



**LOUVAIN**

School of Management

**UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN**

**LOUVAIN SCHOOL OF MANAGEMENT**

La voiture dite 'propre' l'est-elle vraiment? Si l'on prend en compte le processus en aval et en amont nous pouvons actuellement dire que non.

Promoteur : Professeur D. Tyteca

Mémoire-recherche présenté par Edouard Berlier en vue de l'obtention du titre de Master en Sciences de gestion

ANNEE ACADEMIQUE 2014-2015



## **Remerciements**

Je voudrais remercier mon directeur de mémoire, Monsieur Daniel Tyteca pour son soutien et son accompagnement tout au long de la réalisation de mon travail de fin d'études.

Je souhaiterais également remercier l'équipe de General Electric Capital Fleet Services pour leur aide précieuse dans la réalisation de ce mémoire.





## **Executive Summary**

Ce travail tente de répondre à la problématique « La voiture dite 'propre' l'est-elle vraiment? Si l'on prend en compte le processus en aval et en amont nous pouvons actuellement dire que non ». En effet, lorsque nous prenons en considération les émissions liées à l'extraction, à la production, à l'usage et au recyclage de ces différents véhicules, restent conséquentes. Par ailleurs, l'impact en fonction du type de sources d'énergie pour les véhicules électriques et hybrides rechargeables est important.

Pour ce faire, nous avons passé en revue des analyses du cycle de vie déjà existantes. Il s'avère qu'à la production, les véhicules, contenant des batteries, polluent jusqu'à 50% en plus qu'un véhicule à combustion ordinaire. Cela représente des émissions équivalentes à 10,5 tonnes de CO<sub>2</sub> pour les véhicules électriques et 7 tonnes de CO<sub>2</sub> pour les véhicules à combustion tel que le diesel (Wilson, L., 2013. pp. 16, 17). Sur une base de 200 000 km, cela signifie un taux respectif de 70 et 35 g CO<sub>2</sub>/km. Par ailleurs, lors de l'utilisation, les véhicules propres sont également responsables d'émission de CO<sub>2</sub>. Si ce n'est lors de la combustion, lors la production du carburant ou de l'énergie. Les émissions au kilomètre de ces véhicules varient donc entre 70g CO<sub>2</sub>/km et 170g CO<sub>2</sub>/km pour une espérance de vie de 200 000 km et une consommation équivalente à 5l/100km. Les émissions ne se limitent donc pas uniquement aux rejets d'usage. Bon nombre de facteurs doivent être pris en compte afin d'assurer un taux réaliste d'émissions. Il n'est, par conséquent, pas possible de donner une réponse formelle quant aux rejets des véhicules et des meilleures alternatives étant donné que cela dépend d'un cas à l'autre.

De plus, bien que le taux de récupération, de réutilisation et de recyclage soient élevés en Europe, certains composants omniprésents dans les véhicules actuels, tel que le lithium, doivent être recyclés et réutilisés davantage si l'on veut pouvoir profiter de cette ressource pour les années à venir. Les autres pays du monde devraient suivre l'exemple de l'Europe en matière de recyclage.

Afin de donner une image objective des émissions des véhicules, nous proposons de mettre au point un standard applicable par tous les constructeurs. Ce modèle, qui

reprend les émissions du cycle de vie, a pour but d'accroître la transparence du secteur automobile tout en encourageant une prise de conscience des consommateurs.

Enfin, les émissions actuelles liées à la production ne sont pas réglementées et la mise en place de ce modèle devrait encourager les constructeurs à réduire l'empreinte écologique de toutes les étapes de vie de leurs véhicules. Par ailleurs, ces mesures ne touchent pas uniquement les constructeurs mais tous les intervenants dans le cycle de vie d'un véhicule.

## **Glossaire**

WTW	Well-to-wheel
WTT	Well-to-tank
TTW	Tank-to-wheel
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
FCV	Fuel Cell Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
CNG	Compressed Natural gas
ICE	Internal combustion engine
LCA	Life-Cycle Analysis
GWP	Global Warming Potential
LPG	Liquified Petroleum Gas
IEA	International Energy Agency

## Table of Contents

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMATIQUE</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>LIMITES DE L'ETUDE</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>METHODOLOGIE</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>PARTIE I : ETAT DE LA SITUATION</b>	<b>6</b>
<b>5.1</b>	<b>DEFINITION D'UN VEHICULE "PROPRE"</b>	<b>6</b>
<b>5.2</b>	<b>HISTORIQUE ET DEFINITION DES VOITURES D'AUJOURD'HUI</b>	<b>9</b>
5.2.1	LA VOITURE A COMBUSTION CLASSIQUE	9
5.2.1.1	Historique	9
5.2.1.2	Principe de la voiture à combustion	10
5.2.1.3	Avantages	10
5.2.1.4	Inconvénients	10
5.2.1.5	Infrastructures	10
5.2.1.6	Conclusion	11
5.2.2	LA VOITURE AU LPG	11
5.2.2.1	Historique	11
5.2.2.2	Principe de la voiture au LPG	11
5.2.2.3	Avantages	11
5.2.2.4	Inconvénients	12
5.2.2.5	Infrastructures	12
5.2.2.6	Conclusion	12
5.2.3	LA VOITURE AU GAZ NATUREL COMPRESSE (CNG)	12
5.2.3.1	Historique	12
5.2.3.2	Principe de la voiture au CNG	12
5.2.3.3	Avantages	13
5.2.3.4	Inconvénients	13
5.2.3.5	Infrastructures	13
5.2.3.6	Conclusion	13
5.2.4	LA VOITURE ELECTRIQUE	14
5.2.4.1	Historique	14
5.2.4.2	Principe de la voiture électrique	15
5.2.4.3	Avantages	15
5.2.4.4	Inconvénients	16
5.2.4.5	Infrastructures	16
5.2.4.6	Conclusion	17
5.2.4.7	'Better Place'	17
5.2.5	LA VOITURE HYBRIDE	18
5.2.5.1	Historique	18
5.2.5.2	Principe de l'hybride	18

5.2.5.3	Avantages	20
5.2.5.4	Inconvénients	20
5.2.5.5	Infrastructures	20
5.2.5.6	Conclusion	20
5.2.6	VOITURE A L'HYDROGENE	21
5.2.6.1	Historique	21
5.2.6.2	Principe de la pile à combustible à l'hydrogène	21
5.2.6.3	Avantages	22
5.2.6.4	Inconvénients	22
5.2.6.5	Infrastructures	22
5.2.6.6	Conclusion	23

---

## **6 PARTIE 2 : LE CYCLE DE VIE** **23**

### **6.1 DEFINITION ET EXPLICATION DU CONCEPT** **23**

### **6.2 L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE** **26**

6.2.1	MATIERES PREMIERES	26
6.2.1.1	Métaux	26
6.2.1.2	Verre	32
6.2.1.3	Plastique	32
6.2.1.4	Caoutchouc	33
6.2.2	PRODUCTION ET ASSEMBLAGE	33
6.2.2.1	Production et assemblage de la voiture	34
6.2.2.2	Production du carburant	44
6.2.3	TRANSPORT	49
6.2.4	UTILISATION	49
6.2.4.1	Conduite	51
6.2.5	RECYCLAGE	51
6.2.6	LE CYCLE DE VIE	54
6.2.6.1	La voiture électrique	54
6.2.6.2	La voiture à essence	58
6.2.6.3	La voiture au diesel	58
6.2.6.4	La voiture au CNG	59
6.2.6.5	La voiture au LPG	59
6.2.6.6	L'hybride parallèle	60
6.2.6.7	L'hybride rechargeable	60
6.2.6.8	La pile à combustible à l'hydrogène	60
6.2.6.9	La voiture au bioéthanol	61
6.2.6.10	Comparaison	61
6.2.7	CONCLUSION	64

---

## **7 PARTIE 3 : PROPOSITION D'UN MODELE UNIVERSEL** **66**

<b>7.1</b>	<b>PRINCIPE DU MODELE</b>	<b>66</b>
<b>7.2</b>	<b>CARACTERISTIQUES DU MODELE</b>	<b>67</b>
<b>7.3</b>	<b>MODELE</b>	<b>68</b>
<b>7.4</b>	<b>EXEMPLE</b>	<b>70</b>
<b>7.5</b>	<b>LIMITES</b>	<b>70</b>

<b>7.6 CONCLUSION</b>	<b>71</b>
<b>8 ANALYSE CRITIQUE</b>	<b>71</b>
<b>9 PARTIE 4 : IMPLICATIONS POUR LE FUTUR</b>	<b>74</b>
<b>9.1 SOLUTIONS EXISTANTES</b>	<b>74</b>
<b>9.2 SOLUTIONS POTENTIELLES</b>	<b>75</b>
<b>9.3 HYPOTHESES POUR L'AVENIR</b>	<b>77</b>
<b>9.4 RECOMMANDATIONS</b>	<b>79</b>
<b>10 CONCLUSION</b>	<b>80</b>
<b>11 BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>81</b>
<b>12 ANNEXES</b>	







## **I Introduction**

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, nous avons souhaité nous centrer sur l'une des nombreuses problématiques automobiles. Pour cela, nous nous sommes rencontrés avec le professeur Daniel Tyteca, afin de déterminer une problématique avec pour objectif de tirer une réelle plus-value du travail. Nous avons abordé l'effet rebond, le cycle de vie entier d'un véhicule dit 'propre' ainsi que la façon de changer notre vision des véhicules 'propres' afin d'encourager une conduite plus écologique dans son ensemble. Finalement, nous nous sommes accordés afin que le centre de la recherche se porte sur le cycle de vie des véhicules 'propres.'

Afin de réaliser un travail de qualité ainsi que pouvoir comprendre au mieux le secteur automobile, un stage de quatre mois a été réalisé au sein d'une entreprise de leasing opérationnel. Le stage a pris place dans les bureaux de General Electric Capital Benelux. Le bureau en question travaille avec presque tous les constructeurs et gère une flotte de près de 13.000 véhicules. Grâce à ces éléments, General Electric est une source d'expérience et de connaissance pour ce mémoire. Les apprentissages au cours du stage ainsi que l'accès aux bases de données, aux contacts de l'entreprise et aux documents ont été précieux pour la réalisation de ce mémoire. Nous en avons tiré une vue d'ensemble sur le secteur et son avancement.

Nous pouvons donc affirmer que le marché de l'automobile change. En effet, son évolution est poussée par un climat économique et environnemental qui oriente les automobilistes vers des voitures moins nocives pour l'environnement et moins coûteuses (Arval, 2010, p. 5).

Ce changement est lié à 3 facteurs:

Premièrement, l'augmentation du coût des énergies fossiles, lié à leur raréfaction.

Deuxièmement, la dégradation du climat suite aux externalités négatives liées à utilisation de l'automobile modifiant le système de protection de l'atmosphère.

Troisièmement, l'impact de cette pollution sur la santé. Les particules polluantes émanant de la combustion des produits fossiles sont dangereuses pour l'homme (Arval, 2010, p. 5).

Toutefois, l'impact des voitures moins nocives pour l'environnement, en terme de CO<sub>2</sub>, peut induire certains automobilistes en erreur en fonction des circonstances.

En effet, peu importe la source d'énergie utilisée, elle détient souvent sa propre empreinte écologique.

## **2 Problématique**

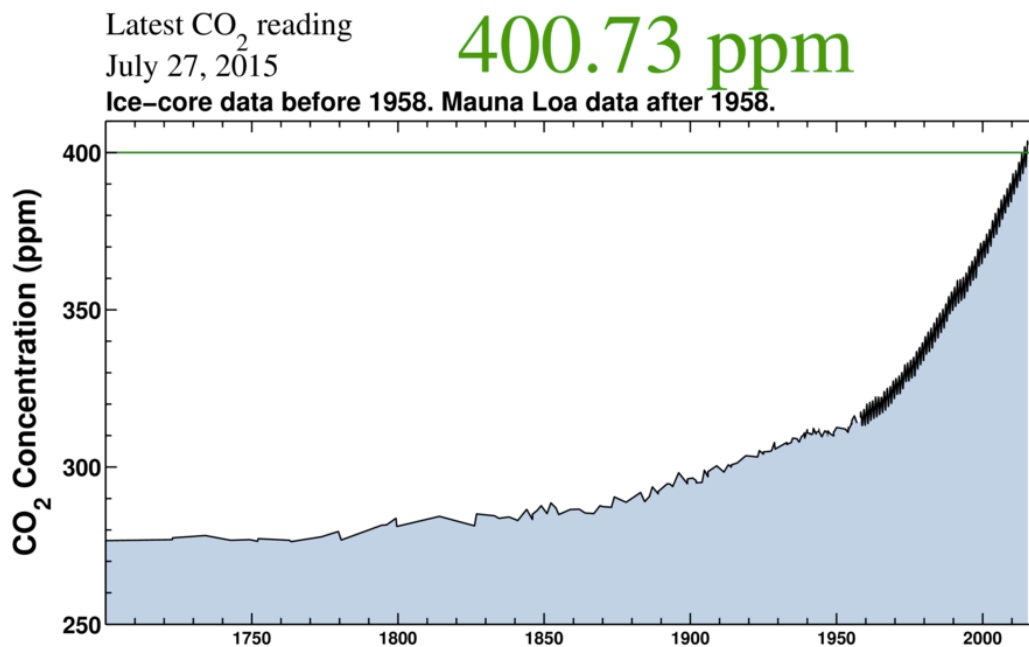
La problématique abordée traite d'un sujet d'actualité. Ce sujet est délicat et complexe notamment à cause du nombre de facteurs à prendre en compte et leurs enjeux environnementaux et économiques. Tout au long de ce travail, nous aborderons le sujet de la voiture 'propre'. Plus précisément, « La voiture dite 'propre' l'est-elle vraiment? Si l'on prend en compte le processus en aval et en amont nous pouvons actuellement dire que non. » Bien que cela puisse sembler être une conclusion hâtive, nous savons que tous les véhicules polluent d'une manière ou d'une autre. Il s'agit donc d'analyser la mesure dans laquelle les véhicules propres réduisent ces rejets.

Notre problématique résulte d'une prise de conscience grandissante et des revendications écologiques de nombreux constructeurs automobiles. En effet, de plus en plus de constructeurs proposent des gammes et des modèles de voitures 'propres' ou respectueuses de l'environnement. Toutefois, ces voitures sont bien souvent moins passives que ce que les constructeurs et les médias revendiquent (Annexes 1 – 3). Les phases d'extraction, de production, d'assemblage, de recyclage et même d'utilisation détiennent leur empreinte écologique qui se révèle, dans certains cas, plus polluante pour un véhicule 'propre'. Nous souhaitons donc définir la mesure dans laquelle les véhicules hybrides, électriques, CNG, biocarburants et hydrogènes sont moins nocifs pour l'environnement et sous quelles conditions. Pour ce faire, nous proposerons d'analyser les résultats des différentes études de cycle de vie afin d'établir une comparaison. Nous souhaitons également refléter l'impact des zones géographiques, des infrastructures et des ressources sur ces différents véhicules.

Les émissions de CO<sub>2</sub> ont été liées au réchauffement climatique dans plusieurs études (Allen, M.R. et al., 2009, pp. 1163-1166. ; Matthews, H.D. et al., 2009, pp. 829–832. ; Meinshausen, M. et al., 2009, p. 1158). Ces études expliquent clairement le lien étroit entre les deux phénomènes. Par ailleurs, afin d'illustrer la problématique actuelle de CO<sub>2</sub> le graphique ci-dessous (Graphique 1) montre l'évolution de la présence du CO<sub>2</sub> dans l'air depuis l'année 1700. Il s'agit de la courbe de Keeling.

Cette courbe démontre une hausse fulgurante au fil des années, une hausse qui doit être arrêtée.

### Graphique I. Présence de CO<sub>2</sub> dans l'air.<sup>1</sup>



Ce graphique présente l'augmentation de la présence de CO<sub>2</sub> dans l'air. L'axe des abscisses indique les années tandis que l'axe des ordonnées indique la concentration de dioxyde de carbone dans l'air.

Source : <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>

Les voitures 'propres' ont le potentiel de diminuer de manière significative les émissions de CO<sub>2</sub> (Ehsani, M. et al., 2010, p. 108), omniprésentes dans le secteur automobile. En effet, actuellement, le secteur du transport représente 14% des émissions globales de CO<sub>2</sub> (IPCC., 2014, Annexe 4).

En Europe, le secteur du transport s'élève à 24%<sup>2</sup> des émissions de CO<sub>2</sub>. Les transports routiers représentent 21% dont 15% émanent des petits véhicules (voitures, camionnettes, ...)<sup>3</sup>. Aux Etats-Unis, 27% du CO<sub>2</sub> est lié au secteur du transport<sup>4</sup>. En Belgique, les transports routiers représentent près de 21% des émissions de CO<sub>2</sub><sup>5</sup>. Il est, de ce fait, crucial de réduire la proportion d'émissions causées par le secteur du transport au vu de la croissance mondiale attendue dans les années à venir.

<sup>1</sup> PPM signifie partie par million

<sup>2</sup> [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/index_en.htm)

<sup>3</sup> [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/index_en.htm)

<sup>4</sup> <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/sources/transportation.html>

<sup>5</sup> <http://www.climat.be/fr-be/changements-climatiques/en-belgique/emissions-belges/emissions-par-secteur>

### **3 Limites de l'étude**

Nous proposons d'analyser les résultats d'études du cycle de vie automobile. Les informations et les sources étant nombreuses et les résultats variables, nous avons tenté de poser notre propre opinion en comparant les diverses études et leurs aboutissements. La littérature sur le sujet évolue de manière quotidienne au même titre que les technologies, les matières et les processus. Il est, par conséquent, difficile de se fier à des ouvrages et articles non actuels. C'est pourquoi nous nous baserons principalement sur des revues scientifiques récentes, qui se réfèrent quant à elles à divers articles et ouvrages plus anciens tout en gardant à l'œil l'évolution constante.

Il est important de tenir cette évolution continue à l'esprit. Par exemple, l'évolution des sources d'électricité vers des ressources moins intensives en CO<sub>2</sub> au fil des années signifie qu'il faut s'attendre à une diminution de l'impact durant la vie de l'automobile.

Nous ne pouvons pas prendre tous les aléas en compte. Nous ne tiendrons donc pas compte du prix des différents véhicules. Nous n'évoquerons pas non plus la problématique de l'effet rebond et des conséquences que cela peut engendrer. Nous n'insisterons pas sur la mise en place des infrastructures pour l'utilisation quotidienne de ces véhicules. Par ailleurs, la problématique de la disponibilité des ressources rares sur le long terme ne sera pas élaborée de manière exhaustive. Enfin, notre étude se base majoritairement sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Toutefois, ces émissions ne présentent qu'une facette des externalités de l'automobile.

### **4 Méthodologie**

Notre objectif n'est pas de définir la meilleure voiture, mais de dévoiler les émissions réelles des différents modèles et d'étudier les cas dans lesquels ces voitures peuvent se révéler moins nocives pour l'environnement.

Pour cette étude, nous nous sommes basés sur de nombreux articles scientifiques déjà existants pour créer une revue des éléments proposés (Hawkins, T. et al., 2012 ; Hill, N., 2013 ; Wilson, L., 2013 ; Aguirre, K. et al., 2012 ; Ma, H. et al., 2011 ; Egede, P. et al., 2015 ; Patterson, J., et al., 2011 ; Lucas, A., et al., 2011 ; Helms, H., 2010.). Nous avons tenu compte des hypothèses et des objectifs de ces études.

Aucune de celles-ci ne reprend, de manière exhaustive, une comparaison complète des différents types de véhicules et leurs émissions. Les rapports durables des principaux constructeurs (Honda, 2014.; Kia, 2015.; General Motors, 2013.; Daimler, 2014.; Toyota, 2014.; Renault, 2013.; Fiat, 2013.; Nissan, 2014.; Ford, 2014.; Volkswagen, 2014.) sont également intéressants, bien que leur objectivité puissent être mis en question. Enfin, ce mémoire a bénéficié de nombreux entretiens informels dans le cadre des activités de stage chez General Electric Capital Fleet Services. Ces entretiens se sont déroulés de manière spontanée avec différents constructeurs, plusieurs consultants automobiles et divers clients majeurs dont les flottes se comptent en milliers de véhicules.

Nous avons préféré proposer une définition de la voiture propre avant d'analyser les différents types de véhicules. Ces éléments font partie intégrante de l'état de la situation. Dans cette partie du mémoire, nous aborderons les aspects plus théoriques pour assurer une compréhension de tous les éléments et une vue d'ensemble de la problématique.

Ensuite, nous entreprendrons l'estimation des différentes empreintes écologiques. Ces estimations se baseront sur les études de cycle de vie existantes qui constituent la partie pratique du travail. Cette partie est subdivisée en fonction des étapes qui constituent le cycle.

Nous proposerons également un modèle de cycle de vie applicable au secteur automobile. Ce modèle se concentre sur les émissions de dioxyde de carbone et ne prend pas en compte d'autres aspects nocifs des voitures actuelles. Le but de cet outil est de compléter l'évaluation actuelle des émissions liées à l'utilisation.

Enfin, nous présenterons une analyse critique afin de contraster les éléments présentés en fonction de leur contexte.

Finalement, nous conclurons par des solutions existantes, des solutions potentielles, des implications pour l'avenir et des recommandations.

## 5 Partie I : Etat de la situation

### 5.1 Définition d'un véhicule "propre"

On entend souvent, de manière abusive, la dénomination propre ou écologique pour des voitures à émission nulle ou faible en CO<sub>2</sub>. Contrairement à ce que cette dénomination pourrait laisser croire, aucun véhicule n'est entièrement écologique. Pour cause, les matières premières et l'énergie, indispensables à la construction, sont responsables de gaz à effet de serre. Sans oublier que des pièces d'usages telles que les pneus ou les batteries ne sont pas sans conséquence pour l'environnement. Finalement, lors du recyclage, aussi performant soit-il, tout véhicule est responsable de résidus et de déchets. De ce fait, même si la source d'énergie utilisée est entièrement renouvelable, ce qui n'est bien souvent pas le cas, la voiture pollue.

Par ailleurs, les gaz à effet de serre ne se composent pas uniquement de CO<sub>2</sub>. Notre atmosphère se compose de nombreux gaz dont la plupart sont transparents et n'empêchent pas le rayonnement solaire. Toutefois, certains d'entre eux retiennent les rayons infrarouges et gardent donc la chaleur. Ce phénomène est naturel et indispensable. Toutefois, il est accentué par d'autres éléments qui ne font pas partie du phénomène naturel. Les principaux responsables sont la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le monoxyde de diazote (N<sub>2</sub>O) (UCL., 2010, p.7). C'est pourquoi, dans de nombreux articles et dans cette étude, la dénomination CO<sub>2</sub> comprend également une fraction de méthane et de monoxyde de diazote.

Plusieurs études ont démontré l'intérêt des citoyens pour les problématiques environnementales<sup>6</sup>. Ces derniers souhaiteraient contribuer à protéger au maximum notre planète. Ces éléments intègrent la logique de développement durable, un « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs<sup>7</sup>. » La responsabilité sociétale des entreprises insiste sur le développement durable et se base sur la combinaison de trois piliers pour l'appliquer. Nous observons le pilier économique, le pilier social et finalement le pilier environnemental. Pour atteindre ce développement durable, la prise en compte de la planète doit faire partie intégrante du processus de développement (Francisco L. et al., 1996, p. 18). Il en va de même pour le secteur

---

<sup>6</sup> [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-08-445\\_fr.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-08-445_fr.htm)

<sup>7</sup> [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/sustainable\\_development/index\\_fr.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/sustainable_development/index_fr.htm)

automobile. En effet, il est essentiel pour toute entreprise d'inclure dans sa stratégie les facteurs environnementaux liés à la rareté des ressources qu'elle exploite, à l'évolution du climat, aux droits des minorités et à l'impact de l'extraction au recyclage de ses produits<sup>8</sup>.

Nous constatons également que les standards ISO évoluent avec cette vision de l'entreprise et de ses obligations (Guérin, A-J. et al., 2008, p. 116). De nombreux constructeurs se conforment à ces standards (Hill, N., 2013, slide 3). Toutefois, les ISO 14000 ne sont pas des normes et consistent simplement à proposer certaines lignes directrices pour les entreprises.

Jusqu'à présent, la voiture 'propre' est souvent définie en terme d'utilisation, tout en sachant qu'elle ne prend pas en compte le cycle de vie entier du véhicule. En effet, afin de prétendre à une voiture propre, il semble essentiel d'insister sur d'autres facettes que la simple utilisation. Par ailleurs, la multitude de facteurs entrant en jeu nous pousse à mieux définir le concept. Pour ce faire, nous devons commencer par l'extraction, la production et l'assemblage avant de considérer la logistique et l'utilisation pour finalement terminer par le recyclage et la réutilisation des composants. Nous pouvons donc définir une voiture propre comme une voiture qui respecte l'environnement "du berceau à la tombe".

Lors du design d'une voiture, tout doit être pensé, non seulement pour limiter et éliminer l'impact négatif d'usage, mais aussi pour les matériaux à utiliser et l'impact de l'extraction ou de la fabrication de ces derniers. Il faut se poser les questions pertinentes avant de faire les choix, tels que ; Pourquoi utiliser telle matière ? Quel est son impact ? Comment l'extraire ou la produire sans avoir d'impact sur l'environnement ? Il est vital de choisir des partenaires de confiance pour s'assurer que tous les accords soient bien respectés.

Il faut également prendre en compte l'impact du transport des pièces et non seulement voir cela comme une fonction de minimisation des coûts. Bien entendu, l'assemblage sur les lignes de production doit être optimisé afin de réduire au maximum les externalités négatives causées.

Ensuite, l'utilisation étant la partie la plus polluante (en terme de CO<sub>2</sub>) de la vie d'une automobile, il est crucial pour les constructeurs de mitiger l'impact de leurs produits. Il semble utile d'insister pour une réduction de l'écart entre l'annonce du

---

<sup>8</sup> <http://communicationorganisation.revues.org/572>

constructeur et la pratique. En effet, bien trop souvent les constructeurs annoncent des chiffres inatteignables en pratique qui faussent certains calculs. Nous pouvons avancer sur cet aspect grâce à l'aide de General Electric Fleet Services qui nous a permis d'analyser les données d'utilisation et de les comparer avec les chiffres annoncés par les constructeurs (Annexes 5 - 7). Nous observons que l'écart est nettement supérieur dans le cas des véhicules hybrides. Il en va de même pour les véhicules électriques. Il est donc important pour les constructeurs de proposer une autonomie ou une consommation réaliste.

Finalement, dès le design, il est indispensable de concevoir les véhicules en optimisant le recyclage de fin de vie. L'effet retardé de cette étape ne devrait pas réduire son importance.

La définition semble simple. En effet, si l'on stipule qu'une voiture propre est une voiture sans impact sur l'environnement de sa création à son recyclage, et en tenant compte de l'utilisation, l'on obtient une définition cohérente. Toutefois, cette définition est utopique et irréaliste aujourd'hui.

En revanche, si l'on combine certaines définitions aux éléments repris ci-dessus, nous pouvons présenter notre définition de la voiture propre.

*Une voiture propre est une voiture qui minimise son impact sur l'environnement tout au long de son cycle de vie. Cela inclut la préservation des sols, des eaux, de l'écosystème et des ressources naturelles. Un véhicule propre permet la mobilité sans pour autant compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins.*

Il est important de préciser que tant pour la responsabilité sociétale des entreprises que pour l'écologie en général, il est difficile de trouver une définition qui convient à tous. Nous proposons donc une définition sans prétendre que cette dernière soit exhaustive ou exclusive.

Il est intéressant d'envisager un modèle universel qui comprend l'ensemble du cycle de vie des véhicules afin d'être le plus transparent et le plus complet possible. Nous reviendrons sur cet aspect plus loin dans notre étude.

## **5.2 Historique et définition des voitures d'aujourd'hui**

Afin de mettre en contexte les diverses alternatives disponibles actuellement, nous proposons de revenir brièvement sur l'origine des propositions. Ensuite, nous entamerons une explication des concepts de véhicules propres en ajoutant les avantages et les inconvénients, les infrastructures et enfin, nous concluons. Ceci peut être perçu comme un portefeuille de lecture des différentes possibilités mais cela semble inévitable pour assurer une meilleure compréhension par la suite.

Même si de nombreux pays clament l'invention de l'automobile, nous devons la première voiture capable de transporter l'homme à Nicolas-Joseph Cugnot en 1768. Cette dernière était propulsée grâce à un moteur à vapeur (Eckermann, E., 2001, p. 14).

Au cours des années, les voitures respectueuses de l'environnement se développent différemment d'un pays à l'autre. Ce développement dépend essentiellement des infrastructures, des ressources, du pouvoir d'achat et des subsides ou avantages accordés par l'état. Il est surtout intéressant de promouvoir les voitures qui ont le plus de potentiel de réduction de CO<sub>2</sub> d'après les ressources, les infrastructures et la géographie du pays.

Nous constatons également que les différents constructeurs croient en différentes technologies et font de la recherche et du développement en fonction de leurs convictions. A titre d'exemple, Renault investit dans l'électrique et espère que ses voitures représenteront 10% de ses ventes d'ici 2020. Toyota finance le développement des voitures électriques et hybrides pour des ventes espérées de 1,5 et 4% respectivement. Toyota met donc davantage l'accent sur ses modèles hybrides (HBC Group, 2014, slide 9).

### **5.2.1 La voiture à combustion classique**

#### **5.2.1.1 Historique**

La première voiture dotée d'un moteur à essence fait son apparition en 1886 avec la Benz Patent-Motorwagen. Cette automobile de Carl Benz est considérée comme la première voiture de production (Patentschrift, 1886). C'est seulement au début du 20<sup>ème</sup> siècle que la voiture à combustion prendra le dessus grâce à son accessibilité,

son autonomie et sa facilité d'utilisation avec le fameux model T de Ford<sup>9</sup>. Depuis, le moteur à essence a dominé le 20<sup>ème</sup> siècle. Les seuls moments de ralentissement de la voiture à combustion sont survenus lors des difficultés liées au pétrole (1973, 1979, 2008).

### **5.2.1.2 Principe de la voiture à combustion**

La voiture utilise un moteur à combustion propulsé par divers carburants tels que l'essence et le diesel. Il est également possible de rouler au bioéthanol, moyennant une installation mineure. La voiture à combustion atteint une consommation raisonnable avec une autonomie suffisante. La voiture à combustion est celle que nous côtoyons quotidiennement depuis des années.

### **5.2.1.3 Avantages**

Tout d'abord, la voiture à essence dispose d'une autonomie ample. Le réseau de stations-services est global. L'expérience des constructeurs et les tests des voitures d'aujourd'hui assurent une certaine fiabilité. Par ailleurs, les garagistes et les mécaniciens maîtrisent les différents moteurs. Finalement, nous pouvons dire que la voiture à essence est abordable financièrement.

### **5.2.1.4 Inconvénients**

Premièrement, il y a une pollution sonore et olfactive qui est liée à la combustion de ressources fossiles. Ensuite, il y a l'impact important des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion du carburant. De plus, l'efficacité énergétique n'est pas optimale si on la compare avec une voiture électrique. En effet, dans des conditions optimales, le rendement ultime des moteurs thermiques est de 35 % et 40 % respectivement pour l'essence et le diesel. Généralement, les véhicules sont utilisés pour des trajets quotidiens courts en ville, dans des conditions non optimales. Cela se traduit par un rendement plus faible. En réalité, les valeurs se rapprochent de 15 % à 20 % (Arval, 2010, p. 7). Par ailleurs, nous observons une hausse des restrictions et des taxes. Finalement, la raréfaction du carburant est également un problème majeur.

### **5.2.1.5 Infrastructures**

Au niveau de la couverture, le réseau est idéal. En Belgique, nous disposons de plus de 3000 stations-service<sup>10</sup>. Les garages sont équipés du matériel nécessaire et disposent d'infrastructures adaptées. Enfin, bien que les usines de raffinage du

---

<sup>9</sup> <http://www.voiture-electrique-populaire.fr/vehicule/histoire>

<sup>10</sup> <http://www.petrolfed.be/fr/lindustrie-pétrolière/economie/lévolution-du-nombre-de-stations-service>

carburant soient en place, ces infrastructures sont-elles réellement adaptées d'aujourd'hui?

### **5.2.1.6 Conclusion**

La voiture à essence a été un élément clé de notre évolution et permet une mobilité facilitée. Toutefois, cette mobilité ne répond plus aux besoins et aux attentes d'aujourd'hui. Les externalités négatives et les inconvénients sont trop importants. La transition vers d'autres moyens de transport de plus en plus performants et de moins en moins dépendants aux énergies fossiles ne sera pas radicale mais progressive.

## **5.2.2 La voiture au LPG**

### **5.2.2.1 Historique**

Le LPG ou Liquefied Petroleum Gas, a été découvert et développé au début du 20<sup>ème</sup> siècle par le chimiste Américain Dr. Walter Snelling. En 1950 le gaz fut utilisé en combinaison avec l'essence pour faire fonctionner les voitures<sup>11</sup>. Les conversions de voitures au LPG ont débuté dans la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle et même si aujourd'hui il ne représente pas l'avenir du secteur, les producteurs de propane aux Etats-Unis voient toujours un grand potentiel de croissance lié à l'automobile (Propane Education and Research Council., 2013, p. 4.).

### **5.2.2.2 Principe de la voiture au LPG**

Les voitures qui roulent au LPG sont des voitures à combustion ordinaires, auxquelles on a ajouté une installation LPG. Ce gaz liquide est constitué de propane et de butane<sup>12</sup>. La voiture en question utilise toujours de l'essence mais seulement 25%, les autres 75% proviennent du LPG. Ce dernier permet une économie à la station-service mais consomme plus. Le résultat est donc mitigé. De plus, le LPG n'a pas réellement de perspectives environnementales positives étant donné qu'il est issu du raffinage et des vapeurs d'essence.

### **5.2.2.3 Avantages**

Un réseau de stations-service est déjà développé en Belgique et le remplissage s'effectue sans difficulté. Le système du LPG préserve mieux l'usure du moteur. De plus, le LPG coûte généralement moins cher que le diesel ou l'essence. Toutefois, comme son apport énergétique est plus faible, il n'est pas garanti que cela ait un

---

<sup>11</sup> [http://www.exceptionalenergy.com/en\\_GB/what-is-lpg/history](http://www.exceptionalenergy.com/en_GB/what-is-lpg/history)

<sup>12</sup> [http://www.diffen.com/difference/CNG\\_vs\\_LPG](http://www.diffen.com/difference/CNG_vs_LPG)

impact conséquent sur les dépenses. Concernant l'utilisation, elle s'avère similaire à un véhicule ordinaire. Enfin, le LPG peut réduire partiellement les émissions de CO<sub>2</sub><sup>13</sup>.

#### **5.2.2.4 Inconvénients**

Le point négatif le plus pénalisant est que les voitures au LPG sont entièrement dépendantes aux énergies fossiles. De plus, lorsqu'il fait froid, le moteur peut avoir des difficultés au démarrage. Finalement, il n'est pas toujours possible de faire son plein à tout moment<sup>14</sup>.

#### **5.2.2.5 Infrastructures**

D'après le site [lpgstations.com](http://lpgstations.com), il y aurait près de 34.000 stations-service qui proposent du LPG dans le monde<sup>15</sup> dont 645 se trouveraient en Belgique<sup>16</sup>.

#### **5.2.2.6 Conclusion**

Le LPG ne constitue pas une alternative intéressante pour le futur par le simple fait de sa dépendance aux énergies fossiles. De plus, son rendement énergétique est faible et son prix plus élevé.

### **5.2.3 La voiture au gaz naturel comprimé (CNG)**

#### **5.2.3.1 Historique**

Ces dernières années, nous entendons davantage parler du gaz naturel comprimé (CNG) comme alternative aux énergies fossiles. Dans les années 1980, Gaz de France a relancé l'utilisation du gaz naturel pour les véhicules avec l'aide de Renault. La principale différence avec le LPG est que le CNG est constitué de méthane<sup>17</sup>.

#### **5.2.3.2 Principe de la voiture au CNG**

Le véhicule au CNG est une voiture à combustion ordinaire à laquelle on a ajouté une installation CNG. Cette conversion peut-être effectuée de base sur un véhicule acheté en concession ou ultérieurement. Le prix d'une telle modification peut varier entre 2000 et 4000€ chez un professionnel. Le CNG est en réalité du méthane comprimé à 200 – 300 bars. Le CNG est stocké en phase gazeuse à température ambiante et permet une autonomie de 400 à 500 km. La qualité du gaz aura, toutefois, un impact conséquent sur l'autonomie. Sa qualité dépendra de sa

---

<sup>13</sup> <http://www.extraordinaryroadtrip.org/research-library/technology/liquified-petroleum/ad-draw.asp>

<sup>14</sup> <http://www.extraordinaryroadtrip.org/research-library/technology/liquified-petroleum/ad-draw.asp>

<sup>15</sup> <http://www.lpgstations.com>

<sup>16</sup> <http://www.mylpg.eu/stations/belgium>

<sup>17</sup> [http://www.diffen.com/difference/CNG\\_vs\\_LPG](http://www.diffen.com/difference/CNG_vs_LPG)

provenance. En pratique, un ratio de 9/1 s'applique. C'est à dire, il faut compter 90% de CNG et 10% d'essence pour l'utilisation (HBC Group, 2014, slide 67).

### **5.2.3.3 Avantages**

Les avantages dont profite le CNG sont ; une consommation de 20 à 30% moins coûteuse, une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 30% comparé au diesel et de 15% par rapport à l'essence. Les émissions de particules diminuent de près de 95%. De plus, la pollution sonore diminue comparé au diesel. Le plein s'effectue de manière simple et rapide. Par ailleurs, le moteur subit moins d'usures suite à une meilleure combustion et moins de résidus. En outre, les véhicules équipés pour le CNG peuvent également rouler au biogaz. Enfin, le CNG est plus sûr que le LPG, l'essence ou le diesel. (HBC Group, 2014, slide 69).

### **5.2.3.4 Inconvénients**

Au niveau des inconvénients, nous comptons un nombre réduit de stations-service, ainsi qu'une installation simple mais coûteuse qui s'avère plus lourde et plus conséquente que pour le LPG. Toutefois, il est possible de recevoir une prime à l'achat pour ce genre de véhicules (HBC Group, 2014, slide 70).

### **5.2.3.5 Infrastructures**

En 2011, nous comptons un peu moins de 20 000 stations-service proposant du gaz naturel dans le monde<sup>18</sup>. Nous comptons 30 stations-service distribuant du gaz naturel en Belgique dont 17 appartiennent au groupe Dats. De nombreux projets de développement sont en cours pour les années à venir<sup>19</sup>.

### **5.2.3.6 Conclusion**

Pour conclure, nous observons que les automobilistes ne sont pas encore convaincus, car ils gardent à l'esprit une image de risque lié au gaz. De surcroît, ce type d'installation est d'autant plus intéressant dans un contexte urbain (HBC Group, 2014, slide 74).

---

<sup>18</sup> <http://www.iangv.org/2012/05/2011-natural-gas-vehicle-statistics-released/>

<sup>19</sup> <http://www.ngva.be/fr/cherche> <https://customer.dats24.be/fr/ou-peut-faire-le-plein-de-gaz-naturel;>  
<https://customer.dats24.be/fr/ou-peut-faire-le-plein-de-gaz-naturel>

## 5.2.4 La voiture électrique

### 5.2.4.1 Historique

D'après certaines sources, la voiture électrique faisait partie des premières voitures<sup>20</sup>. Bien que la date exacte de la première voiture électrique pose débat, nous retiendrons la Flocken Elektrowagen de 1888 créée par Andreas Flocken (Roth, H., 2011, slides 2–3). Lors de sa croissance, la voiture électrique a été pénalisée par son coût, son autonomie limitée et sa vitesse de pointe réduite. Malgré de nombreuses apparitions au fil des décennies, la voiture électrique n'a donc jamais su percer. Le film américain 'Who killed the electric car' illustre bien cette évolution, mais insiste surtout sur les responsables du retrait de la voiture électrique au début des années 2000 et plus particulièrement le retrait de la EVI de General Motors. (Paine, C., 2006)

Les raisons avancées par les constructeurs concernant leurs retraits restent floues. Aux Etats-Unis, les constructeurs ont cessé tout développement une fois que les lois et les restrictions mises en place ont été levées (Paine, C., 2006). Le retrait du groupe PSA est justifié par la perception que cela n'était pas la meilleure utilisation du véhicule électrique (Arval, 2010, p. 11).

Toutefois, il existe des raisons nettement plus plausibles. Premièrement, le réseau de distribution des constructeurs n'est pas favorable à une technologie de rupture comme le 100% électrique. Un moteur électrique est sans entretien. Un système après-vente (SAV) réduit, c'est une réduction du chiffre d'affaires et du bénéfice pour le constructeur et son réseau (Arval, 2010, p. 11). Deuxièmement, la technologie de batteries choisie à l'époque, des batteries NI-cd (cadmium-nickel), est tombée sous le coup d'une réglementation européenne contraignante en 2002. Depuis, l'utilisation du cadmium très toxique sous toutes ses formes est fortement encadrée (Arval, 2010, p. 11).

Malgré cela, quelques années plus tard, la voiture électrique refait son apparition entourée par d'autres alternatives permettant de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> (Paine, C., 2011). Fortement attendus par les utilisateurs, ces nouveaux modèles automobiles arrivent à la maturité technologique permettant leur commercialisation à échelle globale (Arval, 2010, p. 13).

---

<sup>20</sup> <http://www.travelsmart.gov.au/teachers/teachers6.html>

A noter également des écarts de taux d'acquisitions de véhicules 'propres' dans les différents pays. Par exemple, aujourd'hui, nous pouvons observer que la voiture électrique représente 14,5% de parts de marché lors du premier trimestre 2014 en Norvège alors que les autres pays n'arrivent pas à 0,5%. De plus, en Norvège il y a eu une croissance de 422,4% en comparant le premier trimestre de 2013 au premier trimestre de 2014 (HBC Group, 2014, slide 13. ; Annexe 8)

#### **5.2.4.2 Principe de la voiture électrique**

Une voiture électrique est une voiture qui ne compte que sur ses capacités de stockage d'électricité pour aller du point A au point B. L'énergie stockée provient du réseau électrique et est transformée via un moteur pour être ensuite transmise aux roues (Arval, 2010, p. 22). Les batteries envoient du courant moteur électrique qui actionne les roues (Campanari, S. et al., 2009, p. 465). Les éléments constituant la chaîne de traction sont organisés sur le même principe que celui des véhicules thermiques (Arval, 2010, p. 22).

#### **5.2.4.3 Avantages**

Nous observons une économie de consommation conséquente. En effet, nous comptons 1,5 à 2€ pour 100 km. Nous observons également l'absence d'émission CO<sub>2</sub> et d'autres particules fines. (HBC Group, 2014, slide 41). Toutefois, il est probable de causer indirectement l'émission de gaz à effet de serre et d'autres particules en fonction de l'électricité du réseau et de la production. L'usure se voit aussi réduite grâce à l'absence de pièces en mouvement alternatif (billes, pistons, ...). De plus, les coûts d'entretien diminuent de 30 à 40% comparativement à un véhicule à combustion. De surcroît, nous notons une nette réduction de la pollution sonore. (HBC Group, 2014, slide 41). L'efficacité d'un véhicule électrique dans la consommation de son énergie est généralement nettement plus efficace que celle d'un véhicule à combustion classique. Cette hausse d'efficacité est due au freinage régénératif, à l'élimination du moteur qui tourne à l'arrêt et une meilleure efficacité en mouvement (Smith, W-J., 2010, p. 4515).

Par ailleurs, le rendement énergétique des moteurs électriques varie 80 % et 90 %. De même, l'électronique de puissance utilisée pour piloter atteint pratiquement 100 % de rendement (Arval, 2010, p. 7).

Les moteurs électriques présents dans les voitures actuelles sont issus de moteurs industriels. Ils sont faciles à utiliser et extrêmement fiables. Conçus pour fonctionner

en continu pendant des années sans entretien, ils nécessitent seulement des visites de contrôle (Arval, 2010, p. 22).

#### **5.2.4.4 Inconvénients**

Les inconvénients de ce type de véhicules sont liés essentiellement à l'autonomie limitée, qui ne répond pas encore aux besoins de tous, et à la recharge, dont le temps peut varier et l'emplacement de prises adéquates qui peut être difficile à situer (Smith, W-J., 2010, p. 4515). Nous comptons de nombreux types de prises. Il est important de pousser pour plus d'homogénéité afin de pouvoir implanter des infrastructures adaptées et rapides au niveau national et international. (Annexe 9 - 10) Le nombre de places et la capacité du coffre posent également souvent problème, car les batteries prennent de la place. Le système de location des batteries est un obstacle aux ventes, car même après l'achat, il reste un contrat de location. Ce système peut être vu comme bénéfique par les utilisateurs, car il garantit toujours une batterie fonctionnelle. La batterie reste une pièce extrêmement onéreuse du véhicule, c'est pourquoi un système de location a été mis en place. La question du prix et de la valeur résiduelle à la vente se pose également, sans oublier les émissions indirectes de ce genre de véhicules. En effet, les émissions indirectes représentent avec les émissions de production, un problème clé souvent dissimulé. Finalement, l'impossibilité de tracter est perçue de manière restrictive (HBC Group, 2014, slide 42).

#### **5.2.4.5 Infrastructures**

Au niveau des infrastructures, certains pays disposent d'une couverture de réseau nettement supérieure. La Norvège, dispose d'infrastructures exemplaires. Toutefois, le réseau global des bornes est insuffisant et doit être développé. L'installation de nouvelles bornes coûteuses est comparable au dilemme de l'œuf et de la poule. Faut-il plus de bornes pour encourager les voitures électriques ou faut-il plus de voitures électriques avant d'installer de nouvelles bornes ? Cette problématique empêche un développement continu car les utilisateurs attendent plus de bornes et les villes attendent plus de voitures électriques. Nous observons actuellement près de 26 000 points de charge dans le monde<sup>21</sup> (Annexe 11). On estime que 62% de ces bornes sont des prises normales, 30% des points de charge accélérée et seulement 8% des points de charge rapide<sup>22</sup> (Annexe 12) ; la plupart des bornes se trouvent dans des

---

<sup>21</sup> <http://fr.chargemap.com/stats>

<sup>22</sup> *Idem*

parkings<sup>23</sup> (Annexe 13). La Belgique compte environ 600 points de charge<sup>24</sup> (Annexe 14). Il faut aussi noter que la majorité des utilisateurs détiennent un point de charge à domicile et parfois même sur le lieu de travail. Cela implique que le réseau de points de recharges ne doit pas être aussi étendu que pour les autres carburants. L'objectif pour 2020 s'élève néanmoins à 20 000 bornes sur le territoire belge (HBC Group, 2014, slide 46). Toutefois, comme mentionné dans les inconvénients, aucun standard n'existe actuellement d'où le fait que rien ne garantit que lorsque nous trouvons une borne, on puisse réellement charger notre véhicule de par la spécificité du socle (HBC Group, 2014, slide 48 ; Annexe 9).

#### **5.2.4.6 Conclusion**

Pour conclure, l'autonomie de 150km ne limite pas ce type de véhicule à la ville. En effet, la moyenne belge parcourue est de 50km par jour, ce qui nous permet de croire au potentiel des voitures électriques. La problématique actuelle est liée aux batteries et la problématique future au chargement (HBC Group, 2014, slide 48). Par ailleurs, il est crucial de tenir compte des externalités négatives comme les émissions liées à la charge ou la production.

#### **5.2.4.7 'Better Place'**

Nous souhaitons également saluer l'initiative de la société 'Better Place'. Fin 2007, Shai Agassi, annonce la création de Better Place. Cette « start-up » avait réalisé une levée de fonds record, pour organiser la création de réseaux de bornes de recharge de voitures électriques. Le but étant de lever l'un des obstacles à leur adoption par le public. L'analyse de Shai Agassi est formelle: « *L'industrie automobile est en mutation et passe du modèle actuel, la Voiture 1.0, centrée sur le moteur à combustion interne, au modèle de la Voiture 2.0, une voiture électrique mue par des énergies renouvelables* (Arval, 2010, p. 45). »

Leur concept était de produire des voitures électriques abordables pour tous avec l'aide de Renault. Seulement, leur innovation ne se limitait pas à cela. Ce sont les premiers à vouloir vendre des kilomètres plutôt que des batteries<sup>25</sup>. Ils proposaient également des systèmes automatisés pour changer la batterie vide au lieu de devoir patienter à la borne<sup>26</sup>. L'idée derrière ce concept est intéressante et peut encore

---

<sup>23</sup> *Idem*

<sup>24</sup> *Idem*

<sup>25</sup> Bloomberg, Entretien avec Shai Agassi, 2011 <https://www.youtube.com/watch?v=L9m8mTbSYA4>

<sup>26</sup> TED, Présentation de Better Place par Shai Agassi, 2009  
<https://www.youtube.com/watch?v=FcoJt2KLC9k>

être approfondie. Malheureusement, 'Better Place' n'a pas survécu suite au manque de croissance et aux coûts, qui avaient été sous-estimés<sup>27</sup>.

## **5.2.5 La voiture hybride**

### **5.2.5.1 Historique**

La première voiture hybride date en réalité de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. En effet, Ferdinand Porsche a mis au point un véhicule électrique auquel il a ajouté un générateur alimenté par un petit moteur à essence<sup>28</sup>. Bien des années après, Toyota est ensuite venu avec sa propre version de l'hybride à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle. Depuis, la voiture hybride a été proposée sous de nombreuses formes par différents constructeurs.

Bien que la France, le Royaume-Uni et les Pays-Bas vendent le plus en terme de quantité, cela ne représente pas une part de marché significative. La Norvège atteint 6,7% de parts de marché tandis que la France n'atteint que 1,7% (HBC Group, 2014, slide 13; Annexe 15). Par ailleurs, la part de marché des véhicules hybrides aux Etats-Unis s'élève à 3%<sup>29</sup>.

### **5.2.5.2 Principe de l'hybride**

Les véhicules hybrides combinent un moteur électrique avec un moteur thermique, qu'il soit essence ou diesel. Les moteurs peuvent fonctionner de manière simultanée ou séparée en fonction du type d'hybride. En théorie, ce type de véhicule permet d'économiser de 10 à 50% en émissions (HBC Group, 2014, slide 55). En effet, à comparaison équivalente, sur 20 000 km une Toyota Prius rejettera une tonne de CO<sub>2</sub> de moins. Pour les autres polluants, comme l'oxyde d'azote (Nox) et l'hydrate de carbone (HC), les émissions sont inférieures à celles de n'importe quelle autre voiture à essence.

Il est toutefois important de faire la distinction entre toutes les formes de véhicules hybrides.

#### **5.2.5.2.1 Micro hybrides**

« Le système Stop-Start, correspond au niveau le plus faible d'hybridation. Il s'agit d'un système réversible remplissant le rôle du démarreur et de l'alternateur d'une

<sup>27</sup> <http://www.fastcompany.com/3028159/a-broken-place-better-place>

<sup>28</sup> <http://press.porsche.com/news/release.php?id=642>; <http://www.history.com/news/ferdinand-porsches-first-car-was-electric>

<sup>29</sup> <http://www.usatoday.com/story/money/cars/2014/06/09/hybrid-cars-market-share-polk/10238155/>

voiture classique. Le moteur thermique est coupé automatiquement lors des arrêts et il est relancé automatiquement dès que le conducteur débraye » (Arval, 2010, p. 12). Aujourd'hui, le système Stop-Start est devenu un standard sur la plupart des modèles des grands constructeurs.

#### 5.2.5.2.2 Mild hybrides

Les Mild hybrides complètent le Stop-Start par une double propulsion, thermique et électrique: les deux moteurs agissent ensemble pour propulser la voiture. Le moteur électrique apporte son couple pour faciliter le démarrage et pour améliorer les reprises, l'électricité produite en mode alternateur est stockée dans des batteries spécifiques (Arval, 2010, p. 12).

Les Mild hybrides sont capables également de récupérer de l'énergie au freinage. Le système fonctionne dans ce cas en générateur et développe une résistance qui s'ajoute au frein moteur (Arval, 2010, p. 12).

#### 5.2.5.2.3 Hybrides parallèles

Les hybrides parallèles disposent d'un système identique aux Mild hybrides au niveau de la propulsion mais peuvent également fonctionner en tout électrique au démarrage, à basse vitesse et lors des manœuvres de parking. Les batteries ont une capacité suffisante pour parcourir de petits trajets de quelques kilomètres sans avoir recours au moteur thermique (Arval, 2010, p. 12).

#### 5.2.5.2.4 Véhicules électriques à autonomie prolongée

Concernant les véhicules à autonomie prolongée, il n'y a que le moteur électrique qui actionne les roues. Toutefois, afin de permettre une autonomie supérieure, un petit moteur à combustion est prévu pour recharger les batteries en cas de besoin. Ce système permet de prolonger l'autonomie de 60 à 500 km (HBC Group, 2014, slide 59). Cette technologie se répand de plus en plus notamment avec l'I3 de BMW<sup>30</sup>.

#### 5.2.5.2.5 Hybride rechargeable

Les hybrides rechargeables sont une évolution des hybrides parallèles munis de batteries de capacité plus importante (Arval, 2010, p. 12). Ce genre de véhicules hybrides permet de recharger les batteries directement à la prise de courant et permet une autonomie électrique de 20 à 80km ce qui est une nette amélioration

---

<sup>30</sup> [http://www.greencarreports.com/news/1087888\\_2014-bmw-i3-electric-car-why-california-set-range-requirements-engine-limits](http://www.greencarreports.com/news/1087888_2014-bmw-i3-electric-car-why-california-set-range-requirements-engine-limits)

comparé aux hybrides classiques. En effet, dans ce cas-ci, le moteur thermique prend uniquement le relais lorsque les batteries sont déchargées (HBC Group, 2014, slide 56). Au salon de l'automobile de Bruxelles 2015, de nombreux constructeurs exposaient leurs hybrides rechargeables. Lors des échanges sur place entre General Electric et Mercedes, le constructeur allemand ne cachait pas qu'il prévoyait étendre sa gamme de véhicules hybrides rechargeables.

### **5.2.5.3 Avantages**

Nous allons présenter les avantages des hybrides parallèles, rechargeables et les véhicules électriques à autonomie prolongée étant donné qu'il est question de voitures actuelles. Tous ces véhicules ont la capacité de réduire de manière plus ou moins significative la consommation de carburant. En ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub>, il est plus difficile d'affirmer un résultat précis. Les hybrides parallèles assurent une réduction des émissions si on les compare aux véhicules à combustion équivalente. Pour les hybrides rechargeables et les véhicules électriques à autonomie prolongée, il est plus difficile de juger même si une nette diminution est attendue. En effet, l'aspect environnemental de ces véhicules dépend de leur source d'approvisionnement en électricité (HBC Group, 2014, slide 61). Nous pouvons toutefois affirmer une réduction de la pollution locale, même si cela entraîne des conséquences de délocalisation de la pollution. Nous approfondirons ces aspects plus loin dans ce travail.

### **5.2.5.4 Inconvénients**

De manière similaire aux véhicules électriques, les inconvénients restent sans doute le prix d'achat élevé même s'il reste moins important que pour les véhicules électriques. Nous avons également des réserves au niveau de l'autonomie en tout électrique pour certains modèles et le temps de recharge pour les hybrides rechargeables (HBC Group, 2014, slide 62). Finalement, en ce qui concerne les hybrides rechargeables, nous insistons sur l'impact potentiel de la source de l'électricité.

### **5.2.5.5 Infrastructures**

Les infrastructures pour les hybrides sont liées aux infrastructures des véhicules à combustion (5.2.1.5) ou aux véhicules électriques (5.2.4.5).

### **5.2.5.6 Conclusion**

Pour conclure, il s'agit actuellement de la technologie la plus répandue. A court terme, les hybrides rechargeables peuvent être très intéressants (HBC Group, 2014,

slide 63). Toutefois, cela dépend grandement de la source de l'électricité. Les hybrides constituent une étape intermédiaire entre le véhicule électrique et le véhicule à combustion ordinaire. En effet, les hybrides présentent certains, voire tous les avantages de la voiture électrique en ne souffrant que partiellement des inconvénients.

## **5.2.6 Voiture à l'hydrogène**

### **5.2.6.1 Historique**

Bien qu'il ne soit pas encore question de piles à combustible, la première voiture à utiliser l'hydrogène est la voiture à combustion de François Isaac de Rivaz datant de 1807 (Eckermann, E., 2001, p. 17). En 2001, les premiers réservoirs hydrogène à 700 Bar ont été présentés. Cela a permis de réduire leur taille et leur permettre une autonomie supérieure<sup>31</sup>. Cette évolution a permis le développement de nouveaux modèles de voitures pratiques et économiques tels que la Honda FCX Clarity dont la production a débuté en 2008.

### **5.2.6.2 Principe de la pile à combustible à l'hydrogène**

Le véhicule à l'hydrogène est l'option, long terme, préférée de spécialistes tels que les consultants stratégiques de General Electric. En effet, elle élimine les émissions liées directement à l'utilisation même si des émissions indirectes persistent (Von Helmlt, R. Et al., 2007, p. 834).

Le principe de l'hydrogène part des piles à combustible. L'association de l'hydrogène avec l'oxygène produit un courant électrique et rejette de la vapeur d'eau. De ce fait aucune pollution n'est émise lors de cette association. ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{Electricité} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{Chaleur}$ ).

En pratique, les piles à combustible alimentent un moteur électrique. Il ne s'agit pas d'un combustible mais d'un vecteur d'énergie. L'hydrogène est stocké dans un réservoir à haute pression (700 - 900 Bar) doit aussi compter sur une batterie tampon en plus de la pile à combustible et du moteur électrique. Le rendement énergétique de ce genre de véhicule permet de compter sur une autonomie de 500 à 600km (HBC Group, 2014, slides 78-79).

---

<sup>31</sup> [http://www.storhy.net/train-in/PDF-TI/Poster/Poster\\_I.pdf](http://www.storhy.net/train-in/PDF-TI/Poster/Poster_I.pdf)

L'hydrogène est produit principalement à partir de gaz naturel même si des alternatives existent. Si un accroissement de la demande de piles à combustible survient, nous aurons également besoin d'un accroissement de centrales électriques pour la production de l'hydrogène. Par ailleurs, il est pertinent de relever que si l'électricité est produite avec du pétrole ou du charbon, les émissions de CO<sub>2</sub> pour la production de l'hydrogène seront supérieures à celles émises par les voitures à essence. Les enjeux sont donc similaires à ceux de la voiture électrique. Si l'électricité et l'hydrogène sont produits grâce à des énergies renouvelables, l'impact de leur production sera nettement moins négatif. Massachusetts Institute of Technology estime qu'il nous faudra 30 à 40 ans pour accomplir une production propre (HBC Group, 2014, slide 80).

#### **5.2.6.3 Avantages**

Nous insistons sur l'absence de pollution sonore, l'absence d'émissions de CO<sub>2</sub> et de particules fines, l'abondance de l'hydrogène, mais aussi le temps réduit pour faire un plein et l'autonomie qui reste supérieure à celle des véhicules électriques (HBC Group, 2014, slide 81).

#### **5.2.6.4 Inconvénients**

Tout d'abord, il y a le risque de l'explosivité et de l'inflammabilité de l'hydrogène qui est non-négligeable. Deuxièmement, le prix ; actuellement, les piles à combustible rendent les véhicules à l'hydrogène plus chers que les véhicules conventionnels. Troisièmement, l'hydrogène ne produit pas de l'énergie de manière efficace. Quatrièmement, le réservoir H<sub>2</sub> haute pression est encombrant et le rendement énergétique volumique est inférieur à l'essence ou au diesel. Finalement, il faut trouver un moyen d'évacuer la chaleur qui se dégage de la réaction (HBC Group, 2014, slide 82). Il est important aussi de garder à l'esprit que l'hydrogène est, comme l'électricité, produit via différentes sources. Certaines de ces sources détiennent une empreinte écologique conséquente.

#### **5.2.6.5 Infrastructures**

Il est difficile de recenser exactement combien de stations-service qui proposent de l'hydrogène actuellement. Nous pouvons estimer à quelques centaines le nombre de stations<sup>32</sup>. Ce nombre ne cesse néanmoins de croître au fil des mois et des années avec de nouveaux projets et le développement de nouveaux modèles de véhicules à pile à combustible.

---

<sup>32</sup> <http://www.netinform.net/H2/H2Stations/H2Stations.aspx?Continent=EU&StationID=-1>

Afin de promouvoir cette solution pour l'avenir, il est indispensable de rendre la recharge plus accessible en intensifiant la présence de stations-service qui proposent l'hydrogène. Une collaboration entre les filières hydrogènes et les autorités locales serait également bénéfique (HBC Group, 2014, slides 84-85).

#### **5.2.6.6 Conclusion**

Malgré une efficacité limitée, l'hydrogène présente un grand potentiel pour l'avenir. Nous nous attendons donc à un développement lent dans un premier temps avant un développement plus intensif par la suite. Deux nouvelles voitures à hydrogène à grande échelle (Toyota FCV et Honda FCEV) verront le jour en 2015 (HBC Group, 2014, slide 81).

## **6 Partie 2 : Le cycle de vie**

### **6.1 Définition et explication du concept**

L'étude de cycle de vie est utilisée pour quantifier l'impact environnemental durant toutes les étapes de vie du produit, de l'extraction des matières premières au recyclage et à la réutilisation. Réaliser ce type d'étude pour les véhicules propres n'est pas évident. En effet, les résultats peuvent varier de manière conséquente en fonction des paramètres et des facteurs pris en compte (Egede, P. et al., 2015, p. 233). Il est donc difficile de déterminer pour quelles situations et sous quelles conditions la conclusion d'un article scientifique est valide. L'une des raisons principales pour les divergences de résultats est liée au manque de transparence des facteurs importants dans le cycle de vie des véhicules propres (Egede, P. et al., 2015, p. 233). Généralement, les personnes qui ont recours au cycle de vie pour une étude n'ont pas accès à l'information primaire pour réaliser leur travail. Cela signifie que diverses parties prenantes vont être impliquées avec des sources différentes et des paramètres hétérogènes. Les informations recueillies sur la chaîne de production peuvent donc être disparates. S'ajoute à cela l'utilisation de chemins probables et les développements futurs inconnus pour compliquer le bon déroulement de l'étude (Egede, P. et al., 2015, p. 233).

Afin d'identifier l'impact environnemental des véhicules propres, il est important d'utiliser la méthodologie du cycle de vie d'après l'ISO 14040. Cette méthodologie a été globalement acceptée par les experts ces deux dernières décennies. Elle est

également approuvée à l'international et standardisée avec l'ISO 14040 et 14044 (ISO 14040:2009-11., 2009 ; ISO 14044:2006., 2006; Egede, P. et al., 2015, p. 233).

Plus précisément, l'ISO 14040 spécifie « les principes et le cadre applicables à la réalisation d'analyses du cycle de vie (ACV) comprenant: la définition des objectifs et du domaine d'application ACV, la phase d'inventaire du cycle de vie, la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie, la phase d'interprétation du cycle de vie, la communication et la revue critique de l'analyse du cycle de vie, les limitations de l'analyse du cycle de vie, la relation entre les phases de l'analyse du cycle de vie et les conditions d'utilisation des choix de valeurs et des éléments facultatifs <sup>33</sup>.» Quant à l'ISO 14044, il spécifie « les exigences et fournit les lignes directrices pour la réalisation d'analyses du cycle de vie (ACV) comprenant: la définition des objectifs et du champ de l'étude, la phase d' inventaire du cycle de vie, la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie, la phase d'interprétation du cycle de vie, la communication et la revue critique de l'analyse du cycle de vie, les limitations de l'analyse du cycle de vie, la relation entre les phases de l'analyse du cycle de vie et les conditions d'utilisation des choix de valeur et des éléments facultatifs <sup>34</sup>. »

Toutefois, dans cette étude, ces étapes ne font pas partie intégrante du travail étant donné que l'on relate les résultats obtenus dans diverses études. L'idée étant de voir si les variations sont étendues et si une tendance se révèle.

Ensuite, la structure de l'analyse du cycle de vie à proprement parler peut être subdivisée en cinq étapes clés. Premièrement, nous étudions la production. Cette étape se compose des matières premières, des composants et de l'assemblage. Deuxièmement, nous devons tenir compte de la logistique et du transport. Cela concerne les transports routiers, mais aussi le transport ferroviaire et maritime. Troisièmement, nous observons la phase d'utilisation qui se divise principalement en: consommation d'énergie, entretien et maintenance. Quatrièmement, il est question des infrastructures d'approvisionnement. Les stations-service et les points de charge font partie de ces infrastructures. Cinquièmement, lors de la fin de vie du véhicule, le recyclage est la dernière étape clé. Elle peut être subdivisée en recyclage et consommation liée.

---

<sup>33</sup>[http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=37456](http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=37456)

<sup>34</sup>[http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=38498](http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38498)

Ces dernières années, bon nombre d'études de cycle de vie ont été publiées sur les véhicules électriques et autres véhicules propres, parfois en les comparant (Hawkins, T. et al., 2012 ; Hill, N., 2013 ; Wilson, L., 2013 ; Aguirre, K. et al., 2012 ; Ma, H. et al., 2011 ; Egede, P. et al., 2015 ; Patterson, J., et al., 2011 ; Lucas, A., et al., 2011 ; Helms, H., 2010 ; Faria, R., et al., 2012 ; Messagie, M., 2013 ; Notter, D. A., et al., 2010 ; Samaras, C., et al., 2008). D'autres études ont été réalisées pour certains composants comme les batteries au lithium (Majeau-Bettez, G., 2011 ; Ellingsen, L., et al., 2014 ; Sullivan, J. L., et al., 2012 ; Zackrisson, M., et al., 2010).

Pour illustrer la complexité du travail du cycle de vie, les études de Hawkins et al. ainsi que celle de Nordelöf et al. se basent sur 55 et 79 études respectivement sans arriver à des résultats semblables (Egede, P. et al., 2015, p. 235).

L'impact environnemental des voitures propres dépend de nombreux facteurs externes, internes et de consommation d'énergie (Annexe I6). Nous notons cinq facteurs d'influence qui peuvent être subdivisés par la suite ; le véhicule, l'utilisateur, l'infrastructure, les conditions d'utilisation et le modèle utilisé pour le cycle de vie. Tous ces facteurs ne sont pas évidents à analyser car ils présentent beaucoup d'inconnues.

Il est important de noter que lors d'une analyse de cycle de vie, tout véhicule doit avoir une estimation de vie avec un certain kilométrage. Et cela afin d'estimer combien de kilomètres le véhicule va parcourir pour définir les émissions liées à l'utilisation mais aussi pouvoir amortir les émissions de production sur un certain nombre de kilomètres. Par ailleurs, nous observons régulièrement plusieurs scénarios en fonction des facteurs d'influence mais aussi en fonction des évolutions attendues, comme les émissions liées à l'énergie qui devraient diminuer au fil des années. Ces scénarios permettent de garder l'esprit ouvert et de couvrir plusieurs pistes réalistes (Egede, P. et al., 2015, p. 237). De plus, les éléments qui impactent l'environnement sont généralement calculés en équivalence. En effet, comme stipulé plus haut, le CO<sub>2</sub>eq. inclut du méthane (CH<sub>4</sub>) et du monoxyde de diazote (N<sub>2</sub>O). Les proportions ne sont toutefois pas les mêmes.

## **6.2 L'analyse du cycle de vie**

### **6.2.1 Matières premières**

L'extraction et la transformation des matières premières sont des éléments-clés de cette étude. En effet, c'est le point de départ pour l'étude du cycle de vie. Afin d'obtenir une voiture réellement propre, les émissions doivent être limitées à tous les niveaux de la chaîne. Nous entamerons donc le sujet en passant en revue brièvement les éléments-clés de la production de ces voitures. La liste des éléments étudiés n'est donc pas exhaustive de tous les éléments présents dans les voitures d'aujourd'hui.

#### **6.2.1.1 Métaux**

Les métaux font partie intégrante du processus et sont responsables en grande partie des externalités des véhicules. A ce niveau, un débat persiste entre le poids des matériaux et les émissions liées à la production. En effet, une voiture plus légère consomme logiquement moins et a, en conséquence, besoin de moins de puissance ce qui se répercute ainsi dans les émissions de CO<sub>2</sub>. Toutefois, nous constatons que certains éléments, bénéfiques à l'utilisation, sont plus nocifs à l'extraction et au recyclage. Il est donc essentiel de garder une vue d'ensemble à tous les niveaux.

##### **6.2.1.1.1 Aluminium**

L'aluminium, sous forme de divers alliages, est l'un des éléments les plus utilisés dans l'automobile aujourd'hui. Il n'est pas vu comme un élément rare ou à risque pour les années à venir (M.L.C.M. Henckens, M.L.C.M. et al., 2014, p. 5.; Annexe 17). Il serait même l'un des éléments les plus abondants.

La bauxite est l'élément miné afin d'obtenir de l'alumine. L'alumine est ensuite transformée en aluminium (World aluminium, 2013, p. 16). Des efforts importants ont été réalisés lors de certaines étapes de la production pour réduire l'empreinte écologique de l'aluminium. En 2010, les émissions de CO<sub>2</sub>eq. liées à la production de l'aluminium ont été réduites de près de 90% en comparaison avec les années 1990 (World aluminium, 2013, p. 1).

Après avoir puisé nos informations dans les publications de World Aluminium et afin d'évaluer les émissions de CO<sub>2</sub> émises par la production de l'aluminium, nous tiendrons compte de deux bases de données. La première est globale et quantifie l'impact du secteur entier (Global - GLO). La deuxième se base sur les mêmes

chiffres mais en excluant la Chine (Rest of World - RoW). Notons que pour un kilogramme d'aluminium, 10,8 kg CO<sub>2</sub>eq. (RoW) et 16,5 kg CO<sub>2</sub>eq. (GLO) sont rejetés dans l'atmosphère (World aluminium, 2014, p. 13). La Chine a donc un impact considérable sur les externalités du secteur.

Bien que la première source parait fiable, nous souhaitons tout de même indiquer qu'une autre source nous indique des taux d'émissions inférieurs. Cet écart est sans doute lié aux divergences de paramètres et aux variations de données. Il est question de 4 kg CO<sub>2</sub>eq. pour les pays européens de l'OECD (Hill, N., 2013, slide 8). Les pays ne faisant pas partie de l'OECD se situent quant à eux, aux alentours de 8 kg CO<sub>2</sub>eq. par kilogramme d'aluminium (Hill, N., 2013, slide 8). Ces données sont deux fois moins importantes que celles avancées par notre source principale. Nous utiliserons donc les données des deux sources afin de voir si le ratio entre l'aluminium et l'acier reste équivalent en fonction des paramètres.

Les rejets sont principalement liés à l'électricité utilisée qui représente entre 25 % et 80 % de l'empreinte écologique de l'aluminium (Annexes 18 – 21). Il faut donc insister sur le fait que ces émissions peuvent être réduites de manière conséquente si la source d'énergie utilisée est renouvelable. Enfin, dans les étapes de production de l'aluminium, l'électrolyse<sup>35</sup> est de loin l'étape la plus demandeuse d'électricité. En effet, cette étape représente de 43 à 56 % des émissions totales (Annexe 18 – 21).

**Tableau I.** Potentiel de réchauffement climatique (GLO) en kg CO<sub>2</sub>eq./kg d'aluminium

GLO	Bauxite Mining	Alumina Refining	Anode/ Paste Production	Electrolysis	Ingot Casting	Total	Primary Energy (MJ)
Electricity	<0.1	0.4	<0.1	9.2	<0.1	9.7	131
Process & Auxiliary	<0.1	0.7	0.4	2.3	<0.1	3.5	19
Thermal Energy	<0.1	2.2	0.1	<0.1	0.1	2.4	31
Transport	0	0.5	<0.1	0.4	0	0.8	10
<b>Total</b>	<b>&lt;0.1</b>	<b>3.8</b>	<b>0.6</b>	<b>11.9</b>	<b>0.2</b>	<b>16.5</b>	<b>190</b>

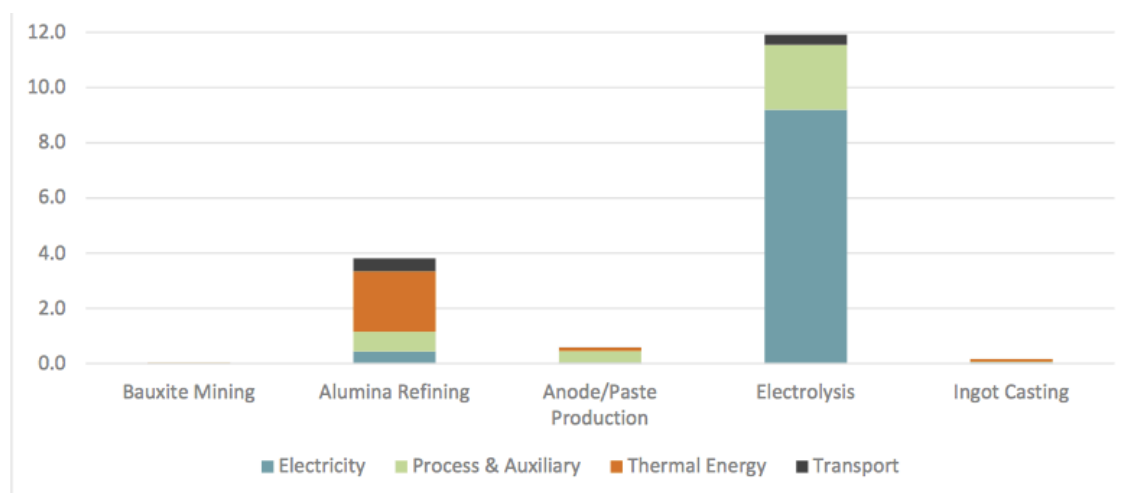
Le tableau I indique les émissions détaillées de la production de l'aluminium. Nous pouvons observer pour chaque étape de la production de l'aluminium (extraction de la Bauxite, raffinage de l'alumine, production de la

<sup>35</sup> « L'électrolyse est un processus d'échange au cours duquel l'énergie électrique est transformée en énergie chimique. La réaction a lieu dans une solution d'eau salée: l'électrolyte »  
<http://www.lenntech.fr/electrolyse.htm#ixzz3gcYUYv00>

pâte, l'électrolyse et le moulage) les taux émissions liés aux différents facteurs (électricité, processus et auxiliaire, énergie thermique et transport). De plus, nous disposons de l'intensité énergétique de chaque facteur.

Source : World aluminium, 2014

**Graphique 2.** Répartition du potentiel de réchauffement climatique (GLO) en kg CO<sub>2</sub>eq./kg d'aluminium.



Le graphique 2 nous présente les émissions de CO<sub>2</sub> par étape de production en fonction des données fournies dans le tableau 1. Nous observons que l'électrolyse représente de loin l'étape la plus nocive pour l'environnement.

Source : World Aluminium, 2014

#### 6.2.1.1.2 Acier

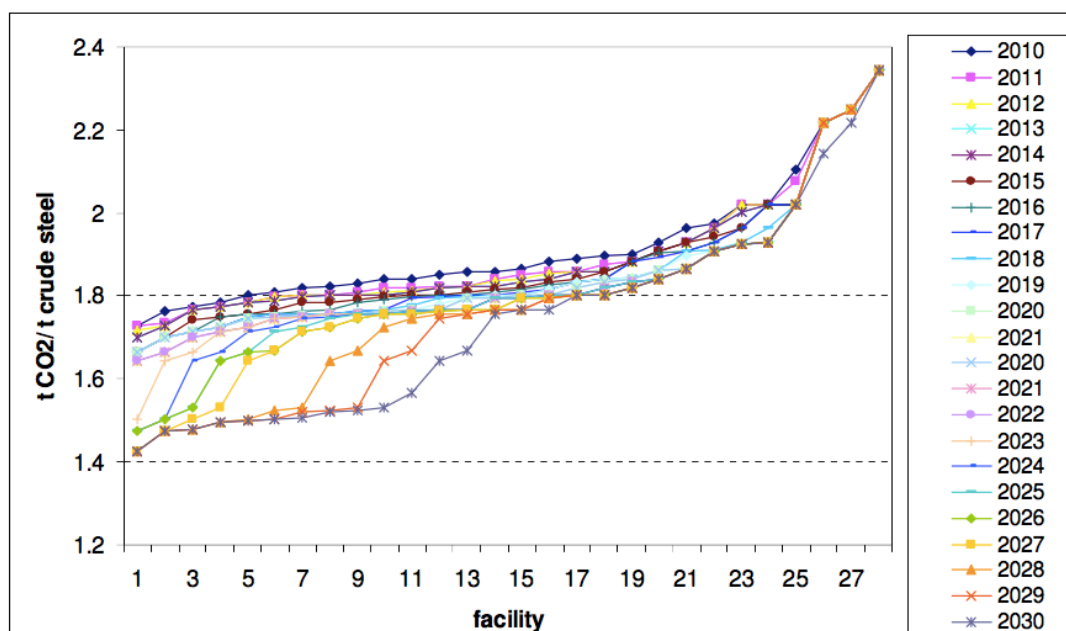
L'acier, robuste et malléable<sup>36</sup>, est encore fortement présent dans l'automobile. En effet, l'acier est toujours utilisé pour certains châssis et autres panneaux qui constituent une voiture. Toutefois, à cause de sa masse, l'acier est de plus en plus remplacé par l'aluminium ou d'autres matériaux plus légers.

L'industrie de l'acier fait partie des industries les plus intensives en CO<sub>2</sub> (Prado, N., 2012). En moyenne, pour produire 1 kg d'acier, il faut compter 1,8 kg CO<sub>2</sub>eq (World steel association, 2014, p. 2). Nous relevons également les données d'une source alternative, représentée dans le graphique ci-dessous, qui nous communique les émissions en fonction du type d'infrastructures (Graphique 3.). Le type d'infrastructures n'est pas communiqué mais elles sont classées par taux d'émission. Nous observons les mêmes résultats que ceux communiqués dans la première étude. Les émissions liées à la production d'acier s'élèvent en moyenne aux alentours de 1,8 kg CO<sub>2</sub>eq. (N., Pardo, 2012, p. 36). Toutefois, comme pour

<sup>36</sup>[http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/ocr\\_gateway\\_pre\\_2011/rocks\\_metals/5\\_cars\\_for\\_scrap3.shtml](http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/ocr_gateway_pre_2011/rocks_metals/5_cars_for_scrap3.shtml)

l'aluminium, une étude supplémentaire sur laquelle se base en partie notre travail indique des rejets inférieurs. Cette dernière indique des rejets des pays européens membre de l'OECD de 0,8 kg CO<sub>2</sub>eq. par kilogramme et des émissions pour les pays ne faisant pas partie de l'OECD aux alentours de 1,2 kg CO<sub>2</sub>eq. par kilogramme (Hill, N., 2013, slide 8). Ces chiffres se situent nettement en dessous des chiffres avancés par les autres sources. De manière identique à l'aluminium, cet écart est sans doute lié aux paramètres pris en compte et aux données utilisées. Pour ces raisons, et comme indiqué précédemment, nous allons comparer l'aluminium et l'acier en fonction des données propres aux différentes sources pour analyser le ratio qui les lie.

**Graphique 3.** Tonnes de CO<sub>2</sub>eq. par tonne d'acier produit en fonction des installations.



Le graphique 3 présente les tonnes de CO<sub>2</sub> émises par tonne d'acier produit en fonction des différents types de production. Il permet également de voir le potentiel d'évolution des émissions de production au fil des années. Source : N., Pardo, 2012

### 6.2.1.1.3 Comparaison entre l'acier et l'aluminium

Afin de tenir une comparaison équivalente entre l'acier et l'aluminium, il est essentiel de se baser sur des mesures équivalentes. Nous prenons donc la moyenne estimée des émissions lors de la production d'acier qui est de 1,8 kg CO<sub>2</sub>eq. tandis que les rejets lors de la production globale d'aluminium s'élèvent à 16,5 kg CO<sub>2</sub>eq. Si l'on tient compte ensuite que la densité de l'acier s'élève à 7800kg/m<sup>3</sup> et que celle de

l'aluminium s'élève à 2700 kg/m<sup>3</sup><sup>37</sup> nous pouvons calculer l'équivalence des deux éléments. En multipliant les éléments pour obtenir un base commune et en divisant la somme de l'aluminium par la somme de l'acier nous obtenons 3,17. A masse volumique équivalente, la production globale d'aluminium est donc 3,17 fois plus nocive pour l'environnement en termes de CO<sub>2</sub>eq. En revanche, si l'on retient les émissions de production d'aluminium en excluant la Chine, nous obtenons un ratio de 2,07. Avec ces paramètres, l'aluminium est seulement 2 fois plus nocif que l'acier, à masse volumique équivalente.

Nous réalisons la même opération pour la source qui avançait des chiffres inférieurs aux autres estimations. Nous arrivons à un ratio de 2,3 pour les pays ne faisant pas partie de l'OECD et à un ratio de 1,7 pour les pays européens faisant partie de l'OECD. Cela signifie que l'aluminium est 1,7 et 2,3 fois plus nocif pour l'environnement à masse volumique équivalente. Ces résultats ne sont finalement pas si divergents de ce qui a été obtenu préalablement. En effet, lorsqu'on perçoit l'impact de la Chine, les résultats européens semblent cohérents avec les résultats obtenus précédemment. Cet écart est la conséquence d'infrastructures plus modernes, de réglementations plus importantes et de sources d'énergies plus propres. Par ailleurs, les données concernant les pays ne faisant pas partie de l'OECD sont en-deçà de ce qui est attendu mais reste néanmoins dans la fourchette prévue.

La production globale d'aluminium est donc entre 2 et 3 fois plus nocive pour notre planète, mais avec une densité nettement moindre, il permet de réaliser des économies d'émission lors de l'usage. Il est donc difficile d'estimer quel élément l'emporte sur la durée de vie entière. Nous imaginons que les résultats sont comparables. Toutefois, plus un véhicule va parcourir des kilomètres, plus il deviendra intéressant d'utiliser l'aluminium pour sa construction. De plus, avec les réglementations, l'avancement des technologies et l'évolution des processus de fabrication, ce ratio devrait diminuer de manière conséquente au fil des années.

Il est théoriquement possible d'établir le point de rupture entre l'acier et l'aluminium. Cependant, certaines inconnues persistent pour réaliser ce calcul. Principalement, nous ne détenons pas les données pour estimer la diminution des émissions de manière fiable.

---

<sup>37</sup> <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=217&pageid=2144417130>

#### 6.2.1.1.4 Lithium

Le lithium est un élément-clé à la production de batteries et constitue l'un des principaux points en défaveur des voitures électriques. Il est donc important d'analyser cet élément en profondeur. Du fait que ses réserves soient limitées, le lithium figure parmi les éléments chimiques rares. (Vikström, H. Et al., 2012, p. 3). Premièrement, concernant les ressources disponibles de lithium pour estimer son potentiel de solution à long terme, les réserves actuelles sont dynamiques et dépendent de nombreux facteurs tels que la technologie, la demande, les tensions politiques et les facteurs sociaux. Certains auteurs estiment que d'autres réserves seront découvertes en fonction de la croissance de la demande (Vikström, H. Et al., 2012, p. 4). Les courbes de disponibilités cumulées ont été utilisées dans cette analyse pour tenter d'estimer au mieux les réserves (Annexe 22).

Le lithium peut être trouvé sous forme de minerais, mais aussi dans des solutions salées qui apparaissent dans certains lacs desséchés. Le taux d'extraction des minerais varie entre 60 et 70% (Vikström, H. Et al., 2012, p. 5). Le Chili en particulier détient une réserve immense avec le Salar de Atacama. Il est intéressant de souligner la présence, en quantités abondantes mais en très faible concentration, de particules de lithium dans les océans. La disponibilité réelle du lithium dans les océans est à l'origine de nombreux débats car aucune technologie ne permet son extraction de manière économiquement et énergiquement efficiente et efficace (Vikström, H. Et al., 2012, p. 8.; Annexe 23).

La quantité de lithium objectivement disponible dans les 112 dépôts est entre 15 et 30 Mt (Vikström, H. Et al., 2012, p. 9.; Annexe 24). Cela ne tient pas compte des réserves potentielles des océans. La production de lithium en revanche ne cesse d'augmenter et les projections de projections futures, nous montre l'importance de trouver une solution viable pour recycler le lithium ou pour le substituer (Vikström, H. Et al., 2012, pp. 13-16; Annexes 22, 25).

La plus grande partie des émissions de CO<sub>2</sub> dans le lithium est lié à la production et l'extraction des matériaux (K., ISHIHARA, 2001, p. 1, Annexe 26). Au niveau du potentiel de réchauffement climatique sur l'ensemble de son cycle de vie, il est question de 22kg CO<sub>2</sub>eq./kg de batterie lithium-Ion (li-Ion) (G. Majeau-Bettez, G, et al., 2011, p. 4552). Ce résultat est toutefois deux à trois fois supérieur à celui produit par des études antérieures. Cependant, ces études ne se basaient pas sur des

paramètres identiques. Samaras et Meisterling (Samaras, C., 2008) arrivent à un résultat de 9,6 kg CO<sub>2</sub>eq./kg de batterie li-Ion tandis que Notter D. A. et al. (Notter, D. A., 2010) arrivent à 6kg CO<sub>2</sub>eq./kg de batterie lithium-Ion.

Bien que les batteries au lithium présentent des atouts considérables, elles émettent des taux de pollution extrêmement élevés. Il faut réduire au maximum cette empreinte écologique, d'autant plus que la demande ne cesse de croître.

#### 6.2.1.1.5 Cuivre

Le cuivre est un composant-clé dans l'automobile étant donné qu'il constitue l'ensemble du câblage présent au sein d'un véhicule. Le cuivre est un élément 100% recyclable et ce sans perte. Bien que le recyclage du cuivre soit omniprésent aujourd'hui, il est tout de même indispensable d'extraire et de produire du cuivre. Cette opération est encore intensive en CO<sub>2</sub>eq. actuellement. En Europe, nous observons 3 kg CO<sub>2</sub>eq. rejeté pour 1 kg de cuivre (ECI, 2012). En combinaison avec le cuivre recyclé, ce chiffre est revu à la baisse.

#### 6.2.1.2 Verre

Le verre laminé et le verre tempéré sont présents dans tous les véhicules hormis certaines exceptions. Il est difficile d'identifier la quantité de carbone rejetée par le verre utilisé dans l'automobile. Les vitres utilisées dans les véhicules sont composées de deux couches de verres séparées d'un film<sup>38</sup>. Nous avons donc pris du verre ordinaire comme repère. Lors de sa création, il faut compter environ 0,6 kg CO<sub>2</sub>eq. par kilogramme de verre ordinaire<sup>39</sup>. Le verre peut être recyclé, ce qui diminue son empreinte écologique.

#### 6.2.1.3 Plastique

Les plastiques représentent encore un composant important de l'automobile. Différentes formes de ce matériau sont utilisées à l'extérieur et à l'intérieur de nombreux véhicules pour sa légèreté et sa malléabilité. Nous constatons une fourchette d'émissions qui varie en fonction du plastique et de la forme qu'il prend. D'après plusieurs études, les émissions sont comprises entre 0,3 et 1,9 kg CO<sub>2</sub>eq. par kilogramme de plastique (Boustead, I., 1997 ; Sullivan, J.L. et al., 2010, p. 17; Harald Pilz Bernd Brandt Roland Fehringer, 2010<sup>40</sup>).

---

<sup>38</sup> <http://www.agc-automotive.com/english/products/lami.html> ; <http://www.agc-automotive.com/english/products/temper.html>

<sup>39</sup> <http://www.planetoscope.com/co2/261-emissions-mondiales-de-co2-dans-l-atmosphere.html>

<sup>40</sup> <http://lca.plasticseurope.org/index.htm>

Finalement, le plastique peut également être recyclé, ce qui tend à diminuer les externalités négatives.

#### **6.2.1.4 Caoutchouc**

Un dernier élément qui recèle un impact important pour l'environnement est le caoutchouc. En effet cet élément, utilisé pour les pneumatiques des véhicules depuis de nombreuses années, est souvent lié à un impact négatif sur l'environnement. Le caoutchouc provient des arbres et du pétrole. De plus, le caoutchouc a connu beaucoup de difficultés concernant son recyclage. Aujourd'hui, il existe un label européen pour les pneus (EC1222/2009). Toutefois, ces labels sont liés principalement à l'économie de carburant, à la pollution sonore et à l'évacuation de l'eau (GE Capital Fleet Services, 2009). L'empreinte écologique du caoutchouc se situe entre 1,16 – 1,53 kg CO<sub>2</sub>eq. par kilogramme en fonction du type d'usine (S. P. Dayataratne, S.P. et al., 2014, p.100). Il est ici question de la fabrication du Caoutchouc au Sri Lanka. Ce pays représente un niveau moyen mais il est possible que d'autres pays soient plus ou moins efficaces.

#### **6.2.2 Production et assemblage**

Dans cette analyse de la production et de l'assemblage des voitures, nous tenons à analyser la production des différents véhicules et plus particulièrement l'impact environnemental des batteries. Nous allons également aborder la production des différents carburants. C'est sans doute l'aspect le plus important de cette étude car ce sont ces sources d'énergies et la façon dont elles sont produites qui font la différence et qui peuvent faire d'un véhicule 'propre', un véhicule encore plus nocif pour l'environnement.

Dans de nombreuses études, les auteurs utilisent le modèle américain GREET (Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model)<sup>41</sup> pour estimer les externalités liées à la production et au cycle de vie d'une voiture. Ce modèle tient compte de tous les facteurs et estime les émissions liées à un ou plusieurs véhicules en fonction de leur type et leur poids. Ce modèle est un outil important car les facteurs qui entrent en jeu lors de la production de véhicules sont compliqués à quantifier. Effectivement, après avoir recherché longuement, il est compliqué de mettre la main sur les informations pertinentes pour tous les facteurs. Malheureusement, le fait que beaucoup d'études se basent sur ce modèle signifie que la base de données utilisée pour faire une étude du cycle de vie est souvent la même.

---

<sup>41</sup> [https://greet.es.anl.gov/fleet\\_footprint\\_calculator](https://greet.es.anl.gov/fleet_footprint_calculator)

Actuellement, il n'y a pas d'objectifs spécifiques pour les émissions de CO<sub>2</sub>eq. lors de la production d'un véhicule. Ce manque de réglementation n'encourage pas suffisamment les constructeurs automobiles à améliorer cet aspect du cycle de vie.

### **6.2.2.1 Production et assemblage de la voiture**

Les voitures à combustion, hybride, hydrogène, CNG, LPG, plug-in et les voitures électriques suivent approximativement le même processus de fabrication et ce parfois sur les mêmes chaînes de production. Les matériaux et pièces utilisés sont sensiblement les mêmes hormis pour les éléments qui touchent aux batteries et aux moteurs.

L'une des principales problématiques d'estimation des émissions de production est liée au kilométrage. Les paramètres ne sont pas identiques ce qui entraîne des résultats divergents.

#### 6.2.2.1.1 Production de la voiture à combustion

La production et l'assemblage d'un véhicule à combustion représentent un rejet de 7 000 kg CO<sub>2</sub>eq. (Wilson, L., 2013, pp. 11,21). Les chiffres avancés par N. Hill (Hill, N., 2013, slide 9) sont de l'ordre de 6 400 kg CO<sub>2</sub>eq. De même, l'étude de Hawkins (Hawkins, T. et al., 2012, p. 56) annonce un rejet de 6 450 kg CO<sub>2</sub>eq. Ces valeurs comprennent tous les facteurs d'influence directe et indirecte ainsi que les pertes.

Les trois études nous confirment que nos estimations de production sont cohérentes. Ces études représentent également le taux d'émission des véhicules CNG et LPG qui ont une composition sensiblement similaire.

La voiture à combustion avec un système d'hybridation représenterait un rejet de 8 000 kg CO<sub>2</sub>eq. (Wilson, L., 2013, p. 6) ; une estimation légèrement inférieure à celle d'un véhicule à hydrogène, à paramètres équivalents (Gao, L., 2012, p 612. ; Miotti, M., 2013, p. 8 ; Annexe 27.).

#### 6.2.2.1.2 Production de la voiture électrique

Les émissions liées à la production d'une voiture électrique sont estimées à 10 500 kg CO<sub>2</sub>eq. (Hill, N., 2013, slide 9.; Wilson, L., 2013, p. 16). D'après l'étude de Hawkins (Hawkins, T. et al., 2012, p. 57), les émissions de CO<sub>2</sub> causées par la

production des véhicules électriques sont estimées à 13 000 kg CO<sub>2</sub>eq. Cependant, l'étude de Ma H. (Ma, H., 2011, p. 163) nous annonce un rejet de 10 000 kg CO<sub>2</sub>eq. En fonction des paramètres, les émissions de production d'un véhicule électrique varient donc.

Par ailleurs, la longévité des batteries pose problème car elle est difficile à estimer de manière fiable ce qui pose problème lors des estimations. Cela dit, la plupart des batteries actuelles sont testées pour plus de 1 500 charges complètes. Avec une autonomie d'au moins 100 kilomètres, nous obtenons une espérance de vie de plus de 150 000 km.

Les batteries d'un véhicule représentent de 35 à 41% de son potentiel de réchauffement planétaire de la production tandis que le moteur électrique ne représente que 7 à 8% (Hawkins, T. et al., 2012, p. 56). Toutefois, l'utilisation peut se révéler tout aussi nocive que l'utilisation d'un véhicule ordinaire. Tout dépend de la source d'électricité.

Finalement, un véhicule hybride rechargeable aura tendance à se positionner entre l'hybride et le véhicule électrique en fonction de ses capacités électriques (Gao, L., 2012, p 612).

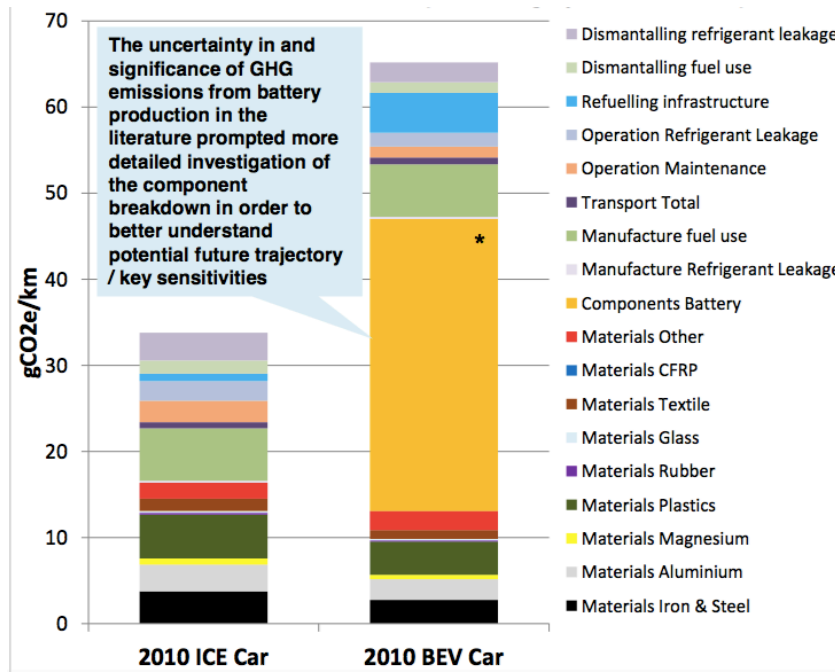
#### 6.2.2.1.3 Comparaison de production

Le graphique ci-dessous, repris de l'étude du cycle de vie des hybrides et des véhicules électriques de N. Hill (Hill, N., 2013, slide 9), nous présente une vue détaillée de la production d'un véhicule électrique comparé à un véhicule à combustion ordinaire (graphique 4.).

L'installation et la production des infrastructures de recharge pour les voitures électriques ou les hybrides rechargeables s'avèrent nocives. En effet, bien qu'une grande majorité des utilisateurs de voitures électriques détiennent un point de recharge chez eux, l'implantation d'un réseau de bornes reste indispensable pour la mobilité. L'écart est lié au fait que le réseau des stations-essence est déjà présent et ne nécessite donc que de légères modifications d'infrastructure. Ces émissions devraient toutefois diminuer avec les années et au cours de la mise en place des infrastructures. L'écart flagrant se situe une fois de plus au niveau de la production de batteries mais concerne aussi leur recyclage inefficace. Les émissions liées aux batteries sont prévues à la baisse pour pouvoir rivaliser avec les véhicules à

combustion d'ici 2030 (Hill, N., 2013, slide 10. ; Annexe 28). Nous aborderons le sujet des batteries plus en profondeur plus loin dans l'étude.

**Graphique 4.** Comparaison des émissions d'un véhicule à combustion avec un véhicule électrique



Le graphique 4 détaille et compare les différents éléments qui composent les véhicules à combustion et les véhicules électriques. Les facteurs importants sont tous repris dans une couleur différente pour nous permettre de visualiser la pollution liée à chaque composant. Les batteries font culminer les émissions de production des véhicules électriques.

Source : Hill, N., 2013, slide 9

Ensuite, l'utilisation de matériaux plus légers peut aussi engendrer une hausse des émissions de production. Il n'y a aucun doute que le fait de produire des voitures plus légères permet d'accroître l'autonomie et permet, de ce fait, de réduire la consommation et les émissions lors de l'utilisation. Toutefois, nous observons que l'utilisation de métaux tels que l'aluminium peut s'avérer trois fois moins propre à la production, ce que nous avons démontré ci-dessus, et plus difficile à recycler (Mischi, M., 2014). Le plastique fait également partie des éléments-clés en ce qui concerne les émissions des véhicules. Néanmoins, recyclé, il permet en théorie de limiter ces émissions. Ces éléments sont produits dans des quantités semblables pour les différents véhicules et ne présentent donc pas un poids pour un seul véhicule mais bien pour l'ensemble.

Finalement, concernant la source d'énergie pour produire et assembler les composants, il faut une quantité considérable d'électricité et de carburant pour

opérer tous les processus de production et d'assemblage et ainsi obtenir un produit fini. Les études ne tiennent souvent pas compte de ces émissions indirectes. Toutefois, ces dernières sont semblables pour les différents types de voitures et représentent donc une problématique générale de l'automobile et non pas une problématique d'un modèle de véhicule propre en particulier.

#### 6.2.2.1.4 Assemblage

Les externalités négatives de l'assemblage des véhicules sur les chaînes de production sont essentiellement liées à la consommation importante d'énergie. Le meilleur moyen de limiter leurs externalités est donc d'utiliser des sources d'énergies renouvelables. Cela étant dit, il est aussi important de tenir compte des externalités telles que la toxicité de l'eau afin de les limiter au maximum.

Depuis quelques années, l'engagement des constructeurs automobiles dans le combat contre leur empreinte écologique s'intensifie. Il est clair que de nombreuses usines d'assemblage ne sont pas à la pointe de la technologie au vu des coûts importants que cela engendre. Toutefois, les nouvelles usines sont de plus en plus attentives à la problématique du gaz à effet de serre. Nous observons notamment que Renault a introduit à Tanger, au Maroc, la première usine zéro émission de CO<sub>2</sub><sup>42</sup>. Cette dernière a, d'après le groupe, réduit ses émissions de CO<sub>2</sub> de 98% et sa consommation d'eau de 70%. De plus, les résidus d'eau ne seront pas rejetés dans l'écosystème avant d'avoir été traités. Renault détient désormais l'ISO 14001 pour toutes ses chaînes de production. Ces 15 dernières années, Renault a réussi à réduire sa consommation d'énergie de 30%, sa consommation d'eau de 65% et ses résidus de 70%<sup>43</sup>. Nous avons illustré cette partie par le cas de Renault mais les autres constructeurs tentent de suivre la même tendance.

#### 6.2.2.1.5 Emissions et particules

Il est important de ne pas se focaliser exclusivement sur les émissions de CO<sub>2</sub>. C'est pourquoi nous avons jugé intéressant d'analyser le graphique ci-dessous proposé par Hawkins (Hawkins, T. et al., 2012, p. 57. ; Graphique 5). Ce graphique présente tous les impacts de production de la voiture à combustion et de la voiture électrique. Il reprend donc non seulement l'impact sur le réchauffement climatique, mais également sur l'environnement dans son ensemble ainsi que l'impact sur notre santé.

<sup>42</sup> <http://group.renault.com/en/our-company/locations/renault-locations/tangier-plant/>;  
<http://group.renault.com/en/commitments/environment/environmental-policy/>

<sup>43</sup> [http://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/business-fundings/france/715\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/business-fundings/france/715_en.htm)

Il semble important de stipuler que les données pour réaliser cette étude sont parfois basées sur des hypothèses et peuvent donc varier plus ou moins fortement en fonction de ces hypothèses mais aussi des données. Néanmoins, les résultats donnent une idée cohérente sous les conditions actuelles. Etant donné le taux d'émission élevé lors de la production, plus un véhicule électrique réalisera de kilomètres, plus il deviendra avantageux. La réduction du CO<sub>2</sub> résultant du cycle de vie d'un véhicule électrique passe de 9 - 14% pour 100 000 km à 27 - 29% pour 200 000 km et ce comparé à un véhicule à essence moyen ; il s'agit donc d'un facteur crucial (Hawkins, T. et al., 2012, p. 57).

Outre les impacts précités, nous pouvons également analyser les autres impacts qui sont tout aussi importants. Tout d'abord, la quantité d'acidification de la terre (TAP) est similaire pour les deux types de véhicules, mais leurs origines diffèrent. Près de 70% de cette acidification provient de la production de métaux précieux pour le catalyseur des pots d'échappement des voitures conventionnelles. Pour un véhicule électrique, cette acidification est liée aux besoins de cuivre, de nickel et d'aluminium pour les batteries et les moteurs. Près de 70% de l'acidification du cycle de vie est causé par le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) (Hawkins, T. et al., 2012, p. 58).

Ensuite, nous observons les particules fines, PMFP (Particulate Matter Formation Potential). Ces dernières suivent la même tendance que l'acidification de la terre. Utiliser de l'électricité produite grâce au gaz, ou même en suivant la moyenne européenne, produit moins de particules fines et s'avère moins nocif pour l'environnement. Néanmoins, nous constatons un niveau plus élevé dans le cas où l'électricité est produite grâce au charbon.

Le SMOG, POFP (Photochemical Oxidation Formation Potential) dans le graphique 5, est l'une des catégories où la voiture électrique est performante. On constate des valeurs nettement inférieures malgré les valeurs plus élevées pour la production des batteries (Hawkins, T. et al., 2012, p. 58).

Le potentiel de toxicité humain (HTP) est décisif. Nous observons une augmentation de cette toxicité non seulement lors de la production, mais aussi lors de l'utilisation. Les différentes possibilités de voitures électriques représentent une hausse de 180 à 290% par rapport aux véhicules conventionnels. Cet impact est dû en grande partie au cuivre utilisé. Près de 75% de la toxicité émise lors de la production provient des

résidus miniers de soufre et de leur traitement. Ce point présente une sérieuse faiblesse des véhicules électriques (Hawkins, T. et al., 2012, p. 58).

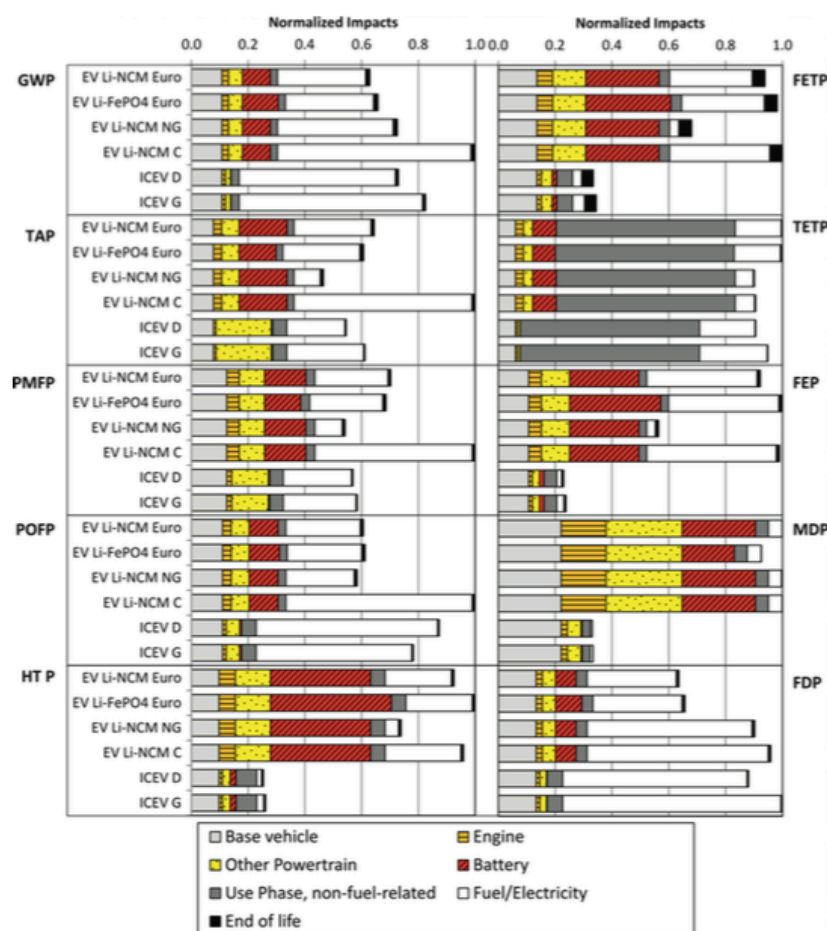
Le potentiel d'écotoxicité de l'eau potable (FETP) est similaire au potentiel de toxicité humain et démontre l'impact négatif des voitures électriques. Cela dit, l'impact causé par l'électricité à base de gaz naturel est nettement moindre (Hawkins, T. et al., 2012, p. 58).

L'écotoxicité potentielle des sols (FEP) est en revanche comparable entre les différents types de véhicules. Les émissions sont essentiellement recensées lors de l'utilisation du zinc, de l'usure des pneus et les particules de cuivre et de titane produits par l'utilisation des freins. Une fois de plus, la voiture électrique illustre un impact négatif (Hawkins, T. et al., 2012, p. 58).

L'appauvrissement métallique potentiel (MDP) est une question persistante en ce qui concerne les voitures électriques, qui sont gourmandes en métaux rares (lithium, cuivre, zinc, nickel, etc.). Cette question est d'ailleurs cruciale car les voitures électriques ont un potentiel trois fois supérieur (Hawkins, T. et al., 2012, p. 58).

L'appauvrissement du combustible fossile potentiel (FDP) peut être diminué de 25 à 36% si l'on se fie à l'énergie produite en Europe. Les voitures électriques qui comptent sur l'électricité au gaz ou au charbon ne contribuent pas à améliorer cette situation (Hawkins, T. et al., 2012, p. 58).

A vrai dire, d'après de nombreux articles, même une fois les externalités négatives de la production prises en compte, c'est la source d'énergie qui sera déterminante. Cependant, le graphique 5 illustre notre focalisation sur le CO<sub>2</sub> et l'abstraction des autres éléments nocif et certainement tout aussi indésirable.

**Graphique 5.** Impacts de production de voitures à combustion et électrique

Impacts normalisés de la production de véhicules à combustion et de véhicules électriques. Les résultats ont été normalisés pour obtenir l'impact total le plus large. Global warming (GWP), terrestrial acidification (TAP), particulate matter formation (PMFP), photochemical oxidation formation (POFP), human toxicity (HTP), freshwater eco-toxicity (FETP), terrestrial eco-toxicity (TETP), freshwater eutrophication (FEP), mineral resource depletion (MDP), fossil resource depletion (FDP), internal combustion engine vehicle (ICEV), electric vehicle (EV), lithium iron phosphate (LiFePO<sub>4</sub>), lithium nickel cobalt manganese (LiNCM), coal (C), natural gas (NG), European electricity mix (Euro).

Source : Hawkins, T. et al., 2012, p. 57

De manière similaire, la comparaison entre les véhicules à essence, les véhicules au CNG et les véhicules à l'hydrogène d'après l'étude de M. Miotti (Miotti, M., 2013, p. 8) illustre des points pour lesquels les voitures 'propres' se révèlent nettement plus nocives que les véhicules à combustion. Premièrement, le potentiel de réchauffement climatique est comparable pour les trois types de véhicules, ce qui ne valorise pas les véhicules 'propres' (Miotti, M., 2013, p. 8., Annexe 29). Deuxièmement, concernant les particules fines, les véhicules à essence se révèlent les moins nocifs, suivis de près par les véhicules au gaz naturel. En revanche, actuellement, les taux des véhicules à hydrogène sont clairement moins encourageants (Miotti, M., 2013, p. 9, Annexe 30).

Troisièmement, nous notons que l'acidification des véhicules à hydrogène se révèle conséquente tandis que les véhicules à essence et au CNG se valent (Miotti, M., 2013, p. 10., Annexe 31). Quatrièmement, les véhicules au CNG et à hydrogène ont un impact nettement plus conséquent que les voitures à essence (Miotti, M., 2013, p. 11., Annexe 32). Ces éléments ont également été estimés pour les années à venir. Les projections sont plus encourageantes même si cela ne surclasse certainement pas un véhicule à essence dans tous les domaines. Par ailleurs, nous ne connaissons pas l'impact réel de ces éléments. L'échelle à laquelle les éléments sont présents peut se révéler insignifiante. Cependant, il est vital de travailler pour améliorer tous les aspects des voitures actuelles, pas seulement le CO<sub>2</sub>. De plus, les éléments devraient être considérés sérieusement pour le long terme afin de déterminer l'impact réel de ces éléments.

#### 6.2.2.1.6 Production et assemblage de la batterie

Les différents impacts des batteries et les émissions qui y sont liées peuvent être relevés ci-dessus (Graphique 5). Toutefois, afin de mieux comprendre l'avancement des technologies concernant les batteries utilisées pour les véhicules électriques et certains hybrides, l'explication de quelques notions techniques s'impose.

« La puissance d'une batterie est déterminée par la quantité d'énergie électrique qu'elle contient dans un litre ou dans un kilogramme. Deux unités de mesure sont employées : le Watt heure par litre Wh/L ou le Watt heure par kilogramme Wh/kg. Les techniciens des véhicules électriques utilisent également une autre notion de puissance, le Watt par kilogramme W/kg déterminant la puissance instantanée maximale fournie par une batterie ou un pack de batteries (Arval, 2010, p. 37). »

« Un autre critère déterminant pour comparer les performances des batteries est leur durée de vie. En effet, les performances d'une batterie se dégradent en fonction du temps et certaines technologies sont beaucoup plus durables que d'autres. Le critère utilisé est le nombre de cycles de charge et décharge. En quelque sorte le nombre de fois où l'on va pouvoir « faire le plein » avant d'avoir à remplacer les batteries (Arval, 2010, p. 37). »

Depuis la commercialisation des voitures électriques de la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, les propriétés des batteries ont beaucoup évolué. Pour une masse et un volume presque identiques, la quantité d'énergie a été multipliée par un facteur de 3 à 5, voire plus (Arval, 2010, p. 38).

Grâce à cet avancement, l'autonomie dépasse largement les 100 km par charge complète. La durée de vie est un élément-clé, comme souligné précédemment, et atteint 1500 cycles pour la majorité des batteries disponibles. Cela signifie que les packs de batteries permettent des kilométrages conséquents avant d'être remplacés (Arval, 2010, p. 38). Plus précisément, une espérance de vie moyenne de 150 000 km est attendue.

Plusieurs types de batteries peuvent être utilisés pour les voitures électriques. Il s'agit des batteries de traction, nommées également batteries de puissance. Au total six technologies différentes sont disponibles pour équiper les véhicules électriques. Les constructeurs profitent de cette diversité de choix.

#### 6.2.2.1.6.1 Plomb/Acide - Pb

Les batteries au plomb sont faciles à fabriquer et à concevoir, sans oublier que les processus de production sont bien maîtrisés. Toutefois, ces batteries ont un poids conséquent, sont peu efficaces mais sont malgré tout compétitives au niveau du prix. Par ailleurs, le plomb reste un élément nocif (Arval, 2010, p. 38).

#### 6.2.2.1.6.2 Cadmium-Nickel - Ni-Cd

La batterie au nickel cadmium (Ni Cd) présente 60Wh/kg et 150 Wh/l avec une autodécharge de 10 à 20% par mois. Sans oublier que le cadmium est nocif et fortement réglementé au niveau européen (HBC Group, 2014, slide 41). Finalement, elle détient un «effet mémoire<sup>44</sup>» qui nécessite des décharges profondes régulières (Arval, 2010, p. 38).

#### 6.2.2.1.6.3 Nickel-Métal Hydrure - Ni-MH

La batterie au nickel métal hydrure (Ni MH) propulsât l'EVI de General Motors avant d'être choisie par Toyota pour ses voitures hybrides. Elle présente une capacité de 80 Wh/kg et 300 Wh/L avec une autodécharge mensuelle de 20 à 30 %. Malgré cette autodécharge, cette batterie s'avère être plus sûre que le lithium en cas de surchauffe (HBC Group, 2014, slide 41). Ces batteries ont été le standard pour équiper les voitures hybrides dans les premières années du 21<sup>ème</sup> siècle. Elles

---

<sup>44</sup> "Phénomène concernant les batteries rechargeables. Lors de leur utilisation, il arrive que les batteries ne soient pas déchargées complètement avant d'être remises à charger. Si cela se produit trop fréquemment, les batteries finiront par ne plus pouvoir se décharger en deçà du seuil où elles ont été remises à charger. C'est ce qu'on appelle l'effet mémoire : la batterie se comporte comme si elle conservait la « mémoire » du seuil où elle a été remise à charger, et refuse de se décharger davantage. Elle contient pourtant encore de l'énergie".

[http://encyclopedie.linternaute.com/definition/1024/7/effet\\_memoire.shtml](http://encyclopedie.linternaute.com/definition/1024/7/effet_memoire.shtml)

présentent une énergie volumique importante et une faible sensibilité à l'effet mémoire.

#### 6.2.2.1.6.4 Lithium et dérivés

Il existe différents types de batteries au lithium. Leurs principaux avantages sont une densité d'énergie élevée ainsi que l'absence d'effet mémoire. Elles présentent une capacité de 150 Wh/kg et 350 Wh/L. Il s'agit du métal le plus léger et qui reste le premier choix des constructeurs de véhicules électriques ou Plug-in Hybrid Electric Vehicle (HBC Group, 2014, slide 38<sup>45</sup>).

D'après le document d'Arval, « Tout savoir sur les voitures électriques », les différentes catégories sont (Arval, 2010, p. 39): «

- *Lithium-ion - Li-ion - les plus courantes pour les applications nomades de faible puissance.*
- *Lithium Polymère - Li-Po - plus légères que les Li-ion, elles sont aussi plus faciles à mettre en œuvre.*
- *Lithium-phosphate- LiFePO4 - une des avancées majeures des cinq dernières années. Elles combinent les avantages des Li-ion et Li-Po et une durée de vie élevée.*
- *Lithium Métal Polymère - LMP - fonctionne à température interne d'environ 85°C. Une technologie en cours de développement dont le promoteur est le groupe Bolloré. »*

#### 6.2.2.1.6.5 Zebra batteries

Une technologie différente, proposée par un seul fabricant. Elle utilise du chloro-aluminate de sodium liquide et sa température interne est de 250°C (Arval, 2010, p. 39).

#### 6.2.2.1.6.6 Nickel-Zinc - NiZn

Elles sont considérées comme des batteries de nouvelle génération et sont comparables au Li-ion au niveau des performances, pour un budget moins onéreux (Arval, 2010, p. 39). De plus, ces batteries sont nettement plus recyclables avec un taux de 90% par rapport aux 50% des batteries Li-ion et au 67% des batteries Ni-MH. En effet, les batteries au Nickel-Zinc ne contiennent pas de plomb ou d'autres métaux rares. Par ailleurs, les éléments de cuivre, de nickel et de zinc sont entièrement récupérables et préservent une valeur commerciale. Ces performances sont donc semblables à celles des batteries au plomb. Elle offre donc des performances comparables aux batteries lithium mais a un prix plus attractif, un taux

<sup>45</sup> <http://www.thehybridshop.com/media/blogs/nickel-metal-hydrate-vs-lithium-best-hybrid-battery/>

de recyclage plus élevé et des émissions de production inférieures (R. Brody, 2011).

### **6.2.2.2 Production du carburant**

#### 6.2.2.2.1 Production de l'essence et du diesel

Le pétrole est un liquide naturel inflammable qui se trouve sous la surface terrestre. Ce dernier est produit par de grandes quantités d'organismes morts, généralement des zooplanctons et algues. La transformation s'opère quand ces organismes sont coincés sous terre avec un niveau de pression élevé et une chaleur intense. Aujourd'hui, la consommation dépasse de manière considérable la production naturelle.

Ensuite, il faut extraire le pétrole et le raffiner pour en extraire différents produits, notamment : l'essence, le diesel, le kérosène, le plastique, etc. Le processus le plus simple actuellement reste la distillation. Cette étape est le premier pas dans le raffinage. Les étapes du raffinage sont : la séparation, la conversion et l'amélioration<sup>46</sup>. Toutefois, les raffineries ne disposent pas toutes des infrastructures pour réaliser un raffinage complet. Ces étapes peuvent elles-mêmes encore être subdivisées mais nous ne détaillerons pas le processus entier.

La phase de production provoque un rejet qui varient entre 6,7 et 27 g CO<sub>2</sub>e/MJ fuel pour l'essence et entre 7,9 et 24 g CO<sub>2</sub>e/MJ fuel pour le diesel. Ces chiffres sont repris de l'étude de M. Eriksson et S. Ahlgren qui se base sur 13 autres études (Eriksson, M. et al., 2013, pp. 30-31). Par ailleurs, si l'on se fie au rapport du Department of Energy, Food and Rural Affairs (DEFRA) nous observons des émissions de production pour l'essence et le diesel de 0,46 et 0,56 g CO<sub>2</sub>eq./litre respectivement (Defra, 2012). Le diesel est donc légèrement plus néfaste à la production.

#### 6.2.2.2.2 Production d'électricité

Incontestablement l'élément crucial à tous les niveaux du cycle de vie est l'électricité et surtout la façon de la produire pouvant influencer l'entièreté du cycle. Actuellement, l'électricité mondiale est générée via quatre sources. Le charbon produit près de 40% de l'électricité globale tandis que le gaz naturel représente 20%. Ensuite, le nucléaire et l'hydroélectrique produisent chacun 15% de cette électricité. Finalement, les 10% restant sont un mélange de pétrole, de biomasse et d'autres

---

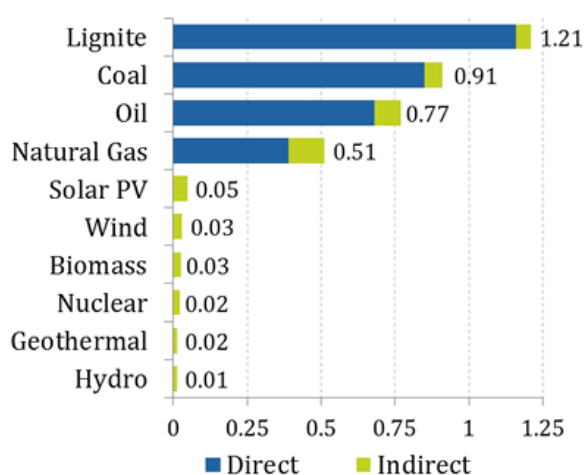
<sup>46</sup> <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-trois-etapes-du-raffinage>

énergies renouvelables tels que le solaire et l'éolien<sup>47</sup>.

Parmi les pays de l'Union européenne, les pourcentages sont différents d'après Eurostat<sup>48</sup>. En effet, nous observons 29% de nucléaire, 24% de renouvelable (essentiellement biomasse), 20% de charbon, 17% de gaz naturel, 9% de pétrole et finalement 1% d'autres énergies.

L'intensité carbone dépend énormément de la source d'énergie comme nous le montre le graphique 6. Ce dernier représente les émissions par kWh des différentes sources d'électricité. Ces émissions sont divisées en émissions directes, liées à la combustion, et indirectes, liées à l'infrastructure, à la production du pétrole et à l'approvisionnement.

**Graphique 6.** Emissions liées à la production d'électricité (kg CO<sub>2</sub>eq./kWh)



Le graphique présente les émissions directes et indirectes liées aux différentes sources d'électricité

Source: <http://shrinkthatfootprint.com/shrink-your-housing-footprint>

Le lignite est un sédiment rocheux combustible et est la forme de production d'électricité la plus néfaste à 1.2 kg CO<sub>2</sub>e/kWh. Le lignite est suivi par le charbon qui atteint des rejets de 0.9 kg CO<sub>2</sub>e/kWh. Ensuite, la production d'électricité grâce au pétrole est également néfaste avec 0.8 kg CO<sub>2</sub>e/kWh tandis que le gaz naturel émet 0.5 kg CO<sub>2</sub>e/kWh. En comparaison, l'énergie solaire, éolienne, nucléaire et hydroélectrique rejettent toutes moins de 0,05 kg CO<sub>2</sub>e/kWh étant donné qu'elles n'ont que des émissions indirectes limitées principalement causées par les

<sup>47</sup> L. Wilson. 2013, Shrink that footprint. Electricity emissions around the world.

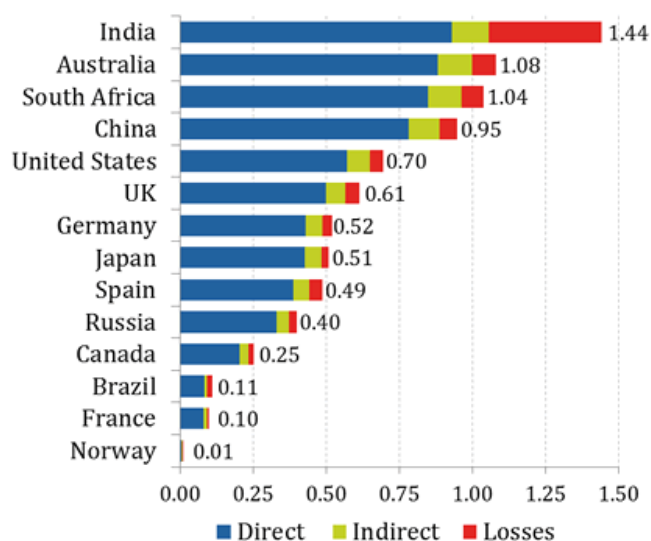
<http://shrinkthatfootprint.com/electricity-emissions-around-the-world>

<sup>48</sup> [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Production\\_of\\_primary\\_energy,\\_EU-28,\\_2013\\_\(%25\\_of\\_total,\\_based\\_on\\_tonnes\\_of\\_oil\\_equivalent\)\\_YB15.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Production_of_primary_energy,_EU-28,_2013_(%25_of_total,_based_on_tonnes_of_oil_equivalent)_YB15.png)

infrastructures pour générer la technologie. En revanche, les émissions liées à la biomasse sont considérées comme nulles sur l'entièreté de son cycle de vie<sup>49</sup>.

Ensuite, le graphique 7 illustre que la source d'énergie varie en fonction des pays. Cela signifie que l'intensité carbone de l'électricité peut évoluer d'un endroit à un autre.

**Graphique 7.** Les émissions nationales (kg CO<sub>2</sub>eq./kWh)



Le graphique 7 présente les émissions directes, indirectes et les pertes liées à la production de l'électricité dans les différents pays. L'Inde produit l'électricité la plus nocive tandis que la Norvège produit l'électricité la plus propre.

Source: <http://shrinkthatfootprint.com/shrink-your-housing-footprint>

Le graphique illustre les émissions directes des carburants consommés, les émissions indirectes des infrastructures et d'approvisionnement en carburant mais aussi les pertes du réseau dû à la transmission et à la distribution. L'Inde se démarque particulièrement par une production d'électricité intensive en CO<sub>2</sub>. En revanche, la Norvège présente une production d'électricité propre.<sup>50</sup>

Par ailleurs, il est indispensable d'aborder trois problématiques. Premièrement, bien que l'énergie nucléaire permette une production élevée d'électricité pour des émissions de CO<sub>2</sub> extrêmement faible elle recèle une autre facette qui se révèle problématique. Il est question des déchets nucléaires. En effet, en fin de vie il faut

<sup>49</sup> Wilson. 2013, Shrink that footprint. Electricity emissions around the world. <http://shrinkthatfootprint.com/electricity-emissions-around-the-world>

<sup>50</sup> Wilson. 2013, Shrink that footprint. Electricity emissions around the world. <http://shrinkthatfootprint.com/electricity-emissions-around-the-world>

stocker cet élément fortement radioactif. Ce dernier reste fortement nocif pendant encore plusieurs centaines d'années. Il cause donc un impact conséquent pour la santé humaine. Est-il donc question de remplacer un mal pour un autre? De plus, il y a un aspect risque conséquent qui est associé aux centrales nucléaires et qui ne peut être négligé. Nous avons déjà vu les conséquences d'un accident nucléaire avec les catastrophes tragiques de Tchernobyl et Fukushima. Cependant, nous ne rentrerons pas en détail dans cette problématique.

Ensuite, il est question des infrastructures de production d'électricité. Si une croissance exponentielle survient, les pays ne pourraient théoriquement pas subvenir aux besoins en électricité de tous. Il faut donc préparer le réseau électrique tout en modifiant les structures existantes pour s'orienter de plus en plus vers des sources d'énergies renouvelables.

Finalement, il est question de la délocalisation liée aux voitures électriques chargées par de l'électricité intensive en CO<sub>2</sub>. Les villes seraient, en effet, plus propres. Néanmoins, ces émissions seraient reportées aux centrales électriques qui combleraient cette demande d'électricité. Nous aurons donc des villes plus propres compensées par des sites polluants.

#### 6.2.2.2.3 Production d'hydrogène

L'hydrogène peut être produit via de nombreux processus en utilisant différentes sources d'énergie. Nous savons que ces deux facteurs ont une influence sur les émissions liées à la production de l'hydrogène. De nombreuses méthodes existent pour produire de l'hydrogène proprement mais nous n'élaborerons pas entièrement ce sujet (Dincer, I., 2011 ; Dufour, X., et al. 2011 ; Cetinkaya, E., et al., 2011).

Premièrement, l'hydrogène produit, via l'électrolyse, de l'eau pour laquelle l'électricité requise est de source renouvelable. Cette méthode se base sur les électrolytes alcalins qui ont une efficacité estimée entre 60 et 90%.

Deuxièmement, l'hydrogène peut également être produit via le gaz naturel. Le procédé consiste à produire de l'hydrogène grâce à la vapeur du gaz. Cette méthode est la plus courante et représente près de 50% de la production globale d'hydrogène. Ce processus peut atteindre une efficacité de près de 85%.

L'hydrogène produit grâce au charbon est de loin la méthode la plus intensive en CO<sub>2</sub>. L'hydrogène est issu de la gazéification du charbon. L'efficacité dépend grandement de la méthode utilisée. Elle est toutefois estimée à 60% en moyenne (Campanari, S. et al., 2009, p. 466).

Aujourd'hui, l'hydrogène est principalement produit grâce au gaz naturel (48%), au pétrole (30%), au charbon (18%) et aux énergies renouvelables (4%)<sup>51</sup>. Les émissions liées à la production de l'hydrogène peuvent varier grandement. En effet, le potentiel de réchauffement climatique est de 11,89 kg CO<sub>2</sub>eq./kg pour l'hydrogène produit avec du gaz naturel, de 11,23 kg CO<sub>2</sub>eq./kg pour l'hydrogène produit avec du charbon et de 1 kg CO<sub>2</sub>eq./kg pour les énergies renouvelables. (Cetinkaya, E., et al., 2011, p. 2078.).

#### 6.2.2.2.4 Production de CNG

Le CNG,, constitué de méthane est un carburant extrait à l'état gazeux qui est stocké sous haute pression. Les deux grands producteurs de gaz naturel sont les Etats-Unis et la Russie<sup>52</sup>. Ils sont suivis par l'Iran, le Qatar, le Canada, la Chine et la Norvège. Ces pays produisent toutefois considérablement moins de gaz naturel que les deux producteurs principaux. D'après le rapport du DEFRA, l'extraction du gaz naturel représente des émissions de CO<sub>2</sub> de 0,21 kg CO<sub>2</sub> / Nm<sup>3</sup> (Defra, 2012).

#### 6.2.2.2.5 Production de LPG

Le LPG est un gaz à base de propane et de butane. Il est issu de l'évaporation du pétrole et prend place lors de son raffinage. Il reprend donc de nombreux aspects de l'essence et du diesel, y compris les inconvénients qui y sont liés. Comme pour les autres carburants, nous proposons les chiffres de production avancés par le DEFRA. Le rapport relate des émissions de production de 0,19 kg CO<sub>2</sub> / litre (Defra, 2012).

#### 6.2.2.2.6 Production de bioéthanol

Les plantations ou cultures contenant du saccharose (betterave, canne à sucre...) ou de l'amidon (blé, maïs...) peuvent être fermenté afin d'obtenir du bioéthanol. Ce carburant est très répandu en Amérique du Sud.

Cependant, l'installation d'un boîtier au niveau des injecteurs est requis afin de pouvoir utiliser le bioéthanol. La formule la plus courante est le E85, ce qui fait référence au 85% de bioéthanol utilisé pour seulement 15% d'essence. Enfin, les émissions de production du bioéthanol sont de l'ordre de 822 g CO<sub>2</sub>eq./l.

---

<sup>51</sup> <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie>

<sup>52</sup> <https://yearbook.enerdata.net/world-natural-gas-production.html>

### 6.2.3 Transport

Le transport est un facteur négligeable du cycle de vie d'un véhicule. De nombreuses études ne s'attardent pas sur cet élément de l'étude. Toutefois, tous les facteurs, sans exception, doivent être minimisés afin d'obtenir une voiture propre. Il est question de 200 kg CO<sub>2</sub>eq. par voiture (Hill, N., 2013, slide 9). Il existe trois types de transports pour les composants et véhicules : routier, ferroviaire, maritime. De ces trois moyens de transport, une grande partie des émissions sont liées au transport routier. Les transports ferroviaires émettent des émissions directes et indirectes en fonction de la zone géographique et de l'énergie utilisée. Finalement, bien que les cargos utilisent de grandes quantités de pétrole ils transportent des quantités gigantesques de marchandises. Généralement ces facteurs sont pris en compte dans les différents modèles tels que le GREET.

### 6.2.4 Utilisation

Les véhicules à combustion nécessitant des énergies fossiles polluent lors de leur utilisation. Actuellement, en Belgique, ces externalités sont fortement réglementées. En effet, les taxes sont notamment calculées en fonction des émissions de CO<sub>2</sub> au kilomètre. Cet élément explique clairement l'avantage fiscal des voitures électriques et hybrides, qui émettent peu ou pas d'externalités négatives directes à l'usage. Cela ne signifie pas qu'il n'y pas d'émissions indirectes comme nous l'avons souligné précédemment. Nous voulons donc dire que si une voiture électrique est chargée, elle n'émet aucune émission lorsqu'elle réalise un trajet. Il en va de même pour les hybrides rechargeables. En effet, tant que ces véhicules n'utilisent que les capacités électriques, aucune émission n'est rejetée lors d'un trajet. Toutefois, si le moteur à combustion est enclenché, les émissions liées à la combustion de carburant s'appliquent. L'hydrogène, au même titre que les voitures électriques, n'émet pas d'émissions directes. En revanche, les véhicules à combustion tels que le CNG, le LPG, le diesel ou encore l'essence et les hybrides parallèles rejettent du dioxyde de carbone lors de la combustion du carburant. Il est donc intéressant de détailler les émissions d'usage de ces véhicules. Nous tirons ces externalités du site [www.ecoscore.be](http://www.ecoscore.be) qui propose des estimations de consommation au kilomètre et nous les comparons ensuite aux éléments repris sur le site du DEFRA. En réalité, un véhicule équivalent consommera les carburants différemment en fonction de leur efficacité. Mettre tous les carburants sur un pied d'égalité au niveau de la consommation illustre donc une situation générale et ne représente pas un cas spécifique pour une voiture identique qui utilise des carburants différents.

Nous observons dans le tableau 2 les émissions de combustion par unité. Nous estimons ensuite une consommation pour obtenir des émissions en kilomètre. Bien entendu ces unités ne sont pas équivalentes en terme d'apport énergétique. Toutefois, la consommation a été adaptée en fonction des types de véhicules.

Les émissions des différents carburants sont calculées en fonction de leur composition de carbone mais aussi de la quantité d'oxygène nécessaire pour brûler le carbone. Nous pouvons ensuite multiplier le résultat en fonction de la consommation du véhicule. Le LPG est calculé suivant la proportion de 75% de LPG pour 25% d'essence. Il consomme en général entre 10 et 20% en plus, c'est pourquoi nous avons adapté la consommation. Le CNG suit la proportion de 90% de CNG pour 10% d'essence. Le bioéthanol va consommer 85% de Bioéthanol et 15% d'essence. De plus le bioéthanol a une consommation estimée à 130%<sup>53</sup>. Enfin, bien que les résultats présentés semblent défavorable au diesel, en pratique le diesel consommera moins et donc aura un rejet équivalent à l'essence.

**Tableau 2.** Emissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion des carburants

	Unité	Combustion	Consommation	Emissions	
		g CO <sub>2</sub> /Unité	U/100km	g CO <sub>2</sub> /100km	g CO <sub>2</sub> /km
Essence	Litre	2314	5	11570	116
Diesel	Litre	2677	5	13385	134
LPG	Litre	1532	6	10365	104
CNG	Nm <sup>3</sup>	2032	5	10301	103
Bioéthanol	Litre	6	6,5	2289,3	23
Hydrogène	Kg	0	1,25	0	0
Electricité	kWh	0	15	0	0

Source : Defra, 2012 ; <http://www.ecoscore.be/fr/comment-calculer-les-emissions-de-co2-en-fonction-de-la-quantite-de-carburant-consomme>

Enfin, il faut garder à l'esprit que ces émissions sont liées uniquement à la combustion et ne reprennent donc pas les émissions qui ont été rejetées pour obtenir le carburant. Les éléments dans leur ensemble seront vus plus loin dans le travail.

<sup>53</sup> <http://www.astuces-pratiques.fr/auto-moto/surconsommation-essence-bioethanol-e85>

### **6.2.4.1 Conduite**

L'utilisation étant pour la grande majorité des véhicules la phase la plus polluante, elle représente plus de 80% des émissions totales (GE Capital Fleet Services, 2013). Les facteurs d'utilisation et de production analysés dans cette étude sont des éléments essentiels du cycle de vie d'un véhicule. Néanmoins, le facteur humain est tout aussi important. Notre style de conduite peut causer une hausse considérable de nos émissions et de notre consommation, allant du simple au double. Quelques conseils faciles permettent pourtant de diminuer cela. Par exemple ;

- réduire sa vitesse sur autoroute de 135 à 110 km/h permet de diminuer la consommation et les émissions jusqu'à 40% (GE Capital Fleet Services, 2013). D'autant plus qu'il est interdit de rouler au-delà de 120km/h en Belgique.
- changer ses vitesses plus tôt et anticiper le freinage peut aussi augmenter l'autonomie (GE Capital Fleet Services, 2013).

Une conduite agressive n'est clairement pas adaptée à un respect de l'environnement peu importe le véhicule utilisé. Il faut donc tenir compte du facteur humain comme tous les autres facteurs pouvant avoir un impact considérable sur les émissions du cycle de vie d'un véhicule mais aussi sur les dépenses des conducteurs.

Il en va de même pour le contexte quotidien d'utilisation. Les petits trajets, les trajets dans les embouteillages, les trajets sur autoroute et les trajets dans un relief vallonné peuvent nécessiter des spécificités différentes ; c'est pourquoi, le véhicule doit être adapté à la conduite et aux besoins du conducteur. Volkswagen a d'ailleurs mis au point sa propre matrice. Elle permet aux conducteurs d'identifier quelle voiture leur conviendrait en fonction du kilométrage, du trajet et des embouteillages (HBC Group, 2014, slide 106). Malheureusement, les besoins des conducteurs ne sont pas toujours en accord avec leurs envies mais il est pourtant important d'utiliser un véhicule adapté.

### **6.2.5 Recyclage**

Aujourd'hui, les voitures sont composées principalement de métaux, de plastique, de caoutchouc, de verre et de liquides (Vermeulen, I., 2011, p. 10). Ces matériaux sont recyclés et réutilisés pour d'autres composants (Vermeulen, I. Et al., 2011, p. 11; Annexe 33). Il est indispensable pour l'Europe d'encourager toujours plus le recyclage des véhicules en fin de vie. D'après la directive 2000/53/EC, l'objectif Européen pour 2015 était d'accroître les taux de 'réutilisation et de récupération' et

de 'réutilisation et de recyclage' respectivement à 95% et 85% (Vermeulen, I. et al., 2011, p. 9 ; Santini, A. Et al., 2011, p. 852).

La réutilisation signifie l'utilisation de composants de véhicules en fin de vie pour la même utilité que lors de leur conception. Le recyclage quant à lui est le processus de traitement des déchets matériels afin de les réutiliser pour la même utilité ou pour d'autres utilités mais sans inclure la récupération de l'énergie. Ensuite, la récupération d'énergie consiste en l'incinération des déchets combustibles, avec récupération de chaleur. Finalement, la récupération est la conversion d'éléments vers d'autres applications.

Hormis le fait d'imposer des objectifs, la directive cible la prévention de déchets automobiles. Pour ce faire, elle encourage les constructeurs en lien avec leurs fournisseurs de composants et de matériaux à :

- Limiter l'utilisation de substances dangereuses au sein des véhicules afin d'empêcher leur intégration dans l'environnement, faciliter le recyclage et éviter la gestion des déchets nocifs (Vermeulen, I. Et al., 2011, p. 9).
- Réaliser et produire des véhicules afin de faciliter le démontage, la réutilisation et le recyclage (Vermeulen, I. Et al., 2011, p. 9.)
- Augmenter la proportion de matériaux recyclés dans les nouveaux véhicules (Vermeulen, I. Et al., 2011, p. 9.)

Comme le stipulent les points précédents, le recyclage d'une voiture dépend grandement de son design, de ses composantes et des infrastructures de traitement. Il semble donc important de préciser qu'en moyenne, une voiture n'est recyclée que 12 à 15 ans après sa conception (Santini, A. Et al., 2011, p. 852). Cela signifie que nous pouvons toujours optimiser le design et améliorer le processus de recyclage mais les modifications apportées aux voitures auront un effet retardé. D'après les éléments observés, les contraintes de traitements des résidus automobiles sont liées au taux élevé de chlore dans le résidu, à la contamination des métaux (plomb, zinc, cuivre, etc.), à l'élimination des scories (*sous-produit d'élaboration métallurgique, ayant une forte teneur en silicates et oxydes métalliques*, Larousse, 2015) ainsi qu'à l'impact élevé des prétraitements et de leur composition (Vermeulen, J. Et al., 2011, p. 9.)

Le recyclage peut être divisé en quatre étapes. Premièrement, nous observons la dépollution, le démontage, le broyage et la séparation. Les éléments restants représentent le résidu automobile. Ce dernier est principalement composé de

polymères, de textiles, de métaux, de câbles, de terre, et de fines particules (Santini, A. Et al., 2011, p. 852). Deuxièmement, il est question de traitement physique et mécanique secondaire des déchets automobile pour leur potentielle réutilisation directe. Troisièmement, l'étape du traitement par récupération d'énergie des déchets automobile prend place. Quatrièmement, le traitement thermo-chimique des déchets clôture ce cheminement.

Le recyclage des véhicules à combustion et des véhicules électriques est identique sauf en ce qui concerne les batteries (Aguirre, K., 2012, p. 5). Au total, le recyclage est responsable de 53,5 kg CO<sub>2</sub>eq. Cependant, cela ne prend pas en compte le traitement des batteries. En effet, le traitement des batteries en fin de vie est équivalent à 1,5 kg CO<sub>2</sub>eq. par kilogramme de batterie (Aguirre, K., 2012, p. 5). Toutefois, cela ne représente que 1% des émissions totales du cycle de vie. (Aguirre, K., 2012, p. 5).

Suite à ces étapes et ces réglementations, il semble important de préciser que le recyclage des véhicules reçoit plus d'intérêt en Europe que dans le reste du monde. C'est pourquoi c'est clairement plus réglementé dans cette zone géographique. Il est essentiel pour les autres pays du monde de suivre cet exemple.

Bien que les éléments conventionnels des véhicules soient bien connus et traités pour arriver à un taux de recyclage élevé, un élément pose actuellement problème. En effet, le recyclage des batteries au lithium n'est pas efficient, principalement à cause du faible niveau de lithium et de son prix accessible (Vikström, H. Et al., 2012, p. 18). Le lithium recyclé n'est pas réutilisé pour faire des batteries quand il est à l'état de poussières pour des raisons économiques. Le coût de l'extraction et de l'affinage du lithium est plus abordable que le coût d'utilisation du lithium issu du recyclage (Misch, M., 2014). Pourtant, le recyclage soutenu permettrait une production linéaire et limiterait l'impact sur l'environnement. Kushnir et Sanden (Kushnir, D. et al., 2012, p. 37) imaginent qu'un taux de recyclage de 80% est envisageable à moyen terme. Nous constatons également une hausse de la demande corrélée à la croissance des voitures électriques et plug-in. Il est important de relever que le lithium est une ressource définie par les contraintes géologiques, économiques et technologiques. Comme dit précédemment, si un boom de la voiture électrique survient et que le recyclage ne s'améliore pas, les réserves de lithium pourraient logiquement être épuisées en l'espace de quelques années

(Vikström, H. Et al., 2012, p. 24).

Cela dit, il existe des alternatives au lithium comme le nickel-zinc pour lesquelles les propriétés de recyclage sont favorables. Il est estimé qu'actuellement 50% des composants des batteries au lithium sont irrécupérables tandis que les batteries au nickel-zinc sont recyclables à 90% (R. Brody, 2011). De surcroit, comme signalé précédemment, le lithium requiert un processus complexe et étendu pour son recyclage. De son côté la batterie au nickel-zinc n'utilise pas de ressources rares et ses composants tels que le zinc, le nickel et le cuivre sont entièrement récupérables. De plus, les éléments récupérés conservent une valeur économique.

Afin d'exercer les processus de recyclage de ces matériaux, certaines entreprises récoltent et recyclent les batteries au plomb, nickel-cadmium, nickel-métal hybride, lithium et nickel-zinc. La récupération des batteries au plomb est réalisée à l'échelle nationale. Pour les autres technologies, des filières spécifiques ont été organisées pour traiter les résidus. Les volumes conséquents produits, et donc à recycler, ont généré la création d'entreprises ou de services spécialisés. Les spécialistes en Belgique sont: Revatech, Indaver, Campine et Umicore. Par exemple, les batteries Zebra en fin de vie sont reprises et traitées directement par le fabricant (Arval, 2010, p. 41).

### **6.2.6 Le cycle de vie**

Afin de mettre en contexte les étapes du cycle de vie, nous proposons de commencer par présenter la situation de manière globale en ciblant les différents types de véhicules et leurs émissions en fonction des infrastructures avant de nous attaquer à trois scénarios spécifiques qui illustrent la situation actuelle et ce qu'elle entraîne comme conséquences pour les voitures.

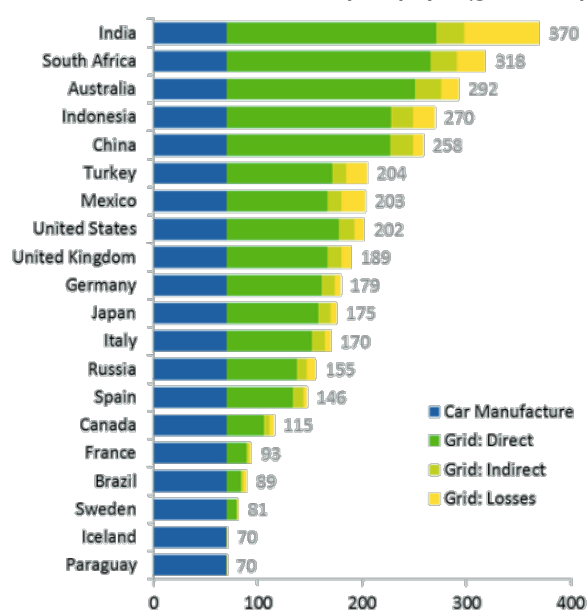
#### **6.2.6.1 La voiture électrique**

Nous proposons tout d'abord, une analyse détaillée des émissions liées aux voitures électriques. Ce choix est lié au fait que les infrastructures font de l'électricité un facteur variable tandis que les autres facteurs sont plutôt fixes ou semi-fixes pour l'hydrogène. Une voiture électrique ou plug-in hybride, qui utilise de l'électricité produite grâce au charbon ne contribue pas ou peu à réduire l'empreinte carbone (Wilson, L., 2013, p. 5).

Afin de proposer des analyses, il est important d'estimer les émissions liées à la

création d'électricité. Pour ce faire, de nombreuses études se basent sur l'intensité carbone de la moyenne nationale. Cette moyenne n'est pas forcément représentative de l'électricité utilisée mais reste le meilleur moyen d'analyse à défaut d'avoir des informations plus spécifiques. Les émissions liées à cette électricité peuvent être directes ou indirectes et peuvent être divisées en quatre catégories. Pour tous les pays, nous posons l'hypothèse d'une même empreinte écologique de production. Nous abordons ensuite les émissions causées par la production de l'électricité. Celle-ci se divise en trois catégories : les émissions directes, indirectes et les pertes. Les émissions de cette production peuvent être divisées suivant une certaine répartition. 80% sont des émissions directes causées par la combustion d'énergies fossiles, 10% des émissions indirectes sont en lien avec le CO<sub>2</sub>, le N<sub>2</sub>O et le CH<sub>4</sub> rejeté par l'extraction, le transport, le raffinage, la distribution et le stockage et 10% d'émissions liées aux pertes. Les pertes proviennent d'une combinaison d'émissions directes en indirectes qui ont été émises pour de l'électricité perdue suite à la transmission et à la distribution qui n'atteignent pas le consommateur (Wilson, L., 2013, p. 8). Bien entendu, ces chiffres représentent une moyenne (IEA, 2012.) et ne sont pas représentatifs de régions spécifiques.

Nous observons dans le Graphique 8 le détail des émissions en fonction des pays et de l'intensité carbone de leurs sources d'électricité. L'écart entre les pays qui produisent de l'électricité faible en carbone et ceux qui produisent de l'électricité intensive en carbone est conséquent.

**Graphique 8.** Emissions par pays (g CO<sub>2</sub>eq./km)

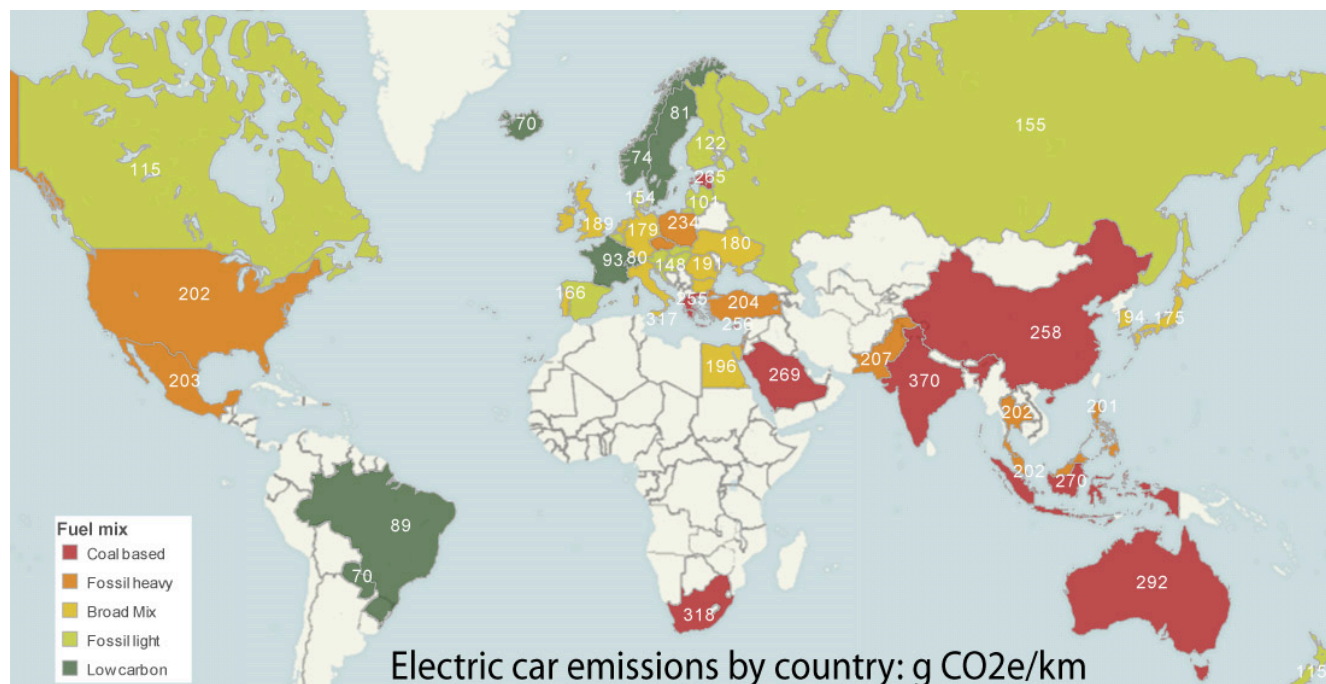
Le graphique 8 présente les émissions de cycle de vie pour les véhicules électriques. Ce graphique tient compte de la production de la voiture, des émissions directes et indirectes, sans oublier les pertes. L'espérance de vie considérée est de 150 000 km.

Source : Wilson, L., 2013, p. 8

Chaque pays produit son électricité en fonction de son accès et de ses ressources. De plus, les pays industrialisés sont loin d'être systématiquement plus respectueux de l'environnement. Nous observons des émissions de CO<sub>2</sub> se limitant aux émissions liées à la production du véhicule dans certains pays, comme le Paraguay où l'électricité générée est pratiquement nulle en carbone. Dans la situation la moins favorable, nous observons des seuils atteignant 370g CO<sub>2</sub>/km (70g CO<sub>2</sub>/km pour la production, 200g CO<sub>2</sub>/km, 30g CO<sub>2</sub>/km pour la production de l'essence et 70g CO<sub>2</sub>/km de pertes d'énergies). Ces pays produisent leur électricité principalement grâce au charbon (Wilson, L., 2013, p. 8).

Nous pouvons observer sur la carte ci-dessous la répartition des émissions en fonction des pays. Ces estimations ne présentent pas de logique géographique spécifique (Carte I).

**Carte I.** Emissions de g CO<sub>2</sub>eq./km en fonction du réseau électrique des pays



La carte nous indique le potentiel de réchauffement climatique des pays en fonction de leurs sources d'énergies.

Source : Wilson, L., 2013

Les couleurs représentent l'impact sur l'environnement et cela en fonction de l'intensité carbone. Les émissions d'une même voiture peuvent être multipliées par 5 en fonction de la source d'électricité.

A titre de référence, un véhicule à essence moyen aux Etats-Unis rejette au total près de 300g CO<sub>2</sub>/km une fois que les étapes de production, de raffinage de pétrole et de combustion d'essence sont comprises. A titre de comparaison, une voiture hybride atteint en moyenne 180g CO<sub>2</sub>/km<sup>54</sup>.

Dans les pays où l'électricité est produite par la combustion de charbon, tels que la Chine, l'Inde, l'Australie ou encore l'Afrique du Sud, avoir une voiture électrique est équivalent à utiliser une voiture à combustion qui consomme 9 L/100km. Les pays qui produisent leur énergie grâce à de nombreuses sources, comme l'Angleterre, l'Allemagne, le Japon et l'Italie, peuvent rivaliser avec les véhicules hybrides les plus efficaces du moment atteignant les 5 L/100km. Finalement, la France, le Brésil, la Suisse, la Norvège sont des pays qui génèrent de l'électricité faible ou nulle en carbone et sont propices à la voiture électrique car elle est équivalente à une voiture qui atteindrait 2,4 L/100km<sup>55</sup>.

<sup>54</sup> <http://shrinkthatfootprint.com/electric-cars-green>

<sup>55</sup> <http://shrinkthatfootprint.com/electric-cars-green>

Par ailleurs, une variation des émissions de production des véhicules aura un impact nettement plus conséquent sur les voitures plus propres étant donné que l'impact de ces émissions sera proportionnellement plus élevé et devra être amorti en fonction du kilométrage. L'effet contraire s'opère concernant l'efficacité des véhicules électriques et hybrides rechargeables. L'effet d'une variation d'efficacité aura un impact considérable dans les régions intensives en CO<sub>2</sub>.

Pour conclure, les facteurs de production de batteries sont d'une importance capitale. Les voitures électriques font face à des soucis de charge, d'autonomie et de coût. Tous ces éléments peuvent être aidés par l'amélioration de la batterie. Malgré tous ces éléments, ces véhicules nous offrent beaucoup d'espoir pour une réduction importante des rejets de CO<sub>2</sub>, une réduction de la pollution sonore et une amélioration de la qualité de l'air local. Il y a bien des raisons de critiquer la voiture électrique qui est loin d'être parfaite, mais en termes d'avancement et d'efforts pour réduire nos émissions, elle se positionne loin devant la voiture à combustion (Wilson, L., 2013, p. 24).

#### **6.2.6.2 La voiture à essence**

Nous souhaitons également offrir une vue détaillée des émissions des véhicules à combustion. De manière similaire aux véhicules électriques, nous notons des émissions liées à la production du véhicule, des émissions directement liées à la production d'essence et des émissions indirectement liées à la production.

Les émissions pour la production d'un véhicule à combustion sont relativement bien répertoriées et sont fiables. Nous fixons notre hypothèse à 35g CO<sub>2</sub>eq./km sur base d'un kilométrage de 200 000 km. Nous combinons cela à un rejet de combustion de 2,31kg CO<sub>2</sub>eq./litre et un rejet de production d'essence de 0,46kg CO<sub>2</sub>eq./litre (Defra, 2012). Notre première hypothèse se base sur un véhicule à essence qui consomme 5L/100km. Pour une telle consommation, un véhicule à essence rejette réellement 174g CO<sub>2</sub>eq./km. Ensuite, nous proposons une estimation pour un véhicule qui consomme 7L/100km. Ce dernier émet réellement 230 g CO<sub>2</sub>eq./km.

#### **6.2.6.3 La voiture au diesel**

La production d'un véhicule à combustion de type diesel est moins nocive qu'une voiture électrique ou hybride au niveau de sa production. Nous constatons une empreinte écologique de production de plus ou moins 35g CO<sub>2</sub>eq./km (Hawkins, T.

et al., 2012, p. 53). Cela se combine à un rejet de combustion de 2.68kg CO<sub>2</sub>eq./litre et un rejet de production de diesel de 0,56kg CO<sub>2</sub>eq./litre (Defra, 2012). Ces chiffres nous amènent à l'hypothèse qu'un véhicule diesel qui consomme 5L/100km émet réellement 196g CO<sub>2</sub>eq./km. Un véhicule diesel qui consomme 7L/100km émet réellement 262g CO<sub>2</sub>eq./km. Il est important de préciser que cette estimation ne tient pas compte des émissions liées aux infrastructures ainsi que des émissions liées au recyclage. Cela étant dit, d'autres études estiment que le taux d'émission que nous avons pris comme taux de production couvre également ces éléments.

Les chiffres indiquent donc que le véhicule au diesel rejette plus de CO<sub>2</sub>eq./km qu'un véhicule à essence. Toutefois, en condition réelle, un véhicule qui roule au diesel consommera moins qu'un véhicule à essence équivalent. Il est donc probable qu'en règle générale d'utilisation un véhicule au diesel émette moins de CO<sub>2</sub>eq./km.

Bien que les émissions de CO<sub>2</sub> soient potentiellement plus faibles pour un diesel que pour un véhicule à essence, les rejets de carbones noirs sont plus nocifs au niveau de l'air local. Néanmoins, les filtres à particules actuels contribuent grandement à réduire ces rejets. Un diesel reste comparable à un véhicule hybride à essence en terme de rejet de CO<sub>2</sub>eq (Wilson, L., 2013, p. 23).

#### **6.2.6.4 La voiture au CNG**

La voiture au CNG a des émissions semblables à un véhicule à essence. Les émissions de production et de combustion du CNG s'élèvent à 0,21g CO<sub>2</sub>eq./Nm<sup>3</sup> et 2,03g CO<sub>2</sub>eq./Nm<sup>3</sup> respectivement (Defra, 2012). Sous les mêmes hypothèses que les points précédents, nous pouvons estimer les émissions d'un véhicule au gaz naturel. Pour une consommation équivalente à 5Nm<sup>3</sup> nous trouvons la valeur de 150g CO<sub>2</sub>eq./Nm<sup>3</sup> tandis que pour une consommation de 7Nm<sup>3</sup>, nous obtenons une émission de 196g CO<sub>2</sub>eq./Nm<sup>3</sup>. Ces émissions, qui restent inférieures aux émissions des véhicules à combustion classique, tiennent compte du ratio de 9/1 qui lie le gaz naturel à l'essence. Ces rejets sont également comparables à ceux d'un hybride parallèle.

#### **6.2.6.5 La voiture au LPG**

De manière presque identique à la voiture au CNG, la voiture au LPG suit les mêmes hypothèses. Nous observons des émissions de production et de combustion de 0,19 g CO<sub>2</sub>eq./litre et 1,53 g CO<sub>2</sub>eq./litre respectivement (Defra, 2012). Ces chiffres nous donnent un taux d'émission de 155g CO<sub>2</sub>eq./km pour un véhicule qui

consomme l'équivalent de 6 litres pour 100km. Ces émissions passent à 194 g CO<sub>2</sub>eq./km pour une consommation équivalente à 8 litres pour 100km.

#### **6.2.6.6 L'hybride parallèle**

Un hybride parallèle émet plus de dioxyde de carbone à la production qu'un véhicule classique dû à la mise en place du système d'hybridation. Les émissions de production ont été estimées à 40 g CO<sub>2</sub>eq./km pour un kilométrage de 200 000km. L'hybride parallèle consomme de l'essence et sera donc plus nocif à consommation équivalente. Toutefois, nous estimons qu'un véhicule hybride consomme moins qu'un véhicule traditionnel. Nous basons donc nos hypothèses sur une consommation réduite à 4 et 6L/100km. Une consommation de 4L/100km correspond à un rejet de 132g CO<sub>2</sub>eq./km tandis qu'une consommation de 6L/100km correspond à une émission de 179g CO<sub>2</sub>eq./km.

#### **6.2.6.7 L'hybride rechargeable**

L'hybride rechargeable est difficile à estimer tant dans sa production que dans son utilisation. En effet, il existe plusieurs versions d'hybrides rechargeables qui présentent toutes une autonomie différente. Par ailleurs, ces véhicules, tout comme les véhicules électriques, dépendent des émissions de dioxyde de carbone du réseau électrique. Nous estimerons donc les émissions lors de l'élaboration des scénarios dans la comparaison.

#### **6.2.6.8 La pile à combustible à l'hydrogène**

Tout comme les hybrides rechargeables, il est difficile d'estimer les émissions liées aux véhicules à hydrogène essentiellement à cause de leur production. Une voiture à hydrogène peut stocker 5kg d'hydrogène sous une pression de 800 bars. Cela équivaut à environ 20 litres d'essence<sup>56</sup>. Nous estimons donc les émissions pour une consommation de 1,25kg et de 1,75kg d'hydrogène pour 100km. Les émissions de CO<sub>2</sub> pour 1,25kg d'hydrogène sont donc de 52g CO<sub>2</sub>eq./km pour l'énergie renouvelable et de 189g CO<sub>2</sub>eq./km pour le processus le plus polluant. Les émissions de CO<sub>2</sub> pour 1,75kg d'hydrogène sont en revanche de 56g CO<sub>2</sub>eq./km pour l'énergie renouvelable et de 248g CO<sub>2</sub>eq./km pour le processus le plus polluant. Les émissions liées à l'hydrogène peuvent donc varier de manière conséquente. En règle générale, l'hydrogène est produit grâce au gaz naturel qui se situe plus au moins entre les deux au niveau des émissions.

---

<sup>56</sup> <http://energiepourdemain.fr/tag/hydrogene/>

### **6.2.6.9 La voiture au bioéthanol**

Le bioéthanol est basé sur le même processus de fabrication que les véhicules à combustion ordinaires. Ce type de carburant consomme 30% de plus qu'un véhicule à essence. Nous observons donc des émissions pour une consommation de 6,5 L et 9 L/100km. Pour une consommation de 6,5 L/100km nous obtenons des rejets de 108g CO<sub>2</sub>eq./km. Ensuite, pour une consommation de 9 L/100km les émissions s'élèvent à 136g CO<sub>2</sub>eq./km. Le Bioéthanol est une alternative intéressante. Toutefois, le fait qu'elle nécessite des végétaux pour fonctionner ne semble pas viable pour une solution long terme pour tous.

### **6.2.6.10 Comparaison**

Notre premier élément de comparaison se base sur la consommation. Plus précisément, nous comparons la consommation en fonction des émissions de la production d'électricité. Nous pouvons donc proposer une équivalence entre véhicules à combustion et véhicules électriques. Nous analysons donc l'équivalent de la consommation en terme de L/100km. Nous observons une consommation variable des véhicules électriques en terme de consommation. Cette comparaison s'observe entre pays. Par exemple, le Paraguay et l'Islande atteignent des chiffres impressionnants contrairement à l'Inde et à l'Afrique du Sud (Wilson, L., 2013, p. 13. ; Annexes 34 – 35). En effet, nous observons que le cycle de vie d'un véhicule électrique, en terme de consommation, au Paraguay est équivalent à utiliser un véhicule à combustion qui consomme 1 L/100km. En revanche, utiliser un véhicule électrique ordinaire en Inde consomme l'équivalent de 12 L/100km. Enfin, utiliser un véhicule électrique en Allemagne correspond à une consommation de 5 L/100km. Nous pouvons donc conclure que sur l'entièreté de son cycle de vie, détenir une voiture électrique dans les pays dont l'empreinte écologique de l'électricité est élevée, ne serait bénéfique que pour un aspect de délocalisation de la pollution et non pas de respect de l'environnement. En comparaison, un véhicule électrique dans les pays à électricité faible en CO<sub>2</sub> est pratiquement une évidence. Finalement, dans les pays représentatifs de la moyenne mondiale, l'entièreté du cycle de vie d'un véhicule électrique peut être comparé à celui d'un véhicule hybride.

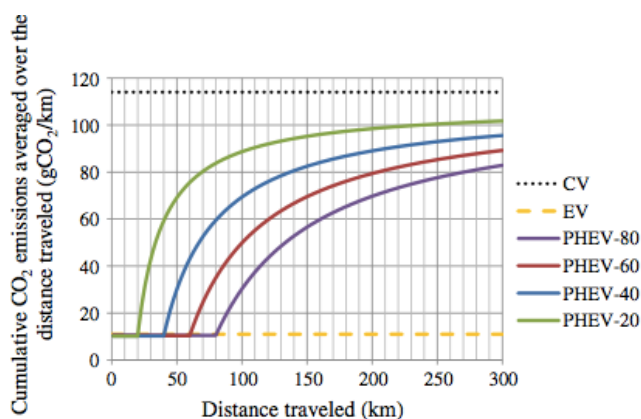
Deuxièmement, il est indispensable d'établir des scénarios. Nous souhaitons donc présenter trois scénarios pour illustrer les différents cas actuels. Le premier est un scénario dans lequel l'électricité produite est faible en CO<sub>2</sub>eq. Le deuxième scénario présente une situation dans laquelle l'électricité produite rejette un niveau moyen de

CO<sub>2</sub>eq. Finalement, la dernière reflète une situation, telle que celle en Inde, en Afrique du Sud ou en Australie actuellement où l'électricité générée provoque d'importantes externalités. Ces scénarios sont illustrés par des graphiques représentatifs (Graphique 9 – 11 ; Doucette, R.T. et al., 2011, p. 2321). Il est important de préciser que ces scénarios ne tiennent pas compte des émissions de production des véhicules qui impactent le cycle de vie. Par ailleurs, il est ici question de véhicules équivalents.

#### 6.2.6.10.1 Scénario 1 : Emissions faibles du réseau électrique

Premièrement, nous présentons le scénario dans lequel l'électricité produite est faible en carbone tel que c'est le cas pour la France. Les voitures électriques y sont donc beaucoup plus intéressantes que les véhicules conventionnels. Ensuite, en fonction du kilométrage quotidien et du budget, les voitures hybrides rechargeables peuvent également s'avérer intéressantes tant que les trajets quotidiens soient réduits. En effet, en deçà de 80km, il est intéressant d'opter pour un hybride rechargeable car les émissions de production d'un véhicule électrique sont nettement plus élevées. Toutefois, au-delà de 80km, il est nettement plus intéressant d'opter pour un véhicule électrique. Le seul autre type de véhicule qui pourrait éventuellement défier les véhicules électriques serait le véhicule à hydrogène. Cela étant dit, seul l'hydrogène produit grâce aux énergies renouvelables est considéré comme équivalent ce qui représente une partie minime de l'hydrogène produit aujourd'hui.

**Graphique 9.** Emissions de CO<sub>2</sub> en fonction du kilométrage



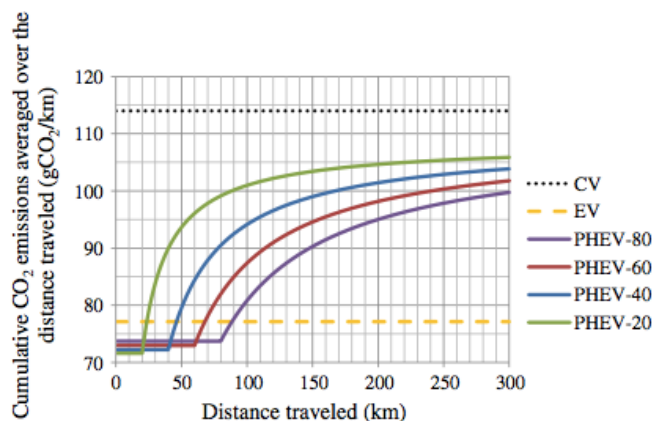
Source : Doucette, R.T. et al., 2011, p. 2321

#### 6.2.6.10.2 Scénario 2 : Emissions moyennes du réseau électrique

Ensuite, nous observons le cas où l'électricité moyenne provient de nombreuses sources. Dans ce cas, il devient toujours plus intéressant de considérer les plug-ins

en fonction du kilométrage. En considérant les trajets quotidiens limités et les émissions de production, il est fortement probable que la balance penche pour l'hybride rechargeable. En effet, si l'on ne compte que sur ses capacités électriques, le plug-in devient plus efficient que le véhicule électrique. Cet écart est principalement causé par la différence de temps de charge et le poids des batteries. De plus, bien qu'il ne soit toujours pas question de véhicules au LPG ou au CNG, les véhicules à l'hydrogène deviennent potentiellement plus intéressants (toujours en gardant à l'esprit que cela va dépendre de la production de l'hydrogène). Si l'hydrogène est produit avec du gaz naturel, il sera sans doute plus intéressant de rester concentré sur les hybrides rechargeables.

**Graphique 10.** Emissions de CO<sub>2</sub> en fonction du kilométrage

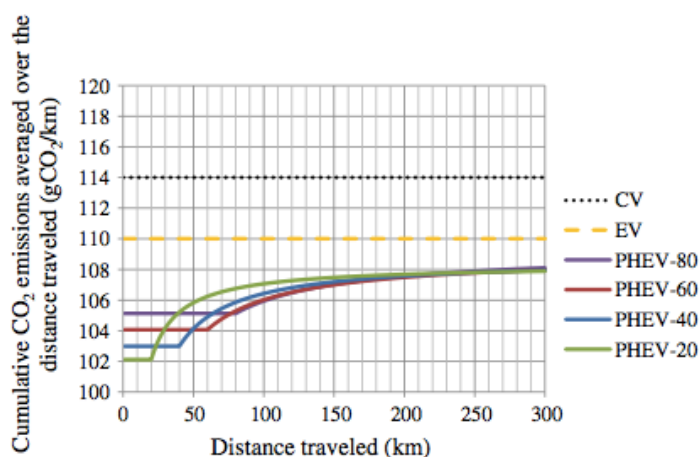


Source : Doucette, R.T. et al., 2011, p. 2321

### 6.2.6.10.3 Scénario 3 : Emissions élevées du réseau électrique

Enfin, le troisième scénario reflète un pays dont l'électricité produite rejette beaucoup de dioxyde de carbone. Tout d'abord, si l'on considère qu'il s'agit de véhicules équivalents, le point de rupture des véhicules électriques est passé, et cela indépendamment du kilométrage. De ce fait, ces véhicules ne seront donc plus pris en compte. Les plug-ins restent intéressants, bien que l'échelle change et l'écart entre les émissions des différents véhicules est sensiblement moins conséquent (Doucette, R.T. et al., 2011, p. 2321). Dans ce type de scénarios, les véhicules à combustion telle que le CNG et le LPG deviennent intéressants, tout comme les hybrides parallèles et les voitures à l'hydrogène. Si l'hydrogène est produit grâce à des sources d'énergies faibles en CO<sub>2</sub>, il s'agira d'une alternative à haut potentiel. Si l'hydrogène est produit grâce au charbon, cela n'a pas d'avantage. Il est donc important de questionner la provenance de l'hydrogène.

### Graphique 11. Emissions de CO<sub>2</sub> en fonction du kilométrage



Source : Doucette, R.T. et al., 2011, p. 2321

#### 6.2.7 Conclusion

Pour conclure, il est difficile d'estimer avec certitude les aspects du cycle de vie. Le nombre d'hypothèses, de paramètres ainsi que les variables rendent ces estimations extrêmement complexes. Bien que cela ait été mentionné au début du travail, cela s'est d'autant plus fort ressenti lors de la réalisation. De plus, certains auteurs ne détaillent pas les résultats obtenus, il est donc compliqué de vérifier les hypothèses. Sans oublier le fait qu'il est souvent laborieux de trouver les informations spécifiques dû au manque de transparence. Il faut aussi trouver des données pour des véhicules comparables, avec leur propre efficacité, et le contexte d'utilisation. Etablir une comparaison réaliste de véhicules équivalents dépend grandement de nombreux éléments, c'est pourquoi nous ne souhaitons pas proposer un graphique récapitulatif afin de ne pas fausser la conclusion et donc le résultat de l'étude. Toutefois, les informations fournies au cours de ce travail permettent une estimation des émissions de tout types de véhicules en fonction des leurs propriétés respectives.

Par ailleurs, il est essentiel pour les utilisateurs de véhicules électriques d'utiliser de l'électricité de sources renouvelables afin d'optimiser l'effet escompté. Utiliser de l'électricité produite grâce au gaz naturel aura un impact similaire à celui d'un véhicule hybride. Utiliser de l'énergie faible en carbone réduit de moitié les émissions totales du meilleur véhicule à combustion. De surcroît, du puits à la roue, les émissions de CO<sub>2</sub> pourraient être diminuées de 51% en Angleterre, de 60% aux Etats-Unis et de 91% en France (King, D., 2010, p. 15).

Ensuite, il est important de rappeler l'importance du recyclage et de la réutilisation. Les pays hors Europe devraient se conformer aux normes qu'impose la réglementation européenne. Il ne faut cependant pas en rester là. En effet, il faut sans cesse aller de l'avant pour un recyclage plus efficient et plus efficace. Certains composants tel que le lithium doivent impérativement être recyclés et réutilisés dans des proportions nettement supérieures si l'on veut compter ces matériaux dans les années à venir. De plus, les batteries au nickel-zinc présentent du potentiel et peuvent s'imposer comme alternative au lithium avec un taux de recyclage et de récupération plus élevé.

De manière similaire, nous avons démontré que l'empreinte écologique de l'aluminium est nettement plus néfaste que celle présentée par l'acier. Il est donc important de limiter les émissions de production et d'optimiser le processus de recyclage qui n'est pas encore optimal.

Nous soulignons également le manque d'efficacité de l'hydrogène qui se révèle problématique. En effet, l'hydrogène requiert plus d'énergie à la fabrication que ce qu'elle ne libère lors de sa combustion. Dans le cas où l'hydrogène est produit grâce aux sources renouvelables, nous pouvons faire abstraction de cette efficacité. Cependant, il faut également s'interroger sur l'utilisation plus judicieuse de cette source d'énergie. Nous pouvons notamment penser à la charge de batterie électrique qui présente une efficacité nettement supérieure. Il s'agit ici d'une simple mise en garde, les technologies doivent continuer à être développées pour améliorer la situation et non pas être arrêtées.

Les alternatives tels que le CNG et le LPG peuvent s'avérer intéressantes dans certains cas. Il faut toutefois préciser que ces éléments dépendent encore des énergies fossiles.

Il a également été question de problèmes d'infrastructures électriques dans cette étude. En effet, plusieurs articles cités questionnent leurs capacités d'adaptation en cas de développement massif du marché du véhicule électrique et de l'hybride rechargeable. La demande en électricité augmenterait de manière exponentielle et il serait nécessaire d'adapter le réseau par le développement croissant de sources d'énergies renouvelables.

Bien que cet aspect n'ait pas été abordé dans le travail, exclusivement en terme de coûts de propriété (total cost of ownership - TCO), les véhicules électriques ne sont toujours pas considérés comme intéressants financièrement. Cela est lié au coût d'achat élevé et à la question qui subsiste : qu'en est-il de sa valeur résiduelle. Il en va de même pour les hybrides rechargeables mais dans une mesure plus réduite (Annexe 36). En revanche, les véhicules au CNG peuvent s'avérer intéressants financièrement (Annexe 37). Cela étant dit, le diesel domine cet aspect financier.

Finalement, il est important de garder à l'esprit que la production et le raffinage d'essence, de diesel, d'hydrogène, etc. utilisés par les véhicules consomment également une quantité significative d'électricité. Cette électricité est souvent tirée de lignes à haute tension avoisinantes. En fonction des pays, cette électricité est souvent produite par de l'énergie fossile et cause donc une émission de CO<sub>2</sub> supplémentaire souvent négligée. Les chiffres des constructeurs omettent souvent de mentionner cet aspect et les données ne sont plus divulguées depuis 2005<sup>57</sup>.

## **7 Partie 3 : proposition d'un modèle universel**

Après ces nombreux éléments, il est indispensable de réaliser une analyse critique afin de structurer cette information et de lui donner de la cohérence.

Avant tout, il est évident que les mesures actuelles de CO<sub>2</sub> ne correspondent pas aux nouveaux types de véhicules et ne nous permettent pas de comparer les différentes technologies (Hill, N., 2013, slide 3). Nous devons donc porter un regard global sur la situation. La problématique du cycle de vie est d'autant plus cruciale qu'une augmentation de 700 millions à 2 milliards de véhicules dans le monde est attendue entre 2000 et 2050 (Hawkins, T. et al., 2012, p. 53). Nous avons d'ailleurs passé le cap du milliard de voitures en 2010<sup>58</sup>.

### **7.1 Principe du modèle**

Suite aux nombreux éléments illustrés dans la partie 2 et afin de donner une image objective des rejets, nous proposons de mettre au point un modèle universel. Ce modèle vise à reprendre les émissions du cycle de vie dans le but d'accroître la transparence du secteur automobile tout en encourageant une prise de conscience des consommateurs. Nous appellerons ce modèle : 'Transparent Emissions'. Par

---

<sup>57</sup> <https://www.youtube.com/watch?t=295&v=854qFolHp4s>

<sup>58</sup> <http://www.20minutes.fr/planete/775994-20110826-automobile-cap-milliard-voitures-terre-depasse>

ailleurs, les utilisateurs de ce modèle doivent suivre les lignes directrices proposées par l'ISO 14040 et l'ISO 14044 en matière de cycle de vie.

La mise en place de ce modèle devrait encourager les constructeurs à réduire l'empreinte écologique de toutes les étapes de vie de leurs véhicules. Ces mesures ne touchent pas uniquement les constructeurs mais tous les intervenants dans le cycle de vie d'un véhicule.

Etant donné le nombre conséquent de facteurs, il paraît indispensable de standardiser le processus tout en laissant un peu de flexibilité pour adapter le modèle.

## **7.2 Caractéristiques du modèle**

Le modèle proposé doit être standardisé afin d'éviter toute manipulation des chiffres et afin d'assurer une certaine homogénéité. Il est également indispensable de proposer une équivalence pour les différents types de voitures. Par ailleurs, étant donné que certains véhicules causent des émissions variables, il est important de laisser une mesure de flexibilité. Ce modèle reprend donc les éléments qui composent l'analyse de cycle de vie. Cela signifie que les facteurs pris en compte sont ; les émissions liées à l'extraction et à la fabrication des matières premières, les émissions de transport, les émissions de production et d'assemblage, les émissions d'utilisation et les émissions de recyclage, sans oublier les émissions indirectes et les pertes.

Bien que ces éléments demandent de la recherche, les constructeurs, en coopérations avec leurs intervenants, sont les mieux placés pour obtenir ces données. En effet, les constructeurs ont accès à une grande partie des éléments requis. Si certains chiffres se révèlent indisponibles, ils devraient être rendus publics par le gouvernement en question.

Par ailleurs, le kilométrage, propre aux différents véhicules, devrait refléter une espérance moyenne réaliste. A titre d'exemple, nous estimons actuellement qu'un véhicule au diesel permettra une plus grande espérance de vie qu'un véhicule électrique. L'espérance moyenne doit être considérée comme le kilométrage moyen atteignable sans modification majeure à la voiture (changement de moteur, des

batteries, etc). Par ailleurs, la consommation devrait être relevée lors d'essais en conditions réelles et non basée sur des conditions optimales inatteignables.

L'électricité utilisée pour charger les batteries des véhicules doit aussi tenir compte d'un certain niveau de décharge qui touche les utilisateurs peu fréquents.

### **7.3 Modèle**

Le modèle proposé est représenté un cycle de vie simplifié et adapté au secteur de l'automobile. Il n'y a donc rien de particulièrement innovant concernant le modèle. Cependant, comme nous l'avons souligné précédemment, un tel outil est indispensable aujourd'hui. En effet, les émissions ne sont plus toujours centrées sur l'utilisation et le modèle actuel doit donc évoluer avec l'automobile.

Comme nous pouvons le constater dans le graphique 12 ci-dessous, les émissions totales sont données en grammes de CO<sub>2</sub> par voiture avant d'être transformées, grâce à l'estimation de kilométrage, spécifique à chaque véhicule, en grammes de CO<sub>2</sub> par kilomètre. Cela permet de donner une idée précise de ce que rejette un véhicule.

Nous observons trois catégories qui reprennent les émissions de production, d'utilisation et de recyclage. Ces catégories peuvent être subdivisées en émissions directes et indirectes avant d'être une fois de plus subdivisées en différents composants ou étapes. Seules les catégories applicables doivent être complétées.

En ce qui concerne les sources d'énergie, l'électricité et l'hydrogène ne rejettent pas des émissions fixes. Il faut donc compter la moyenne nationale. Toutefois, un scénario alternatif peut également être réalisé pour illustrer le potentiel d'émissions si les processus de production sont renouvelables. Par ailleurs, les véhicules qui combinent plusieurs sources d'énergie doivent multiplier la proportion de chaque carburant par la consommation utilisée pour parcourir une distance de 100km. Par exemple, un véhicule roulant au LPG consomme 5l/100km et utilise 75 % de LPG pour 25% d'essence. Il faut donc combiner les proportions des différents carburants pour obtenir la consommation estimée.

**Graphique 12. Modèle – ‘Transparent Emissions’**

Modèle - Transparent Emissions						
		Kilométrage estimé				
		Consommation par 100 km				
		Composants	Unité	Emissions	Quantités utilisées	Emissions totales
Extraction - Production - Assemblage - Transport	Emissions directes	Aluminium	g CO2/kg			0
		Acier	g CO2/kg			0
		Cuivre	g CO2/kg			0
		Zinc	g CO2/kg			0
		Magnésium	g CO2/kg			0
		Fibre de carbone	g CO2/kg			0
		Verre	g CO2/kg			0
		Plastique	g CO2/kg			0
		Caoutchouc	g CO2/kg			0
		Textiles	g CO2/kg			0
		Composants batteries	g CO2/kg			0
		Autres	g CO2/kg			0
		Assemblage	g CO2/véhicule			0
	Emissions indirectes	Infrastructures automobiles	g CO2/production espérée			0
		Electricité (pertes comprises)	g CO2/kWh			0
		Carburant (pertes comprises)	g CO2/l			0
		Infrastructures sources	g CO2/production espérée			0
		Transport	g CO2/véhicule			0
	Total	Total émissions directes	g CO2/Véhicule			0
		Total émissions indirectes	g CO2/Véhicule			0
		Total émissions production	g CO2/Véhicule			0
		Total émissions production	g CO2/km			#DIV/0!

		Composants	Unité	Emissions	Unités/100 km	Unités/km	Emissions totales (km)
Utilisation	Emissions directes	Esence - Production	g CO2/l	464		0	
		Esence - Combustion	g CO2/l	2314		0	
		Diesel - Production	g CO2/l	564		0	
		Diesel - Combustion	g CO2/l	2677		0	
		LPG - Production	g CO2/NM3	192		0	
		LPG - Combustion	g CO2/NM3	1533		0	
		CNG - Production	g CO2/l	210		0	
		CNG - Combustion	g CO2/l	2032		0	
		Hydrogène - Production	g CO2/kg			0	
		Hydrogène - Combustion	g CO2/kg			0	
		Bioethnol (pure) - Production	g CO2/l	6		0	
		Bioethanol (pure) - Combustion	g CO2/l	822		0	
		Electricité - Production	g CO2/kWh			0	
		Electricité - Combustion	g CO2/kWh			0	
		Autre - Production					
		Autre - Combustion					
		Entretien et maintenance	g CO2/ Entretien			0	
	Emissions indirectes	Infrastructures sources	g CO2/production espérée			0	
	Total	Total émissions utilisation	g CO2/km				

		Composants	Unité	Emissions	Quantité	Emissions totales
Recyclage	Emissions directes	processus de recyclage	g CO2/véhicule			0
		Traitement des résidus	g CO2/véhicule			0
	Emissions indirectes	Electricité (pertes comprises)	g CO2/kWh			0
		carburant (pertes comprises)	g CO2/l			0
	Total	Infrastructures	g CO2/production espérée			0
		Total émissions recyclage	g CO2/véhicule			0
		Total émissions recyclage	g CO2/km			#DIV/0!

Cycle de vie	Total	Total émissions cycle de vie	g CO2/km	#DIV/0!	
			g CO2/véhicule	#DIV/0!	

## 7.4 Exemple

Si nous prenons l'exemple d'une VW golf 7 1,6l TDI Bluemotion. Nous imaginons tout d'abord que cette voiture est capable d'effectuer 300 000km sans intervention majeure du garage. Nous complétons notre modèle pour un taux de production estimé de 23g CO<sub>2</sub>/km. Nous combinons cela avec une consommation de 3,2 l/100km, une émission de production du diesel de 564 g CO<sub>2</sub>/l et une émission de combustion de 2678 g CO<sub>2</sub>/l. Enfin, nous estimons à 5 g CO<sub>2</sub>/km les émissions liées au recyclage. Ces éléments nous donnent finalement un rejet de 132g CO<sub>2</sub>/km.

## 7.5 Limites

Les émissions ne sont pas calculées en fonction d'un type de conducteur spécifique et représentent donc une moyenne. Cela signifie qu'un conducteur agressif et constamment en excès de vitesse dépassera allègrement la consommation préétablie. Il n'est pas possible de prendre cette variable en compte dans un modèle standardisé. Nous pouvons en revanche envisager l'ajout du type de conducteur dans le modèle. Admettons que plusieurs profils de conducteurs existent en fonction de leur style de conduite et de leurs trajets quotidiens. Ensuite, admettons que nous pouvons estimer l'impact des ces facteurs en terme de pourcentage d'émissions. Nous pouvons par exemple évaluer la consommation d'un conducteur agressif à 120% par rapport à la consommation indiquée. Il serait donc théoriquement possible d'adapter les émissions au kilomètre en fonction de ce paramètre supplémentaire.

De même, il est impossible de présenter un modèle standardisé qui fait également du cas par cas. Nous proposons donc différents résultats envisageables en fonction des conditions d'utilisation mais cela n'est pas forcément représentatif. Il est donc également intéressant que les concessionnaires proposent des analyses de cycle de vie au cas par cas en fonction des caractéristiques propres des clients. Cela permettrait de proposer aux personnes intéressées une estimation précise de leurs externalités.

Afin de prendre en compte l'évolution des émissions, il est préférable d'adapter les estimations aux nouvelles infrastructures. Cela peut être effectué de manière annuelle étant donné qu'une fois les données établies, certains éléments peuvent être réutilisés pour les estimations d'autres véhicules.

Un système d'audit devrait être mis en place pour vérifier la validité des estimations avancées. Sans vérification, il faut compter sur la bonne foi des constructeurs et autres intervenants. Un système de validation devrait donc être instauré.

Finalement, le modèle proposé se focalise sur le CO<sub>2</sub> alors que ce n'est pas le seul élément nocif dans la production et l'utilisation de véhicules. En nous centrant sur ces émissions, nous ne faisons plus attention aux autres éléments. Il est donc indispensable de présenter différents modèles qui reprennent les particules nocives pour l'environnement et la santé.

## **7.6 Conclusion**

Le modèle 'Transparent Emissions' permet de donner une idée précise des émissions de cycle de vie d'un véhicule. Comme indiqué, cela assure plus de transparence et encourage à réduire toutes les émissions afin de présenter un taux plus compétitif.

Ce modèle a certainement des failles et ne prétend pas être exhaustif pour l'ensemble des émissions. Toutefois, il reprend déjà un nombre important d'émissions négligées actuellement. De plus, il illustre ce vers quoi les constructeurs devraient s'orienter.

Si nous arrivons à présenter un modèle viable, les ressources du secteur automobile peuvent permettre de développer un modèle encore mieux adapté qui pourrait être mis en place rapidement. Cependant, les constructeurs n'ont aucun incitant à mettre en place ce genre de modèle. Il faut donc que le gouvernement intervienne.

## **8 Analyse critique**

Lors de cette étude des différents cycles de vie, nous constatons que des émissions sont constamment rejetées à un moment ou à un autre du cycle de vie. Lorsqu'une solution est proposée, elle amène une problématique complémentaire. Nous observons la situation actuelle du diesel qui était annoncée, il y a peu, comme plus propre. Aujourd'hui, ce véhicule est fortement critiqué pour les particules nocives pour la santé qu'il émet. Il en va de même pour les véhicules électriques. Les émissions liées aux batteries sont conséquentes sans oublier l'influence de la source d'énergie qui se révèle critique.

Objectivement, il est compliqué de présenter l'ensemble des impacts de l'automobile

car toutes les variables à prendre en compte influencent le résultat final. Idéalement, il faudrait mesurer les différents facteurs d'influence comme nous l'avons fait dans le point 6.2.2.1.5. Toutefois, il est important de se centrer sur une facette de la problématique, c'est pour quoi nous avons insisté sur les rejets de CO<sub>2</sub>eq. et le réchauffement climatique. Il est toutefois utile de préciser que certains véhicules, annoncés comme propres, ont en réalité un impact plus important sur d'autres aspects.

Nous avons estimé que la méthode de cycle de vie était la plus intéressante à analyser. Toutefois, nous aurions pu procéder à une autre méthode. Le WTW, que nous utilisons partiellement, illustre les émissions d'énergies de leur extraction à leur application. Ce processus insiste sur l'efficacité des énergies ce que nous soulignons par la consommation des véhicules. Nous aurions pu analyser une phase du cycle de vie plutôt que l'ensemble. En effet, cela nous aurait permis d'effectuer une étude plus approfondie et nous aurait permis d'analyser l'ensemble des facteurs nocifs pour cette phase plutôt que de se limiter au CO<sub>2</sub>eq. Cependant, d'après nous, l'ensemble du cycle de vie est l'élément le plus représentatif étant donné que les émissions varient en fonction des phases du cycle de vie pour les différents véhicules. De même, nous aurions pu limiter la phase descriptive de la partie I pour insister davantage sur les différents éléments du cycle de vie mais cela semblait, à nos yeux, important pour la compréhension générale du travail.

Les entretiens informels ont contribué à la rédaction de ce mémoire. La réalisation de ces entretiens de manière informelle ne s'est pas faite par choix mais plutôt en fonction des situations et des opportunités. Toutefois, nous sommes conscients qu'une intervention plus formelle de ces différents experts aurait pu apporter une crédibilité supplémentaire aux éléments avancés. Par ailleurs, bien que nous aurions aimé procéder à des entretiens complémentaires pour approfondir certains aspects, l'éventail des informations requises et la spécificité de celles-ci ne se prêtaient pas à un nombre limité d'entretiens. D'après nous, les rapports et les articles scientifiques contenaient l'information la plus exhaustive et la plus adaptée.

Nous aurions également pu prendre le facteur de coût en compte dans la réalisation de ce travail. Cela aurait permis de donner un rapport émissions/prix intéressant. Nous avons d'ailleurs mentionné l'utilisation du coût total de propriété, utilisé constamment dans les entreprises de leasing. Néanmoins, notre objectif se limitait à

évaluer la mesure dans laquelle les différents véhicules permettraient d'épargner notre environnement.

Ensuite, nous ne présentons pas de résultats définitifs et nous ne mettons pas un véhicule particulier en avant. Cela résulte du fait que chaque véhicule présente des avantages et les émissions liées dépendent des propriétés et des caractéristiques, ce qui ne convient pas pour représenter une situation dans son ensemble de manière objective.

Nous pouvons constater que, bien qu'une majorité des articles utilisés aient été validés par des pairs, les experts ont des convictions divergentes en terme de voitures pour l'avenir. Cela peut être lié à un investissement personnel, à une dynamique spécifique ou aux ressources d'une certaine zone géographique. Certains auteurs et experts pensent donc être objectifs mais présentent des résultats biaisés en fonction de leurs convictions.

Enfin, bon nombre d'études ne prennent pas en compte l'évolution des technologies et des infrastructures dans leurs études. Par exemple, le réseau électrique propose une proportion croissante d'énergies renouvelables ce qui réduit les émissions liées au réseau. Nous pouvons donc dire que la voiture électrique devient moins nocive au fil des années. C'est pourquoi nous conseillons d'adapter le modèle en fonction de l'évolution des émissions.

Finalement, certains articles se basent sur une espérance de vie commune pour tous les véhicules et cela pour permettre une homogénéité des résultats étant donné que les émissions sont calculées sur une base commune. Toutefois, d'après nous, cela n'est pas représentatif de la situation actuelle. En effet, différents types de véhicules aspirent à différents kilométrages. C'est pourquoi nous avons laissé la flexibilité du kilométrage dans notre modèle afin d'obtenir une estimation réaliste en fonction de toutes les spécificités des véhicules.

## 9 Partie 4 : implications pour le futur

### 9.1 Solutions existantes

Il existe déjà de nombreuses solutions à mettre en place afin de limiter les externalités du secteur automobile. Cependant, il faut du temps pour mettre ces solutions en place à grande échelle étant donné qu'elles demandent généralement des changements majeurs d'infrastructures.

Premièrement, il est essentiel, lors de l'utilisation d'un véhicule électrique, de s'assurer que le courant utilisé est issu d'une source d'énergie faible en CO<sub>2</sub>. Cette mesure permet déjà de limiter bon nombre d'externalités potentielles.

Ensuite, il est intéressant de considérer les nouvelles bornes de stockage de l'électricité proposé par Tesla<sup>59</sup>. En combinaison à des panneaux solaires ou à une éolienne domestique<sup>60</sup>, cela permet de conserver l'électricité qui n'est pas utilisée pour recharger un véhicule par exemple. Bien que ces installations aient clairement un coût, nous pourrions envisager l'aide de l'état afin de permettre aux familles et aux entreprises de disposer de leur propre approvisionnement électrique.

Par ailleurs, comme nous l'avons mentionné dans ce travail, utiliser un véhicule adapté à ses besoins peut potentiellement réduire considérablement les émissions de CO<sub>2</sub>; sans oublier l'évolution des réseaux de covoiturage, les transports en commun et les transports individuels alternatifs tels que le vélo ou la marche.

En outre, certaines entreprises montrent l'exemple à suivre et montrent qu'il est possible de limiter les émissions. Nous prenons l'exemple de Renault qui a inauguré une usine d'assemblage qui n'émet pas de CO<sub>2</sub> à l'utilisation. Ces solutions existent donc et permettent de limiter encore davantage l'impact des véhicules déjà sur le marché.

De surcroît, il est également intéressant de considérer autrement la protection des brevets. Les constructeurs peuvent rendre une partie de leurs brevets publics pour permettre un développement nettement plus rapide grâce à un plus grand nombre d'intervenants. Le principe open-source pourrait éventuellement être appliqué à l'automobile dans la même optique. Les constructeurs peuvent ainsi bénéficier de cet

---

<sup>59</sup> <http://www.teslamotors.com/powerwall>

<sup>60</sup> <http://www.eolienne-particulier.info/>

outil pour faire avancer les technologies plus vite et faire circuler des idées nouvelles et différentes.

Une solution existante, qui peut encore être développée et optimisée, est le recyclage et la réutilisation. Il est essentiel de tirer un maximum des éléments déjà à disposition. L'exemple d'Umicore qui recycle les métaux précieux pour leur donner une nouvelle vie illustre bien cet aspect. Le processus n'est certainement pas encore respectueux de l'environnement mais il vise néanmoins à limiter les émissions grâce à la réutilisation.

Enfin, afin de palier à l'anxiété de l'autonomie et au temps de charge, la mise en place de points de chargement rapide serait indispensable. Par ailleurs, la standardisation des prises et des socles est inévitable. Ces infrastructures faciliteront la conversion dans les pays adaptés ; même dans le cas contraire, la voiture électrique est le seul véhicule qui devient plus propre en même temps que le réseau électrique.

## 9.2 Solutions potentielles

Tout d'abord, une petite entreprise américaine nous permet d'envisager une alternative à la production actuelle de voitures. En effet, Local Motors est actuellement à l'avant-plan de nouvelles voitures produites par imprimante 3D<sup>61</sup>. Ces voitures y sont conçues en quelques heures dans une matière composite de plastique AVC et de fibres de carbone. Ce processus n'est clairement pas adapté pour le moment à la production grande échelle qui permet actuellement de produire une centaine de voitures de manière simultanée à l'aide de 100 personnes. Toutefois, il est important de garder à l'esprit les avantages et les possibilités de cette méthode. Il faut noter que l'impression 3D permet de construire la structure intégralement<sup>62</sup>. En d'autres mots, il est possible de produire des pièces avec une résistance accrue et un poids largement inférieur. De plus, la voiture 3D n'utilise que la matière qu'on lui donne pour produire contrairement à l'industrie classique qui produit avec un ratio de 1/20 (buy-to-fly ratio). C'est dire 1 unité pour 20kg de déchet<sup>63</sup>. Nous pouvons donc envisager une réduction considérable de pollution suite à l'arrêt du transport de tous les composants, à la diminution de l'extraction des matières premières, à une augmentation de l'efficacité. Par ailleurs, même si il n'est pas possible de produire la voiture à grande échelle, l'alliage de plastique et de fibres de carbone peut être intéressant à utiliser par les grands constructeurs afin d'éviter l'utilisation,

<sup>61</sup> <https://localmotors.com/3d-printed-car/>

<sup>62</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=daioWIkH7ZI>

<sup>63</sup> <http://uk.businessinsider.com/car-3d-printing-local-motors-strati-2015-2?r=US&IR=T>

du moins en aussi grande quantité, des métaux actuels. Pour ce qui est du recyclage, l'idée est de couper la voiture en petits morceaux, refondre le tout et en produire une nouvelle. Le processus entier permet de simplifier et optimiser le cycle de vie complet.

Ensuite, dans un tout autre aspect, il y a une possibilité de changer la façon d'aborder la problématique. Une situation dans laquelle une alternative permettrait de palier aux externalités négatives de la voiture. Il est question de dispositifs qui capturent et transforment le CO<sub>2</sub> qui a déjà été émis directement dans l'air<sup>64</sup>. Ce système ne suit pas la logique de la capture du CO<sub>2</sub> lors de son émission pour le stocker ensuite. Il est ici question de filtrer l'air et d'en éliminer le CO<sub>2</sub>. Les installations dont il est question réalisent pratiquement le même travail que les arbres mais ne requièrent proportionnellement que 1/1000 de la place. Cela signifie que les terres cultivables ne doivent pas être sacrifiées pour planter des arbres car l'installation peut être disposée même sur des terres inutilisables. Le dispositif en question transforme le dioxyde de carbone en carbone. En réalité, près de 80% du dioxyde de carbone qui passe par le dispositif est traité. Il est concevable de réaliser ce projet à grande échelle, ce qui théoriquement, pourrait capturer l'équivalent des émissions de 300 000 véhicules par an<sup>65</sup>. Le système en question peut donc être fait sur mesure en fonction des besoins d'une communauté. Ils peuvent être installés dans une zone d'énergie renouvelable comme dans une ville à concentration forte en CO<sub>2</sub>. Ce système serait intéressant à mettre en place à condition qu'il fasse partie d'une étape intermédiaire vers un environnement plus propre et non un prétexte pour polluer plus.

Finalement, un autre concept attire notre attention. Il s'agit de l'idée du belge, Bert Holtappels, qui a conçu des cellules électriques rechargeables<sup>66</sup>. Le principe est de faire le plein de piles électriques afin de se débarrasser de l'anxiété des kilomètres. On ferait donc le plein de boules chargées en électricité et une fois les batteries déchargées, elles sont aspirées hors du plein pour pouvoir remettre des boules chargées. Les boules aspirées seraient donc rechargées à la pompe à essence pour les automobilistes suivants. Les cellules sont apparemment stables. Il serait donc question de faire le plein de batteries comme l'on fait le plein de carburant.

---

<sup>64</sup> <http://www.iflscience.com/technology/giant-wall-fans-sucks-carbon-dioxide-straight-out-air>

<sup>65</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=GkEAA7VnyhE>

<sup>66</sup> <http://www.zdnet.be/nieuws/161645/belg-vindt-tankbare-batterijen-uit/>

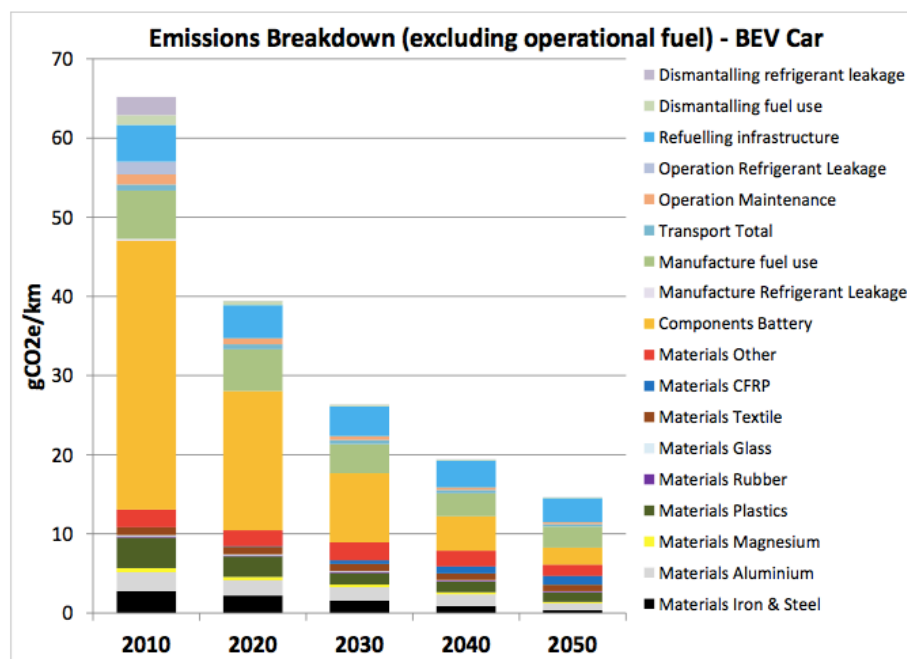
### 9.3 Hypothèses pour l'avenir

Il est difficile d'estimer l'avancement du marché automobile dans les années à venir. Le nombre d'éléments à prendre en compte complique les estimations concernant le présent alors pour le futur, il ne s'agira que de spéculations. Toutefois, certains auteurs l'ont fait et nous proposons donc de voir brièvement les estimations pour les années à venir.

L'article présenté dans « Journal of Power Sources » par O. Van Vliet (Oscar van Vliet, O. et al., 2011, p. 2038) nous permet d'observer un scénario de probabilités quant aux tendances pour 2030. En réalité, il s'attend à ce que le véhicule plug-in soit le plus répandu et ce sans grand écart entre les pays. La seule différence notable est la projection pour l'université de Tokyo avec un taux de pénétration de 80% de Plug-In. Deux estimations ont été établies en ce qui concerne les voitures électriques. Une estimation plus basse avec 6% et une estimation plus élevée avec 30% de pénétration. La demande totale d'électricité va dépendre du nombre de véhicules électriques. Nous nous attendons à une augmentation du nombre de véhicules sur les routes et à un kilométrage moyen stable.

D'après le graphique 12 présenté par l'étude N. Hill (Hill, N., 2013, slide 10), les émissions liées à la production de véhicules électriques devraient chuter de 80% d'ici 2050. Ce graphique présente une vue détaillée des composants et de leur évolution.

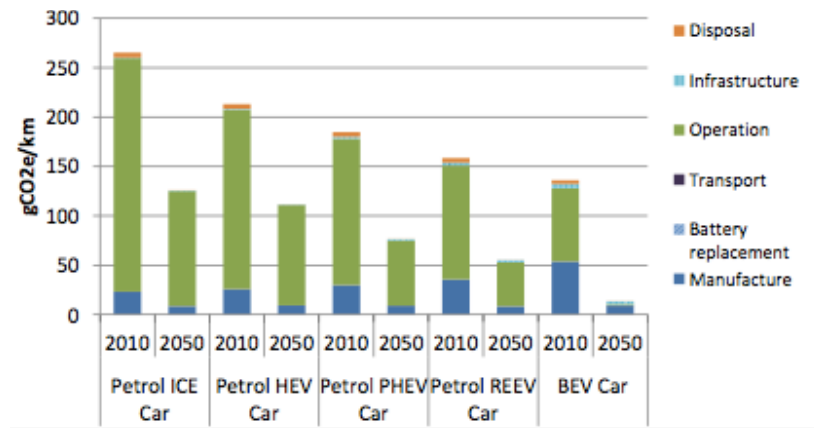
**Graphique 12.** Evolution des émissions de CO<sub>2</sub>eq. liées à la production



Source : Hill, N., 2013, slide 10.

Ensuite, l'étude continue et élabore deux scénarios. Le premier représente le scénario idéal dans lequel nous retrouvons des émissions minimales pour les véhicules électriques en 2050 (Hill, N., 2013, slide 14.; Graphique 13). Les hybrides rechargeables et les véhicules électriques à autonomie étendue suivent mais présentent un écart conséquent par rapport aux véhicules électriques.

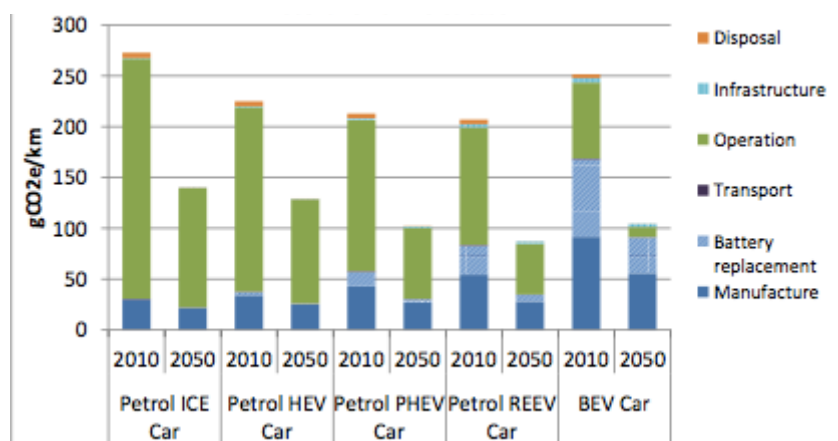
**Graphique 13.** Scénario idéal – g CO<sub>2</sub>eq./km en fonction du véhicule et des années



Source : Hill, N., 2013, slide 14.

Le deuxième scénario reflète la situation la moins favorable. Suivants ces hypothèses, ce sont les véhicules électriques à autonomie étendue et les hybrides rechargeables qui sont les alternatives les plus intéressantes. Ils sont tout de même presque équivalents aux émissions des véhicules électriques. Les émissions des véhicules électriques sont principalement causées par les émissions de production et les émissions de remplacement des batteries.

**Graphique 14.** Scénario pessimiste – g CO<sub>2</sub>eq./km en fonction du véhicule et des années



Source : Hill, N., 2013, slide 14.

## 9.4 Recommandations

En ce qui concerne les conseils, nous souhaitons proposer certaines lignes directrices qui, après la réalisation de cette étude, nous semblent essentielles.

Premièrement, au vu de son impact qui s'étend bien au-delà de l'automobile, il est crucial de promouvoir des sources d'énergies renouvelables. Cette évolution aura également des conséquences directes sur l'ensemble du cycle de vie de tous les véhicules. Cela étant dit l'impact sera d'autant plus ressenti pour les véhicules électriques et les hybrides rechargeables. Cet élément est le plus important car il va au-delà du secteur automobile tout en contribuant à rendre ce secteur plus propre.

Deuxièmement, il est essentiel de promouvoir l'ensemble des véhicules à émissions réduites. Il est évident que certains pays auront tendance à mettre un type de véhicules plus en avant. Toutefois, il ne faut pas négliger le potentiel des autres véhicules pour autant. Par ailleurs, il est important de promouvoir le véhicule qui convient le mieux aux utilisateurs et à la région/pays. Bien que les véhicules mis en avant et étudié dans cette étude ne soient pas toujours propres, il faut encourager cet avancement.

Ensuite, bien que les constructeurs fassent des efforts, il est important d'encourager la transparence. Celle-ci doit être visible pour les données proposées au niveau de la production et de l'assemblage, des avancements technologique réels et de la provenance des composants. En effet, nous avons vu que l'ensemble des constructeurs publie des rapports durables. Il faut néanmoins une prise d'initiative qui dépasse le cadre légal. Le respect des législations ne correspond pas à une prise de positions respectueuses de l'environnement. Par ailleurs, ces entreprises doivent éviter le *greenwashing*<sup>67</sup>.

Pour compléter le point précédent, il parait évident que les mesures actuelles d'émissions des véhicules sont dépassées. Les estimations d'aujourd'hui ne tiennent compte que d'un élément alors qu'il devrait y en avoir une multitude. Nous souhaitons donc obtenir des estimations de cycle de vie proposées par les constructeurs en fonction du type de véhicules, du pays, du kilométrage d'après les données réelles dont ils disposent. Cette tâche revient aux constructeurs car ils ont

---

<sup>67</sup> "Le *greenwashing*, ou écoblanchiment, est une pratique commerciale qui consiste à utiliser des arguments environnementaux souvent trompeurs pour vendre des produits qui ne sont pas, la plupart du temps, si verts."; <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/dico/d/developpement-durable-greenwashing-6026/>

accès à tous les éléments nécessaires et ils ont pour obligation de donner une image réaliste de leur produit. Afin d'assurer une certaine cohérence il est inévitable de présenter des lignes directrices précises des éléments à prendre en compte afin d'émettre un standard. De plus, il est intéressant d'envisager un modèle spécifique, utilisé par tous les constructeurs, qui reprendrait tous les éléments.

En outre, actuellement, aucune réglementation n'est mise en place quant aux émissions de productions des différents véhicules. Il semble pourtant indispensable aujourd'hui de recourir à ce genre de réglementation afin d'encourager une production et une utilisation toujours plus respectueuse de l'environnement

## **10 Conclusion**

Tout au long de ce travail, notre but a été de démontrer que les voitures 'propres' ne sont pas encore respectueuses de l'environnement. Dans l'ensemble, les constructeurs qui aspirent à développer des voitures vertes ont encore un certain travail mais doivent continuer à avancer pour un jour prétendre proposer une voiture propre. Toutefois, cela ne passe pas que par la volonté des constructeurs, toutes les parties prenantes doivent faire des efforts. Cela vaut pour les gouvernements et la promotion d'un réseau électrique plus respectueux de l'environnement mais aussi pour les sous-traitants qui doivent limiter les externalités et les consommateurs qui doivent soutenir les initiatives prometteuses.

Le modèle que nous proposons de mettre d'application par les constructeurs est une simplification du cycle de vie centrée sur les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, même si cela n'est pas un modèle particulièrement innovant, cela permet d'accroître la transparence. Cette visibilité des émissions automobiles aura tendance à encourager les constructeurs à limiter tous les impacts. Par ailleurs, les émissions des différents véhicules varient en fonction du type de voiture et des circonstances. Néanmoins, avec une voiture adaptée et une conduite raisonnable il est déjà possible de réduire de manière considérable les émissions de CO<sub>2</sub>eq. Liées au transport personnel. En effet, les émissions d'utilisation restent les plus conséquentes.

Finalement, il est important de ne pas se focaliser sur une seule problématique. Le gaz à effet de serre doit être corrigé, cela ne fait aucun doute. Toutefois, il y a d'autres éléments néfastes qui sont tout aussi importants et réduire un mal pour en augmenter un autre ne résout pas réellement le problème. Il serait certainement intéressant d'approfondir cet aspect de la problématique.

## I I Bibliographie

### Articles scientifiques :

- Aguirre, K., Eisenhardt, L., Lim, C., Nelson, B., Norring, A., Slowik, P., Tu, N., 2012, pp. 3 – 5, 7 – 10., Lifecycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle.
- Allen, M.R., Frame, D.J., Huntingford, C., Jones, C.D., Lowe, J.A., Meinshausen, M., Meinshausen, N., 2009. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature* 458, pp. 1163–1166.
- Arval, le corporate vehicle observatory France, 2010, pp. 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 22, 37, 38, 39, 41, 45., Tout savoir sur les véhicules électriques
- S. Campanari, G. Manzolini, F. Garcia de la Iglesia,. 2008, p. 466,. *Journal of power*, Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations.
- E. Cetinkaya, I. Dincer, G.F. Naterer, 2011, pp. 2076 - 2079, *International journal of hydrogen energy*, Life cycle assessment of various hydrogen production methods
- S. P. Dayataratne, K. D. Gunwardana, 2014, p.100, *Journal of Cleaner Production*, Carbon footprint reduction: a critical study of rubber production in small and medium scale enterprises in Sri Lanka
- Dincer, I., 2011, *International journal of hydrogen energy*, Green methods for hydrogen production
- R. T. Doucette, M. D. McCulloch. 2011. p2321. *Applied Energy*. Modeling the prospects pf plus-in hybrid electric vehicles to reduce CO<sub>2</sub> emissions
- Dufour, X. P., Serrano, D., Gálvez, J. L., González, A., Soria E., Fierro J. L.G., 2011, *International journal of hydrogen energy*, Life cycle assessment of alternatives for hydrogen production from renewable and fossil sources
- Eckermann, E., (2001). *World History of the Automobile*. SAE Press. p. 14.
- Egede, P., T. Dettmer, C. Herrmann, S. Kara,. 2015, pp. 233, 235, 237, ScienceDirect, Life Cycle Assessment of Electric Vehicles – A Framework to Consider Influencing Factors
- Ehsani, M., Gao, Y., Emadi, A., 2010. *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*, second ed. CRC Press, New York. p. 108

- Ellingsen, L. A. W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valøen, L. O., Strømman, A. H., 2014, pp. 113 – 124., Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *J Ind Ecol*
- M. Eriksson et S. Ahlgren, 2013, pp. 30-31. LCA's of petrol and diesel, a literature review
- Faria, R., Moura, P., Delgado, J., de Almeida AT., 2012, pp. 19 - 30., A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system. *Energy Convers Manag*
- Francisco, L., Vigneron, J., *La communication environnementale*, Economica, Paris, 1996, p.18.
- Gao, L., Winfield, Z. C., 2012, p. 612., Life Cycle Assessment of Environmental and Economic Impacts of Advanced Vehicles., *Energies*
- Guérin, A-J, Libaert T., 2008, p. 116., *le développement durable*, Dunod, coll. Maxi Topos.
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strømman, AH. 2012, pp. 53, 56 - 61., Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles., *Journal of Industrial Ecology*,
- Helms, H., Pehnt, M., Lambrecht, U., Liebich, A., 2010, *Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions*
- Henckens, M.L.C.M., P.P.J. Driessen, E. Worrell, 2014, p. 5, Metal scarcity and sustainability, analyzing the necessity to reduce the extraction of scarce metals - *Resources, Conservation and Recycling* 93 (2014) 1–8
- Hill, N., Ricardo –AEA, 2013, Life-cycle assessment for hybrid and electric vehicles, “beyond the tailpipe” LowCVP annual conference 2013, slides 3, 8, 9, 10, 14.
- K., ISHIHARA, N., KIHARA, N., TERADA, and T., IWAHORI, 2001, p. 1., *Environmental Burdens of Large Lithium-Ion Batteries Developed in a Japanese National Project*
- King, D., Inderwildi, O., Carey, C., Santos, G., Yan, X., Behrendt, H., Holdway, A., Maconi, L., Owen, N., Shirvani, T., Teytelboym, A., 2010. p. 15., *Future of Mobility Roadmap: Ways to Reduce Emissions While Keeping Mobile*. Smith School of Enterprise and the Environment, Oxford, England.
- Kushnir D, Sandén BA., 2012, p. 37., *The time dimension and lithium resource*

constraints for electric vehicles. Resource Policy

- Lucas, A., Silva, C., Neto, R., 2011, Energy policy, Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles
- Ma, H., Balthasar, F., Tait, N., Riera-Palou, X., Harrison, A., 2011, A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles
- G. Majeau-Bettez, T. R. Hawkins, A. Hammer Strømman, 2011, pp. 4552, Environmental Science and Technology, Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles.
- Matthews, H.D., Gillett, N.P., Stott, P.A., Zickfeld, K., 2009. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. Nature 459, pp. 829–832.
- Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S.C.B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D.J., Allen, M.R., 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting 586 global warming to 2C. Nature 458, p. 1158. Stern, N., 2006. Stern review on the economics of climate change: stern review on the economics of climate change. UK Treasury.
- Messagie, M., 2013, Environmental performance of electric vehicles, a life cycle system approach, Vrije Universiteit Brussel, Belgium
- Miotti, M., Simons, A., Hofer, J., Bauer, C., 2013, p. 8., Paul Scherrer Institut, Laboratory for Energy Systems Analysis., LCA of current and future fuel cell vehicles
- Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A.M., Ljunggren Söderman, M., van Mierlo, J., 2014, pp. 1866–1890., Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? Int J Life Cycle Assess
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Stamp, A., Zah, R., Althaus, H. J., 2010, 6550–6556., Contribution of li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. Environ Sci Technol
- Propane Education and Research Council., 2013, p. 4, 2013 Propane Market Outlook

- Samaras, C., Meisterling, K., 2008, pp. 3170–3176., Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: implications for policy. *Environ Sci Technol*
- Santini, F. Passarini, I. Vassura, D. Serrano, J. Dufour, L. Morselli, 2011, p. 852, *Waste Management*, Auto Shredder residue recycling: Mechanical separation and pyrolysis
- Smith, W.J., 2010. P. 4515. *Energy*. Can EV (electric vehicles) address Ireland's CO<sub>2</sub> emissions from transport?
- J.L. Sullivan, A. Burnham, and M. Wang, p.14 2010, Energy System Division, *Energy-Consumption and Carbon-Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing*
- Sullivan, J. L., Gaines, L., 2012, pp. 134-148., *Status of life cycle inventories for batteries. Energy Convers Manag*
- Oscar van Vliet, Anne Sjoerd Brouwer, Takeshi Kuramochi, Machteld van den Broek, André Faaij E, 2011, p. 2038, *Journal of power sources*, Energy use, cost and CO<sub>2</sub> emissions of electric cars
- Vermeulen, J. Van Caneghem, C. Block, J. Baeyens, C. Vandecasteele, 2011, pp. 9 – 11, 23 – 24., *Journal of hazardous materials*, Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals valorisation
- H. Vikström, S. Davidsson, M. Höök. 2012. Pp.3, 4, 5, 8, 9, 13, 16, 18, 24. *Applied Energy*. Lithium availability and future production outlooks.
- Von Helmolt. R.,U. Eberle,. 2007, p 834, *Journal of power sources*. Fuel cell vehicles: Status 2007.
- L. Wilson. 2013. pp. 5, 6, 8, 11, 13, 16, 21, 23, 24. *Shrink that footprint. Shades of Green: Electric Cars'Carbon Emissions Around The Globe*.
- World aluminium, 2013, p. 16, *Global Life Cycle Inventory Data for the Primary Aluminium Industry*
- World aluminium, 2014, p. 13, *Environmental metrics report*
- World steel association, 2014, p. 2, *World steel position paper, Steels contribution to a low carbon future*
- Zackrisson, M., Avellán, L., Orlenius, J., 2010, pp. 1517 – 1527., *Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles—critical*

issues. J Clean Prod

### **Rapports :**

- Boustead, I., 1997, Eco-profiles of the European Plastics Industry, Report 10: Polymer Conversion, Association of Plastics Manufacturers in Europe, May. ; Plastics Europe, Library, Eco-profiles, Module: PU Foams, <http://lca.plasticseurope.org/index.htm>
- Richard Brody, 2011, pp. 3 - 6 Powergenix, Nickel-Zinc batteries for transportation applications
- Daimler. 2014. Sustainability report 2014.
- DEFRA. 2012 greenhouse gas conversion factors for company reporting. London: DEFRA, 2012.
- European Copper Institute (ECI), 2012, Life Cycle Assessment
- Edwards, R., Larivé, J-F., Beziat, J-C., (2011) *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*, Well-to-Tank Report Version 3c, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport.
- Fiat. 2013. 2013 sustainability report.
- Ford. 2014. Sustainability report 2013/2014.
- GE Capital Fleet Services, 2009, EU tyre labeling legislation
- GE Capital Fleet Services, 2013, Drivers guide - Eco driving
- General Motors. 2013. 2013 Sustainability report. Connecting you to what is important.
- Harald Pilz Bernd Brandt Roland Fehringer, 2010, p. 17, Summary report June 2010, The impact of plastics on life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions in Europe
- HBC Group – Automotive consultancy. 2014, Slides 9, 13, 38, 41, 42, 46, 48, 55, 56, 59, 61 - 63, 67, 69, 70, 78 - 82, 84, 85, 106. rapport des nouvelles énergies.
- Honda. 2014. CSR report 2014 - Striving to be a company society wants to exist.
- International Energy Agency, 2014, Key World Energy Statistics
- IEA. CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion. IEA, 2012.
- IPCC., 2014, p. 47, Climate Change 2014, Synthesis Report,
- Kia. 2015. Kia motors sustainability magazine 2015.

- Natural Gas Vehicle Statistics: Summary Data 2010". 2010, International Association for Natural Gas Vehicles.
- Nissan. 2014. Sustainability report 2014.
- Patterson, J., Alexander, M., Gurr, A., 2011, Preparing for a Life Cycle CO<sub>2</sub> Measure., A report to inform the debate by identifying and establishing the viability of assessing a vehicle's life cycle CO<sub>2</sub>e footprint
- N., Pardo, J. A., Moya, K., Vatopoulos, 2012, European Commission, JRC Scientific & Policy Reports, Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO Emissions in the EU Iron & Steel Industry
- Propane Education and Research Council, 2013, pp. 1 - 4., 2013 Propane Market Outlook
- Renault. 2013. 2013 sustainability report. A world of responsibilities.
- Toyota. 2014. Sustainability report 2014.
- Volkswagen. 2014. Sustainability report 2014.
- B. Yazicioglu / Dr. J. Tytgat, 2011, Umicore, Life cycle assessment involving Umicore's battery recycling process

### **Sites Internet:**

- <http://www.20minutes.fr/planete/775994-20110826-automobile-cap-milliard-voitures-terre-depasse>
- <http://www.agc-automotive.com/english/products/temper.html>
- <http://www.agc-automotive.com/english/products/lami.html>
- <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=217&pageid=2144417130>
- [http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/ocr\\_gateway\\_pre\\_2011/rocks\\_metals/5\\_cars\\_for\\_scrap3.shtml](http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/ocr_gateway_pre_2011/rocks_metals/5_cars_for_scrap3.shtml)
- <http://www.climat.be/fr-be/changements-climatiques/en-belgique/emissions-belges/emissions-par-secteur>
- <http://communicationorganisation.revues.org/572>
- <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie>
- <https://customer.dats24.be/fr/ou-peut-faire-le-plein-de-gaz-naturel>
- [http://www.diffen.com/difference/CNG\\_vs\\_LPG](http://www.diffen.com/difference/CNG_vs_LPG)

- <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-5/assessment-1>
- [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/index_en.htm)
- [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/index_en.htm)
- [http://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/business-fundings/france/715\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/business-fundings/france/715_en.htm)
- [http://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/pdf/umicore\\_pres\\_18072011.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/pdf/umicore_pres_18072011.pdf)
- [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Production\\_of\\_primary\\_energy,\\_EU-28,\\_2013\\_\(%25\\_of\\_total,\\_based\\_on\\_tonnes\\_of\\_oil\\_equivalent\)\\_YB15.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Production_of_primary_energy,_EU-28,_2013_(%25_of_total,_based_on_tonnes_of_oil_equivalent)_YB15.png)
- <http://www.ecoscore.be/fr/comment-calculer-les-émissions-de-co2-en-fonction-de-la-quantité-de-carburant-consommé>
- <http://energiepourdemain.fr/tag/hydrogene/>
- <http://www.eolienne-particulier.info/>
- <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/sources/transportation.html>
- [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-08-445\\_fr.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-08-445_fr.htm)
- [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/sustainable\\_development/index\\_fr.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/sustainable_development/index_fr.htm)
- [http://www.exceptionalenergy.com/en\\_GB/what-is-lpg/history](http://www.exceptionalenergy.com/en_GB/what-is-lpg/history)
- <http://www.extraordinaryroadtrip.org/research-library/technology/liquified-petroleum/ad-draw.asp>
- <http://www.fastcompany.com/3028159/a-broken-place-better-place>
- <http://fr.chargemap.com/stats>
- [http://www.greencarreports.com/news/1087888\\_2014-bmw-i3-electric-car-why-california-set-range-requirements-engine-limits](http://www.greencarreports.com/news/1087888_2014-bmw-i3-electric-car-why-california-set-range-requirements-engine-limits)
- [https://greet.es.anl.gov/fleet\\_footprint\\_calculator](https://greet.es.anl.gov/fleet_footprint_calculator)
- <http://group.renault.com/en/our-company/locations/renault-locations/tangier-plant/>
- <http://group.renault.com/en/commitments/environment/environmental-policy/>
- <http://www.history.com/news/ferdinand-porsches-first-car-was-electric>
- <http://www.iangv.org/2012/05/2011-natural-gas-vehicle-statistics-released/>

- <http://www.iflscience.com/technology/giant-wall-fans-sucks-carbon-dioxide-straight-out-air>
- [http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=37456](http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=37456)
- [http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=38498](http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38498)
- <http://www.lenntech.fr/electrolyse.htm#ixzz3gcYUYv00>
- <https://localmotors.com/3d-printed-car/>
- <http://www.lpgstations.com>
- <http://www.mylpg.eu/stations/belgium>
- <http://www.netinform.net/H2/H2Stations/H2Stations.aspx?Continent=EU&StationID=-1>
- <http://www.ngva.be/fr/cherche>
- <https://customer.dats24.be/fr/où-peut-faire-le-plein-de-gaz-naturel>
- <http://www.petrolfed.be/fr/lindustrie-pétrolière/economie/lévolution-du-nombre-de-stations-service>
- <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-trois-etapes-du-raffinage>
- <http://www.planetoscope.com/co2/261-emissions-mondiales-de-co2-dans-l-atmosphere.html>
- <http://press.porsche.com/news/release.php?id=642>
- <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/27/07>
- L. Wilson. 2013, Shrink that footprint. Electricity emissions around the world. <http://shrinkthatfootprint.com/electricity-emissions-around-the-world>
- <http://shrinkthatfootprint.com/electric-cars-green>
- [http://www.storhy.net/train-in/PDF-TI/Poster/Poster\\_1.pdf](http://www.storhy.net/train-in/PDF-TI/Poster/Poster_1.pdf)
- <http://www.teslamotors.com/powerwall>
- <http://www.thehybridshop.com/media/blogs/nickel-metal-hydride-vs-lithium-best-hybrid-battery/>
- <http://www.travelsmart.gov.au/teachers/teachers6.html>  
<http://uk.businessinsider.com/car-3d-printing-local-motors-strati-2015-2?r=US&IR=T>

- <http://www.usatoday.com/story/money/cars/2014/06/09/hybrid-cars-market-share-polk/10238155/>
- <http://www.voiture-electrique-populaire.fr/vehicule/histoire>
- <https://yearbook.enerdata.net/world-natural-gas-production.html>
- <https://www.youtube.com/watch?t=295&v=854qFolHp4s>
- <https://www.youtube.com/watch?v=daioWIkH7ZI>
- <https://www.youtube.com/watch?v=GkEAA7VnyhE>
- Bloomberg, Entretien avec Shai Agassi, 2011 →  
<https://www.youtube.com/watch?v=L9m8mTbSYA4>
- TED, Présentation de Better Place par Shai Agassi, 2009 →  
<https://www.youtube.com/watch?v=FcoJt2KLC9k>
- <http://www.zdnet.be/nieuws/161645/belg-vindt-tankbare-batterijen-uit/>

### **Documentaires:**

- Mischi, M., France 5. La voiture électrique pas si écolo. 2014
- Paine, C., 2006. Who killed the electric car.
- Paine, C., 2011. Revenge of the electric car.

### **Autres:**

- Larousse, 2015, Dictionnaire de français  
<http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/scorie/71579>
- Patentschrift, Benz Patent Motorwagen, 1886,  
[http://home.arcor.de/carsten.popp/DE\\_00037435\\_A.pdf](http://home.arcor.de/carsten.popp/DE_00037435_A.pdf)
- Roth, H., *Das erste vierrädrige Elektroauto der Welt*, March 2011, slides 2–3.
- Université Catholique de Louvain, 2010, p. 7, Effet de serre et changements de climat: pourquoi, comment et que pouvons-nous y faire?, Science Infuse
- ISO 14040:2009-11 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, 2009.
- ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, 2006.
- John Voelcker (2013-10-23). "2014 BMW i3 Electric Car: Why California Set Range Requirements, Engine Limits". Green Car Reports



## 12 Annexes

- **Annexe 1. Publicité Toyota**

**TOYOTA**  
Quality Revolution

The planet's favourite hybrid.

**NEW PRIUS**

Leading the hybrid revolution, and shaping the future of cars, the new Prius is unlike any other. Its Hybrid Synergy Drive gives you three independent driving modes – Eco, Electric, and Power. Advanced features like Head-Up and Touch Tracer Displays, Electronic shift lever, Smart entry with a push-start, Traction control, 7 airbags, High fuel efficiency, Low CO<sub>2</sub> emissions and many more. No wonder the planet loves it.

HYBRID SYNERGY DRIVE

How it works

1 STARTUP 2 NORMAL DRIVING 3 ACCELERATION 4 DECELERATION 5 STOPPING 6 STARTING

Electric motor only | Motor and engine | Motor and engine (Additional power drawn from batteries) | Battery charging | Engine automatically shuts off | Electric motor only

Test drive the hybrid revolution at your nearest dealership.

<b>GALAXY TOYOTA</b> Met Nagar Crossing 9560795820, 418 77 777	<b>GALAXY TOYOTA</b> Dwarka, N. Sec-9 Metro Station 9582940310, 9910495090	<b>GALAXY TOYOTA</b> Kirti, Opp. Defence Colony 9810183114, 465 77 777	<b>GALAXY TOYOTA</b> Shalimar Place, Over-Sea Road, N. Sector 9871292939, 400 11 111	<b>GALAXY TOYOTA</b> Vasant Square Mall, Vasant Kunj 9871199992, 9560795843	<b>MGF TOYOTA</b> Gurgaon 9871488717, 0124-4603333	<b>UTTAM TOYOTA</b> Noida 9958744441, 0120-4299208	<b>UTTAM TOYOTA</b> Delhi 9910080041, 22149696	<b>UTTAM TOYOTA</b> Ghaziabad 9871699925, 0120-4537300	<b>ESPIRIT TOYOTA</b> Mathura Road, New Delhi 9654171792, 66274000-01	<b>THIRTY SIX TOYOTA</b> 147, Main Mathura Road, Faridabad 8800790071, 0129-4293636	<b>GRACE TOYOTA</b> N.H.5, Gurgaon 9871522914, 9711303021, 0124-4687800
---	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---

Terms and Conditions apply. Accessories shown in the picture of the car are not part of the standard equipment.

Source : HBC Group – Automotive consultancy. 2014

- **Annexe 2. Publicité Toyota**

**Gezegenin en sevdiği otomobil**  
**Toyota Prius.**

Toyota'nın yeni nesil Hybrid Synergy Drive teknolojisiyle şimdi gökyüzü daha mavi, ağaçlar daha yeşil, gezegen daha mutlu...

Kuşların en sevdiği otomobil

Ağaçların en sevdiği otomobil

Tavşanların en sevdiği otomobil

**TOYOTA**

Today Tomorrow Toyota

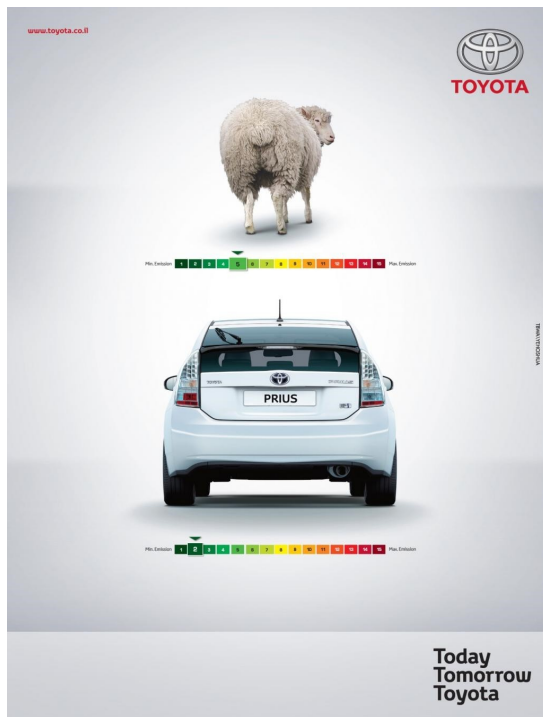
www.wineplanet.com.tr

Hybrid Synergy Drive

Herda yer verdiğimiz bu araç, 3 yıl ve 50.000 km'ye kadar garanti kapsamına girer.

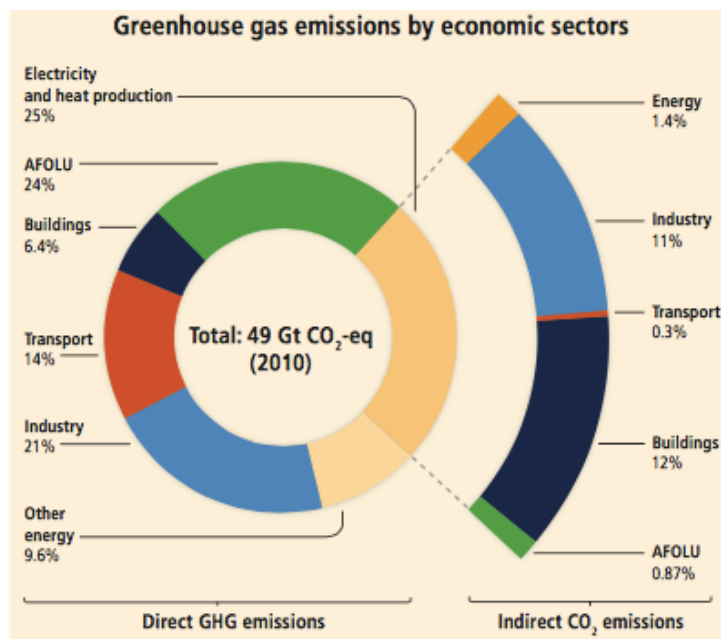
Source : HBC Group – Automotive consultancy. 2014

• **Annexe 3. Publicité Toyota**



Source : HBC Group – Automotive consultancy. 2014

• **Annexe 4. Répartition des émissions globales**



Source : IPCC., 2014

- **Annexe 5.** Différence entre consommation théorique et réelle - diesel

## Diesel

Make Model	Fueltype	Number of tankings	Real fuel consumption	Theoretical fuel consumption	Difference	Monthly extra fuel costs
V60 2.4 215PK 5D D5 Summum	D	39	7,7	4,6	3,1	€ 140,46
VW Passat Variant New 1.6 105PK 5D CR TDI Comfortline BMT	D	281	7,3	4,4	2,9	€ 131,39
Audi A4 Avant 2.0 136PK 5D TDI "e" DPF Start/Stop	D	112	6,9	4,4	2,5	€ 113,27
BMW 1-Reeks New (F20) 2.0 116PK 5D 116d	D	201	6,7	4,3	2,4	€ 108,74
Volvo XC60 2.0 163PK 5D D DRIVE	D	280	8,2	5,9	2,3	€ 104,21
BMW 1-Reeks New (F20) 2.0 136PK 5D 118d	D	67	6,6	4,4	2,2	€ 99,68
Volvo V60 DRIVE	D	279	6,7	4,5	2,2	€ 99,68
VW Touran 1.6 105PK 5D CRTDI DPF BMT	D	598	6,6	4,6	2,0	€ 90,62
Mazda CX-5 2.2 150PK 5D SKY-D 4X2 Active	D	26	6,5	4,6	1,9	€ 86,09
MB C-Klasse Break 2.2 136PK 5D C200 CDI BlueEFFICIENCY	D	408	7,1	5,2	1,9	€ 86,09
BMW 3-Reeks Touring (E9 2.0 136PK 5D 318d	D	815	6,3	4,5	1,8	€ 81,56
E-Klasse 2.2 204PK 4D 250 CDI BlueEFFICIENCY ECO	D	131	6,7	4,9	1,8	€ 81,56
Ford C-Max New 1.6 115PK 5D TDCI Titanium DPF	D	127	6,3	4,6	1,7	€ 77,02
Skoda Octavia Combi 1.6 105PK 5D CR TDI Elegance DPF	D	203	5,9	4,2	1,7	€ 77,02
Opel INSIGNIA 2.0 CDTI Edition DPF	D	8	6,8	5,8	1,0	€ 45,31
<b>Average</b>					<b>2,1</b>	<b>€ 95,15</b>

Source : General Electricque

- **Annexe 6.** Différence entre consommation théorique et réelle - essence

## Petrol

Make Model	Fueltype	Number of tankings	Real fuel consumption	Theoretical fuel consumption	Difference
Audi A5 Sportback 2.0 180PK 5D TFSI	P	110	9,9	6,5	3,4
VW Tiguan 1.4 122PK 5D TSI Sport & Style BM Technology (FL)	P	46	9,3	6,5	2,8
Audi A3 Sportback 1.4 140PK 5D TFSI Ambition	P	10	7,3	4,8	2,5
Audi A3 Sportback 1.4 125PK 5D TFSI Attraction	P	30	8,2	5,8	2,4
BMW 3-Reeks Touring (E9 2.0 163PK 5D 320i	P	64	8,4	6,4	2,0
BMW 3-SERIES 320i	P	31	7,9	6,1	1,8
Renault Mégane Grandtour 1.6 110PK 5D 16V Authentique	P	154	8,3	6,9	1,4
MB C-Klasse 1.8 156PK 4D C180 CGI BlueEFFICIENCY CLASSIC	P	68	7,9	6,7	1,2
<b>Average</b>					<b>2,2</b>

Source : General Electricque

- **Annexe 7.** Différence entre consommation théorique et réelle - hybride

## Hybrid

Make Model	Fueltype	Number of tankings	Real fuel consumption	Theoretical fuel consumption	Difference
Mitsubishi Outlander	P	14	8,8	1,9	6,9
Volvo V60	D	210	6,3	1,9	4,4
Citroën D55	D	424	7,5	3,3	4,2
Toyota Auris	P	439	7,4	3,8	3,6
Opel Ampera	P	161	4,3	1,2	3,1
Lexus CT200h	P	747	6,5	3,5	3,0
Honda Insight	P	576	7,0	4,1	2,9
Volkswagen Jetta	P	141	6,5	4,1	2,4
Peugeot 3008 Hybrid	D	75	5,6	3,3	2,3
Toyota Grand Prius	P	15	6,3	4,1	2,2
Toyota Auris Touring Sport	P	58	5,8	3,7	2,1
Toyota Prius	P	222	5,8	3,9	1,9
Lexus RX450h	P	70	7,1	6,3	0,8
<b>Average</b>					<b>3,1</b>








Source : General Electricque

- **Annexe 8.** Part de marché de la voiture électrique

Electric Passenger Cars					
Country	Jan-March 2014		Jan-March 2013		%
	Units	Share	Units	Share	
Norway	5.297	14,52%	1.014	3,01%	422,4%
Germany	1.869	0,26%	1.113	0,17%	67,9%
France	1.533	0,34%	2.248	0,52%	-31,8%
UK	1.229	0,18%	614	0,10%	100,2%
Netherlands	584	0,54%	695	0,60%	-16,0%
Switzerland	379	0,55%	129	0,18%	193,8%
Belgium	363	0,24%	77	0,05%	371,4%
Denmark	301	0,63%	103	0,25%	192,2%
Austria	295	0,36%	25	0,03%	1080,0%
Sweden	268	0,40%	590	1,05%	-54,6%
Italy	231	0,06%	77	0,02%	200,0%
Eire	101	0,20%	13	0,03%	676,9%
Spain	67	0,03%	68	0,04%	-1,5%
Portugal	51	0,15%	21	0,09%	142,9%
Finland	25	0,08%	42	0,15%	-40,5%
Greece	-	0,00%	0	0,00%	0,0%
<b>West Europe</b>	<b>12.593</b>	<b>0,40%</b>	<b>6.829</b>	<b>0,24%</b>	<b>84,4%</b>

Source : HBC Group – Automotive consultancy. 2014

- **Annexe 9.** Types de prises et propriétés respectives

Prises							
	Domestique	Type1	Type 2	Type 3	Type 4 Chademo	Combo	Combo
Côté	Infrastructure	Véhicule	Infrastructure Véhicule	Infrastructure	Véhicule	Véhicule	Véhicule
Courant	AC	AC	AC	AC	DC	AC	DC
Phase	Mono	Mono	Mono/Tri	Mono Tri	DC	Mono Tri	DC
Courant Maxi	8 A	32 A	70 A	32 A	125 A	70 A Mono	125 A
Broches	3	5	7	7	10	7	2
kVA	2 kVA	3-7 kVA	3-43 kVA	3-22 kVA	50 KVA	43 kVA	50 kVA
Tension Maxi	250 V	250 V	500 V	500 V	500v	500 V	500 V

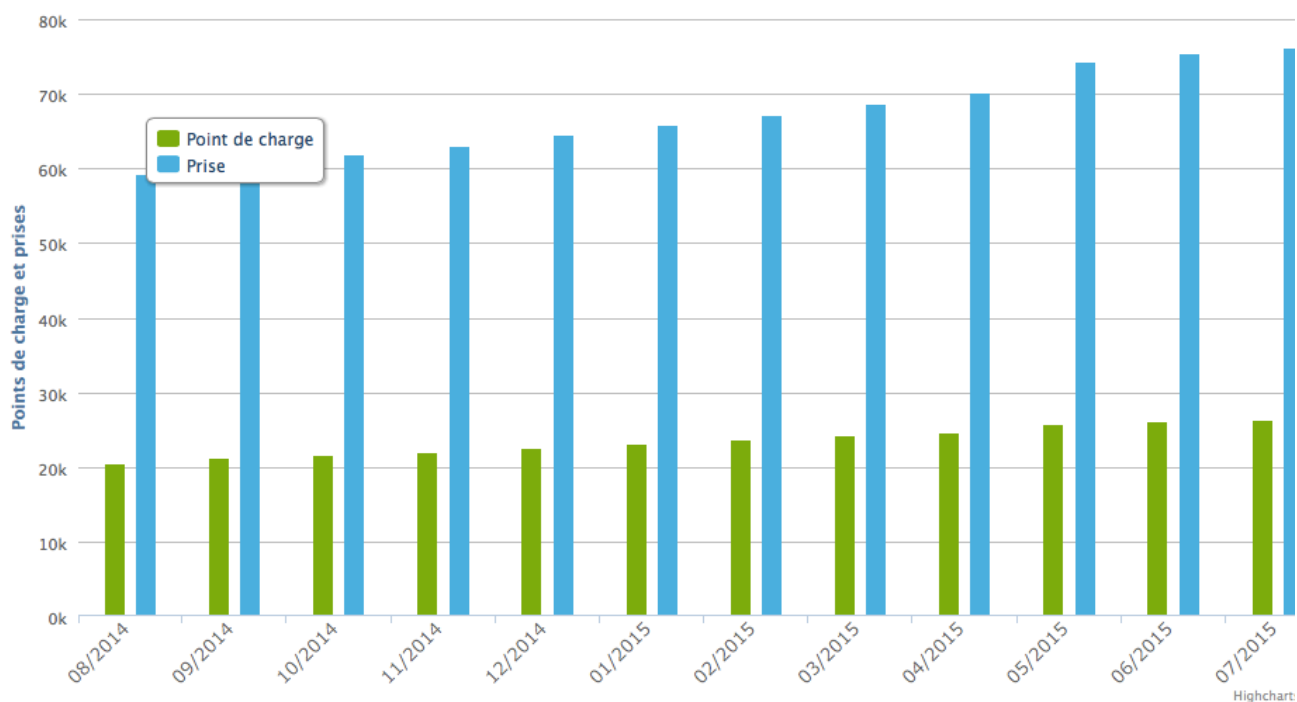
Source : HBC Group – Automotive consultancy. 2014

- **Annexe 10.** Types de courants et de puissances pour charger les batteries

Durée de recharge	Alimentation	Puissance	Tension	Intensité maxi
12-14 heures	Monophasé	2kW	230 VAC	8 A
6-8 heures	Monophasé	3,7kW	230 VAC	16 A
2-3 heures	Triphasé	11kW	400 VAC	16 A
3-4 heures	Monophasé	7kW	230 VAC	32 A
1-2 heures	Triphasé	22kW	400 VAC	32 A
20-30 minutes	Triphasé	43kW	400 VAC	63 A
20-30 minutes	Continu	50kW	400 - 500 VDC	100 - 125 A

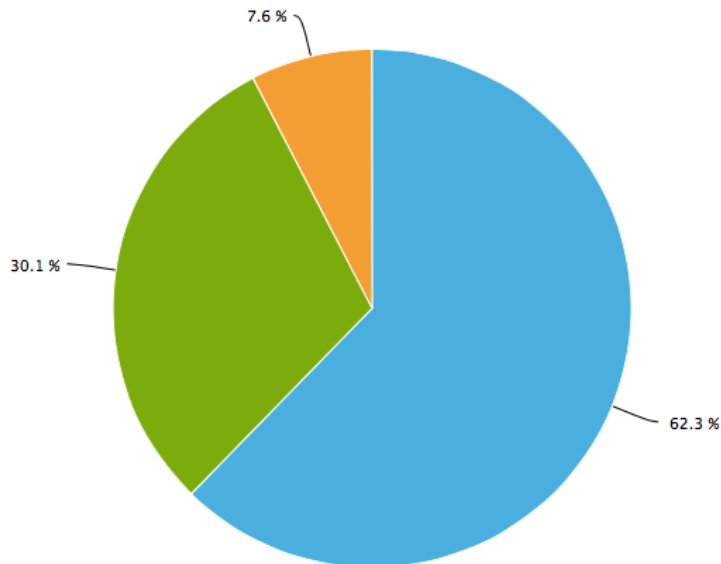
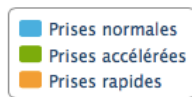
Source : HBC Group – Automotive consultancy. 2014

- **Annexe 11.** Points de charge et prises dans le monde sur les 12 derniers mois



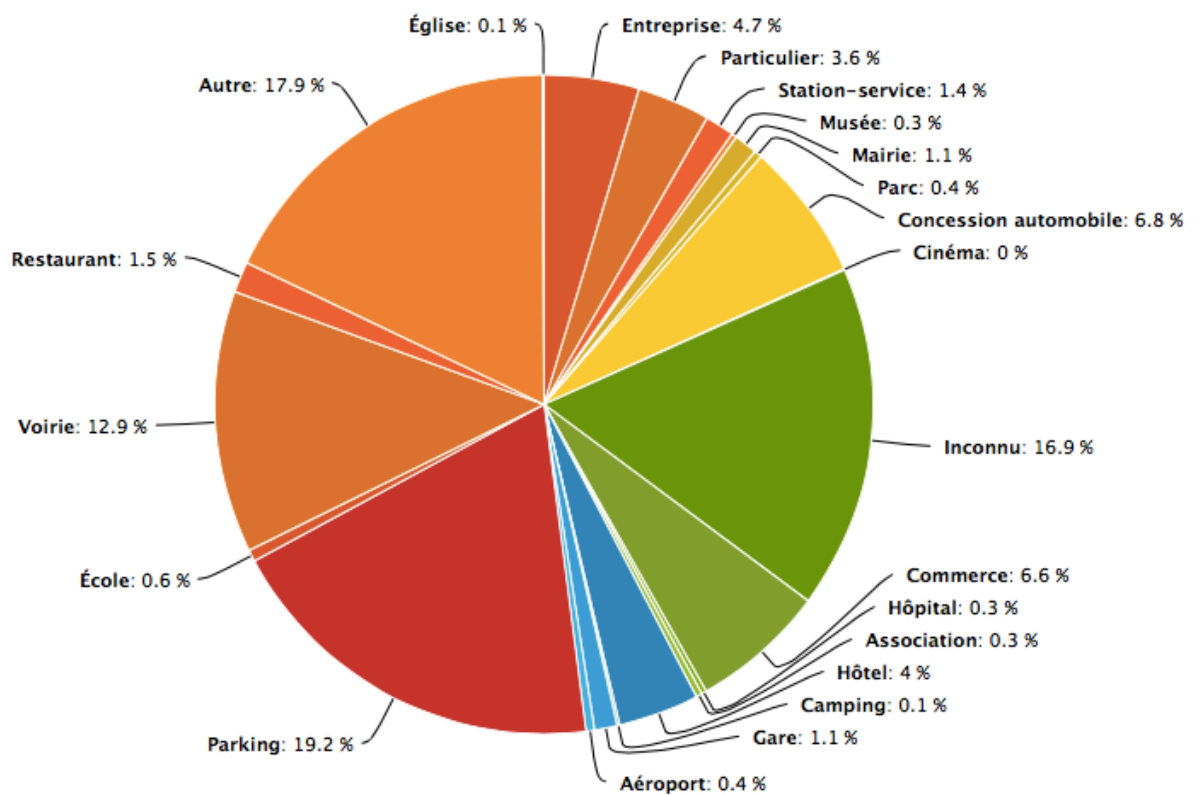
Source : <http://fr.chargemap.com/stats>

- **Annexe I2.** Types de points de charge



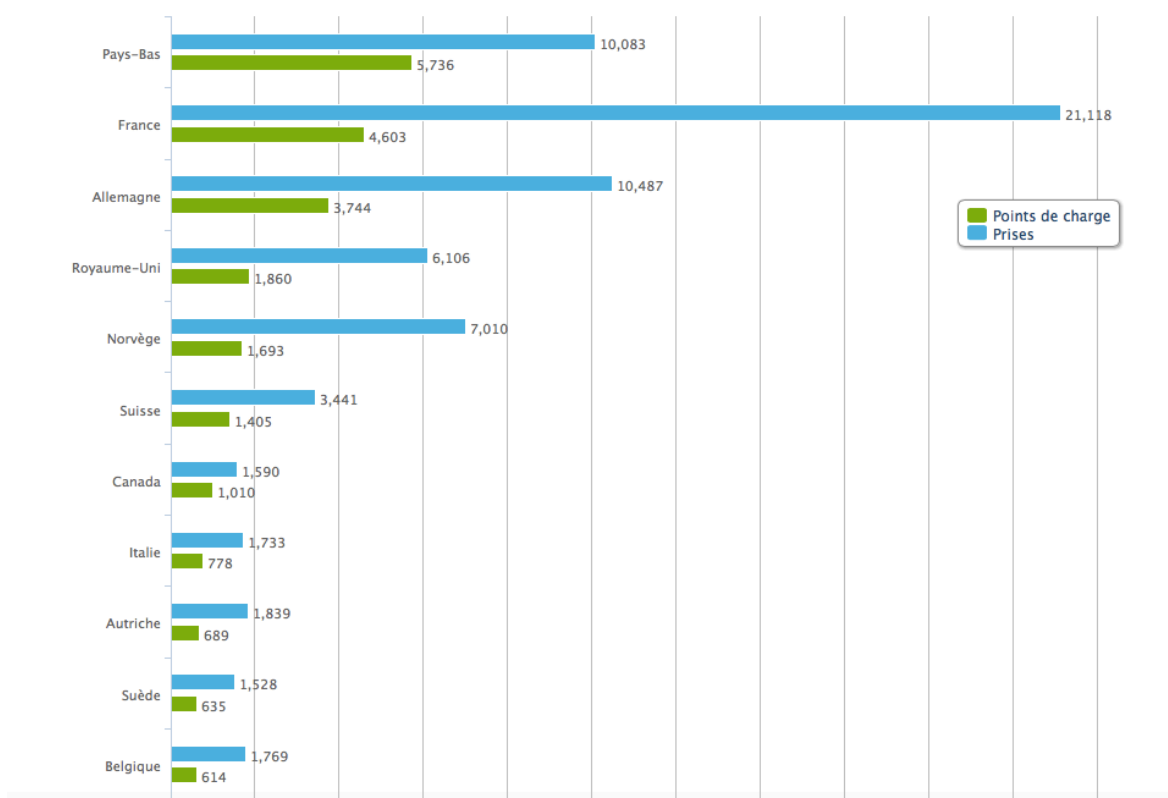
Source : <http://fr.chargemap.com/stats>

- **Annexe I3.** Lieux de charge



Source : <http://fr.chargemap.com/stats>

- **Annexe 14.** Réparation des points de charges par pays



Source : <http://fr.chargeamap.com/stats>

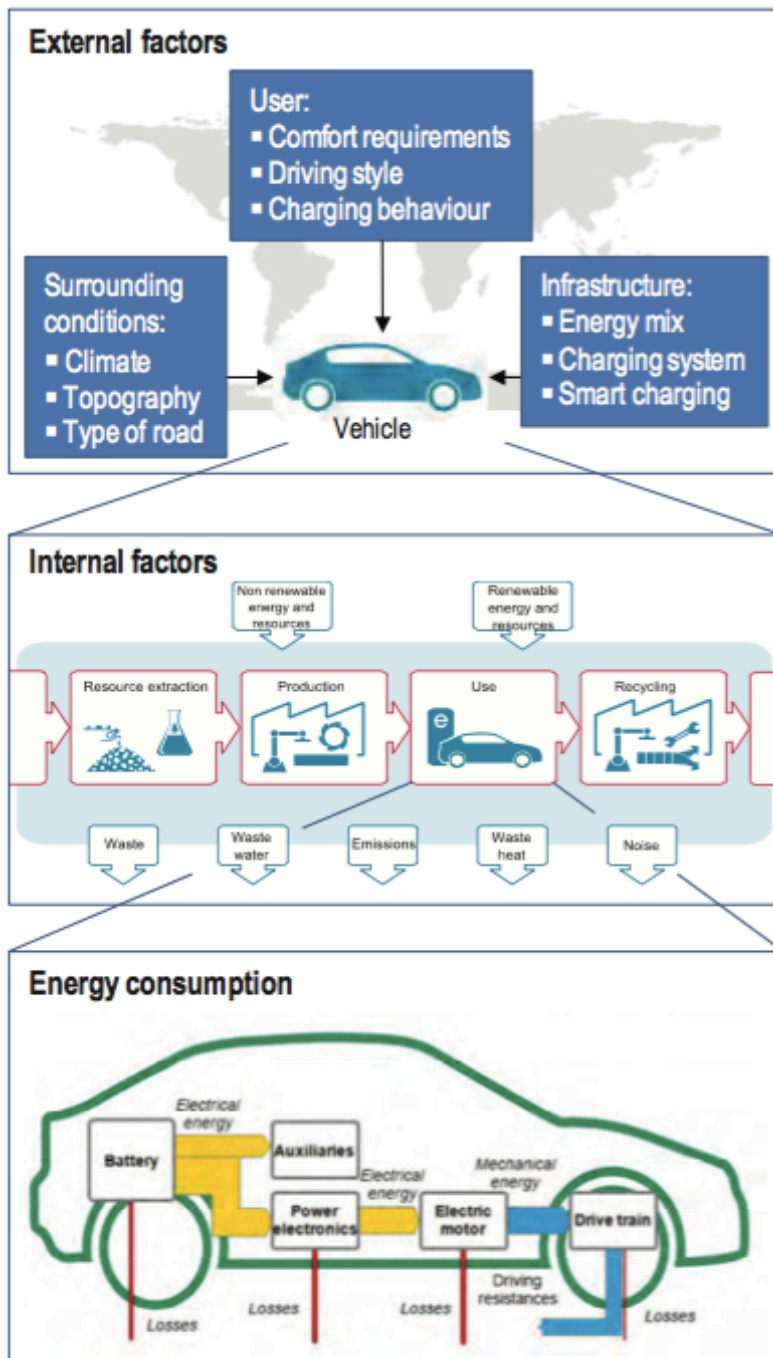
- **Annexe 15.** Part de marché des véhicules hybrides en Europe

Hybrid Passenger Cars					
Country	2013		2012		%
	Units	Share	Units	Share	
France	30.660	1,71%	17.860	0,94%	71,7%
UK	29.070	1,28	25.010	1,22%	16,2%
Netherlands	28.640	6,87	21.730	4,32%	31,8%
Germany	25.980	0,88%	20.480	0,66%	26,9%
Italy	13.570	1,04%	5.660	0,40%	139,8%
Spain	9.980	1,38%	9.550	1,37%	4,5%
Norway	9.490	6,68%	6.020	4,36%	57,6%
Switzerland	6.290	2,04%	5.840	1,78%	7,7%
Belux	5.590	1,05%	5.320	0,99%	5,1%
Sweden	5.170	1,92%	3.180	1,14%	62,6%
Austria	2.420	0,76%	1.740	0,52%	39,1%
Finland	2.210	2,14%	1.380	1,24%	60,1%
Denmark	1.030	0,57%	420	0,25%	145,2%
Portugal	720	0,68%	730	0,77%	-1,4%
Eire	550	0,74%	640	0,80%	-14,1%
Greece	370	0,63%	460	0,79%	-19,6%
<b>West Europe</b>	<b>171.740</b>	<b>1,49%</b>	<b>126.020</b>	<b>1,07%</b>	<b>36,3%</b>

Source : AID (Ampera, Volt not included)

Source : HBC Group – Automotive consultancy. 2014

- **Annexe I6.** Facteurs d'influence de la voiture



Source : Egede, P. et al., 2015, p. 236

- **Annexe 17.** Réserves globales d'aluminium

**Table 3**

Division of metals in groups according to geologic scarcity. The depletion periods are after 2050. It is assumed that the extraction increases annually by 3% until 2050 where after it stabilizes.

Very scarce (EGR depleted before 2050)		Scarce (EGR depletion time <100 years after 2050)		Moderately scarce (EGR depletion time between 100 and 1000 years after 2050)		Not scarce (EGR depletion time >1000 years after 2050)	
Sb	Antimony	Au	Gold	Ag	Silver	Al	Aluminum
		Mo	Molybdenum	As	Arsenic	Ba	Barium
		Re	Rhenium	B	Boron	Be	Beryllium
		Zn	Zinc	Bi	Bismuth	Co	Cobalt
				Cd	Cadmium	Ga	Gallium
				Cr	Chromium	Ge	Germanium
				Cu	Copper	Hg	Mercury
				Fe	Iron	Li	Lithium
				Ni	Nickel	Mg	Magnesium
				Pb	Lead	Mn	Manganese
				Sn	Tin	Nb	Niobium
				W	Tungsten	PGM	Platinum Group Metals
						REE total	Rare Earth Metals
						Se	Selenium
						Sr	Strontium
						Ta	Tantalum
						Ti	Titanium
						Tl	Thallium
						U	Uranium
						V	Vanadium
						Zr	Zirconium

Source : M.L.C.M. Henckens, M.L.C.M. et al., 2014, p. 5

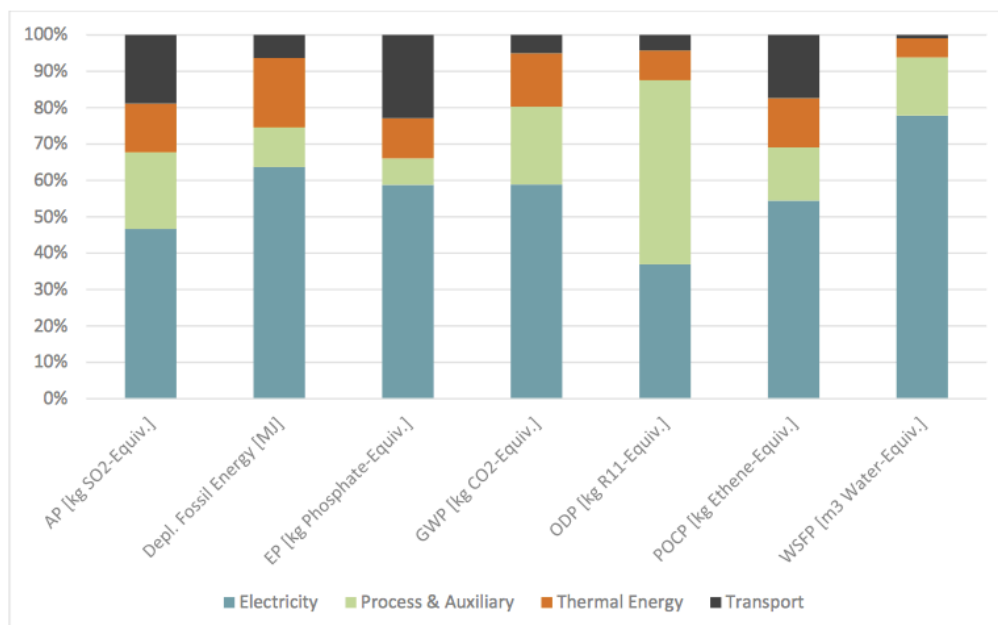
- **Annexe 18.** Potentiel de réchauffement climatique (GLO) en kg CO<sub>2</sub>eq. par kg d'aluminium

GLO	Bauxite Mining	Alumina Refining	Anode/Paste Production	Electrolysis	Ingot Casting	Total	Primary Energy (MJ)
Electricity	<0.1	0.4	<0.1	9.2	<0.1	9.7	131
Process & Auxiliary	<0.1	0.7	0.4	2.3	<0.1	3.5	19
Thermal Energy	<0.1	2.2	0.1	<0.1	0.1	2.4	31
Transport	0	0.5	<0.1	0.4	0	0.8	10
<b>Total</b>	<b>&lt;0.1</b>	<b>3.8</b>	<b>0.6</b>	<b>11.9</b>	<b>0.2</b>	<b>16.5</b>	<b>190</b>

Le tableau indique les émissions détaillées de la production de l'aluminium. Nous pouvons observer pour chaque étape de la production de l'aluminium (extraction de la Bauxite, raffinage de l'alumine, production de la pâte, l'électrolyse et le moulage) les taux émissions liés aux différents facteurs (électricité, processus et auxiliaire, énergie thermique et transport). De plus, nous disposons de l'intensité énergétique de chaque facteur.

Source : World aluminium, 2013

- **Annexe 19.** Répartition du potentiel de réchauffement climatique (RoW) en kg CO<sub>2</sub>eq. par kg d'aluminium.



Le graphique nous présente les émissions de CO<sub>2</sub> par étape de production en fonction des données fournies dans le tableau. Nous observons que l'électrolyse représente de loin l'étape la plus nocive pour l'environnement.

Source : World aluminium, 2013

- **Annexe 20.** Potentiel de réchauffement climatique (GLO) en kg CO<sub>2</sub>eq. par kg d'aluminium

RoW	Bauxite Mining	Alumina Refining	Anode/Paste Production	Electrolysis	Ingot Casting	Total	Primary Energy (MJ)
Electricity	<0.1	0.1	<0.1	4.6	<0.1	4.8	98
Process & Auxiliary	<0.1	0.7	0.4	2.2	<0.1	3.4	19
Thermal Energy	<0.1	1.6	0.1	<0.1	0.1	1.8	26
Transport	0	0.5	<0.1	0.3	0	0.8	10
<b>Total</b>	<0.1	2.8	0.6	7.2	0.2	10.8	153

Le tableau indique les émissions détaillées de la production de l'aluminium. Nous pouvons observer pour chaque étape de la production de l'aluminium (extraction de la Bauxite, raffinage de l'alumine, production de la pâte, l'électrolyse et le moulage) les taux émissions liés aux différents facteurs (électricité, processus et auxiliaire, énergie thermique et transport). De plus, nous disposons de l'intensité énergétique de chaque facteur.

Source : World aluminium, 2013

- **Annexe 21.** Répartition du potentiel de réchauffement climatique (RoW) en kg CO<sub>2</sub>eq. par kg d'aluminium.

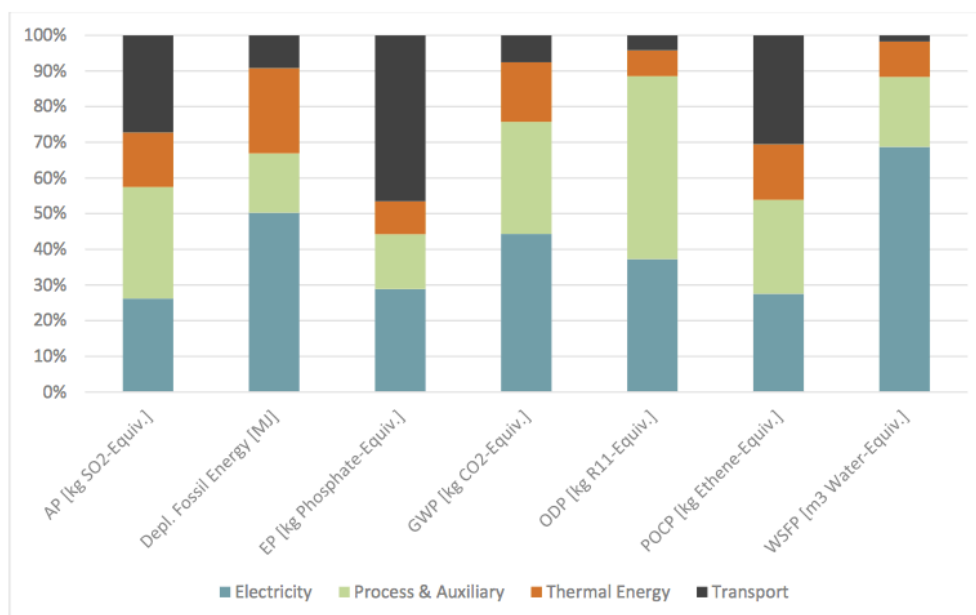
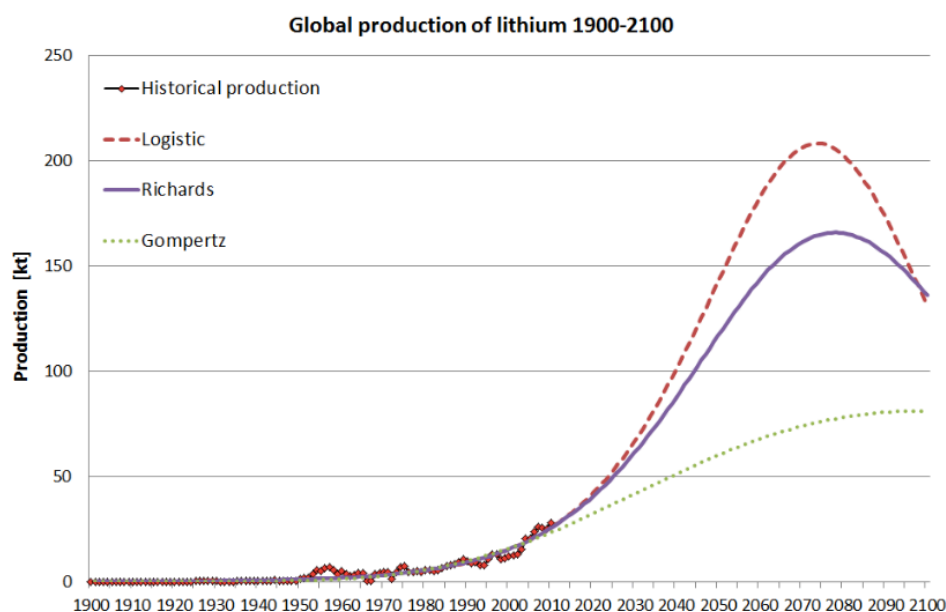


Figure 8 - RoW: Relative contributions to indicator results split by process type

Le graphique nous présente les émissions de CO<sub>2</sub> par étape de production en fonction des données fournies dans le tableau. Nous observons que l'électrolyse représente de loin l'étape la plus nocive pour l'environnement.

Source : World aluminium, 2013

- **Annexe 22.** Courbes de production globale de lithium entre 1900 et 2100



Nous observons dans l'annexe 22 l'évolution de la production du lithium. Cette évolution atteint son pic en 2078 avec une production avoisinant les 200 kt.

Source : Vikström, H. Et al., 2012, p. 5

- **Annexe 23.** Taux d'extraction du lithium en fonction du type de dépôt.

Deposit	Li conc. [ppm]	Mg/Li ratio	Assumed 100% recovery rate [Mt of seawater]	Assumed 30% recovery rate [Mt of seawater]
Dead Sea	10	2000	2000	6 667
Great Salt Lake	400	250	50	167
Seawater	0.17	7000	118 000	392 000

Dans ce graphique nous observons trois types de dépôts contenant du lithium. Ces dépôts contiennent des concentrations divergentes. Nous estimons donc les besoins en eau pour une capacité d'extraction équivalente à 20 000 Mt de lithium par an. Clairement, les lacs salés présentent l'extraction la plus viable économiquement.

Source : Vikström, H. Et al., 2012, p. 8

- **Annexe 24.** Comparaison des estimations de lithium publiées

**Table 5.** Comparison of published lithium assessments.

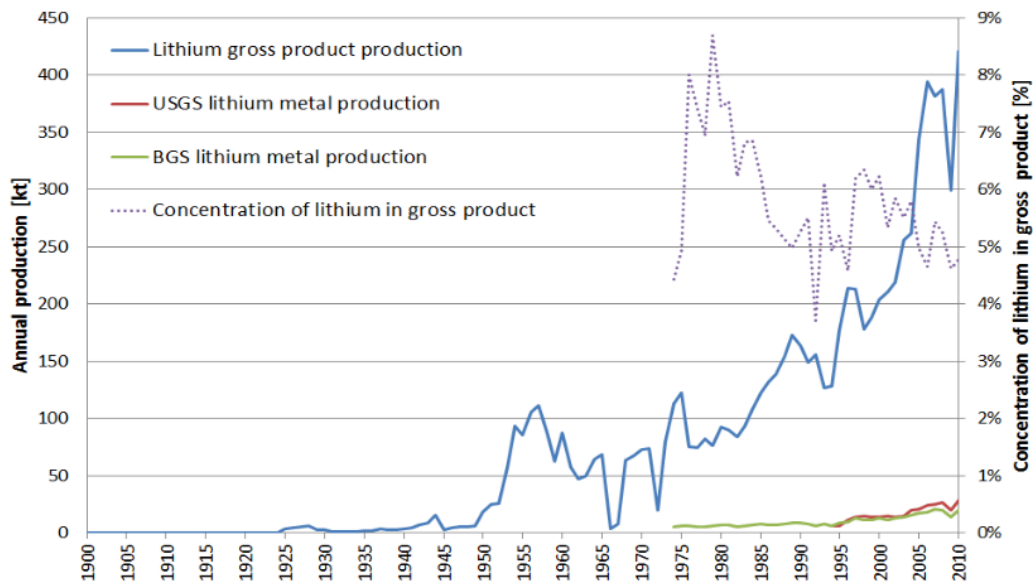
Reference	Deposits included	Reserves [Mt]	Resources [Mt]
Clarke and Harben (2009) [55]	61	n.a	39.4
Evans (1978) [56]	22*	2.0*	10.6*
Evans (2008) [42]	24	n.a	29.8
Fasel and Tran (2005) [36]	n.a	4-6	9.4-21
Grosjean et al. (2012) [13]	77	n.a	37.1-43.6
Gruber et al. (2012) [16]	103	<19.3	38.7
Kesler et al. (2012) [21]	61	n.a	30.9
Kushnir and Sandén (2012) [18]	n.a	30	n.a
Mohr et al. (2012) [15]	45	23.1	71.3
Rockwood Lithium (2012) [57]	n.a	n.a	>30
SGU (1987) [58]	n.a	8.4	n.a
SQM (2009) [27]	n.a	n.a	56.1
Tahil (2007; 2008) [19, 20]	15	4.6	19.2
USGS (1996) [59]	n.a	2.2	>12.8
USGS (1997) [60]	n.a	2.0	>12.8
USGS (1998) [61]	n.a	3.7	>12.8
USGS (1999) [62]	n.a	3.4	>12.8
USGS (2000) [63]	n.a	3.4	>12.8
USGS (2001) [64]	n.a	3.4	>12.8
USGS (2002) [65]	n.a	3.4	>12.8
USGS (2003) [66]	n.a	4.1	>13.8
USGS (2004) [67]	n.a	4.1	>13.8
USGS (2005) [68]	n.a	4.1	>13.8
USGS (2006) [69]	n.a	4.1	>13.8
USGS (2007) [70]	n.a	4.1	>13.8
USGS (2008) [71]	n.a	4.1	>13.8
USGS (2009) [72]	n.a	4.1	>13.8
USGS (2010) [73]	n.a	9.9	25.5
USGS (2011) [74]	n.a	13	33
USGS (2012) [12]	n.a	13	30
Yaksic and Tilton (2009) [36]	40	29.4	64
<b>This study</b>	<b>112</b>	<b>15</b>	<b>65</b>

\* Only data for the western world

Les estimations de ressources de lithium varient en fonction des auteurs. Toutefois, elles sont aujourd'hui estimées à plus de 30 Mt.

Source : Vikström, H. Et al., 2012, p. 9

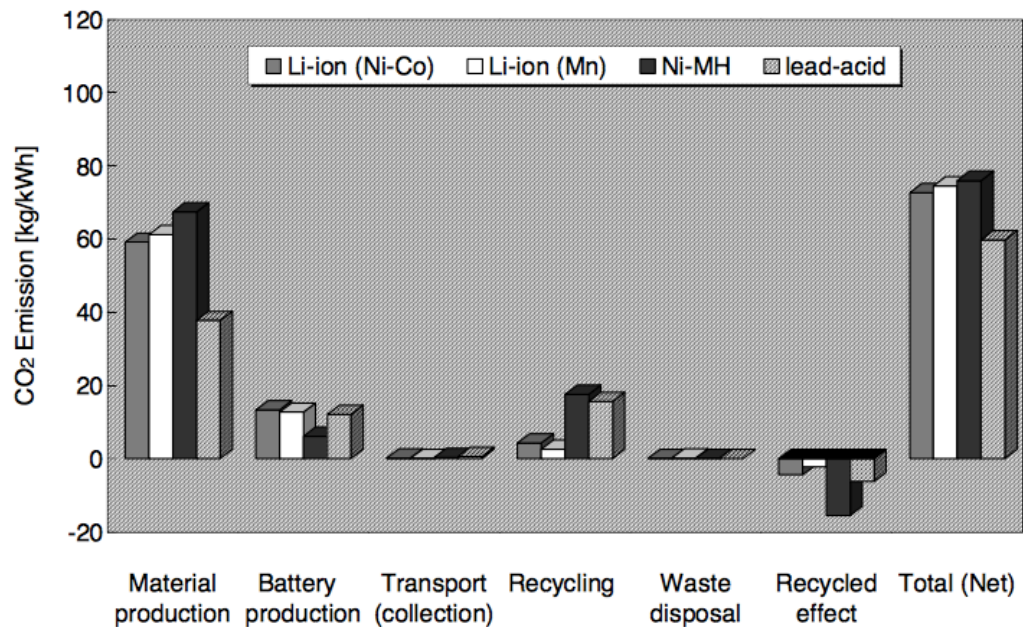
- **Annexe 25.** Production brut de lithium



La production brut de lithium à déjà évoluée au fil des années et nous attendons une croissance encore plus forte dans les années à venir.

Source : Vikström, H. Et al., 2012, p. 16

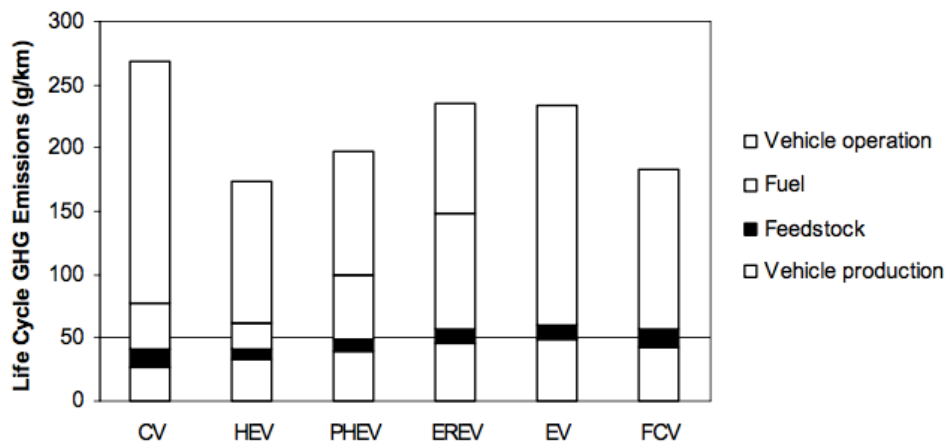
- **Annexe 26.** Impact environnemental du cycle de vie des batteries en terme de kWh



Le graphique présenté nous montre les besoins énergétiques des différentes étapes de vie des différents modèles de batteries.

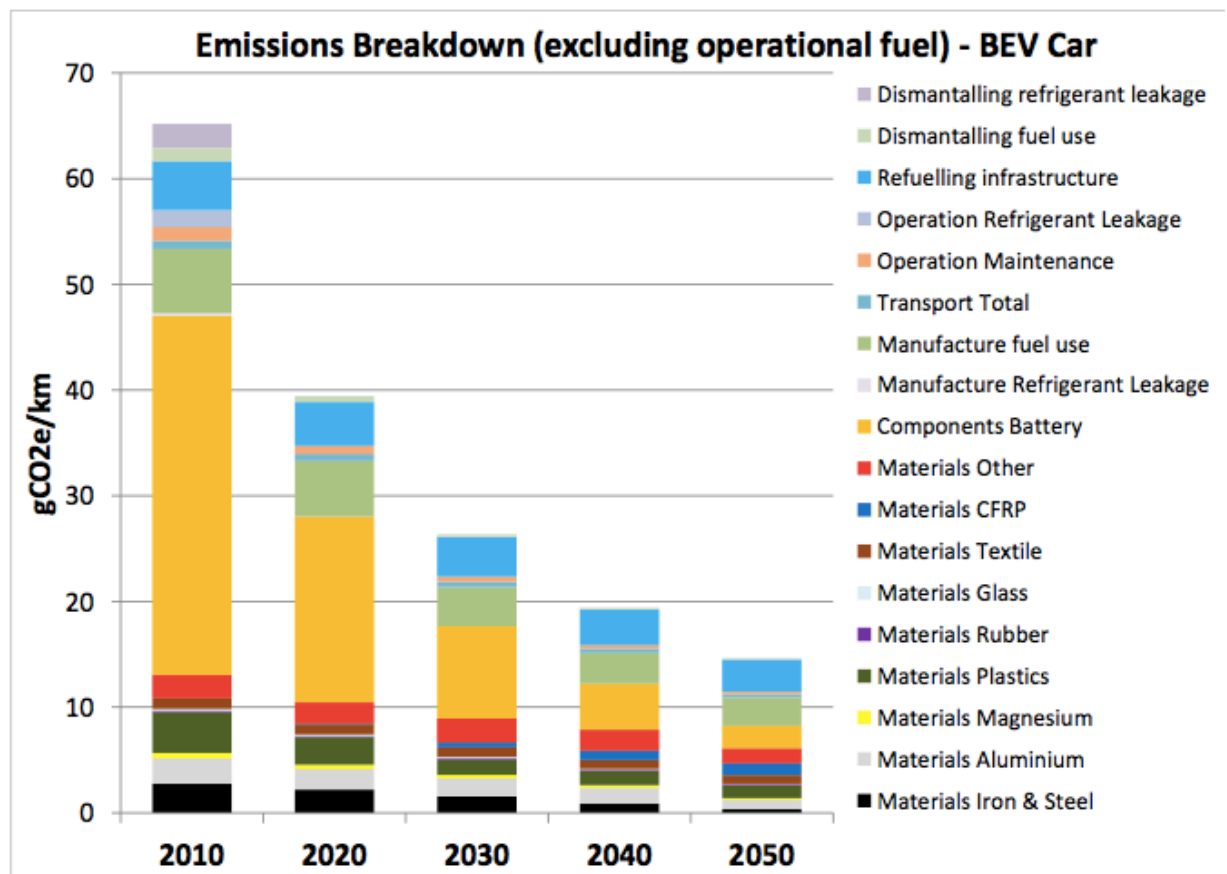
Source : K., ISHIHARA, 2001, p. 1.

• **Annexe 27.** Cycle de vie des émissions de CO<sub>2</sub>eq. pour différents véhicules



Source : Gao, L., 2012, p. 612

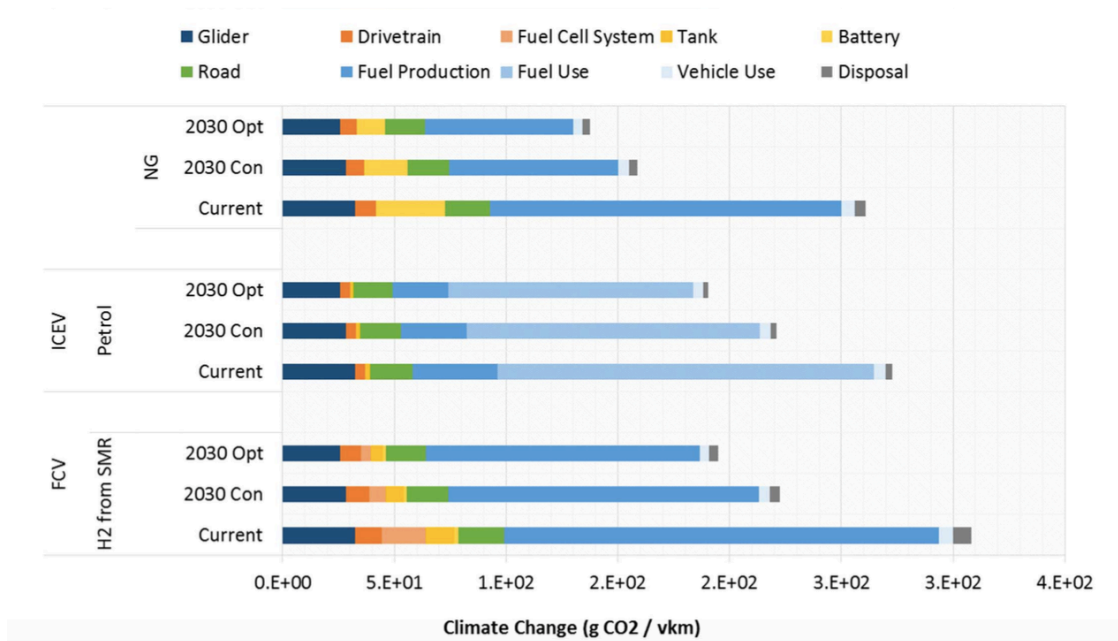
• **Annexe 28.** Evolution des émissions liées à la production de voitures électriques



Nous observons dans ce graphique une vue détaillée des émissions liées à la production de véhicules électriques. Ces émissions diminuent en fonction des années. Les éléments le plus affectés sont les batteries.

Source : Hill, N., 2013, slide 9

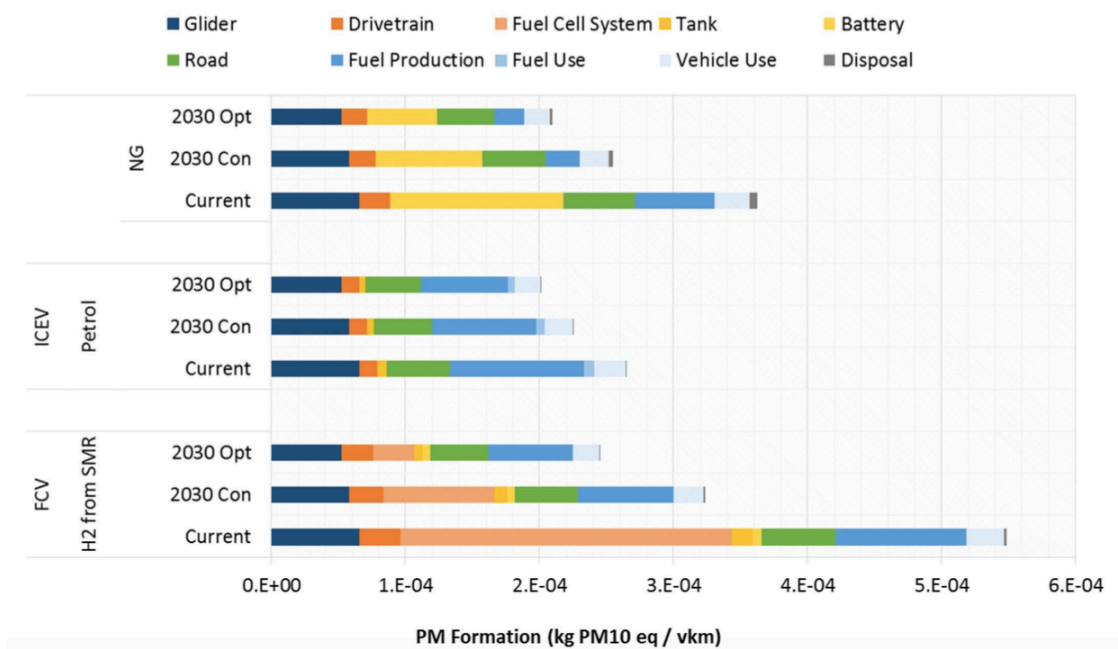
• **Annexe 29.** Potentiel de réchauffement climatique des différents véhicules



Le graphique présente les différents potentiels de réchauffements climatiques. Les émissions sont détaillées en fonction des différents aspects.

Source : Miotti, M., 2013, p. 8

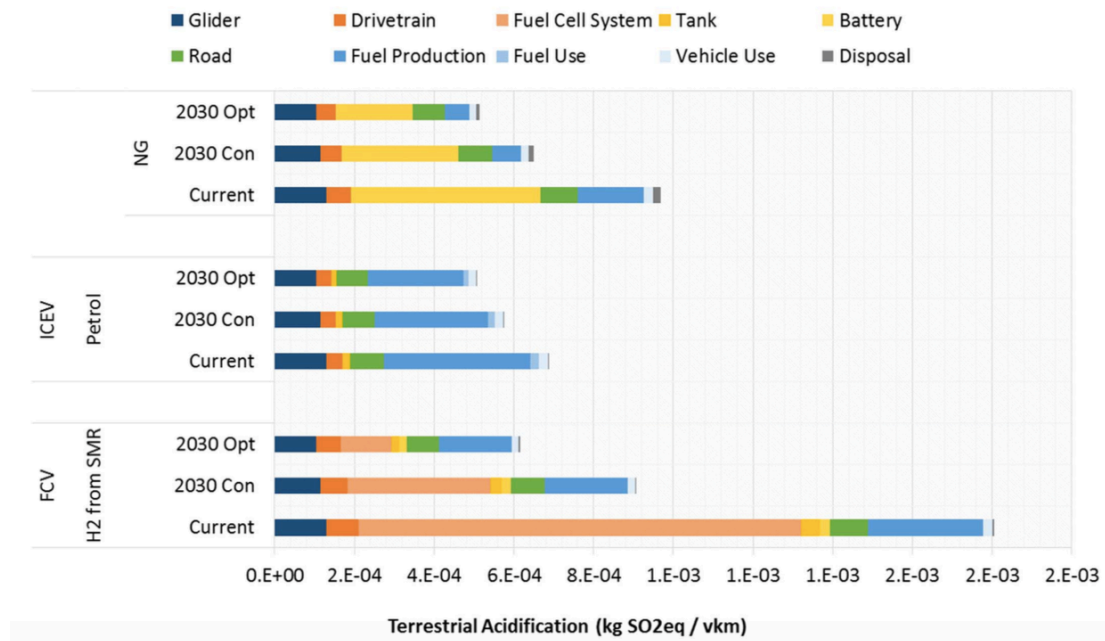
• **Annexe 30.** Emissions de particules fines des différents véhicules



Le graphique présente les différentes émissions de particules fines en fonction des véhicules. Les émissions sont détaillées en fonction des différents aspects.

Source : Miotti, M., 2013, p. 9

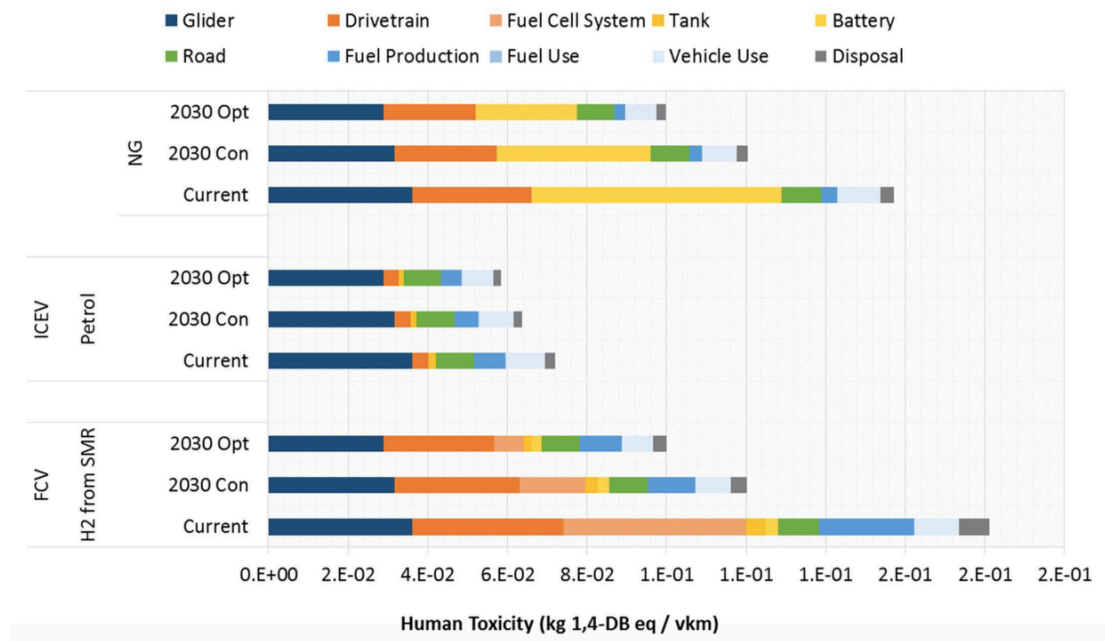
• **Annexe 31.** Acidification terrestre des différents véhicules



Le graphique présente les différents taux d'acidification de la terre en fonction des véhicules. Les émissions sont détaillées en fonction des différents aspects.

Source : Miotti, M., 2013, p. 10

• **Annexe 32.** Toxicité humaine des différents véhicules



Le graphique présente les différents taux de toxicité. Les émissions sont détaillées en fonction des différents aspects.

Source : Miotti, M., 2013, p. 11

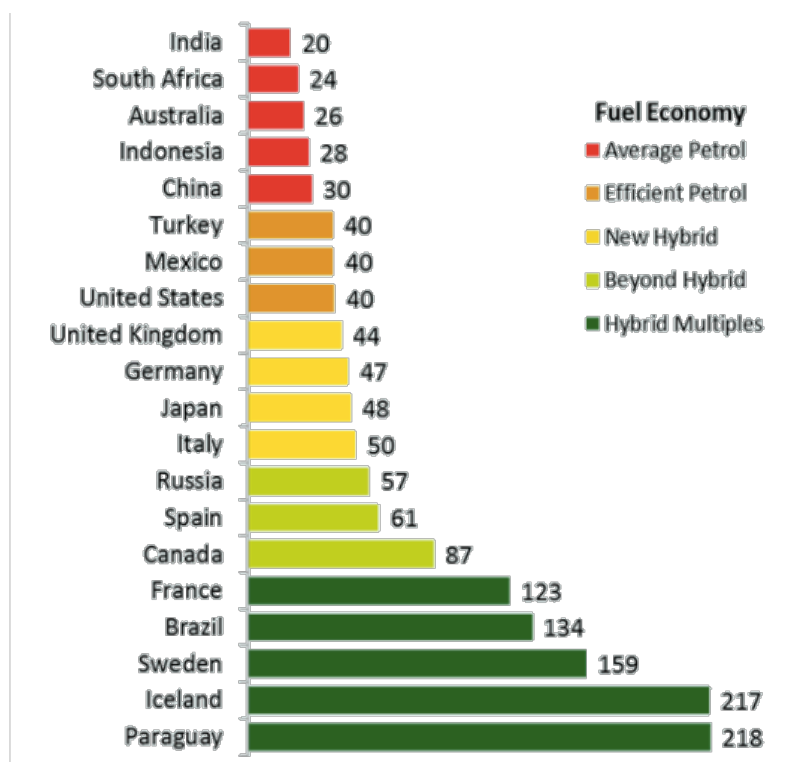
- **Annexe 33.** Réutilisation des matériaux après le recyclage

**Table 2**  
Parts that can be recycled from ELVs [7].

Part	Material	Recycled as
Window	Glass	Tiles
Seat	Foam and fibre	Soundproofing materials for vehicles
Body, trunk, hood and door	Steel	Car parts and general steel products
Wire harness	Cu	Cu and engines products (cast Al reinforcement)
Bumper	Resin	Bumper, interior parts, toolbox, etc.
Radiators	Cu and Al	Gun metal ingots and Al products
Coolant, engine and gear oil	Oil	Alternative fuel for boilers and incinerators
Engine transmission, suspension and wheel	Steel and Al	General steel and Al products
Catalytic converter	Precious metals	Catalytic converters or precious metal (e.g. platinum) recycling
Tire	Rubber	Raw material and energy recovery (e.g. cement kilns)

Source : Vermeulen, I., 2011

- **Annexe 34.** Equivalence de consommation entre voiture électrique et combustion



Source : Wilson, L., 2013

XVIII

- **Annexe 35.** Equivalence de consommation entre véhicules électriques et à combustion

Country	MPG (US)	L/100 km	km/L	MPG (UK)
Paraguay	218	1.1	93	261
Iceland	217	1.1	92	260
Sweden	159	1.5	68	191
Brazil	134	1.8	57	160
France	123	1.9	52	148
Canada	87	2.7	37	105
Spain	61	3.8	26	74
Russia	57	4.1	24	68
Italy	50	4.7	21	60
Japan	48	4.9	21	58
Germany	47	5.0	20	56
United Kingdom	44	5.4	19	53
United States	40	5.8	17	48
Mexico	40	5.9	17	48
Turkey	40	5.9	17	48
China	30	7.9	13	36
Indonesia	28	8.3	12	34
Australia	26	9.1	11	31
South Africa	24	10.0	10	28
India	20	11.9	8	24

Source : Wilson, L., 2013

- **Annexe 36.** TCO comparaison entre (PH)EV et diesel

(PH)EV vs diesel									
TCO									
Duration 48 months			Mileage on a annual basis						
Description	Net Investment		10000km	15000km	20000km	25000km	30000km	35000km	
Golf VII 1.4 150PK 5D TSI GTE Plug-In-Hybrid DSG	€ 30.197	P	515,99€	539,28€	563,08€	586,13€	610,40€	648,71€	
Golf VII 2.0 150PK 5D CRTDI Highline BMT	€ 21.891	D	445,54€	465,74€	496,37€	530,26€	557,69€	590,34€	
			70,44€	73,55€	66,72€	55,87€	52,71€	58,37€	
A3 Sportback 1.4 150PK 5D TFSI e-tron Attraction S-Tronic	€ 31.074	P	571,89€	593,29€	615,14€	636,65€	659,33€	695,50€	
A3 Sportback 2.0 150PK 5D TDI Attraction	€ 21.429	D	424,19€	458,07€	492,30€	523,24€	551,57€	584,57€	
			147,69€	135,22€	122,84€	113,41€	107,75€	110,93€	
V60 2.4 215PK 5D D6 Plug in Hybrid Momentum AWD Geartronic	€ 48.694	P	814,66€	845,54€	876,40€	907,11€	938,29€	970,05€	
V60 2.4 215PK 5D D5 Momentum	€ 33.278	D	712,43€	749,12€	785,98€	822,57€	859,98€	898,29€	
			102,24€	96,41€	90,42€	84,54€	78,31€	71,76€	
Golf VII 0.0 115PK 5D e-Golf	€ 28.032	P	558,75€	574,26€	589,94€	605,61€	621,63€	638,88€	
Golf VII 1.6 105PK 5D CRTDI Trendline BMT	€ 17.476	D	347,96€	365,60€	392,15€	422,31€	446,55€	475,11€	
			210,79€	208,67€	197,80€	183,30€	175,08€	163,77€	
<b>Average Difference per car per month - Petrol vs Diesel</b>			<b>132,79€</b>	<b>128,46€</b>	<b>119,44€</b>	<b>109,28€</b>	<b>103,46€</b>	<b>101,21€</b>	

Source : GE Capital Fleet Services

- **Annexe 37.** TCO comparaison entre (PH)EV et diesel

CNG vs diesel									
TCO									
Duration 48 months			Mileage on a annual basis						
Description	Net Investment		10000km	15000km	20000km	25000km	30000km	35000km	
Golf VII 1.4 110PK 5D TGI Trendline BM	€ 18.898	P	356,77€	384,10€	411,67€	438,98€	467,07€	503,11€	
Golf VII 1.6 105PK 5D CRTDI Trendline BMT	€ 17.476	D	347,96€	365,60€	392,15€	422,31€	446,55€	475,11€	
			8,82€	18,51€	19,53€	16,67€	20,52€	27,99€	
A3 Sportback 1.4 110PK 5D TFSI Attraction CNG G-Tron	€ 19.826	P	364,73€	394,73€	425,18€	455,17€	486,16€	526,44€	
A3 Sportback 1.6 110PK 5D TDI Ultra Attraction	€ 19.435	D	356,59€	387,79€	419,30€	447,89€	474,19€	504,71€	
			8,14€	6,94€	5,88€	7,28€	11,97€	21,73€	
B-Klasse 2.0 156PK 5D B200 BE Natural Gas Drive	€ 25.879	P	467,20€	500,72€	535,79€	572,07€	610,42€	647,34€	
B-Klasse 2.1 136PK 5D B200 CDI	€ 23.695	D	483,59€	516,13€	550,82€	587,23€	626,47€	663,48€	
			-16,39€	-15,41€	-15,03€	-15,16€	-16,05€	-16,14€	
E-Klasse 2.0 156PK 4D 200 Natural Gas Drive AUT	€ 38.396	P	652,33€	687,93€	726,49€	764,43€	803,66€	854,49€	
E-Klasse 2.1 136PK 4D 200 BlueTEC	€ 31.532	D	630,65€	665,19€	703,09€	740,72€	779,10€	817,46€	
			21,68€	22,73€	23,40€	23,71€	24,56€	37,03€	
<b>Average Difference per car per month - Petrol vs Diesel</b>			<b>5,56€</b>	<b>8,19€</b>	<b>8,45€</b>	<b>8,12€</b>	<b>10,25€</b>	<b>17,65€</b>	

Source : GE Capital Fleet Services