du courant, avec des pertes plus faibles à haute tension. La base de données EcoInvent 3.1 permet de choisir différentes tensions pour l'utilisation de l'électricité. Elle inclut les pertes du réseau. Dans cette étude, deux gammes de tensions ont été considérées en fonction de l'utilisation de l'électricité : tension moyenne et faible.

- Tension faible : en-dessous de 1000 Volts, celle-ci est utilisée dans la recharge des EV et PHEV. Ce niveau de tension est disponible chez les particuliers mais induit une perte plus importante qu'une tension plus élevée.
- Tension moyenne : entre 1000 Volts et 1000 kilo-volts, cela correspond à une tension rentrant dans une usine. Cette tension est utilisée pour le mix énergétique de la production des batteries.

1.5.2 Rendement de charge

Lors du chargement d'une batterie de voiture, une partie de l'électricité est perdue à la borne. Le rendement est de 76% pour un chargeur Tesla 400 V qui correspond à une estimation optimiste de ce qui se fait sur le marché. Les données des autres constructeurs ne sont pas disponibles.

1.6 Consommation énergétique et émissions de CO₂ de la combustion

Les démarches sont relativement différentes entre les carburants fossiles et l'électricité. Pour implémenter l'émission de CO₂ dû à la combustion du carburant, la consommation de carburant et les caractéristiques de celui-ci sont nécessaires. Les propriétés des carburants sont disponible en Annexe B. Nous obtenons ainsi le nombre de tonnes de CO₂ pour rouler 200.000 km.

Dans les cas EV et PHEV, nous n'avons besoin que de la consommation d'électricité. La production initiale est cependant différente de cette consommation à cause des pertes du réseau et du rendement de charge. Le calcul est le suivant :

$$E_{init} = \frac{E_{dest}}{\epsilon_{charge}} \quad (1.4)$$

Avec E_{init} l'électricité qui doit être produite à la source. E_{dest} est l'électricité arrivant à destination, pertes dans le réseau comprises⁷. ϵ_{charge} est le rendement de charge à la borne. Dans cette section, les calculs sont uniquement réalisés sur la consommation NEDC, l'analyse sur des valeurs de consommation réelle est faite dans l'analyse de sensibilité (section 3).

7. Nous n'avons pas de donnée précise pour ces pertes dans le réseau basse et moyenne tension mais elles sont déjà incluses dans le processus de SimaPro via la base de données EcoInvent 3.1

1.6.1 Consommation et émissions CO_2 en fonction du carburant

Essence L'essence possède un PCI⁸ de $43,5 \text{ MJ/kg}$, ainsi qu'une masse volumique de 720 g/litre . $31,32 \text{ MJ}$ d'énergie sont donc contenus dans un litre d'essence. En multipliant cette énergie par la consommation, $4,7 \text{ l/100km}$ ⁹, on obtient l'énergie en carburant nécessaire pour faire rouler une voiture à essence 100 km , c'est-à-dire $147,20 \text{ MJ/100km}$. La combustion de l'essence génère $70,64 \text{ g } CO_2/\text{MJ}$. On peut donc calculer avec les données précédentes que rouler 100 km implique une émission de $10,84 \text{ kg}$ de CO_2 . Cette étude porte sur une distance totale parcourue de 200.000 km , ce qui donne $21,68 \text{ tonnes}$ de CO_2 émisent.

Diesel La Audi A3 diesel consomme $4,2 \text{ l/100km}$ ¹⁰, ce qui correspond à $147,40 \text{ MJ/100km}$. Le diesel ayant un PCI de $42,8 \text{ MJ/kg}$, la combustion émet $74,38 \text{ g } CO_2/\text{MJ}$. Cela donne $22,46 \text{ tonnes}$ de CO_2 émisent pour 200.000 km , correspondant à 105% des émissions d'un moteur essence équivalent.

Pour ce moteur, le diesel émet plus de CO_2 que l'essence. Ce résultat surprenant est dû à la taille du moteur. Dans ce cas-ci, les moteurs essence et diesel ont une puissance équivalente de 85 kW , les plus petits moteurs de la gamme chez Audi. Si le même calcul était effectué avec des moteur de puissance supérieure, 110 kW par exemple, le diesel émettrait moins de CO_2 (98%) que l'essence. De plus, comme marqué à la section 3.1, la différence entre la consommation réelle et NEDC dans le cas du diesel est relativement faible contrairement au cas de l'essence où la différence est importante.

CNG L'hypothèse faite ici est qu'une voiture au gaz à besoin de la même quantité d'énergie pour se mouvoir qu'une voiture à essence. Cependant, le rendement moteur est supérieur, 35% au lieu de 32% pour l'essence. L'énergie nécessaire est donc de $134,59 \text{ MJ/100km}$. La combustion produit $15,65 \text{ tonnes}$ de CO_2 pour 200.000 km . La combustion du gaz émet 25% de CO_2 en moins que la combustion de l'essence.

HEV Pour la voiture hybride Prius, la consommation d'essence en test NEDC est de $3,6 \text{ l/100km}$ ¹¹, cela correspond à $93,96 \text{ MJ/100km}$. Le calcul est similaire à celui de la voiture essence. Le résultat donne $13,28 \text{ tonnes}$ de $CO_2/200.000 \text{ km}$.

PHEV Les voitures Plug-in hybrid sont celles dont les consommations sont les plus difficiles à modéliser. En effet, il nous faut connaître la répartition des kilomètres parcourus à l'électricité et à l'essence.

Dans le cadre du test NEDC, une procédure [16] à été mise en place. Elle est composée de deux tests avec un niveau de charge (SOC pour "state of charge") différent pour la batterie en fonction du test. D'abord un test NEDC (mode CD pour "charge depletion") réalisé avec la batterie chargée au maximum et qui se décharge durant le test. On obtient alors une valeur de consommation de carburant (C_1) et une électricité utilisée (e_1) calculée comme indiqué dans la Figure 1.14.

Le second test (CS mode pour "charge sustainable") se fait avec une batterie qui est à son SOC minimum pendant le cycle NEDC. Après le cycle, la batterie est rechargée au maximum et

8. Syllabus du cours : Internal Combustion Engine, LMECA2220, pg.69, École Polytechnique de Louvain, UCL

9. Site web du constructeur Audi : <https://www.fr.audi.be/be/web/fr/modeles/a3/a3-sportback/moteurs.html>, consulté le 15 mars 2018

10. Site web du constructeur Audi : <https://www.fr.audi.be/be/web/fr/modeles/a3/a3-sportback/moteurs.html>, Consulté le 15 mars 2018

11. Fiche technique disponible sur le site de Toyota : <https://fr.toyota.be/modeles/prius/index/finitions>, consulté le 25 janvier 2018

ensuite déchargée jusqu'à son SOC minimum une fois comme indiquée dans la Figure 1.15. Trois valeurs sont tirées de cela : e_2 , e_3 et C_2 .

L'autonomie électrique d'une PHEV est déterminée en la faisant passer des cycles NEDC consécutivement jusqu'au SOC minimum de la batterie.

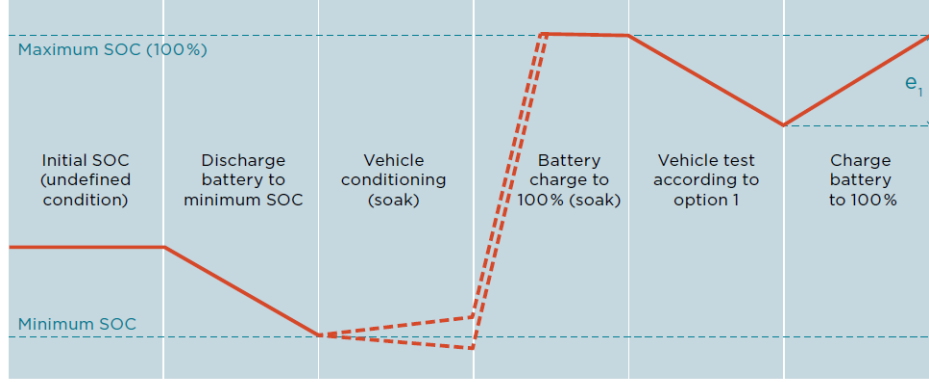


FIGURE 1.14 – Schéma de la procédure de conditionnement de la batterie et de l'électricité utilisée durant le test, dans le cas du test avec une batterie à son SOC maximum au début du test NEDC, tiré de [16].

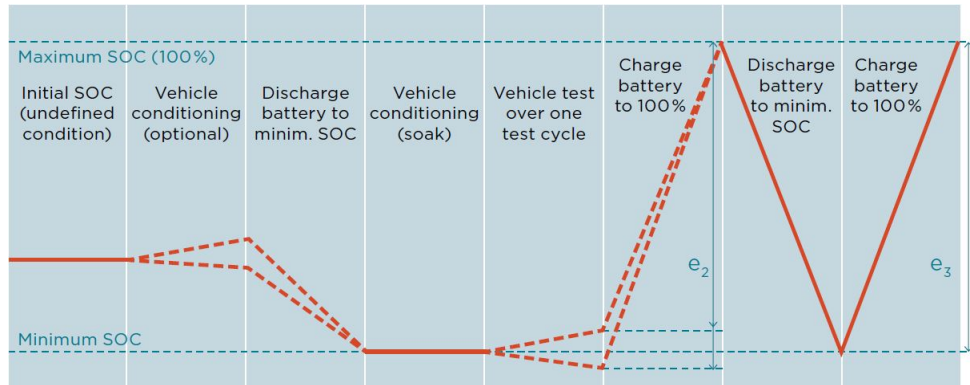


FIGURE 1.15 – Schéma de la procédure de conditionnement de la batterie et de l'électricité utilisée durant le test, dans le cas du test avec une batterie à son SOC minimum au début du test NEDC, tiré de [16].

En combinant ces valeurs dans les équations suivantes [16], les consommations électriques et de carburant peuvent être trouvées.

- C : Consommation de carburant pour 100km.
- C_1 : Consommation de carburant pour 100km en mode CD.
- C_2 : Consommation de carburant pour 100km en mode CS.
- D_e : Autonomie du véhicule uniquement sur batterie.
- D_{av} : 25km, distance moyenne roulée en mode CS selon la norme UN-ECE R101.

$$e_{CD} = \frac{e_1}{D_{CD}} \quad (1.5)$$

$$e_{CS} = \frac{e_4}{D_{CS}} \quad (1.6)$$

$$C = \frac{D_e \cdot C_1 + D_{av} \cdot C_2}{D_e + D_{av}} \quad (1.7)$$

$$E = \frac{D_e \cdot e_{CD} + D_{av} \cdot e_{CS}}{D_e + D_{av}} \quad (1.8)$$

Pour l'Audi e-tron, la consommation (C) estimée grâce à ces calculs est $C = 2,92$ litres/100km, équivalant à 91,45 MJ/100km. Mais n'ayant pas les données e_1 et e_4 , il ne fut pas possible de calculer la consommation électrique E.

Afin de remédier à ce problème, nous avons décidé de faire les estimations de consommation différemment et de prendre en compte 2 cas différents en fonction du type de conduite. Nous avons modélisé deux scénarios différents. Le premier fait l'hypothèse de 20% de la distance réalisée en électrique, et 80% à l'essence. La consommation en essence est assumée égale à celle de l'Audi A3 car ces voitures sont comparables. L'apport du moteur électrique et du système de récupération d'énergie au freinage diminue la consommation, mais ce facteur est compensé par la masse de 200 kg supérieure de la PHEV comparée à l'Audi à motorisation ICE. Le moteur électrique possède un rendement proche de 100%, contrairement au moteur thermique qui est d'environ 40%, l'énergie électrique nécessaire pour un kilomètre parcouru est donc 2,5 fois inférieure.

Un second scénario est d'utiliser l'électricité à hauteur de 50% de la distance. Le raisonnement est similaire au premier cas. Ce scénario correspond assez bien à l'étude sur les voitures hybrides réalisée en 2017 sur base de données empiriques en Allemagne et aux États-Unis (Plötz et al., 2017) [17]. L'énergie en carburant fossile nécessaire d'après les calculs de la procédure NEDC, 91 MJ/100km, se trouve entre les deux cas (50% : 73 MJ/100km ; 80% : 117 MJ/100km), ce qui montre l'intérêt de nos deux cas. Dans le scénario 50%, les émissions dues à la combustion de l'essence sont de 10,40 tonnes de CO_2 pour 200.000 km et de 16,64 tonnes de CO_2 pour le scénario à 80%. Il faut rajouter à cela l'énergie électrique utilisée, respectivement 21,52 MWh/200.000km et 8,61 MWh/200.000km, dont les émissions de gaz à effet de serre dépendent du mix énergétique servant à recharger la batterie. Ces quantités d'électricité correspondent aux quantités à produire à la source, avant les pertes réseau et de charge. Avec un mix énergétique européen, les émissions de CO_2 dû à la recharge des batteries sont respectivement 11,6 tonnes de CO_2 eq. et de 4,60 tonnes de CO_2 eq. pour 200.000km s'il est considéré que cette énergie est exclusivement tiré du réseau et non dû à la recharge causé par le récupérateur d'énergie au freinage.

EV La voiture entièrement électrique possède une batterie de 27,2 kWh utilisable. Si on prend l'hypothèse de 200 km d'autonomie, cela donne 13,6 kWh/100km en consommation d'électricité. Pour calculer l'électricité à produire en amont de la chaîne, il faut prendre en compte le rendement lors de la charge de la batterie. Cela est réalisé dans la section 1.5. L'énergie totale nécessaire à la BMW I3 est alors de 17,89 kWh/100km. Ce qui correspond à 35,79 MWh pour 200.000 km.

Les Tables 1.3 et 1.4 synthétisent toutes ces valeurs.

1.6.2 Emission de N_2O

Le protoxyde d'azote, N_2O est un gaz à effet de serre 298 fois plus puissant que le CO_2 . Le site de l'agence de l'environnement des États-Unis fournit des données d'émissions de ce gaz pour différents types de véhicule [18]. Le véhicule à l'essence émet à hauteur de 0,0036 g/mile, ou 447,2 g sur 200.000 km. La multiplication par le coefficient GWP (298) donne 133,27 kg CO_2 eq. Les véhicules diesel en émettent trois fois moins selon cette même source. En comparant avec les valeurs d'émissions de CO_2 ci-dessus (20 tonnes de CO_2 pour le véhicule à essence), on peut conclure que l'émission de N_2O est négligeable quand à l'impact sur le réchauffement climatique.

	Essence	PHEV	PHEV	HEV	CNG	DIESEL	EV
L/100km (CNG : Kg/100km)	4,70	50% essence	80% essence	3,00	3,10	4,20	0
MJ/100km	147,20	73,60	117,76	93,96	134,59	147,40	0
kg CO ₂ /100km	10,40	5,20	8,32	6,64	7,83	10,96	0
T CO ₂ /200 000 km	20,80	10,40	16,64	13,28	15,65	21,93	0
Par rapport à l'essence	1,00	0,50	0,80	0,64	0,75	1,05	0
Masse Kg	1150	1540	1540	1420	1150	1150	1195

TABLE 1.3 – Consommations de carburant et émissions de CO_2 correspondantes.

	PHEV	PHEV	EV
Consommation électrique	50% élec	20% elec	E_{batt} divisé par l'autonomie
MJ/100km	29,44	11,78	
kWh/100km	8,18	3,27	13,60
Elec primaire (kWh/100km) (76% rendement charge)	10,761	4,304	17,895
MWh/200.000km	21,52	8,61	35,79
Tonnes CO_2 eq. /200.000km (EU mix)	11,51	4,60	19,14
Masse [kg]	1540	1540	1195

TABLE 1.4 – Consommations d'électricité des voitures plug-in hybride et électrique. Les émissions de CO_2 sont basées sur un mix énergétique européen qui comprend un facteur de 534,8 g CO_2 /kWh.

1.6.3 Influence de l'aérodynamisme

Les surfaces frontales et les coefficients d'aérodynamisme influencent l'énergie nécessaire pour mouvoir le véhicule. Nous avons repris dans la Table 1.5 les valeurs des différentes voitures. Le coefficient de traînée, nommé C_x , indique la résistance d'une forme exposée à un vent de face. SC_x est tout simplement le coefficient de traînée multiplié par la surface frontale exposée à l'air (en mètre carré). C'est de SC_x , et bien sûr de la vitesse, que dépend l'énergie à fournir pour mouvoir la voiture face à l'air.¹²

	Surface frontale [m^2]	Coefficient de traînée (C_x)[-]	SC_x [-]
Audi A3 ¹³	2.08	0.31	0.65
BMW I3	2.38	0.29	0.69
Toyota Prius	2.05	0.28	0.57

TABLE 1.5 – Caractéristiques aérodynamiques des voitures de cette étude. SC_x est le produit de la surface frontale et du coefficient de traînée.

La force appliquée à la voiture par l'air ambiant peut être calculée avec l'équation suivante :

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_x$$

Avec ρ , la masse volumique de l'air, qui est de $1.225 \text{ kg}/m^3$ à 15° . La Table 1.6 donne les valeurs pour trois vitesses différentes : 50 km/h, 80 km/h et 110 km/h.

	Toyota Prius	Audi A3	BMW I3
50km/h	67.82	76.18	81.55
80km/h	173.62	195.03	208.76
110km/h	328.25	368.73	394.69

TABLE 1.6 – Force de traînée, F_x [N], des différentes voitures reprises dans cette étude en fonction de la vitesse.

Pour connaître l'impact sur la consommation du moteur, il est utile de convertir ces unités en kWh/100km. Sachant que la force est une énergie divisée par une distance, et que l'énergie est une puissance multipliée par un temps,

$$F = \frac{P \cdot t}{d}$$

$$F = \frac{1000 \text{ Watts} \cdot 3600 \text{ sec}}{100.000 \text{ m}} = 36 \text{ N}$$

1 kWh/100km correspond donc à 36 N. En divisant par 36 les nombres de la Table 1.6, on obtient les résultats de la Table 1.7.

	Toyota Prius	Audi A3	BMW I3
50km/h	1.88	2.12	2.27
80km/h	4.82	5.42	5.80
110km/h	9.12	10.24	10.96

TABLE 1.7 – Consommation [kWh/100km] des différentes voitures en fonction de la vitesse.

Nous n'avons pas tenu compte des différences de résultats dans nos analyses car cela est implicitement compté dans la consommation. Le lecteur pourra observer que la HEV Prius est avantagée en terme d'aérodynamisme.

12. Source : Fiche-auto.fr [19]

1.6.4 Influence de la masse

La masse des véhicules est un autre enjeu important de la conception des véhicules. A haute vitesse, la force principale s'opposant au mouvement du véhicule est le frottement de l'air. Mais à faible vitesse, la friction entre les roues et la route est la composante déterminante. La formule de cette force est la suivante :

$$F = \mu * m * g$$

On peut débattre et chercher longtemps la valeur exacte de μ pour nos voitures. Nous prendrons comme hypothèse $\mu = 0.015$ ¹⁴. La force est multiple directe de la masse si l'on néglige l'influence de la masse sur le coefficient μ (dû à la déformation du pneu). La Table 1.8 indique la force de frottement pour nos voitures. Pour transformer les Newton en kWh/100km, il suffit de diviser le nombre par 36, comme réalisé à la section précédente.

	Toyota Prius	Audi A3	BMW I3	Audi e-tron
Masse [Kg]	1420	1150	1195	1540
F [N]	209	169	176	227
F [kWh/100km]	5,80	4,70	4,88	6,29

TABLE 1.8 – Force de frottement entre les roues et le sol pour les différentes voitures étudiées.

Les voitures de masse plus faible, c'est à dire l'ICE (Audi A3) et la EV (BMW I3) sont avantagées. En comparant les chiffres avec la Table 1.7 concernant l'aérodynamisme, on peut observer que la force de frottement (induite par la masse du véhicule) des pneus sur la route est supérieure à la force de trainée aérodynamique pour une vitesse inférieure à environ 80 km/h. Dans le cadre de cette étude, aucun facteur de correction de la consommation dû à l'influence de la masse n'a été utilisé.

1.7 Matériaux et poids respectifs

Le département d'énergie de l'Université de Chicago, l'Argonne national laboratory, a effectué une étude approfondie de trois types de voitures aux États-Unis : thermique, hybride et pile à combustible. Ils ont développé un modèle permettant une approche en terme de cycle de vie de l'énergie et des émissions des voitures. Ils ont notamment détaillé les matériaux et poids respectifs des différentes parties des voitures. Les masses des voitures européennes sont généralement moindres qu'aux États-Unis mais nous nous sommes basés sur leurs proportions pour déterminer les poids des matériaux de nos voitures. La Table en annexe D détaille ces calculs.

La voiture électrique n'étant pas analysée par le modèle Argonne, nous avons fait l'hypothèse que le châssis de la voiture est similaire à celle de la voiture hybride. Nous avons évidemment retiré le moteur thermique et la transmission liée.

1.7.1 Énergie d'assemblage

L'énergie totale nécessaire dans le cycle de vie d'une voiture, et donc son impact CO_2 , se décompose en plusieurs catégories comme expliqué à la section 1.2.1.

Au niveau des différentes étapes de production de la voiture, le logiciel SimaPro calcule, grâce aux données EcoInvent, les impacts des matériaux de base (aluminium, plastique, etc.). Ceci comprend l'extraction des minerais et autres ressources fossiles, et leur acheminement. La

14. Syllabus du cours : Internal Combustion Engine, LMECA2220, pg.69, École Polytechnique de Louvain, UCL

transformation pour en faire des tôles de véhicules ou des moteurs n'est pas calculée. Nous n'avons pas non plus repris dans cette étude l'énergie d'assemblage des pièces dans les usines de production de voitures.

En comparant les études déjà réalisées, nous avons obtenu une fourchette de 2 à 6 tonnes de CO_2 par véhicule pour l'ensemble de la production des matériaux et la mise en forme d'une voiture thermique classique [4] - [6]. Nos résultats (voir section 2.1) indiquent un bilan de 3,7 tonnes CO_2 eq. pour la construction d'une voiture ICE, c'est-à-dire les matériaux de base. Nous pouvons en conclure que la mise en forme des matériaux et l'assemblage de la voiture (hors batterie) ne représentent qu'une petite proportion des impacts du cycle de vie, car en prenant la borne supérieure des études de la littérature, nous arrivons à 2,3 tonnes de CO_2 . Cette valeur est à mettre en perspective des 30 tonnes de CO_2 du bilan global du cycle de vie.

Notre hypothèse de négliger cet élément là est aussi soutenue par le fait que les différents véhicules ont à peu près le même châssis et donc une énergie d'assemblage similaire. La comparaison entre les types de véhicules n'en est donc que peu affectée.

1.8 Durée de vie

Nous avons fait l'hypothèse d'une durée de vie moyenne d'une voiture de 200.000 kilomètres. Cette valeur est généralement celle choisie dans les études sur le même sujet. Dans le cadre de cette étude, la maintenance des voitures (changement des pneus, des disques de frein,...) n'a pas été prise en compte car l'impact environnemental est relativement faible. La seule opération de maintenance incluse est le remplacement de la batterie pour l'EV.

1.9 Batteries

Les batteries sont un secteur en évolution rapide. Les batteries lithium-ion sont les plus prisées pour les grandes capacités que nécessitent les voitures électriques et plug-in hybrid. On en distingue plusieurs types, dont les LMO ($LiMn_2O_4$) et les NMC ($LiNiMnCoO_2$). Les batteries Ni-MH sont utilisées dans notre véhicule HEV.

Densité Leur densité énergétique se situe autour de 0,12 kWh/kg selon les sources, notamment Matheys et al.(2009) [20], Kim et al. (2016) [21]. Ces chiffres sont en accords avec la batterie de la BMW I3 qui pèse 230 kg pour 30 kWh (=0,13kWh/kg) [22]. La densité énergétique de la batterie de l'Audi e-tron est plus faible, 0,07kWh/kg ($\frac{8.8kWh}{125kg}$). Cela peut être dû à la plus grande proportion massique de l'enveloppe (plastique, acier,...) comparée aux cellules. Ces batteries ont une durée de vie d'environ 1000 cycles selon Matheys et al.(2009) [20].

Durée de vie Notre voiture électrique peut donc théoriquement rouler 200.000 km avec la même batterie ($\frac{1000cycles*27kWh}{13.6kWh/km}$). La garantie fournie par la marque est de 8 ans ou 100.000 km et 70% de capacité restante [23]. Nous avons donc testé les deux cas, en remplaçant une fois ou pas les batteries de la BMW I3.

Pour la voiture plug-in hybrid, la garantie de Sonya est de 8 ans. La batterie est cependant moins sollicitée que pour la voiture électrique car elle n'est pas utilisée en continu et elle reste à un niveau de charge plus constant (moins de passages de charge maximale à charge minimale).

Or ce sont les SOC extrêmes qui détériorent le plus les batteries. Nous avons donc considéré que la batterie ne doit pas être remplacée durant les 200.000 km.

Les batteries de voitures HEV comme la Prius sont quand à elles réalisées avec la technologie Ni-MH (nickel metal hydride). La densité énergétique est plus faible, autour de 0,07kWh/kg. Pour obtenir 1,3 kWh, il faudrait donc 19 kg de batterie. La valeur de 39 kg trouvée pour la Prius [9] inclut l’enveloppe (acier, plastique, etc). La durée de vie de ces batteries au nickel est plus longue que celles au lithium, jusque 1500 cycles [20]. Cela permet de ne pas avoir à changer la batterie durant toute la durée de vie de la voiture.

Concernant la composition précise de ces batteries, nous nous sommes basés sur le programme GREET [24] pour la batterie Ni-MH, sur l’étude Dunn and al.(2012) [25] pour la batterie LMO, et Dunn et al. (2014) [26] pour celle NMC. Une table reprenant les compositions exactes est disponible en annexe D.

Energie L’énergie de production des batteries est un point crucial et les valeurs varient fortement entre les études précédemment réalisées. Une liste de ces études est reprise dans la bibliographie [25–31]. Kim et al. (2016) [21] ont réalisé une synthèse et ont analysé les hypothèses de ces études. Ils ont basé leurs valeurs sur les données de consommation des usines de production. Nous avons choisi de reprendre leur énergie d’assemblage de 120 MJ/kg pour la batterie mixte LMO/NMC. En tenant compte de la grande disparité des valeurs entre les études, nous avons fixé 100 MJ/kg d’énergie d’assemblage d’une batterie Ni-MH. L’énergie de production des différents composants est fournie par EcoInvent dans le programme SimaPro.

Lieu de production La production de batteries pour voitures électriques est en rapide augmentation et de nouvelles usines s’ouvrent régulièrement, surtout en Asie. Bloomberg [32] a compilé des données mondiales sur les entreprises de construction de batteries et son étude est reprise dans la Table 1.9.

Entreprise	Pays des usines	Production [GWh]
LG Chem	Corée sud	17
Tesla	USA	7
BYD	Chine	16
Guoxian high tech	Chine	6
Tianjin Lishen Battery Joint Stock	Chine	3
Amperex Technology (CATL)	Chine	7.5
Panasonic	Japon	8.5
Optimum battery	chine	1.5
Automotive Energy supply corp (AESC)	Japon	8.4
Samsung SDI	Hongrie	6
CBAK energy technology	Chine	2.5
CALB (China aviation lithium battery	Chine	2.4
LEJ (Lithium Energy Japan)	Japon	2.3
Wanxiang	Chine	2.1
<i>total</i>		<i>90.2</i>

TABLE 1.9 – Répartition par entreprise de la production des batteries lithium-ion en 2017, suivant Bloomberg [32].

La Table 1.10 permet de voir la répartition par pays de la production des batteries. A partir de

l'énergie électrique totale nécessaire par kg, 100 MJ et 120 MJ respectivement pour les batteries Ni-MH et lithium-ion, on peut déduire l'électricité à prélever sur le réseau de chaque pays. A noter que pour les USA, il s'agit exclusivement de l'entreprise Tesla qui s'alimente en électricité à partir de panneaux photovoltaïques, ce que nous avons inclus dans notre simulation.

Pays	%	Energie élec Ni-MH [MJ]/kg	Energie élec Li-ion [MJ]/kg	Facteur [g CO_2 /kWh]
Chine	45	45	54	1156
Japon	21	21	25.2	645
Corée sud	19	19	22.8	638
Hongrie	7	7	8.4	680
USA	8	8	9.6	/
<i>total</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>120</i>	

TABLE 1.10 – Répartition par pays de l'énergie électrique pour la fabrication des batteries. L'électricité provient du mix énergétique de chaque pays tel que présent dans la base de donnée EcoInvent 3.1. Les facteurs d'émission moyens de l'électricité par pays [g CO_2 /kWh] sont indiqués dans la 3ème colonne, excepté pour les USA où la Gigafactory de Tesla utilise des panneaux photovoltaïques.

1.10 Recyclage d'une voiture

Le recyclage des voitures est un sujet d'importance car il influence les impacts CO_2 ainsi que les impacts de diminution de ressources, surtout métalliques. Au vu du nombre de pièces, de leurs imbrications, ainsi que de la variété des matériaux utilisés, le recyclage n'est pas toujours une partie aisée du cycle de vie d'un véhicule.

Les processus de recyclage fournis par EcoInvent 3.1 (et repris par le logiciel SimaPro) sont parfois flous du point de vue de leur demande en énergie et des processus exacts. Nous avons donc implémenté nous-même certains processus en suivant le document de S. Belboom et al. (2016) [33] dont la Figure 1.16 est extraite. L'article étudie le recyclage de voitures électriques en laissant de côté le recyclage de la batterie.

La première étape de la fin de vie d'un véhicule est son démantèlement. Comme le processus est principalement manuel, nous l'avons considéré avec une demande énergétique nulle.

Ensuite, les proportions massiques de recyclage des différents matériaux sont indiqués ci-dessous. La technique de recyclage dépend des matériaux et est donnée par EcoInvent 3.1. L'énergie électrique nécessaire par voiture à ce recyclage est de 80 kWh, à laquelle il faut rajouter 18,56 kg de pétrole.

- Acier et fer : 93%
- PVC : 85%
- PP (polypropylène) : 85%
- PE (polyéthylène) : 85%
- PET (polyethylene terephthalate) : 85%
- Aluminium : 97%

Chacune des pièces du véhicule est traitée selon ce processus. Cependant, certaines pièces ne peuvent pas être envoyées entièrement au recyclage dû aux impossibilités de démontage. Elles vont alors pour 50% vers une mise en décharge à 50% vers une incinération. L'incinération se fait avec un scénario belge.

1.10.1 Recyclage des batteries

Pour le recyclage des batteries, plusieurs processus modernes sont déjà implémentés dans Sima Pro pour les batteries Li-Ion, Ni-MH ainsi que les batteries au plomb. Ces procédés de recyclages forment donc une boîte noire qui nous fournit les émissions en CO_2 de cette partie du recyclage.

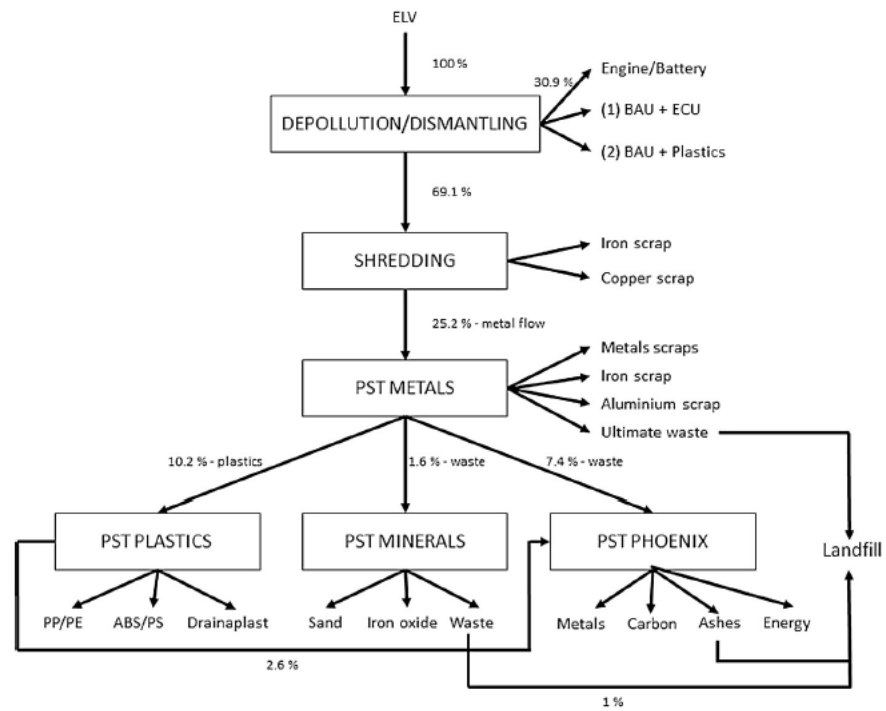


Fig. 1. Boundaries of systems: presentation of included steps – (1) refers to the ECU removal, (2) to the plastics removal (only output products are shown in this figure; BAU means Business As Usual).

FIGURE 1.16 – Schéma de recyclage issu de S. Belboom et al. (2016) [33].

Chapitre 2

Résultats

2.1 Résultats généraux comparatifs

L'implémentation des hypothèses précédemment décrites dans le logiciel SimaPro permet de sortir des résultats comparatifs entre les véhicules. Pour rappel, nous avons 6 motorisations différentes et 2 scénarios d'utilisations de la voiture plug-in hybrid.

2.1.1 Impacts climatiques

Comparaison générale Le résultat général est présenté à la Figure 2.1 où l'on voit l'impact sur le changement climatique (kg CO_2 eq.). Les hypothèses standards sont un mix énergétique européen et une consommation résultant de tests NEDC. Ce sont donc des consommations optimistes mais qui permettent une analyse sur une base équivalente pour l'ensemble des véhicules.

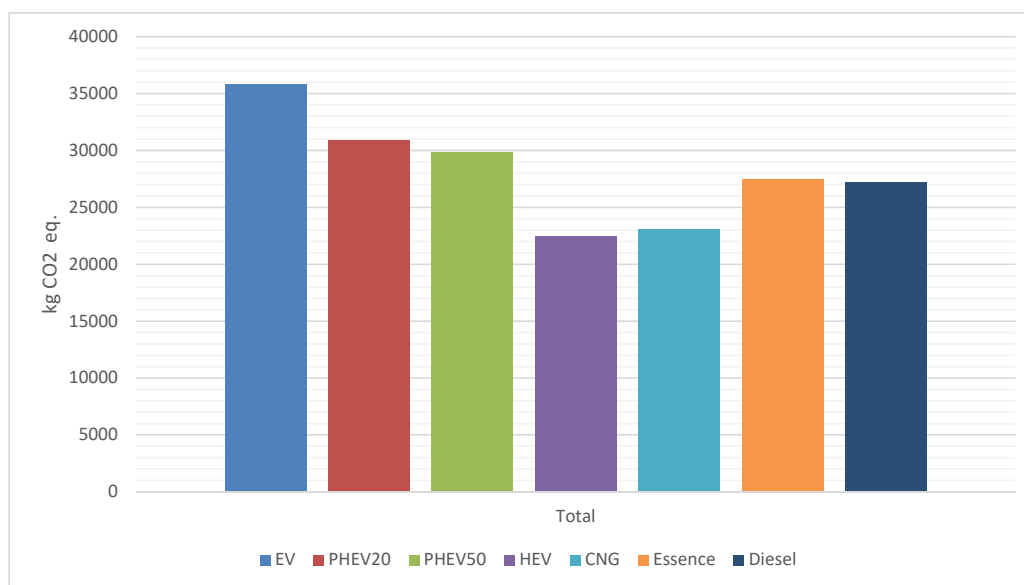


FIGURE 2.1 – Comparaison des émissions totales de CO_2 entre différentes voitures sur l'ensemble de leur cycle de vie. Les consommations sont basées sur des tests NEDC et le mix énergétique est européen.

La voiture électrique est la plus grande émettrice de CO_2 . La PHEV arrive en seconde position, dû au fait qu'il y ait une consommation d'électricité et d'essence, ainsi qu'une batterie

de 125 kg. La voiture est d'ailleurs plus lourde. Viennent ensuite les voitures ICE essence et diesel.

Le véhicule au CNG ainsi que le HEV ont tous les deux un net avantage sur les autres en terme d'impact sur le changement climatique. L'avantage du véhicule CNG est que le gaz produit moins de CO_2 lors de la combustion. La HEV obtient un très bon résultat grâce à une diminution de la consommation dû à son petit moteur électrique mais sans avoir le désavantage d'une batterie de grande capacité comme la PHEV. L'écart d'émissions de CO_2 sur l'ensemble d'un cycle de vie de chaque véhicule par rapport au véhicule électrique est visible à la Table 2.1

Climate change	EV	PHEV 20	PHEV 50	HEV	CNG	Essence	Diesel
kg CO2 eq.	35 789	30 870	29 865	22 453	23 065	27 447	27 168
Ecart	0,00%	-13,74%	-16,55%	-37,26%	-35,55%	-23,31%	-24,09%

TABLE 2.1 – Émissions totales sur l'ensemble d'un cycle de vie de différents véhicules et écart d'émissions par rapport à la voiture électrique.

Pour observer la répartition des impacts entre les différentes étapes du cycle de vie, il faut se reporter à la figure 2.2. On peut observer que la construction de la voiture électrique, et dans une moindre mesure celle de la PHEV, impacte fortement son bilan. Les véhicules ICE essence et diesel sont quasiment similaires en terme de bilan CO_2 sur l'ensemble du cycle de vie.

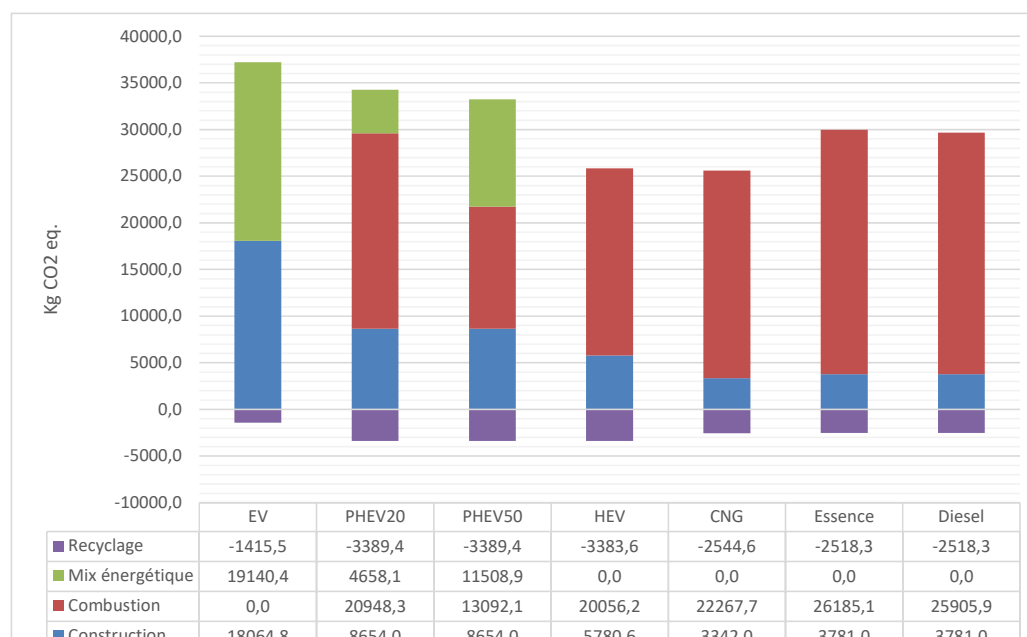


FIGURE 2.2 – Comparaison des sources d'impacts climatique entre les différents véhicules sur l'ensemble du cycle de vie.

2.1.2 Impacts sur les ressources métalliques

La diminution des ressources métalliques est donné en [kg Fe eq.]. L'importante utilisation de métaux dans les batteries fait de la voiture électrique un très gros consommateur de ressources métalliques. Ces ressources utilisées dans l'ensemble de l'industrie électrique et électronique

sont des métaux abondants et facilement extractibles mais aussi des métaux plus difficile à trouver et à raffiner (Palladium, Cobalt, lithium entre autres). Selon E. Pirard, que nous avons écouté en séminaire (cours "Compléments d'énergétique"), le problème principal n'est pas la raréfaction de ces métaux. Il en reste suffisamment dans la croûte terrestre pour satisfaire tous nos besoins. Par contre, les impacts pour aller récupérer et raffiner ces métaux sont de plus en plus importants. Les proportions de métaux dans les mines diminuent petit-à-petit (on est passé de 3% de cuivre à moins de 1% dans les zones d'extraction entre 1950 et aujourd'hui¹). Or, le processus le plus gourmand en énergie est le broyage des roches, qui demande d'autant plus d'énergie (par kilogramme de métal) que le métal est en faible proportion. Les technologies de pointe mêlent de plus en plus les différents métaux, notamment les terres rares, pour améliorer le rendement et les caractéristiques du produit. Le recyclage en est rendu plus difficile. Si du recyclage devait se généraliser, il demanderait aussi énormément d'énergie car ces métaux sont présents en très faible proportion dans les produits.

Tout cela amène à dire que la quantité importante de ressources métalliques nécessaire pour la construction d'une batterie est un réel enjeu écologique surtout dans le cas d'une augmentation de la production de voitures EV et PHEV.

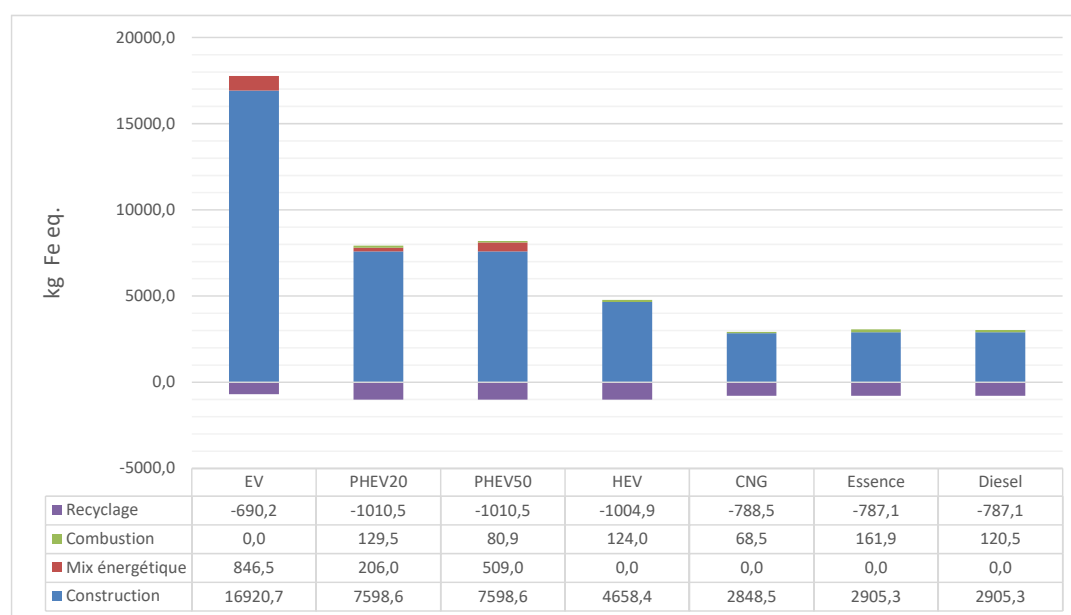


FIGURE 2.3 – Comparaison de l'utilisation des ressources métalliques par les différents véhicules.

Comme inscrit dans la Table 2.2 et représenté à la figure 2.3, il est possible d'observer que la voiture électrique consomme 60% de ressources métallique en plus que la PHEV et presque 10 fois plus qu'une ICE, ce qui est énorme.

2.1.3 Impacts sur les ressources fossiles

L'utilisation de ressources fossiles est calculée en terme de [kg oil eq.]. Contrairement à l'utilisation des ressources métalliques, les utilisations de ressources fossiles des différentes

1. Enjeux des ressources métalliques et du recyclage, conférence donné à l'UCL par E. Pirard le 11 mai 2018

Metal depletion	EV	PHEV 20	PHEV 50	HEV	CNG	Essence	Diesel
kg Fe eq.	17 076	6 923	7 177	3 777	2 128	2 280	2 238
Ecart	0,00%	-59,46%	-57,97%	-77,88%	-87,54%	-86,65%	-86,89%

TABLE 2.2 – Comparaison de l'utilisation des ressources métalliques par rapport à l'EV.

voitures sont relativement proches. Le bilan oscille autour de 9000 kg oil eq. comme cela est indiqué dans la Table 2.2. Ce qui est surprenant c'est que la voiture électrique soit très proche de la consommation en ressources fossiles de la voiture à essence alors qu'il n'y a aucune émission sur la route pour l'EV (Figure 2.4). Les émissions de l'EV proviennent de l'importante consommation de ressources fossiles pour la production d'électricité dans les pays producteurs de batteries ainsi que de la dépendance à hauteur de 42,8% aux ressources fossiles du mix énergétique européen. Autre résultat remarquable, le CNG impacte moins les ressources fossiles que le diesel et l'essence.

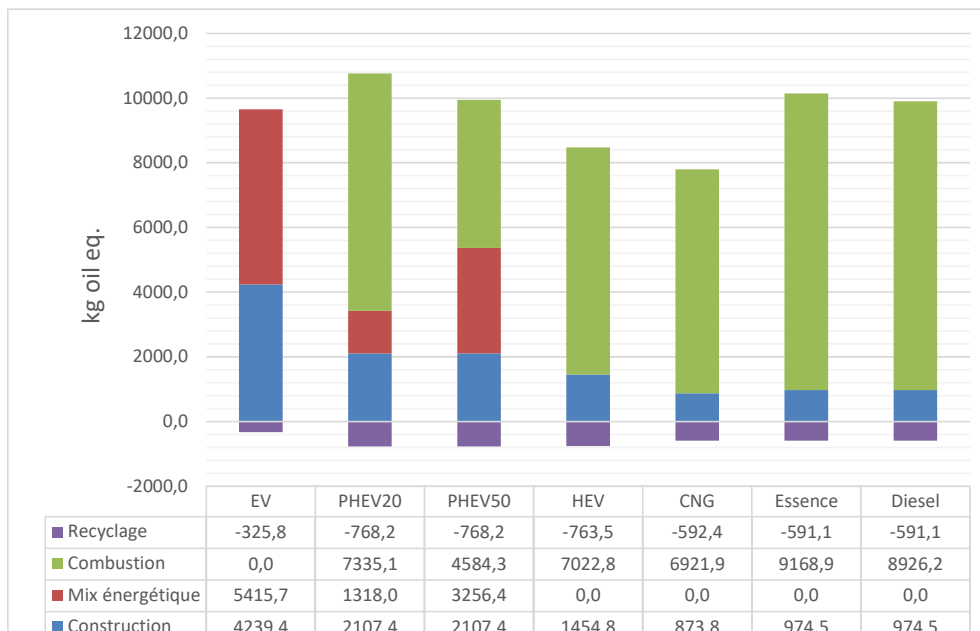


FIGURE 2.4 – Comparaison des impacts sur les ressources fossiles.

Fossil depletion	EV	PHEV 20	PHEV 50	HEV	CNG	Essence	Diesel
kg oil eq.	9 329	9 992	9 179	7 714	7 203	9 552	9 309
Ecart	0,00%	7,11%	-1,60%	-17,31%	-22,79%	2,39%	-0,21%

TABLE 2.3 – Comparaison des impacts sur les ressources fossiles par rapport à l'EV.

2.2 Cycle de vie par voiture

Des graphes de type "arbres" sont intéressants pour analyser l'importance des différents éléments contribuant à l'impact sur le changement climatique.

La Figure 2.5 montre par exemple que le carburant représente 95% du bilan pour la voiture essence, dont 20% provient de l'extraction et le transport de ce carburant. La construction de la voiture (y compris l'origine des matériaux) ne représente que 13% de l'impact global. A noter

que le recyclage réalise un bilan positif d'environ 9% en terme de CO_2 . La somme de l'énergie grise de la voiture ("Car ICE" en bleu sur la figure) et du carburant est donc de 109%. L'arbre ne montre que les éléments comptant pour plus de 1,5% du bilan global. Ainsi, le "body in white" n'est évidemment pas la seule pièce de notre voiture, mais c'est la plus importante (car une des plus lourde). L'acier est utilisé par d'autres pièces mais il n'est relié sur le graphe qu'au "Body in white" car cette pièce est la seule visible.

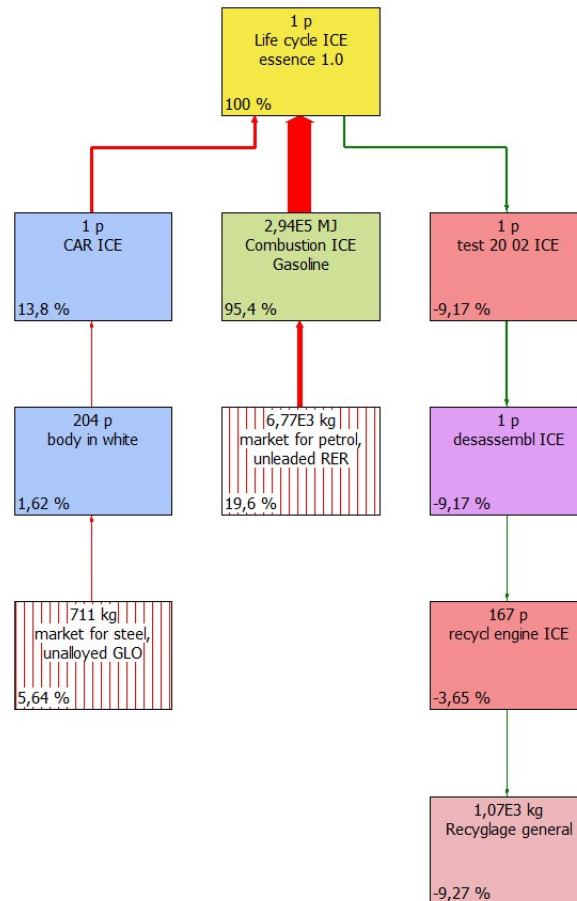


FIGURE 2.5 – Impact sur le changement climatique du cycle de vie de la voiture ICE essence. Les éléments comptant pour moins de 1,5% du bilan ne sont pas visibles sur le graphe. Le "body in white" n'est évidemment pas la seule pièce de notre voiture, mais c'est la plus importante en terme d'impact climatique (car une des plus lourde). L'acier est utilisé par d'autres pièces mais il n'est relié sur le graphe qu'au "Body in white" car cette pièce est la seule visible. La somme de l'énergie grise de la voiture ("Car ICE" en bleu sur la figure) et du carburant est de 109% car le recyclage apporte un bilan positif de 9%.

La Figure 2.6 détaille quant à elle les impacts des différents composants de la voiture. L'acier vaut pour $\frac{1550}{3750} = 41\%$ suivi par l'aluminium avec 32%. Le moteur est évidemment un élément qui pèse beaucoup dans l'énergie grise de la voiture.

A l'inverse, pour une voiture électrique, la construction de la batterie influence le bilan CO_2 , à raison de 43% (Figure 2.7). Dans cette fabrication, la majorité de l'impact est réalisé par l'électricité nécessaire à sa construction. Le reste de la construction de la voiture représente 7,5%. L'électricité lors de l'utilisation compte pour 54% du bilan CO_2 global. Comme pour l'arbre du véhicule à essence, la somme de l'électricité et de la fabrication donne 104,1% car le recyclage est

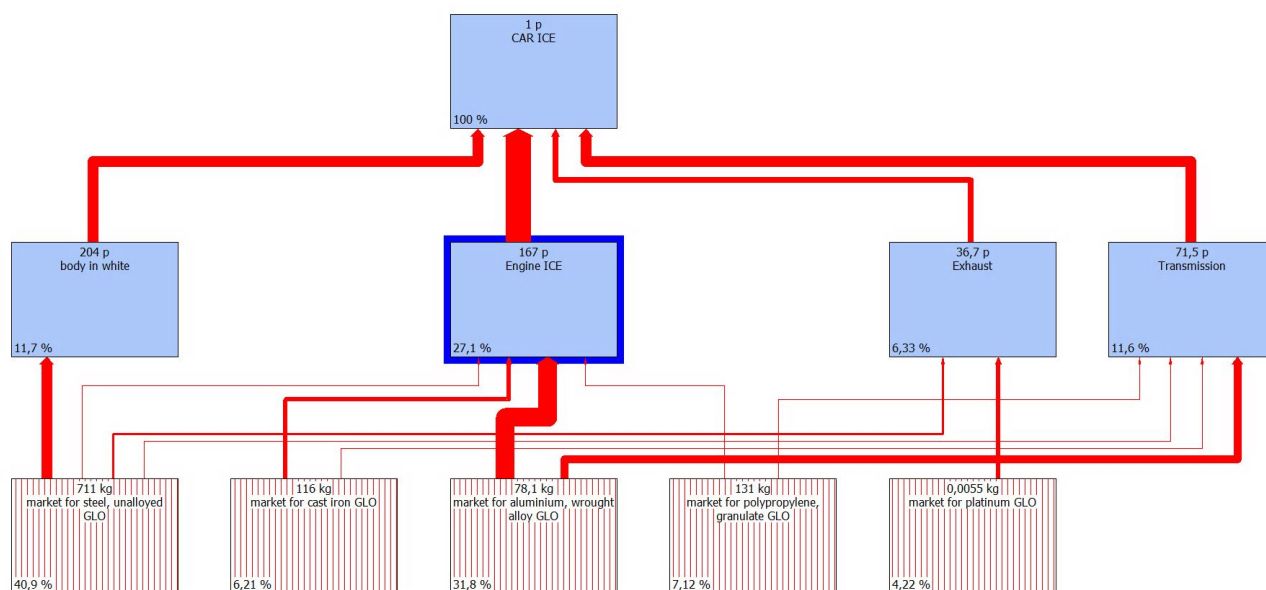


FIGURE 2.6 – Impact sur le changement climatique de la construction de la voiture ICE.

comptabilisé en valeur négative.

Les autres arbres avec les impacts détaillés des différents catégories sont présentés aux Figures E.1 - E.4 en Annexe E

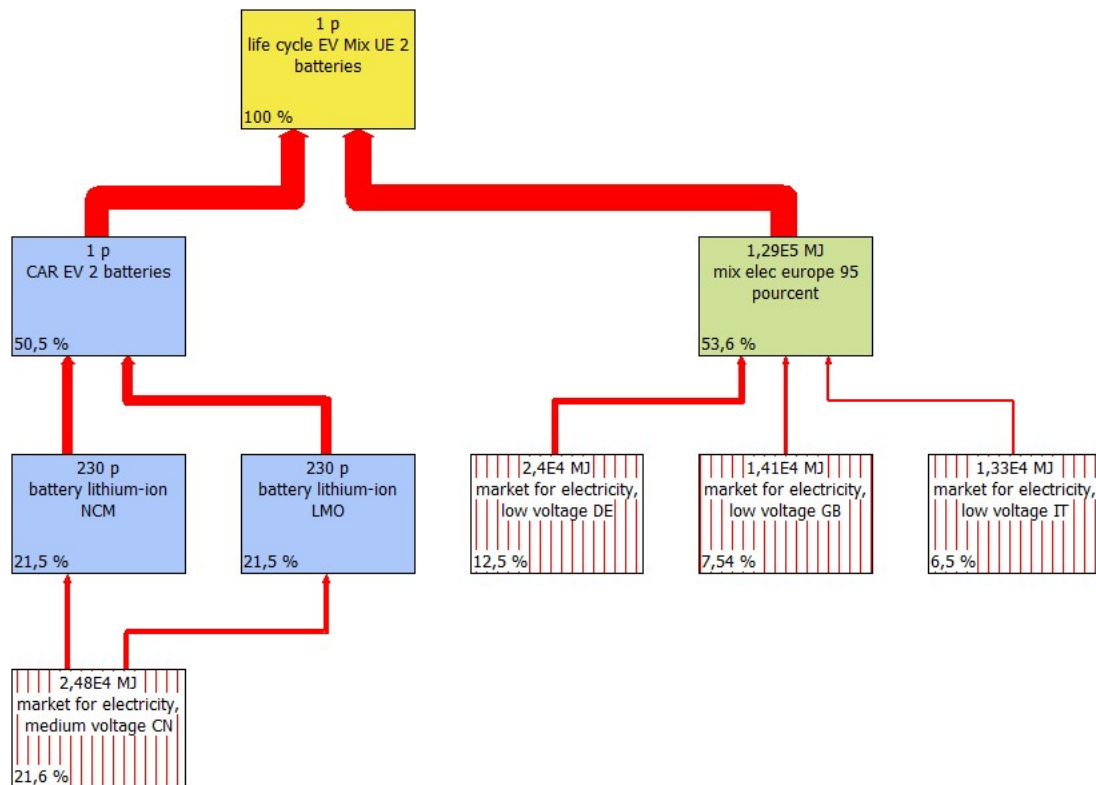


FIGURE 2.7 – Impact sur le changement climatique du cycle de vie de la voiture électrique.

2.3 Batteries

Nous avons analysé les différences d’impacts entre les types de batteries. Pour rappel, la voiture PHEV (Audi e-tron) ainsi que la voiture électrique contiennent des batteries lithium-ion LMO/NCM. La batterie de la Toyota hybride, elle, est de type Ni-MH. La Figure 2.8 compare les impacts au niveau changement climatique et épuisement des métaux. A noter que nous avons pris en compte dans la comparaison la densité énergétique (voir section 1.9). Le résultat n’est donc pas par kg mais par kWh de contenu énergétique de la batterie.

La batterie Ni-MH a une plus faible densité énergétique (0.07 Wh/kg) mais un coût énergétique de fabrication qui reste élevé, ce qui cause un impact, en terme d’équivalent CO_2 , d’environ 30% supérieur aux batteries lithium-ion. Celles-ci ont une densité énergétique plus élevée (0,12 kWh/kg). Les valeurs sont présentent à la Figure 2.8. Les bilans au niveau épuisement des ressources métalliques sont relativement similaires avec un léger désavantage pour la batterie LMO comme c’est visible sur la Figure 2.9.

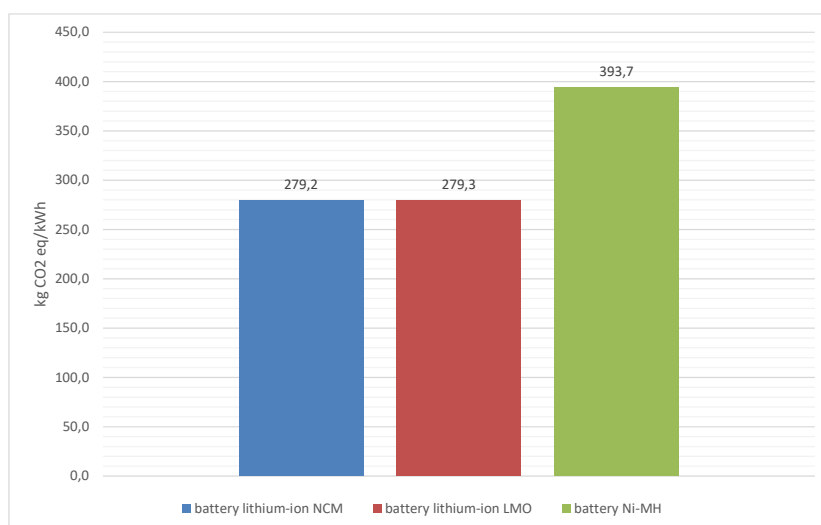


FIGURE 2.8 – Comparaison du bilan CO_2 des différents types de batteries.

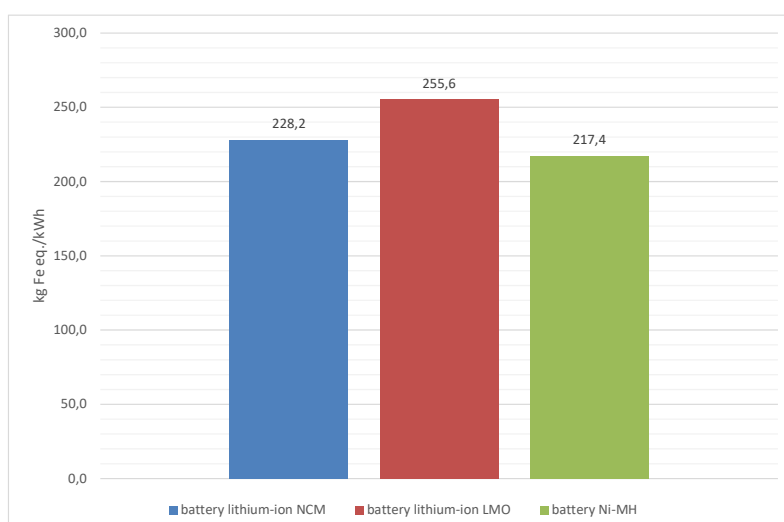


FIGURE 2.9 – Comparaison sur l'épuisement des ressources métalliques des différents types de batteries.

Chapitre 3

Analyse de sensibilité

Les hypothèses posées jusqu’ici sont nombreuses et influencent fortement le résultat. L’objectif de cette section est d’analyser l’impact de la variation de certains paramètres. Parmi les paramètres essentiels, nous avons sélectionné la consommation réelle des véhicules, le mix énergétique pour les véhicules électriques, et la durée de vie de la batterie lithium-ion.

3.1 Consommations réelles

Consommations Les consommations de carburant que nous avons utilisés sont pour la plupart données par le constructeur suite aux tests NEDC. Or, nous savons que ce test est biaisé à la baisse comparé à une conduite réelle sur route. Des tests en laboratoire ont été réalisés pour 500 véhicules européens [34] et nous nous basons sur ces tests pour émettre des hypothèses de consommations réelles. La consommation d’un véhicule dépend toujours du type de routes (urbaine ou extra-urbaine par exemple), du type de conduite (défensive ou sportive) et même de facteurs comme le gonflement des pneus ou la vitesse du vent et il faut donc rester critique envers ces chiffres et ne pas les penser comme absolus.

- La voiture essence Audi A3 consomme en réalité 5,6 l/100km au lieu de 4,7 l/100km, ce qui équivaut à une augmentation de 19% de la consommation.
- La Toyota Prius nécessite 4,6 l/100km au lieu de 3 l/100km, une augmentation de 53% de la consommation.
- Pour le CNG et les PHEV, aucune donnée n’est disponible. Nous avons utilisé le même ratio que pour l’essence, c’est-à-dire augmenté la consommation de 19%. Elles sont donc considérées comme ayant le même besoin énergétique primaire que l’essence.
- L’audi A3 diesel consomme du 4,4 l/100km, 5% de plus que le test NEDC.
- Le département d’énergie de l’agence américaine de l’environnement donne une consommation de 18,12 kWh/100km pour la BMW I3 au lieu de notre hypothèse de 13,6 kWh/100km. La consommation est donc rehaussée de 33% de la consommation. [35].

Les consommations réelles sont donc bien plus importantes que ne l’indique le test NEDC, excepté dans le cas du diesel où elle n’est que de 5% plus élevée.

Impacts climatiques Le véhicule électrique augmente légèrement son bilan comparé aux véhicules essence et diesel. Cela est dû à la forte surestimation de la capacité réelle de la batterie et de l’impossibilité d’imiter la conduite du test NEDC. De même, la Prius hybride passe derrière le véhicule au CNG en terme d’impact CO_2 (Fig. 3.1). C’est pour ce véhicule HEV que l’écart entre le test NEDC et la consommation réelle est la plus grande. Le véhicule diesel obtient ici un bilan carbone plus faible que l’essence

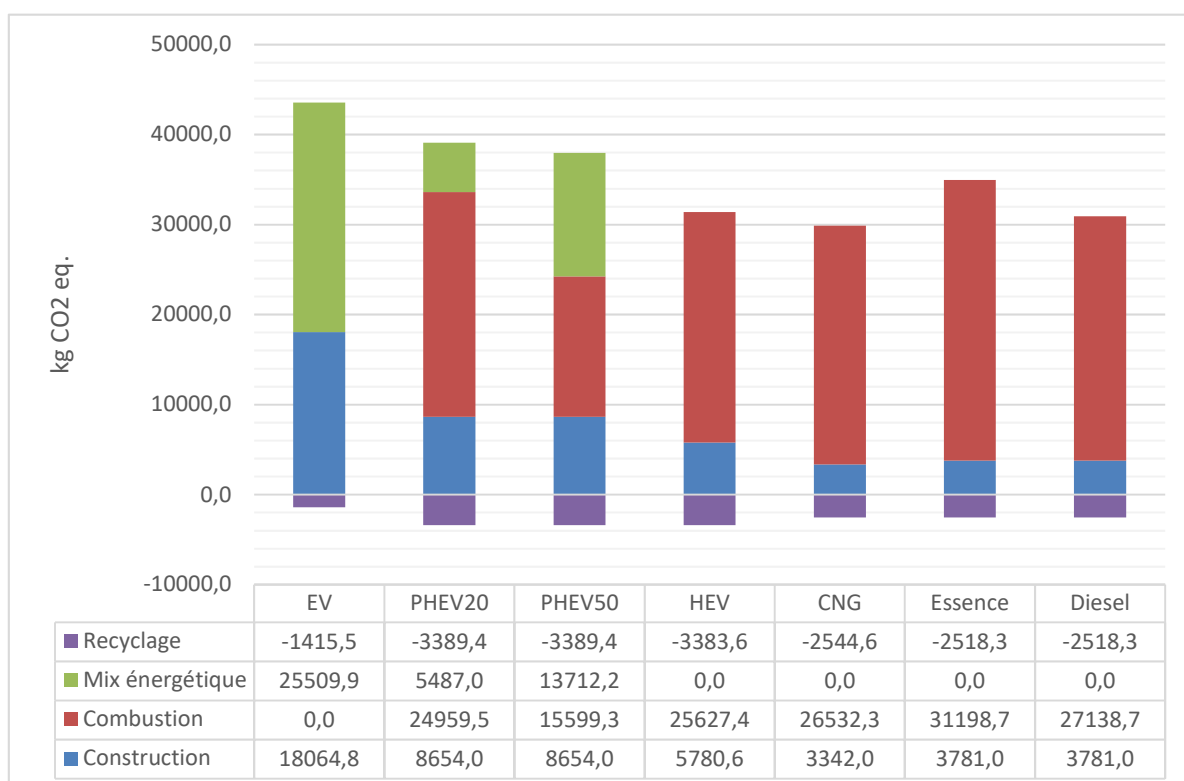


FIGURE 3.1 – Décomposition des impacts climatiques des différents véhicules par origine, en considérant la consommation réelle.

Climate change	EV	PHEV20	PHEV50	HEV	CNG	Essence	Diesel
kg CO_2 eq.	42 159	35 711	34 576	28 024	27 329	32 461	28 401
Ecart	0%	-15,3%	-18%	-33,5%	-35,2%	-23%	-32,6%

TABLE 3.1 – Emissions totales en kg CO_2 eq. au cours d'un cycle de vie de différentes voitures en prenant une consommation réelle à l'utilisation, et écarts par rapport à la voiture électrique.

A la Figure 3.2, nous pouvons observer les augmentations des impacts CO_2 sur l'ensemble du cycle de vie entre le cas avec une consommation NEDC et le cas avec une consommation réelle. Les valeurs exactes sont précisées dans la Table 3.2

Climate change							
[kg CO_2 eq.]	EV	PHEV20	PHEV50	HEV	CNG	Essence	Diesel
Consommation Réelle	42 159	35 711	34 576	28 024	27 330	32 461	28 401
Consommation NEDC	35 790	30 871	29 866	22 453	23 065	27 448	27 169
Ecart	17,8%	15,7%	15,8%	24,8%	18,5%	18,3%	4,5%

TABLE 3.2 – Comparaison des impacts climatiques des véhicules entre une consommation NEDC et une consommation réelle ainsi que les écarts entre les deux.

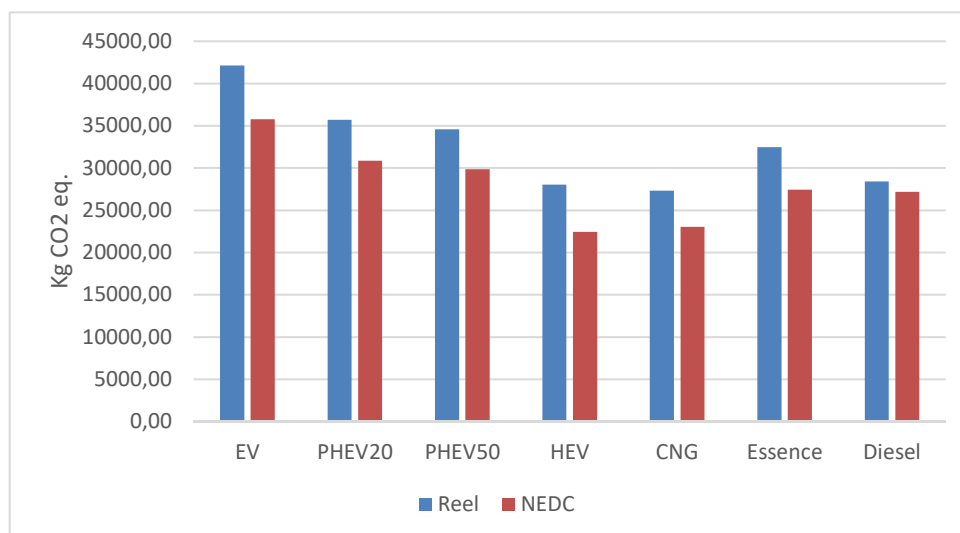


FIGURE 3.2 – Comparaison des impacts climatiques des véhicules entre une consommation NEDC et une consommation réelle.

3.2 Mix de production d'électricité

Toutes les études existantes insistent sur ce point crucial : la source de production d'électricité influence fortement le résultat des véhicules électriques. Nous avons donc effectué une analyse complémentaire en prenant comme source d'électricité le mix énergétique belge, et ensuite des panneaux photovoltaïques. La Figure 3.3 montre que l'impact sur le changement climatique est réduit de 22% avec un mix belge par rapport à un mix européen, et de 43% avec des panneaux photovoltaïques. Avec un mix électrique belge, le véhicule électrique a un impact climatique équivalent à celui à l'essence.

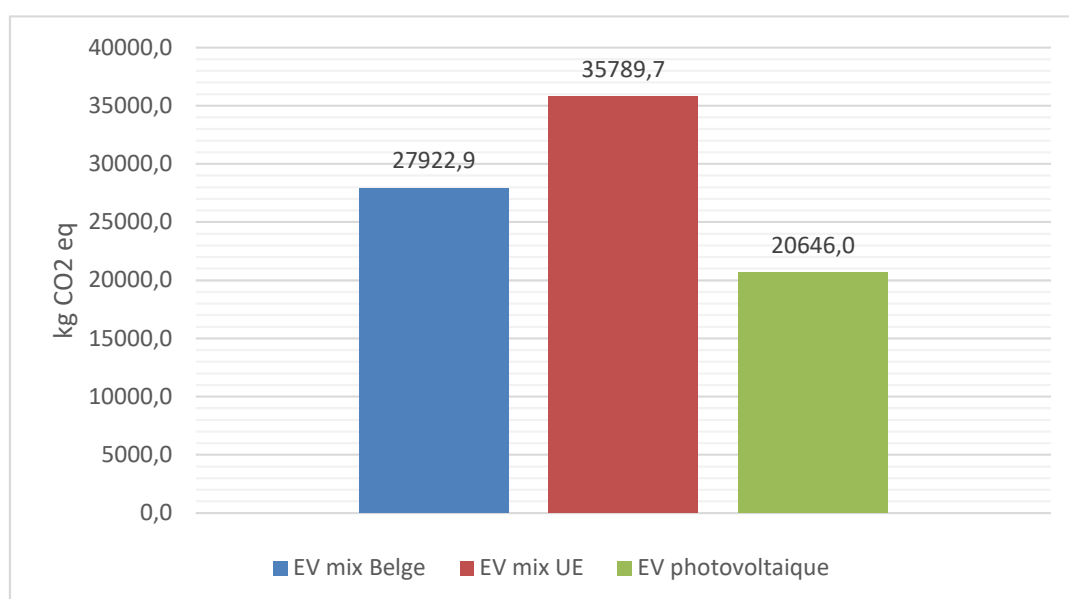


FIGURE 3.3 – Impacts climatiques du cycle de vie d'une voiture électrique avec trois mix énergétiques à l'utilisation différents. Sources : données EcoInvent 3.1.

3.3 Durée de vie de la batterie

Nous avons vu à la section 1.9 que deux hypothèses se justifiaient : remplacer ou non la batterie de la voiture électrique sur la durée de vie du véhicule. Dans cette étude, les résultats principaux ont été obtenus avec l'hypothèse d'un changement de batterie après 100.000 km. La Figure 3.4 compare le résultat standard avec la seconde hypothèse qui est de n'utiliser qu'une seule batterie.

L'impact sur le changement climatique de l'EV dû au remplacement de la batterie est de 25% du bilan global, ce qui est considérable. L'impact climatique des voitures ICE essence et diesel se situent autour de 27 tonnes et 29 tonnes CO_2 eq. pour l'ensemble du cycle de vie. Dans le cas d'une voiture électrique n'ayant pas besoin de changement de batterie, celle-ci revient à la hauteur du véhicule essence en terme d'émission de gaz à effet de serre (27 447 kg CO_2 eq. pour l'essence contre 27 904 dans la Figure 1.9). Cela induit que dans les futures innovations technologiques des batteries, un critère écologique important sera soit de réduire le coût énergétique de fabrication de manière importante, soit d'augmenter la durée de vie des batteries, soit idéalement les deux.

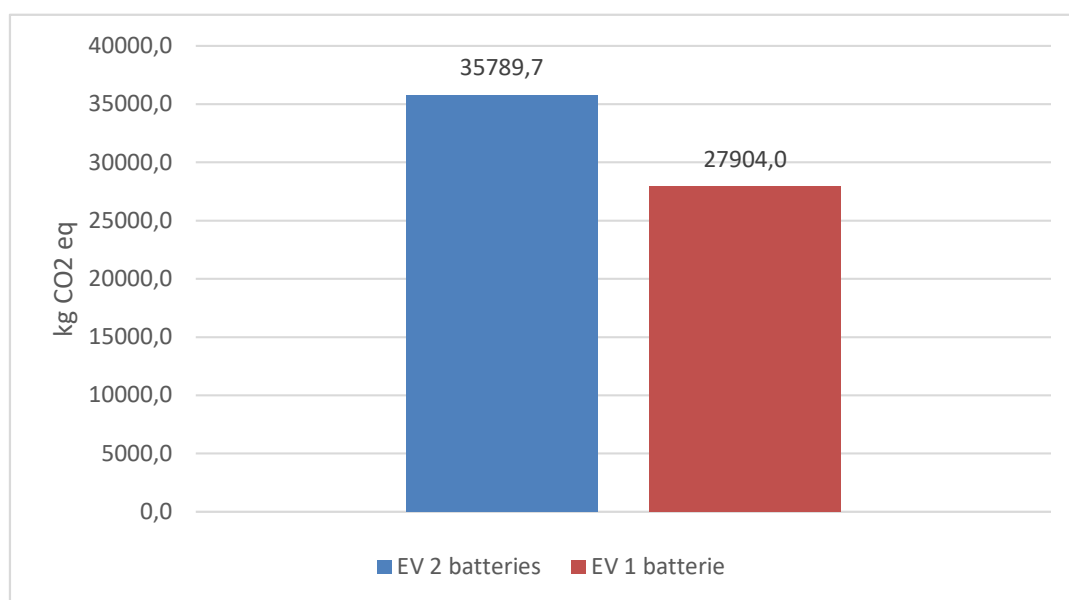


FIGURE 3.4 – Impact sur le changement climatique de l'utilisation d'une ou deux batteries sur la durée de vie du véhicule électrique.

3.4 Mix énergétique pour la production de la batterie

Cette section apporte une analyse de sensibilité quant au lieu de production de la batterie. Nous savons que la Chine possède un mix énergétique très polluant. Or, c'est elle (avec le Japon et la Corée notamment) qui produit une bonne partie des batteries de véhicules électriques (comme expliqué à la section 1.9). Quel serait l'impact de la voiture électrique si les batteries étaient produites en Europe, avec un mix énergétique européen ? La Figure 3.5 en donne un aperçu. En rajoutant le cas d'une EV avec un mix énergétique belge à l'utilisation et une construction de la batterie faite en Europe, un point de comparaison supplémentaire est établi. Et c'est seulement dans ce dernier cas que la voiture électrique a un impact climatique inférieur au véhicule à essence.

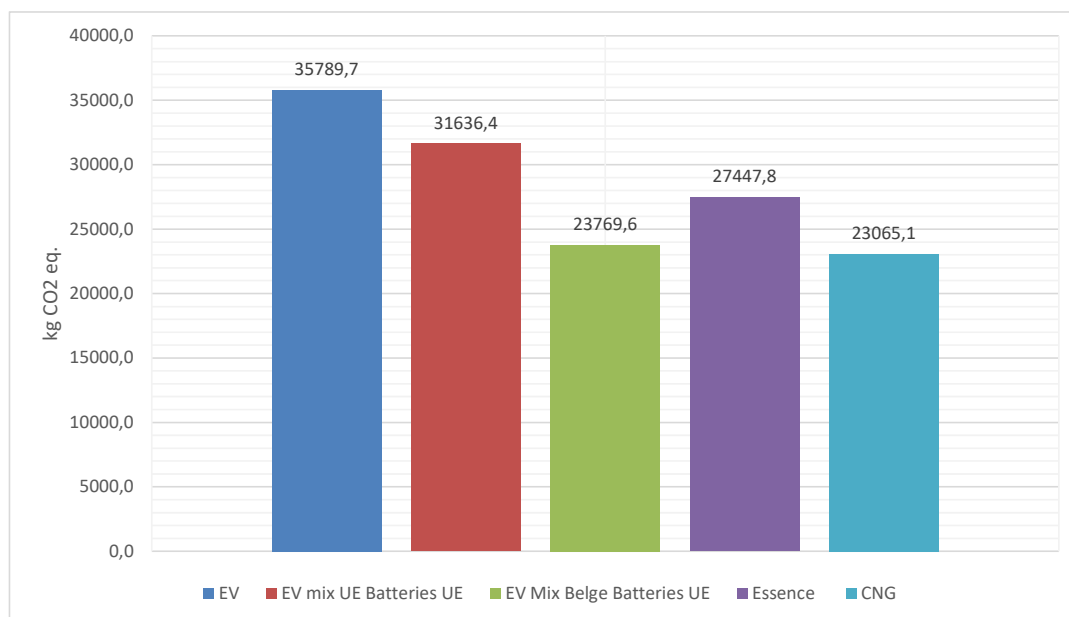


FIGURE 3.5 – Comparaison de l’impact d’une EV en fonction du lieu de production de la batterie.

3.5 Variabilité de la consommation d’essence, de gaz et du mix énergétique

Dans cette section l’impact climatique de la voiture électrique avec trois mix énergétiques différents sont comparé l’impact climatique d’une voiture à essence en fonction de sa consommation de carburant. Les impacts climatiques de la voiture électrique sont calculés avec une consommation NEDC. Cette comparaison est visible à la Figure 3.6.

3.6 Mise en perspective des paramètres de l’EV

Dans le cas de la voiture électrique, la construction ainsi que la provenance de l’électricité à une grande importance. Les sections précédentes analysent déjà la variations de certains paramètres, mais sans les mettre en perspective les uns des autres. Pour pouvoir comparer différents cas, une analyse de sensibilité à été réalisée ici en prenant plusieurs combinaisons. Les paramètres sont le lieu de construction de la batterie, le mix énergétique, ainsi que le nombre de batteries (une ou deux sur la durée de vie du véhicule).

Trois mix énergétiques sont différenciés pour l’origine de l’électricité alimentant la batterie du véhicule : un mix moyen européen, un mix belge, et une production via des panneaux photovoltaïques. L’influence du pays où est construite la batterie est dûe au mix énergétique utilisé pour la fabrication (voir section 1.9). Pour cette analyse, deux endroits ont été choisis, correspondant à deux mix énergétiques : une répartition suivant les principaux pays producteurs de batteries (hypothèse standard de la section 1.9), et l’Europe (mix énergétique européen moyen). L’ensemble des ces possibilités, 12 au total, sont classées et mises en perspectives des voitures CNG et essence dans la Figure 3.7.

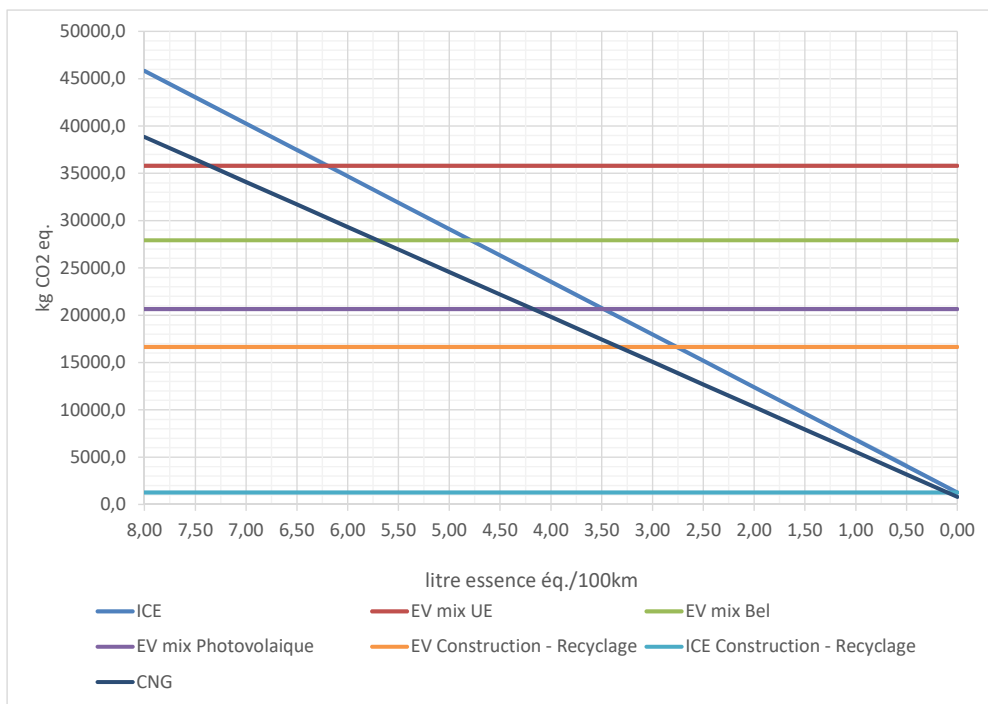


FIGURE 3.6 – Comparaison d’une voiture électrique selon 3 mix énergétique différents par rapport aux impacts climatiques de la voiture à essence en fonction de sa consommation de carburant.

On peut y observer que le scénario le plus optimiste pour la voiture électrique (mix PV et 1 batterie fabriquée en Europe) donne un bilan trois fois meilleur à son pire scénario, qui est réalisé avec les hypothèses standards de cette étude. Les trois paramètres analysés ici influencent chacun sensiblement le résultat. La marge d’amélioration de l’impact de l’EV est donc importante.

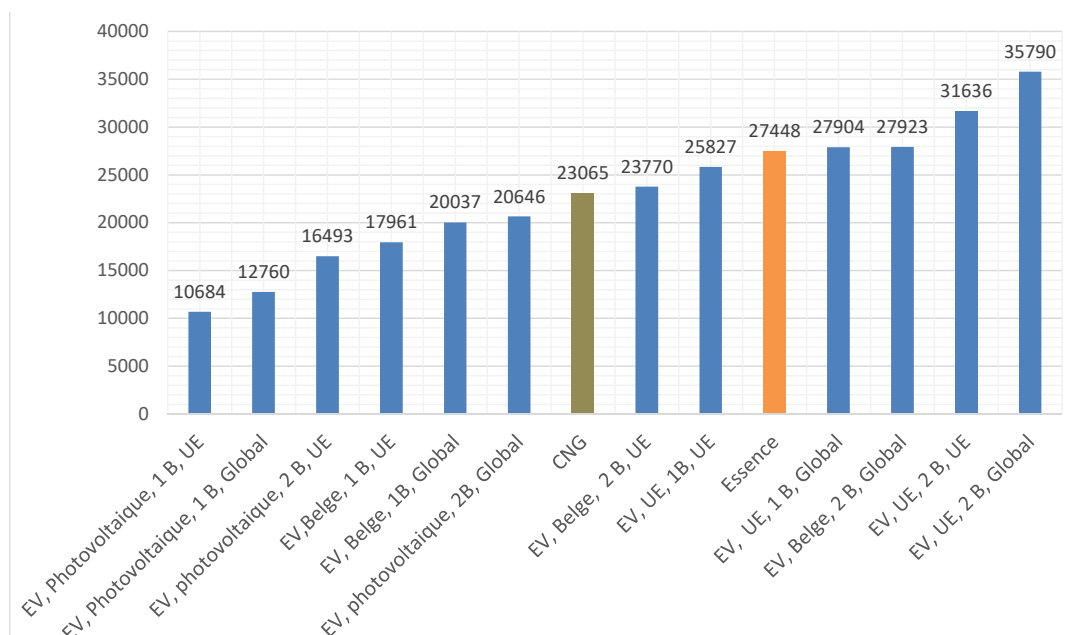


FIGURE 3.7 – Combinaison de 3 paramètres pour obtenir une sensibilité sur le bilan CO_2 eq. du véhicule électrique. L’identification des paramètres est dans l’ordre : type de voiture, mix énergétique, nombre de batterie, lieu de production de la (les) batterie(s).

3.7 Etude de sensibilité des méthodes d'analyse

Pour voir si la méthode d'analyse choisie est représentative, il est important de la comparer avec des résultats obtenus avec d'autres méthodes. Les bilans produits par deux autres méthodes, *Impact 2002+* et *ILCD 2011 Midpoint+*, donnent des valeurs en kg CO_2 eq. pour le midpoint "changement climatique". Les résultats apparaissant dans la Figure 3.8 montrent que les écarts entre les méthodes sont relativement faibles. Les écarts les plus importants apparaissent dans le cas de voitures ayant une batterie importante. A noter aussi que la méthode *Impact 2002+* donne systématiquement les résultats les plus bas. Les écarts en % par rapport aux résultats obtenus avec *ReCiPe Midpoint Hierarchist* sont visible dans la Table 3.3.

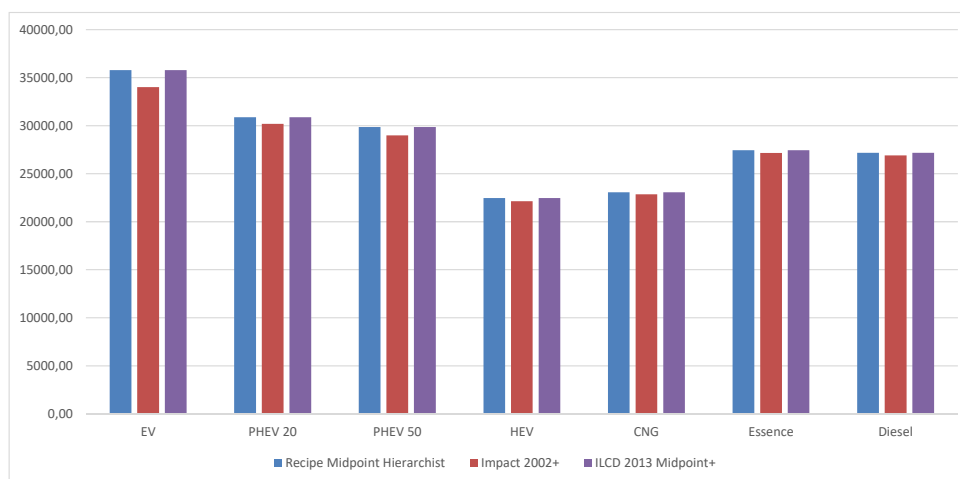


FIGURE 3.8 – Comparaison des résultats obtenus avec différentes méthodes d'analyse disponibles dans SimaPro.

	EV	PHEV 20	PHEV 50	HEV	CNG	Essence	Diesel
Impact 2002+	5,20%	2,26 %	3,00%	1,44%	0,89%	1,08%	1,02%
ILCD 2013 Midpoint+	0,0012%	0,0004%	-0,0003%	0%	0,0001%	-0,0001%	-0,0001%

TABLE 3.3 – Écarts des méthodes *Impact 2002+* et *ILCD 2013 Midpoint+* par rapport aux résultats obtenus avec la méthode *ReCiPe Midpoint Hierarchist*.

Chapitre 4

Comparaison avec d'autres études

Le dernier chapitre de ce travail tente de comparer notre méthodologie, nos hypothèses et nos résultats avec ceux d'études précédentes. Elles sont classées par ordre chronologique en commençant par la plus récente.

4.1 "Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA", 2017 [\[1\]](#)

L'étude la plus récente que nous ayons trouvée a été menée en 2016 par 4 chercheuses italiennes de l'Université de Niccolo Cusano. L'hypothèse principale est de prendre un châssis et d'adapter la motorisation pour comparer quatre types de voitures : essence, plug-in hybride essence-électrique, plug-in hybrid fuel cell-battery, et électrique. En utilisant le programme SimaPro, la méthode ReCiPe Midpoint Hierarchist a été utilisée. Les indicateurs pris en considération sont la demande énergétique cumulée, l'épuisement des ressources fossiles et l'impact sur le changement climatique.

La voiture étudiée est une GM Chevrolet Malibu avec un moteur thermique de 104kW. La batterie de l'EV fait 33 kWh, tandis que celle de la plug-in hybride est de 13 kWh. Elles sont remplacées une fois sur la durée de vie du véhicule (200.000 km). Le rendement de charge de la batterie est posé à 90%. Le mix énergétique standard est celui de l'Italie (641 gCO_2/kWh selon l'étude), avec une étude de sensibilité réalisée en prenant un mix Français et Américain. Pour la fin de vie des batteries, le processus de SimaPro « 1kg Disposal, Li-ions batteries, mixed technology/GLO S » a été utilisé.

Les consommations des véhicules sont divisées entre la conduite urbaine et extra-urbaine. Pour la voiture thermique, la consommation moyenne est de 9.36 l/100km en utilisant un cycle urbain Arte-mis, différent du test NEDC. La consommation électrique est de 22.3 kWh/100km. Pour la voiture plug-in hybride, elle est de 8.44 kWh/100km ajouté aux 2.66 l/100km d'essence. La voiture PHEV demande presque 40% d'énergie cumulée (MJ/km) en moins en phase d'utilisation que la voiture essence.

Plusieurs hypothèses sont similaires à notre étude : la méthode ReCiPe Midpoint hierarchist, les indicateurs concernant le changement climatique et l'épuisement des ressources, et enfin la capacité et la fin de vie des batteries. La principale différence se situe au niveau des cycles de conduite et donc de la consommations des véhicules. Une voiture qui consomme plus de 9 l/100km est devenu une exception sur les routes. C'est le double de notre hypothèse standard de consommation de 4,2 litres en test NEDC pour la voiture ICE essence. La consommation électrique du véhicule EV est aussi supérieure à notre hypothèse, d'environ 35% si l'on prend

en compte la différence du rendement de charge. Le mix énergétique italien émet plus de CO_2 (environ 20% de différence) que la moyenne européenne que nous avons considéré. Avec une implémentation de ces hypothèses dans notre programme, les résultats seraient largement différents.

Au niveau du résultat, le véhicule plug-in hybride se classe premier (33 tonnes CO_2 eq.) devant l'électrique pure (45 tonnes) et la motorisation essence (52 tonnes). Ces chiffres sont bien supérieurs à nos résultats. L'impact de la voiture électrique est décomposé comme suit : 64% lors de l'utilisation, 18% pour la construction, 16% pour la maintenance et 2% pour la fin de vie. De notre étude résulte à l'inverse un impact de la construction (principalement la batterie) de 45%.

4.2 "Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles", 2015 [2]

Cette étude réalisée au laboratoire d'analyse d'énergie des systèmes en Suisse a d'abord pour but de calculer l'impact des voitures à piles à combustibles. Leur analyse s'intéresse cependant aussi aux voitures ICE et électriques, avec des hypothèses relativement proches des nôtres. La durée de vie des voitures est de 150.000 km. La consommation de l'ICE est basée sur un cycle NEDC de la VW Golf 2015 avec une majoration de 10% pour se rapprocher de la réalité, ce qui donne 5.88 l/100km. La batterie de la voiture EV est de 25 kWh avec une densité énergétique de 0.11 kWh/kg. Le calibrage de la consommation se base sur la Nissan Leaf avec une demande finale de 16.8 kWh/100km. Le mix énergétique est celui de l'Union Européenne et donne 594 gCO_2/kWh d'électricité. Aucune indication n'est donnée concernant le rendement de charge de la batterie, supposé donc de 100%. La simulation standard ne prend pas en compte de remplacement de la batterie.

La consommation de l'ICE est proche de notre hypothèse de consommation réelle. La demande en électricité du EV est par contre 40% inférieure à la consommation réelle de la BMW I3 de notre étude (voir section 3).

Concernant les résultats, l'étude montre que l'impact sur le changement climatique de la voiture électrique est 10% inférieur à l'impact du véhicule ICE, respectivement 210 $g CO_2/km$ et 230 $g CO_2/km$. La construction de la batterie a un impact de 25 $g CO_2/km$, la moitié des 50 $g CO_2/km$ de la construction du reste du véhicule. La somme de ces deux chiffres, qui donne l'ensemble de la construction, équivaut à un tiers de l'impact global de la voiture électrique. A noter qu'une durée de vie de 150.000 km, comparé à une analyse sur 200.000 km, augmente légèrement l'impact de la construction et de la fin de vie sur l'impact de l'utilisation.

En convertissant nos résultats en unités équivalentes, nous obtenons 210 $g CO_2/km$ pour l'EV et 175 $g CO_2/km$ pour l'ICE essence. L'impact de la construction du véhicule ICE est d'environ 12% dans notre étude alors qu'il est de 18% dans l'étude citée.

4.3 "The environmental performance of current and future passenger vehicles : Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework", 2015 [3]

Une étude 8 mois plus ancienne que la précédente, en partie des mêmes auteurs (Hofer et Bauer), élargit le champ d'étude en incluant les voitures diesel et au gaz. L'apport majeur de cette étude est de réaliser une simulation complète de la demande en énergie en partant des caractéristiques intrinsèques des voitures : poids, surface frontale, etc. Cette demande d'énergie

est aussi basée sur le World harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP). La demande d'énergie est ensuite transformée en consommation de carburant en utilisant le programme Advisor et des rendements moyens.

La EV a une batterie de 50 kWh, presque le double de notre hypothèse. La durée de vie de la batterie est posée à 150.000 km et celle du véhicule à 240.000 km (suivant la moyenne des véhicules réels en UE). La méthode de comparaison des impacts est, comme nous, la méthode ReCiPe Midpoint (H). Aucune indication n'est donnée concernant le rendement de charge ou les pertes dans le réseau électrique.

La méthodologie est donc différente de notre étude car nous avons récupéré des données des tests NEDC et des consommations réelles, de même que des rendements de charge mesurés.

Les résultats sont présentés à la Figure 4.1, tirée de l'étude. En observant les résultats pour 2012, la voiture électrique émet 215 g CO_2/km et l'hybride essence 250 g CO_2/km . Les véhicules ICE ont un moins bon bilan avec l'essence 300 g CO_2/km , le diesel 255 g CO_2/km et le gaz 240 g CO_2/km . La construction de la batterie influe peu sur le résultat car le bilan n'est que d'environ 20 g CO_2/km . Évalué sur 200.000 km, cela équivaut à 4 tonnes de CO_2 . A titre de comparaison, l'impact de la batterie de notre EV est de 38,9 g CO_2 eq./km par batterie.

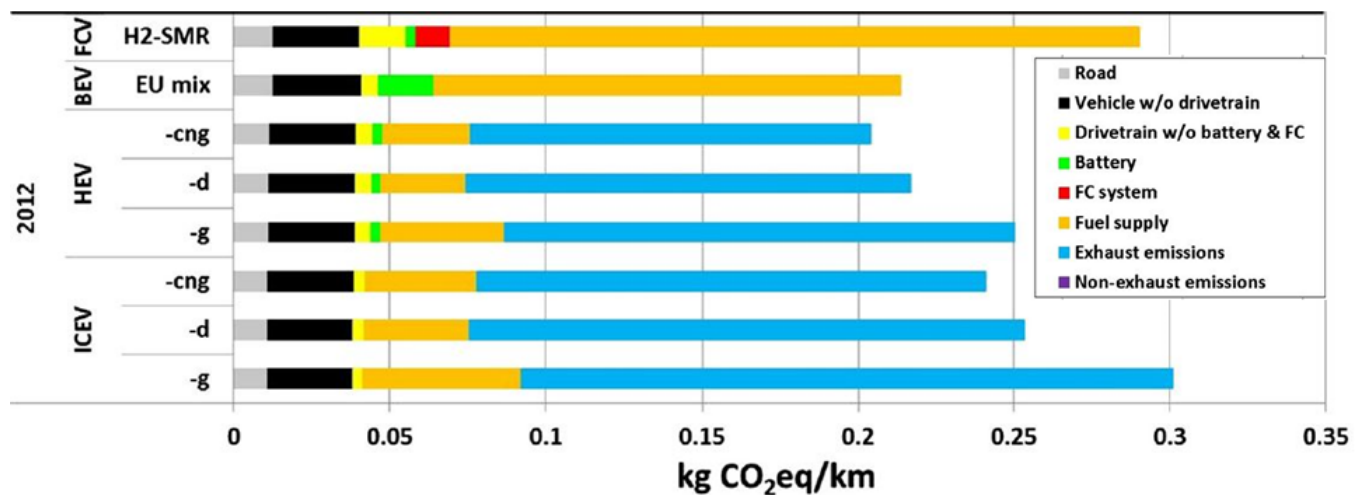


FIGURE 4.1 – Impacts sur le changement climatique des différentes voitures considérées dans l'étude de Bauer et al. (2015) [3].

4.4 "Research on Life Cycle Energy Consumption and Environmental Emissions of Light-duty Battery Electric Vehicles", 2015 [4]

Cette étude chinoise ne prend en compte que les voitures électriques. La consommation d'énergie provenant des matériaux, des processus de fabrication et de l'assemblage est basée sur le modèle GREET. La consommation électrique est posée à 17,3 kWh/100km suivant un cycle NEDC, rendement de charge compris. Le mix énergétique est celui de la Chine.

La construction de la batterie lithium-ion LMO demande 2500 MJ d'énergie pour 220 kg, ce qui donne 11,35 MJ/kg. Pour rappel, notre hypothèse était de 120 MJ/kg, très clairement supérieure.

Le bilan global du LCA du véhicule est de presque 40 tonnes de CO_2 comme c'est visible sur le graphe 4.2. C'est légèrement supérieur à notre résultat. Mais la part de la production du véhicule vaut moins de 20% du total, deux fois inférieure au résultat de notre étude. Cela est dû à la faible demande d'énergie pour la construction de la batterie.

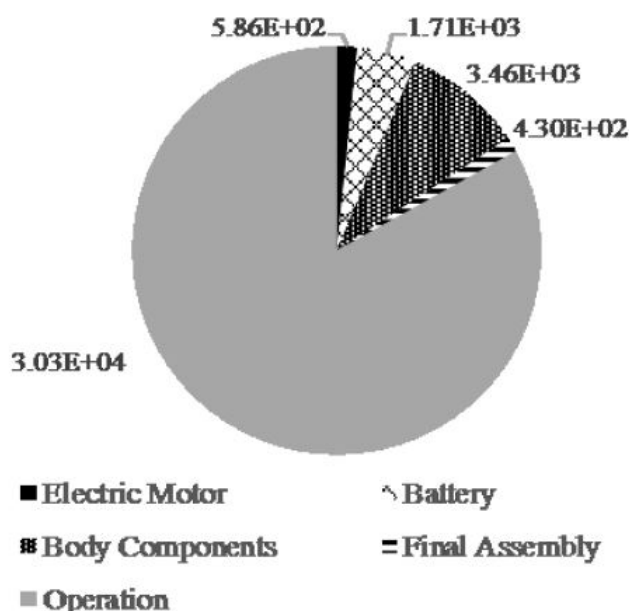


FIGURE 4.2 – Répartition des impacts sur le changement climatique par catégorie pour les véhicules électrique [kg CO_2] selon Shen et al. (2015) [4].

4.5 "A Range-Based Vehicle Life Cycle Assessment Incorporating Variability in the Environmental Assessment of Different Vehicle Technologies and Fuels", 2014 [5]

Cette étude a été menée en Belgique, à la VUB plus précisément. Les véhicules ont une durée de vie de 230.000 km, hypothèse basée sur une moyenne belge. Les consommations des véhicules sont basées sur le test NEDC et sur l'analyse « Ecoscore » [36] dont nous n'avons pas trouvé les sources pour la consommation des véhicules. 200.000 véhicules sont répartis en catégories (motorisations et Euro standard). Une valeur moyenne (arithmétique) de consommation de carburant est donnée, ainsi que le minima et maxima. La moyenne pour les véhicules essence

est de 7,1 l/100km, tandis que pour la voiture diesel la valeur est de 5,3 l/100km. Le véhicule CNG est indiqué à 9 Nm³/100km et l'hybride consomme 6,1 l/100km. La voiture électrique a besoin de 17 kWh/100km, sans indication concernant le rendement de charge de la batterie. Le mix énergétique est européen. Un remplacement de la batterie est prévu après 160.000 km, pour correspondre à sa durée de vie estimée.

Les résultats des impacts globaux sur le changement climatique sont présentés à la figure 4.3. La voiture électrique (+100 g CO₂/km) a environ deux fois moins d'impact que l'hybride, le gaz et le diesel. Le véhicule à essence se situe un peu en dessous de 300 g CO₂/km.

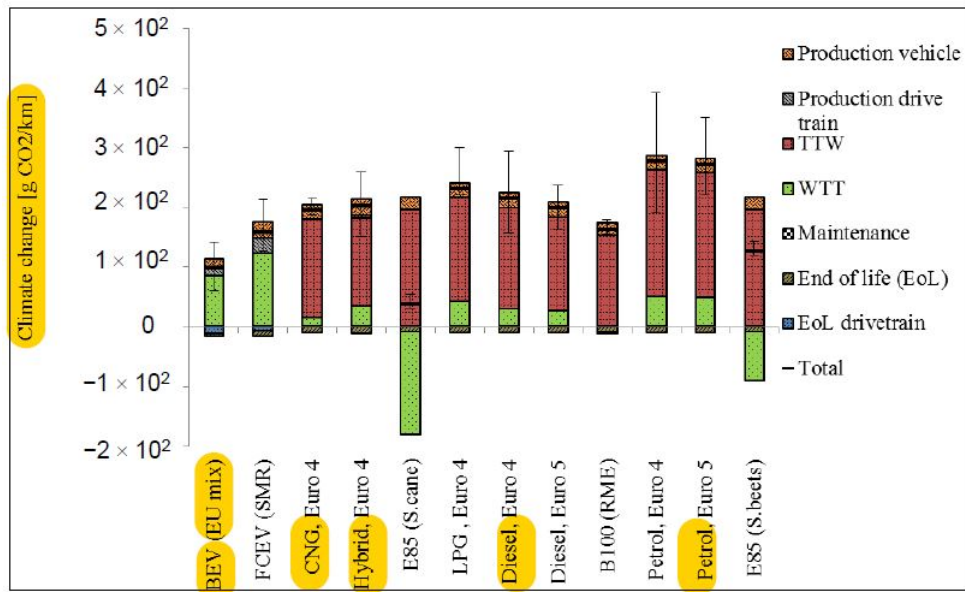


FIGURE 4.3 – Impacts sur le changement climatique des différentes catégories de voitures de l'étude de Messagie et al. (2014) [5].

Chapitre 5

Conclusion

Cette étude a pour but de comparer différents types de voitures sur base de leur impact sur le changement climatique, de l'épuisement des ressources métalliques et de l'épuisement des ressources fossiles. Nous avons pour cela utilisé le programme SimaPro, au sein duquel est appliquée la méthode de calcul de cycle de vie ReCiPe 2016 Hierarchist. La base de données utilisée est EcoInvent 3.1, qui a été mise en ligne en 2014. C'est la seule qui nous était disponible dans SimaPro.

Avec l'hypothèse d'un mix énergétique européen et d'une production de batteries essentiellement en Asie, le véhicule électrique émet, sur l'entièreté de son cycle de vie, 35 t CO_2 eq. pour 200.000 km. Cela en fait le véhicule le plus polluant, devant le plug-in hybrid (30 t CO_2 eq.). En suivant les tests NEDC pour la consommation, les véhicules à combustion interne essence et diesel émettent environ 27 t CO_2 eq. Le véhicule hybride (HEV) occasionne quant à lui une émission de 22,5 t CO_2 eq., légèrement moins que le CNG (23 t CO_2 eq.).

La consommation réelle de chaque véhicule est difficile à estimer. En outre, le type de route empruntée (urbaine, sub-urbaine ou autoroute) ainsi que la manière de conduire influence la consommation de manière significative suivant Nordelof et al. (2014) [6]. Des tests en condition de conduite réelle amènent des bilans carbone globaux sensiblement différents des résultats NEDC. Le véhicule électrique reste dernier (42 t CO_2 eq.). Le véhicule diesel devance celui à essence (32 t CO_2 eq. contre 28,4 t CO_2 eq.). Enfin le HEV (28 t CO_2 eq.) devient plus polluant que le CNG (27,3 t CO_2 eq.).

Le bilan CO_2 du véhicule électrique est évidemment fortement influencé par le mix énergétique du pays d'origine de la batterie et de celui d'utilisation du véhicule.

L'électricité consommée lors de l'utilisation compte pour plus de 50% du bilan global. Celui de l'UE est alimenté par presque 50% d'énergies fossiles. Un mix énergétique belge, comptant une part significative de nucléaire et uniquement du gaz comme ressource fossile, diminue de plus de 20% le bilan CO_2 global de l'EV comparé au mix européen, alors qu'une source photovoltaïque le réduit de 40%. En suivant les consommations des tests NEDC, le bilan carbone à partir d'une source photovoltaïque est à peine supérieur à celui du CNG (23,7 t CO_2 eq. contre 23 t CO_2 eq.).

L'énergie nécessaire à la fabrication des deux batteries pour le véhicule électrique intervient à hauteur de 40% du bilan global. Produire ces batteries en Europe permettrait de réduire leur impact climatique car le mix énergétique est moins carboné qu'en Asie où se situent la majorité des usines actuellement. Améliorer la durée de vie de la batterie est aussi un élément crucial car si une seule batterie est nécessaire pour 200.000 km, l'impact de l'EV en est réduit de 20%.

En faisant varier ces trois paramètres principaux (mix énergétique, durée de vie et lieu de fabrication de la batterie), plusieurs cas permettent de rendre le véhicule électrique moins impactant que les autres et aller jusqu'à diviser par trois son impact CO_2 .

Concernant l'impact sur les ressources fossiles, les bilans varient entre 7,2 t oil eq. (CNG) et 10 t oil eq. (PHEV). C'est donc le type d'impact où la différence de motorisation est la plus faible. Les véhicules essence et diesel se situent au même niveau que le véhicule électrique (autour de 9,4 t oil eq.). Le bilan au niveau épuisement des ressources métalliques est très clairement en défaveur du véhicule électrique, à cause de ses batteries. C'est donc un autre enjeu dont il faut tenir compte lors des recherches sur les différents types de batteries.

Sur base de ces résultats, un certain nombres de pistes peuvent être envisagées.

A court terme, le véhicule hybride (HEV) et celui au CNG sont ceux qui ont le plus faible impact et qui devraient être encouragés. Une condition pour le développement du second à grande échelle est la disponibilité d'un réseau de distribution.

A moyen terme, deux autres idées sont intéressantes. Avec l'augmentation de la part de renouvelable, le problème du stockage de l'électricité est devenu flagrant. Le Power-to-Gas, qui consiste à transformer cette électricité en gaz, apparaît comme une solution complémentaire à l'extension des véhicules CNG. D'autre part, le développement d'un véhicule hybride au CNG, qui combinerait avantageusement 2 technologies déjà au point, réduirait de manière importante le bilan carbone global.

Sur le long terme, selon nous à l'horizon 2050, au vu de l'évolution possible des batteries et des mix énergétiques des pays utilisateurs et producteurs de batteries, les impacts de l'EV vont encore grandement évoluer. L'EV permettrait, après le développement des énergies renouvelables et l'amélioration technologique des batteries (y compris sa recyclabilité), une réduction des impacts plus importante que ce qui est possible avec les véhicules CNG et HEV.

Toutefois, nous aimerions préciser que l'évolution de la mobilité n'est pas uniquement liée à un changement des types de motorisations. La diminution du poids et l'amélioration de l'aérodynamisme permettent une réduction du bilan carbone.

Précisons par ailleurs qu'aucune voiture n'est neutre en carbone. La voiture zéro émission, de sa fabrication à sa fin de vie, n'existe pas. Il est donc primordial, en amont d'une réflexion sur le type de voiture, de diminuer le transport en véhicule particulier. Des alternatives sont à considérer en dehors du cadre des voitures particulières (transport en commun, le vélo,...) même si cela sort du cadre de cette étude.

Notre analyse pourrait être élargie à plusieurs niveaux. Le spectre des voitures étudiées pourrait être étendu afin de comparer différents modèles de voitures thermiques, hybrides et électriques. Des projections d'évolutions technologiques des véhicules et des mix énergétiques pourraient être simulés afin d'établir les voies les plus prometteuses en terme d'impact climatique.

Bibliographie

- [1] L. Lombardi, L. Tribioli, R. Cozzolino, and G. Bella. Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on lca. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22 :1989–2006, 2017.
- [2] M. Miotti, J. Hofer, and c. Bauer. Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22 :94–110, 2015.
- [3] C. Bauer, J. Hofer, H-J. Althaus, A. Del Duce, and A. Simons. The environmental performance of current and future passenger vehicles : Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework.
- [4] W. Shen, B. Zhang, Y. Zhang, X. Wang, Q. Lu, and C. Wang. Research on life cycle energy consumption and environmental emissions of light-duty battery electric vehicles. 814 :447–457, 2015.
- [5] M. Messagie, F-S. Boureima, T. Coosemans, C. Macharis, and J. Van Mierlo. A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different vehicle technologies and fuels, 2014.
- [6] A. Nordelof, M. Messagie, A-M. , Tillman, M. Ljunggren Söderman, and J. Van Mierlo. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles — what can we learn from life cycle assessment, 2014.
- [7] BMW. Consommation de carburant et émissions de co₂. www.bmw.fr/fr/tous-les-modeles/bmw-i/i3/2017/developpement-durable.html (consulté en mars 2018).
- [8] Audi A3 sportback, 2018. www.audi.fr/fr/web/fr/gamme/a3/a3-sportback.html# (consulté en novembre 2017).
- [9] Wikipedia. Accumulateur nickel-hydrure métallique. www.fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_nickel-hydrure_metallique (consulté en avril 2018).
- [10] European Union. Framework and requirements for lcia models and indicators. *ILCD Handbook—International Reference Life Cycle Data System*, 2010.
- [11] M.Z. Hauschild, M. Goedkoop, J. Guinée, R. Heijungs, M. Huijbregts, O. Jolliet, M. Margni, A. De Schryver, S. Humbert, A. Laurent, and R. Sala, S. Pant. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012.
- [12] M.A.J Huijbregts, Z.J.N. Steinmann, P.M.F Elshout, G. Stam, F. Verones, M.D.M Vieira, A. Hollander, M. Zipp, and R van Zelm. Recipe 2016 v1.1, report 1 : Characterization. Technical report, National Institute for Public Health and the Environment of The Netherlands, 2016.
- [13] EcoInvent. Ecoinvent 3.1. www.ecoinvent.org/database/older-versions/ecoinvent-31/ecoinvent-31.html (Consulté en mars 2018).
- [14] Nations Unies. *Accord : Concernant l’adoption de prescriptions techniques uniformes applicables aux véhicules à roues, aux équipements et aux pièces susceptibles d’être montés ou*

utilise sur un véhicule à roues et les conditions de reconnaissance réciproque des homologations délivrées conformément à ces prescriptions, 2013.

- [15] European commission. Eu energy in figures. *Statistical pocket book*, 2017.
- [16] The international council on clean transportation. Too low to be true? how to measure fuel consumption and co2 emissions of plug-in hybrid vehicles, today and in the future. *ICCT briefing*, 2017.
- [17] P. Plötz, S.A. Funke, P. Jochem, and M. Wietschel. Co2 mitigation potential of plug-in hybrid electric vehicles larger than expected. *Scientific Reports*, 7(16493) :–, 2017.
- [18] United States Environmental Protection Agency. Emission factors for greenhouse gas inventories. www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors_2014.pdf (consulté en mai 2018).
- [19] Fiche Auto.FR. L’aérodynamisme d’une voiture : principes et notions. <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1701-l-aerodynamisme-d-une-voiture-cx-scx-trainee-etc.php>, dernière modification le 11/04/2017 (consulté en mars 2018).
- [20] J. Matheys, J-M. Timmermans, and J. Van Mierlo. Comparison of the environmental impact of five electric vehicle battery technologies using lca. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1(3) :318–329, 2009.
- [21] H.C Kim, T.J Wallington, R Arsenault, C. Bae, S Ahn, and J Lee. Cradle-to-gate emissions from a commercial electric vehicle li-ion battery : A comparative analysis. *Environmental Science and Technology*, 50 :7715–7722, 2016.
- [22] Battery University. Bu-1003 : Electric vehicle (ev). batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev, dernière modification le 08-02-2018 (consulté en mars 2018).
- [23] Automobile propre. Bmw i3. www.automobile-propre.com/voitures/bmw-i3/ (consulté en février 2018).
- [24] A. Brunham, M. Wang, and Y. Wu. Development and applications of greet 2.7 - the transportation vehicle-cycle model, 2016.
- [25] J.B. Dunn, L. Gaines, J. Sullivan, and M.Q. Wang. Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries. *Environmental Science and Technology*, 46 :12704–12710, 2012.
- [26] J.B Dunn, L. Gaines, J.C. Kelly, C. James, and K.G. Gallagher. The significance of li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling’s role in its reduction. *Environmental Science and Technology*, pages –, 2014.
- [27] D. A Notter, M. Gauch, R. Widmer, Wager P., A. Stamp, R. Zah, and H-J. Althaus. Contribution of li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environ. Sci. Technol.*, 44 :6550–6556, 2010.
- [28] G. Majeau-Bettez, T. Hawkins, and Strømman A.H. Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles. *Environmental Science and Technology*, 45 :4548–4554, 2011.
- [29] A-W. Ellingsen, G. Majeau-Bettez, B. Singh, A.K. Srivastava, L.O. Valoen, and A.H. Stromman. Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1) :113–124, 2013.
- [30] Y. Liang, J. Su, B. Xi, Y. Yu, D. Ji, Y. Sun, C. Cui, and J. Zhu. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emission, 2016.
- [31] J.L. Sullivan and L. Gaines. Status of life cycle inventories for batteries. *Energy Conversion and Management*, 58 :134–148, 2012.

- [32] Bloomberg new energy finance. Lithium-ion battery costs and market, 2017. <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf> (consulté en avril 2018).
- [33] S. Belboom, G. Lewis, P-F. Bareel, and A. Lénornard. Life cycle assessment of hybrid vehicles recycling : Comparison of three business lines of dismantling. 2016.
- [34] Test achat. Calculez la consommation réelle de votre voiture!, avril 2018. www.test-achats.be/consommationreelle.
- [35] US department of energy. Compare side-by-side. www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=38001 (consulté en avril 2018).
- [36] Ecoscore. <http://ecoscore.be/>, publié le 25/05/2018 (consulté en mai 2018).

Annexes

Annexe A

Mix énergétique

Scénario électriques européens

Pays producteur	Elec produite GWh	Pourcentage dans le mix européen	Conso kWh	EV	Conso EV kWh
European Union	2,786,037				37579
Germany (DE)	517,377	0,1857	6979		
France (FR)	440,971	0,1583	5948		
United Kingdom (GB)	303,902	0,1091	4099		
Italy (IT)	286,027	0,1027	3858		
Spain (ES)	233,172	0,0837	3145		
Poland (PL)	132,839	0,0477	1792		
Sweden (SE)	127,496	0,0458	1720		
Netherlands (NL)	105,332	0,0378	1421		
Belgium (BE)	81,725	0,0293	1102		
Finland (FI)	80,759	0,0290	1089		
Austria (AT)	61,852	0,0222	834		
Czech Republic (CZ)	57,997	0,0208	782		
Greece (GR)	53,363	0,0192	720		
Portugal (PT)	46,353	0,0166	625		
Romania (RO)	43,569	0,0156	588		
Hungary (HU)	37,541	0,0135	506		
Denmark (DK)	31,152	0,0112	420		
Bulgaria (BG)	28,939	0,0104	390		
Ireland (IE)	26,099	0,009	352		
Slovakia (SK)	24,987	0,009	337		
Croatia (HR)	15,3	0,005	206		
Slovenia (SI)	13,026	0,005	176		

TABLE A.1 – Mix énergétique UE 2016.

Annexe B

Propriétés des carburants et production de CO_2 à l'utilisation

Carburants	Gaz	Diesel	Essence
PCI (MJ/kg)	47,440	42,8	43,5
PCI (MJ/m ³)	35,140		
Densité (kg/l)	0,7407		0,72
Energie (MJ/l)			31,32
Emissions (g CO ₂ /MJ)	58,1447	74,382597	70,648153

TABLE B.1 – Propriétés des carburants.

Gaz naturel	%	Composition (CH _y)	CO ₂ (Kg/Kg)
Methane	92,54	3,7016	2,7583835
Ethane	4,47	0,1341	
Propane	1,97	0,0525333	
n-Butane	0,95	0,019	
Y		3,9072333	
Masse molaire CH _y		15,954997	
Masse molaire Gaz		17,915935	

TABLE B.2 – Composition du gaz naturel.

Diesel		CO ₂ (Kg/Kg)	Essence		CO ₂ (Kg/Kg)
C _{7,25} H ₁₃		3,1835752	C ₇ H ₁₆		3,073194644
Y	1,7931034		Y	2,2857143	
M Chy	13,824081		M Chy	14,320603	
M CO ₂		44,01			

TABLE B.3 – Composition essence et diesel.

Annexe C

Composition des voitures

C.1 ICE

C.1.1 Composition générale

Poids des composants EV : BMW I3

	Masse (%)
Body	53
Powertrain	1
Transmission	0
Chassis	30
Générateur	4
Motor	10
Controller/invertor	2
<i>total</i>	<i>100</i>
Masse totale	1195
Batterie	230
Masse sans batterie	965

TABLE C.1 – Composition du véhicule ICE en terme de % de la masse totale par groupe de composants.

C.1.2 Composition détaillé

[illegible]

	exterior electrical	22	9,98	0,02	8,48	plastic	59	copper	41										
Interior	instrument panel	53	24,04	0,04	20,42	steel	46	plastic	47	organic	4	wrought Al	1	rubber	1	magnesium	1		
	trim and insulation	49	22,23	0,04	18,88	plastic	67,2	steel	29,5	organic	3,2	wrought Al	0,1						
	seating and restraint	132	59,88	0,10	50,86	steel	58	plastic	39	organic	3								
	HVAC	44	19,96	0,03	16,95	steel	56,2	wrought Al	21,5	copper	16,7	plastic	2,4	rubber	2	zinc	0,5	other	0,7
	interior electrical	22	9,98	0,02	8,48	plastic	59	copper	41										
	weld blanks and fasteners	22	9,98	0,02	8,48	steel	50	plastic	50										
	total	1299	589,23	1,00	500,54														
Powertrain	Engine	450	204,12	0,57	166,79	cast iron	50	wrought Al	30	steel	10	plastic	4,5	rubber	4,5	copper	1		

[illegible]

[illegible]

C.2 PHEV

C.2.1 Composition générale

Poids des composants PHEV : Audi e-tron

	Masse (%)
Body	42
Powertrain	17
Transmission	7,2
Chassis	23
Générateur	3
Motor	6
Controller/invertor	1,8
<i>total</i>	<i>100</i>
Masse totale	1540
Batterie	125
Masse sans batterie	1415

TABLE C.2 – Composition du véhicule PHEV en terme de % de la masse totale par groupe de composants.

C.2.2 Composition détaillé

Body		Livres dans GREET	kg GREET (1 livre = 0.4536kg)	en % du body	Masse dans notre étude	composi tion	en %	compositi on	en %	compositi on	en %	compositio n	en %	compositio n	en %				
594,3	body in white	551,00	249,93	0,41	241,85	steel	100												
	body panels	176,00	79,83	0,13	77,25	steel	100												
	bumpers	22,00	9,98	0,02	9,66	steel	100												
	hardware	22,00	9,98	0,02	9,66	plastic	89,8	steel	5,3	rubber	2,3	copper	2	glass	0,6				
	weld blancks and fasteners	22,00	9,98	0,02	9,66	steel	50	plastic	50										
	weld blancks and fasteners 2	22,00	9,98	0,02	9,66	steel	50	plastic	50										
	glass	88,00	39,92	0,06	38,63	glass	100												
Exterior	paint	26,00	11,79	0,02	11,41	paint	100												
	exterior trim	22,00	9,98	0,02	9,66	plastic	93.6	steel	4.3	rubber	1.5	organic	0.6						
	sealers/dea deners	4,00	1,81	0,00	1,76	rubber	100												
	exterior electrical	22,00	9,98	0,02	9,66	plastic	59	copper	41										
Interior	instrument panel	53,00	24,04	0,04	23,26	steel	46	plastic	47	organic	4	wrought Al	1	rubber	1	magnes ium	1		
	trim and insulation	49,00	22,23	0,04	21,51	plastic	67.2	steel	29.5	organic	3.2	wrought Al	0.1						

[illegible]

	weld blanks and fasteners	22,00	9,98	0,04	10,46	steel	100												
			<i>total</i>	<i>1,00</i>	<i>240,55</i>														
Transmission	transmission	214,00	97,07	#####	101,88	steel	30	wrought Al	30	cast iron	30	plastic	5	rubber	5				
101,88																			
Chassis	cradle	66,00	29,94	0,09	29,34	steel	100												
325,45	driveshaft/axle	163,00	73,94	0,22	72,47	steel	100												
	differential	55,00	24,95	0,08	24,45	steel	100												
	corner suspension	90,00	40,82	0,12	40,01	steel	100												
	braking system	84,00	38,10	0,11	37,35	iron	60	steel	35	friction material	5								
	wheels	91,00	41,28	0,12	40,46	steel	100												
	tires	90,00	40,82	0,12	40,01	steel	67	rubber	33										
	steering system	49,00	22,23	0,07	21,79	steel	80	wrought Al	15	rubber	5								
	chassis electrical	22,00	9,98	0,03	9,78	plastic	59	copper	41										
	weld blanks and fasteners	22,00	9,98	0,03	9,78	steel	100												
		<i>total</i>	<i>332,04</i>	<i>1,000</i>	<i>325,45</i>														
Générateur	42,45					steel	36,1	cast Al	36,1	copper	27,3								
Motor	84,9					steel	36,1	cast Al	36,1	copper	27,3								
Controller/invertor	25,47					steel	5	cast Al	47	copper	8,2	rubber	3,7	plastic	24	organic	12		

C.3 HEV

C.3.1 Composition générale

Poids des composants HEV : Prius

	Masse (%)	
Body	45,3	
Powertrain	17	
Transmission	7,2	
Chassis	24,5	
Générateur	2,1	
Motor	2,1	
Controller/invertor	1,8	
<i>total</i>	<i>100</i>	

poids total	1420	Prius GREET : 1274kg
Batterie	50	
Masse sans batterie	1370	

TABLE C.3 – Composition du véhicule HEV en terme de % de la masse totale par groupe de composants.

C.3.2 Composition détaillé

Body		Livres dans GREET	kg GREET (1 livre = 0.4536kg)	en % du body	Masse dans notre étude	compo- sition	en %	compo- sition	en %	compo- sition	en %	compo- sition	en %	compo- sition	en %		
620,61	body in white	551	249,93	0,407	252,55	steel	100										
	body panels	176	79,83	0,130	80,67	steel	100										
	bumpers	22	9,98	0,016	10,08	steel	100										
	hardware	22	9,98	0,016	10,08	plastic	89,8	steel	5,30	rubber	2,3	copper	2	glass	0,6		
	weld blancks and festeners	22	9,98	0,016	10,08	steel	50	plastic	50,00								
	weld blancks and festeners 2	22	9,98	0,016	10,08	steel	50	plastic	50,00								
	glass	88	39,92	0,065	40,34	glass	100										
Exterior	paint	26	11,79	0,019	11,92	paint	100										
	exterior trim	22	9,98	0,016	10,08	plastic	93,6	steel	4,3	rubber	1,5	organic	0,6				

	sealers/de adeners	4	1,81	0,003	1,83	rubber	100										
	exterior electrical	22	9,98	0,016	10,08	plastic	59	copper	41,00								
Interior	instrument panel	53	24,04	0,039	24,29	steel	46	plastic	47,00	organic	4	wrought Al	1	rubber	1	magnesium	1
	trim and insulation	49	22,23	0,036	22,46	plastic	67,2	steel	29,5	organic	3,2	wrought Al	0,1				
	door modules	55	24,95	0,041	25,21	plastic	65,3	organic	32,6	steel	1,8	glass	0,3				
	seating and restraint	132	59,88	0,097	60,50	steel	58	plastic	39,00	organic	3						
	HVAC	44	19,96	0,032	20,17	steel	56,2	wrought Al	21,5	copper	17	plastic	2,4	rubber	2	zinc	0,5
	interior electrical	22	9,98	0,016	10,08	plastic	59	copper	41,00								
	weld blanks and fasteners	22	9,98	0,016	10,08	steel	50	plastic	50,00								
	<i>total</i>	<i>1354</i>		<i>1,000</i>	620,61												
Powertrain	Engine	243	110,22	0,480	111,85	cast iron	50	wrought Al	30,00	steel	10	plastic	4,5	rubber	4,5	copper	1
232,9	engine fuel storage system	119	53,98	0,235	54,77	steel	100										
	powertrain thermal	32	14,52	0,063	14,73	steel	50	plastic	50,00								

	exhaust	64	29,03	0,126	29,46	steel	99,99	platinum	0,015								
	powertrain electrical	22	9,98	0,043	10,13	plastic	59	copper	41,00								
	emission control electronics	4	1,81	0,008	1,84	plastic	59	copper	41,00								
	weld blanks and fasteners	22	9,98	0,043	10,13	steel	100										
	<i>total</i>	<i>506</i>		<i>1,000</i>	<i>232,90</i>												
Transmission		214	97,07	100,000	98,64	steel	30	wrought Al	30,00	cast iron	30	plastic	5	rubber	5		
98,64																	
Chassis	cradle	66	29,94	0,090	30,26	steel	100										
335,65	driveshaft/ axle	163	73,94	0,223	74,74	steel	100										
	differential	55	24,95	0,075	25,22	steel	100										
2	corner suspension	90	40,82	0,123	41,27	steel	100										
	braking system	84	38,10	0,115	38,52	iron	60	steel	35,00	friction material	5						
	wheels	91	41,28	0,124	41,73	steel	100										
	tires	90	40,82	0,123	41,27	steel	67	rubber	33,00								
	steering system	49	22,23	0,067	22,47	steel	80	wrought Al	15,00	rubber	5						
	chassis electrical	22	9,98	0,030	10,09	plastic	59	copper	41,00								

	weld blanks and fasteners	22	9,98	0,030	10,09	steel	100										
	<i>total</i>	<i>732</i>	<i>332,04</i>	<i>1,000</i>	<i>335,65</i>												
Générateur	28,77					steel	36,1	cast Al	36,10	copper	27						
Motor	28,77					steel	36,1	cast Al	36,10	copper	27						
Controller/invert or	24,66					steel	5	cast Al	47,00	copper	8,2	rubber	3,7	plastic	23,8	organic	12

C.4 EV

C.4.1 Composition générale

Poids des composants EV : BMW I3

	Masse (%)
Body	53
Powertrain	1
Transmission	0
Chassis	30
Générateur	4
Motor	10
Controller/invertor	2
<i>total</i>	<i>100</i>
Masse totale	1195
Batterie	230
Masse sans batterie	965

TABLE C.4 – Composition du véhicule EV en terme de % de la masse totale par groupe de composants.

C.4.2 Composition détaillé

Body		Livres dans GREET	kg GREET (1 livre = 0.4536kg)	en % du body	Masse dans notre étude	compositio n	en %	composit ion	en %	compos ition	en %	compo sition	en %	comp ositio n	en %				
511,45	body in white	551,00	249,93	0,41	208,13	steel	100,00												
	body panels	176,00	79,83	0,13	66,48	steel	100,00												
	bumpers	22,00	9,98	0,02	8,31	steel	100,00												
	hardware	22,00	9,98	0,02	8,31	plastic	89,80	steel	5,30	rubber	2,30	coppe r	2,00	glass	0,60				
	weld blancks and festeners	22,00	9,98	0,02	8,31	steel	50,00	plastic	50,00										
	weld blancks and festeners 2	22,00	9,98	0,02	8,31	steel	50,00	plastic	50,00										
	glass	88,00	39,92	0,06	33,24	glass	100,00												
Exterior	paint	26,00	11,79	0,02	9,82	paint	100,00												
	exterior trim	22,00	9,98	0,02	8,31	plastic	93,6	steel	4,3	rubber	1,5	organi c	0,6						
	sealers/de adeners	4,00	1,81	0,00	1,51	rubber	100,00												
	exterior electrical	22,00	9,98	0,02	8,31	plastic	59,00	copper	41,00										
Interior	instrument panel	53,00	24,04	0,04	20,02	steel	46,00	plastic	47,00	organic	4,00	wrou ght Al	1,00	rubbe r	1,00	magn esium	1,00		

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Annexe D

Composition des batteries

Matériau	NCM [%]	LMO [%]	NiMH [%]
Lithium manganese oxide (LiMn2O4)	28	33	
Cuivre	11	11	3.9
Acier	1.4	1.4	24
Aluminium(wrought)	20	19	0.5
Graphite	18	15	
PE : polyéthylène	0.29	0.29	3
PET : polyethylene terephthalate	1.2	1.2	5
PP polypropylène	1.7	1.7	15
C3H4O3 : carbonate d'éthylène (EC)	5.3	5.3	
Lithium hexafluorophosphate : LiPF6	1.8	1.8	
Polyvinylidenchloride (PVC)	2.4		
Fibre de verre	0.36	0.36	
Nickel			28
Acrylonitrile butadiene styrene copolymer (ABS)			0.1
Magnesium			1
Fonte (fer, carbone, silicium)			12
Cobalt			1.8
<i>total</i>	<i>91.45</i>	<i>90.05</i>	<i>94.3</i>
Non implémenté dans simaPro			
DMC : dimethyl carbonate		5.3	
Liant	2.5	2.5	
Isolation thermique	0.34	0.34	
Glycol	1	1	
Partie électronique	1.1	1.1	

TABLE D.1 – Composition des batteries en % massique.

Annexe E

Autres arbres de résultats

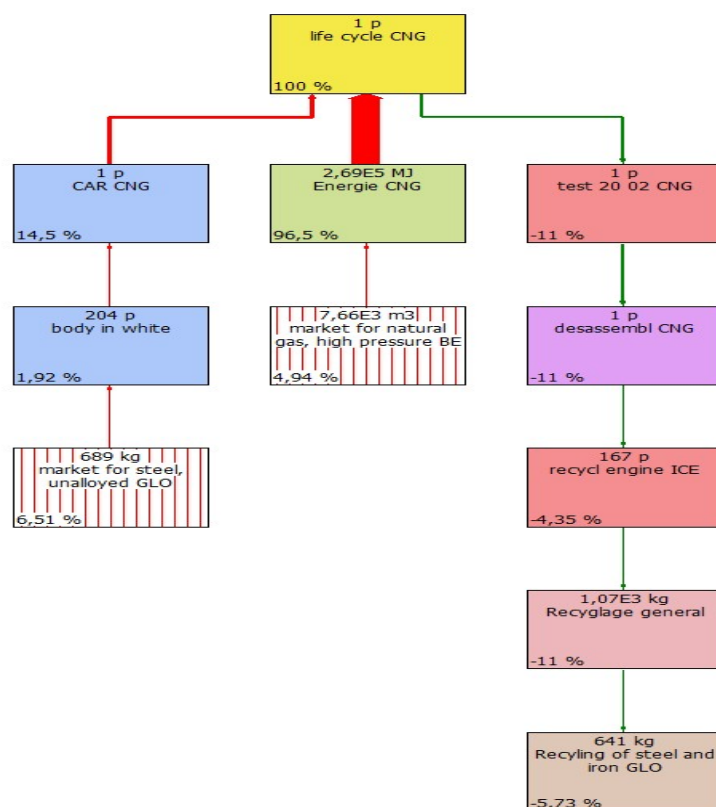


FIGURE E.1 – Impact sur le changement climatique de la voiture au CNG.

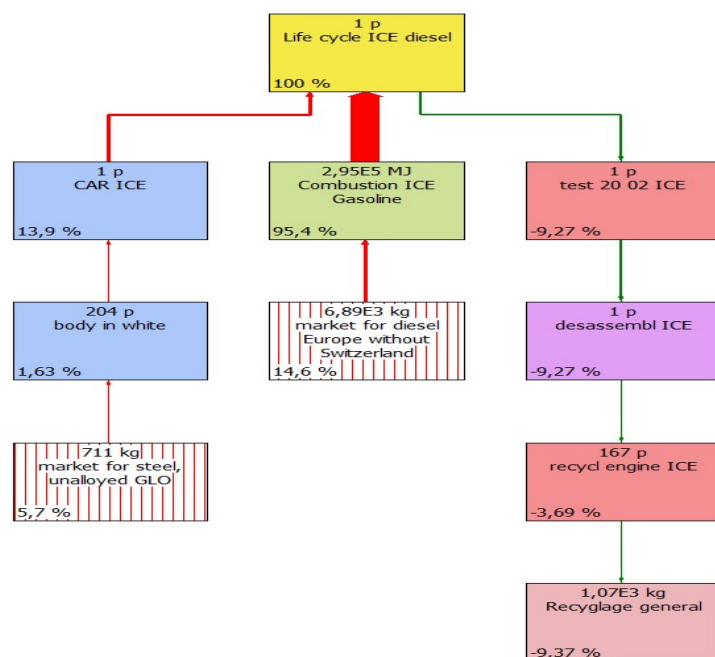


FIGURE E.2 – Impact sur le changement climatique de la voiture diesel.

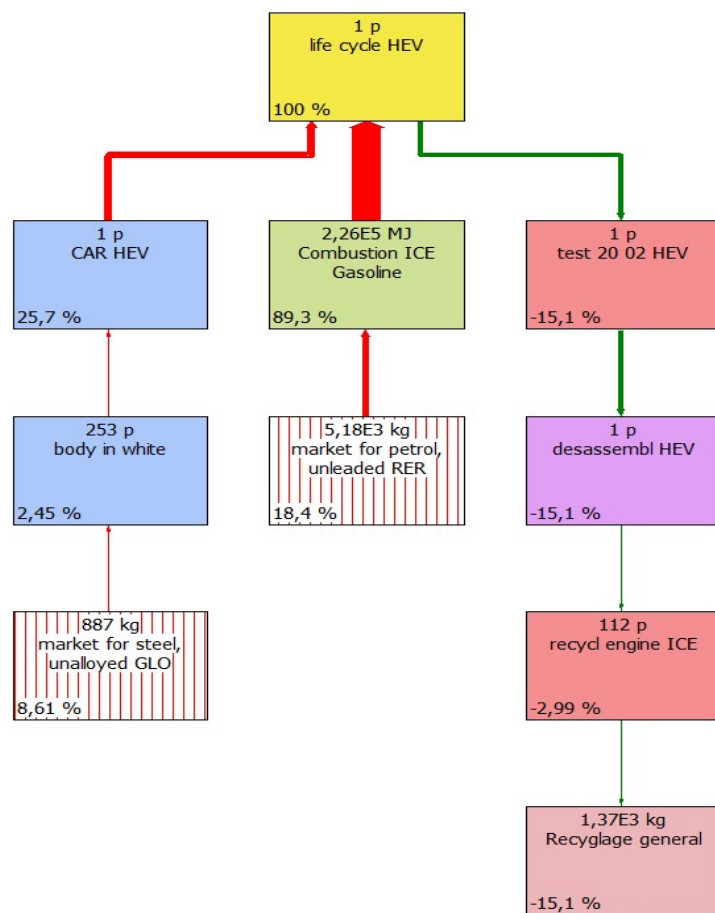


FIGURE E.3 – Impact sur le changement climatique de la voiture HEV.

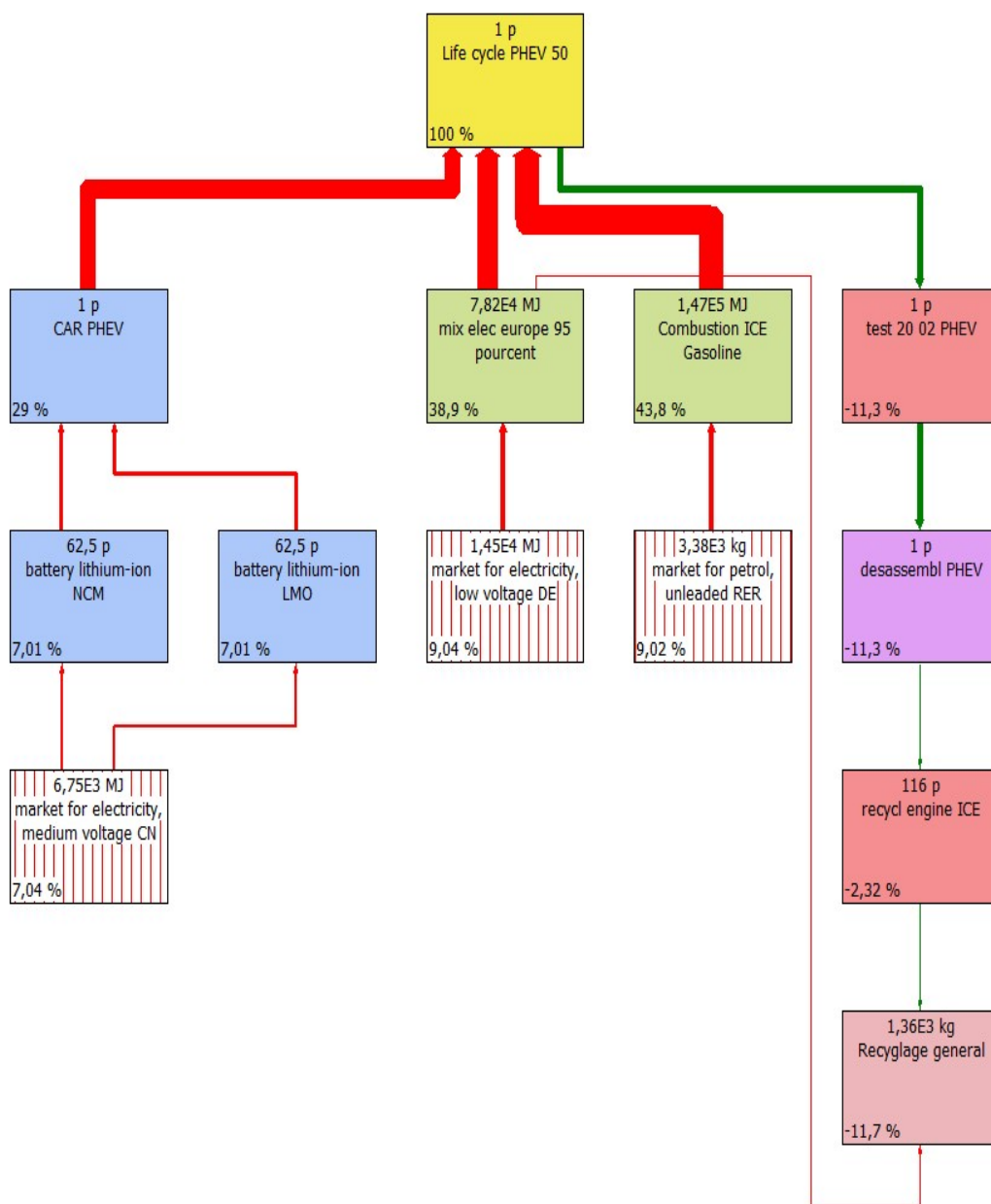


FIGURE E.4 – Impact sur le changement climatique de la voiture PHEV 50.

