

Louvain School of Management

Comparaison des deux modes de propulsion des véhicules électriques : véhicules à pile à combustible versus véhicules à batterie

Auteur: **Justin DE COCK**
Superviseur: **Daniel DE WOLF**
Année académique 2021–2022
Master [60] en Sciences de Gestion

Abstract

Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'Union Européenne met en place des réglementations en faveur de la transition vers le transport 100 % électrique. Deux types de véhicules 100 % électriques sont actuellement disponibles sur le marché : les véhicules électriques à batterie et les véhicules électriques à pile à combustible. De nombreuses personnes restent sceptiques par rapport au transport électrique et des questions persistent. Le but de cette étude est d'analyser et de comparer les deux types de véhicules électriques afin de répondre aux questions que les citoyens se posent. Quatre critères sont analysés : prix, autonomie, empreinte carbone et infrastructure belge. Le prix d'achat des véhicules électriques est nettement plus élevé que celui des véhicules à moteur thermique. Par contre, le coût total sur la durée de vie des véhicules électriques à batterie est compétitif par rapport aux véhicules à moteur thermique. Le coût total sur la durée de vie des véhicules à pile à combustible reste toutefois trop élevé actuellement en comparaison avec les autres types de véhicules. Étant donné l'usage des véhicules, les progrès au niveau de l'autonomie et l'infrastructure, l'autonomie ne constitue plus un frein objectif à l'usage des véhicules électriques à batterie, même si les citoyens ont encore des craintes à ce sujet. Le manque d'infrastructure de recharge à hydrogène constitue un frein à l'adoption des véhicules électriques à pile à combustible. La réduction de l'empreinte carbone constitue le principal atout des véhicules électriques, en particulier en cas d'utilisation d'énergie verte. Moyennant l'augmentation de la production d'énergie et des techniques telles que le smart charging, le réseau belge est capable de supporter l'augmentation des véhicules électriques en circulation au cours des prochaines années. Il en va de même pour l'hydrogène en Belgique.

Table des matières

Abstract	i
Introduction	1
1 Analyse statistique	3
1.1 Analyse des données des tableaux A.1 et A.2	5
2 Analyse économique	9
2.1 Coût d'acquisition des véhicules électriques à batterie	9
2.2 Coût d'acquisition de véhicules électriques à pile à combustible	12
2.3 Coût total sur la durée de vie (TCO) des véhicules électriques à batterie .	13
2.4 Coût total sur la durée de vie (TCO) des véhicules électriques à pile à combustible	17
2.5 Conclusion	20
3 Autonomie	21
3.1 Autonomie et types d'utilisateurs	21
3.2 Stations de recharge en Europe	23
3.2.1 Stations de recharge pour véhicules électriques à batterie	23
3.2.2 Stations de recharge pour véhicules électriques à pile à combustible	26
3.3 Types d'usage	26
4 Analyse environnementale	28
4.1 Méthodologie	28
4.2 Résultats	31
5 Conséquence sur les infrastructures de production et de transport	34
5.1 Réseau électrique belge et infrastructures de production d'électricité	34
5.2 Réseau de transport et infrastructures de production d'hydrogène vert . . .	35
Conclusion	37
Appendices	39

A	Tableaux des données de véhicules électriques	40
B	Analyse du rapport autonomie-prix	45
C	Coût total sur la durée de vie	47
C.1	Coût total sur la durée de vie de la Volkswagen Golf 8 1.5 TSI et de la Volkswagen ID.3	47
C.2	TCO de certains pays de l'Union Européenne pour plusieurs types de véhicules	48
	Bibliographie	53

Introduction

La crise écologique constitue une problématique majeure. La lutte contre le réchauffement climatique est un des principaux enjeux écologiques. Le déséquilibre de l'effet de serre est la cause principale du réchauffement climatique [1]. En 2008, L'Union Européenne a fixé plusieurs objectifs pour la lutte contre le réchauffement climatique. L'un de ces objectifs est la diminution des émissions de gaz à effet de serre de 20 % entre 1990 et 2020 [2]. En 2020, une diminution de 31 % des émissions de gaz à effet de serre est observée par rapport à 1990 [2]. Le transport est le seul secteur pour lequel les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté par rapport à 1990 [2]. Le secteur des transports est responsable de près d'un tiers des émissions totales de CO₂ au sein de l'Union Européenne, le transport routier représentant 72 % de ces émissions [2]. Une nette amélioration écologique doit donc être réalisée au niveau de transport routier Européen.

Le prochain objectif fixé pour 2030 est une réduction de 55 % des gaz à effet de serre par rapport à 1990 [2]. Afin d'atteindre cet objectif, une transition vers le transport 100% électrique est envisagée. Le Parlement Européen a récemment voté l'interdiction de la vente de véhicules neufs à moteur thermique à partir 2035 [3]. De plus, plusieurs grandes villes prévoient l'interdiction de circulation des véhicules à moteur thermique dans les années à venir. Ainsi, les autorités bruxelloises ont décidé d'interdire la circulation des véhicules à moteur thermique à partir 2035 [4]. La même décision a été prise à Paris pour l'horizon 2030 [5].

Les progrès technologiques, les mesures européennes et le changement au niveau des habitudes de la société ont mené à une augmentation du nombre de véhicules 100 % électriques en Europe. Il existe actuellement deux catégories de véhicules 100 % électriques sur le marché :

- les véhicules 100 % électriques à batterie ou battery electric vehicles (BEV). Ces véhicules électriques utilisent une batterie rechargeable afin d'alimenter le moteur électrique.
- les véhicules 100 % électriques à pile à combustion ou fuel cell electric vehicles (FCEV). Ces véhicules possèdent un réservoir d'hydrogène. Cet hydrogène alimente une pile à combustible permettant de créer le courant utilisé par le moteur électrique du véhicule.

Bien que les véhicules électriques ne rejettent pas de CO₂ lors de leur utilisation, de nombreuses personnes restent sceptiques quant à leurs performances, ralentissant ainsi la transition vers le transport électrique. Cette problématique relève donc de nombreuses questions à propos du transport routier électrique. Le but de cette étude est de répondre aux questions principales.

Premièrement, une base de données sous forme de tableaux est créée. Cette base de données reprend la plupart des modèles de véhicules électriques. Ces tableaux permettent ensuite de réaliser une analyse statistique du prix et de l'autonomie. Quatre points majeurs sont ensuite étudiés pour les deux types de véhicules électriques.

1. Le premier point concerne le prix de chacun des types de véhicules. Cette étude reprend d'une part une analyse du coût d'achat du véhicule, et d'autre part une analyse du coût total sur la durée de vie du véhicule ou total cost of ownership (TCO).
2. Le point suivant comporte une analyse d'autonomie des véhicules et de l'infrastructure de recharge mise en place. Cette analyse permet de découvrir si les véhicules 100 % électriques sont limités au niveau des longs trajets.
3. Ensuite, une étude du taux d'émissions de CO₂ des deux types de véhicules est établie. L'analyse d'émissions de CO₂ va de la production du véhicule à son recyclage, en passant par son utilisation.
4. Enfin, la conséquence sur les infrastructures de production et de transport en Belgique est discuté.

Chapitre 1

Analyse statistique

Les véhicules électriques deviennent de plus en plus populaires et le nombre de véhicules électriques en circulation augmente de façon exponentielle. Ces véhicules peuvent être répartis en deux grandes classes : les véhicules 100 % électriques à batterie ou battery electric vehicles (BEV), et les véhicules 100 % électriques à pile à combustion ou fuel cell electric vehicles (FCEV). En 2020, plus de 10 millions de véhicules électriques étaient en circulation dans le monde, la majorité étant des véhicules électriques à batterie [6, p. 19]. Cela correspond à une augmentation de 43 % par rapport à 2019 [6, p. 19]. La croissance du parc mondial de véhicules électriques à batterie peut être observée dans la FIGURE 1.1.

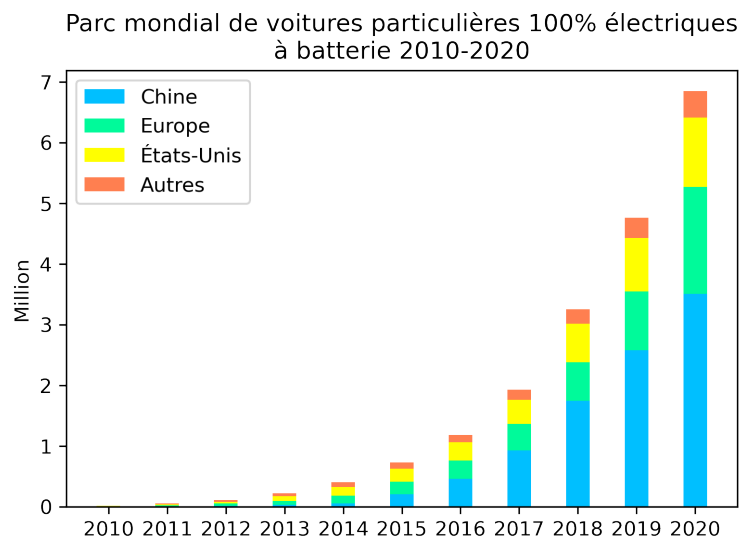


FIGURE 1.1 – Parc mondial de voitures électriques à batterie [6, p. 19]

La croissance du parc mondial de véhicules électriques à pile à combustible peut elle être observée de 2017 à 2021 dans la FIGURE 1.2.

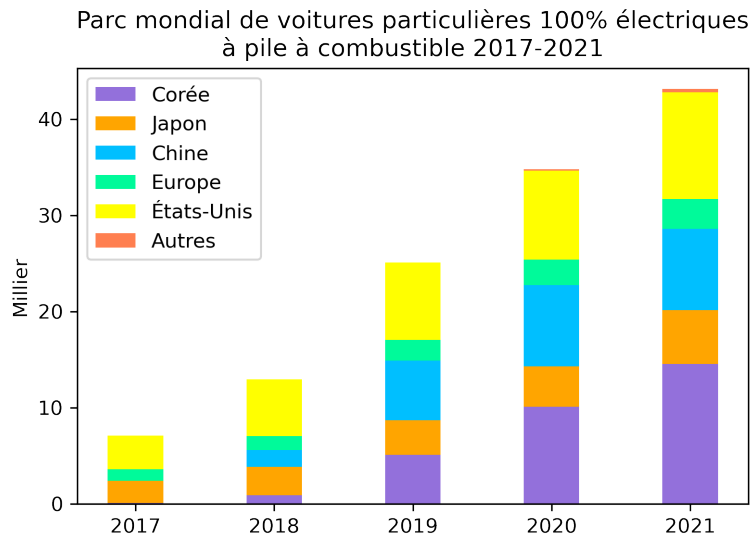


FIGURE 1.2 – Parc mondial de voitures électriques à pile à combustible [7]

Malgré la diminution du nombre d'immatriculations de nouvelles voitures en 2020 suite à la pandémie, la vente de voitures électriques a augmenté de 70 % par rapport à 2019 [6, p. 19]. Cette augmentation est principalement marquée par le marché Européen qui a enregistré 1.4 million d'immatriculations de nouvelles voitures électriques, ce qui représente plus du double d'immatriculations par rapport à 2019 [6, p. 19]. L'Europe présente donc la meilleure évolution de 2019 à 2020, notamment grâce aux pays à large marché tels que l'Allemagne et la France, et les pays nordiques tels que la Norvège ou la Suède. Cette tendance peut être observée dans la FIGURE 1.3.

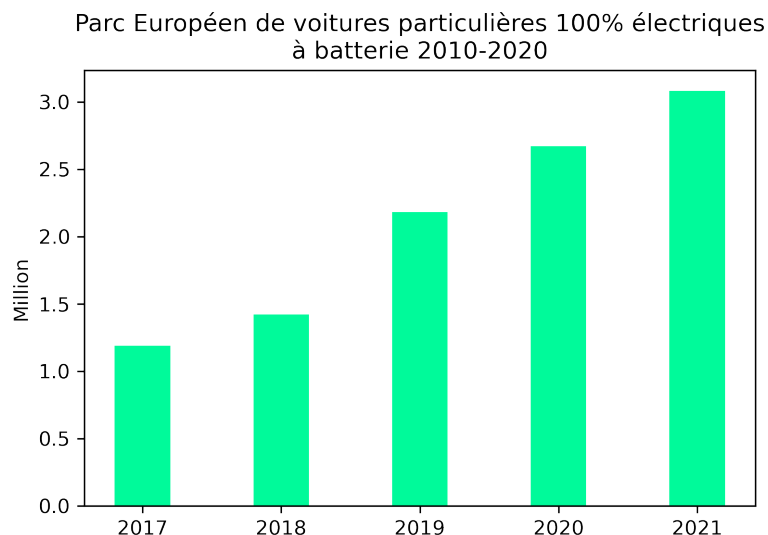


FIGURE 1.3 – Parc Européen de voitures électriques à batterie [6, p. 19]

Cette évolution peut être expliquée par plusieurs facteurs :

1. la présence de plusieurs campagnes incitant le passage des véhicules à moteur thermique aux véhicules électriques tels que les campagnes *EV30@30*¹ et *Drive to Zero*²,
2. l'accélération dans le développement de nouveaux modèles de véhicules électriques, ainsi que la performance de ces nouveaux modèles. Ce facteur est sans doute influencé par le premier. Parmi les 20 plus grandes marques de voiture au monde, 18 ont annoncé leur intention d'élargir leur gamme de véhicules électriques et d'augmenter rapidement la production de ceux-ci [6, p. 26].

Afin de mener au mieux l'étude, deux tableaux des différents véhicules électriques à batterie et véhicules électriques à pile à combustible ont été établis. Ces tableaux contiennent l'autonomie ainsi que le prix de chaque véhicule. Ils sont basés sur les modèles vendus en Belgique en 2022. Ils ne contiennent pas l'entièreté des modèles disponibles dans le monde, mais ils permettent d'avoir une représentation globale du marché actuel des véhicules électriques à batterie et électriques à pile à combustible, en reprenant les modèles les plus courants. Les prix affichés sont les prix les plus bas pour une autonomie donnée. Toutes les informations peuvent être observées dans les TABLEAUX A.1 et A.2.

Sur base de ces données, il est possible de réaliser une analyse détaillée afin de répondre à différentes questions concernant l'avenir de l'automobile. Premièrement, les véhicules électriques à batterie seront analysés pour ensuite passer à l'analyse de véhicules électriques à pile à combustible.

1.1 Analyse des données des tableaux A.1 et A.2

La première analyse qui peut être réalisée concernant les véhicules électriques est une analyse statistique. Cette analyse est basée sur les données du TABLEAU A.1.

Les données statistiques calculées sont reprises dans le TABLEAU 1.1. Ce tableau contient la moyenne ainsi que l'écart type du prix et de l'autonomie des véhicules électriques à batterie et à pile à combustible. La moyenne et l'écart type permettent de calculer le coefficient de variation. Le coefficient de variation permet de comparer l'autonomie et le prix en termes de dispersion autour de la moyenne. Le coefficient de variation se calcule de la manière suivante :

1. La campagne *EV30@30* a été lancée au meeting *Clean Energy Ministerial* de 2017. Elle a pour but d'atteindre une part de ventes de véhicules électriques de 30 % d'ici 2030 parmi les pays engagés [6, p. 13]

2. Le programme et la campagne *Drive to Zero*TM visent à accélérer la croissance du parc mondial des véhicules utilitaires à zéro émission (ZE), dans le but que la technologie ZE devienne commercialement compétitive d'ici 2025 et dominante d'ici 2040 dans des segments de véhicules et des régions spécifiques [8]

$$c_V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (1.1)$$

Les coefficients de variation du prix et de l'autonomie sont également repris dans le TABLEAU 1.1.

<i>Analyse statistique</i>	<i>BEV</i>	<i>FCEV</i>
Prix moyen (\bar{p})	57 492 €	69 234 €
Autonomie moyenne (\bar{a})	408 km	658 km
Ecart type du prix (σ_p)	27 963 €	4 764 €
Ecart type de l'autonomie (σ_a)	112 km	8 km
Coefficient de variation du prix (c_V^p)	48.64 %	6.88 %
Coefficient de variation de l'autonomie (c_V^a)	27.45 %	1.22 %

TABLE 1.1 – Tableau des données statistiques des voitures électriques de 2021-2022

L'écart type du prix des véhicules électriques à batterie est élevé. De plus, le coefficient de variation du prix est assez élevé, ce qui reflète bien l'écart type du prix élevé pour les véhicules électriques à batterie. Les coefficients de variation des véhicules électriques à pile à combustible sont relativement faibles par rapport à ceux des véhicules électriques à batterie. Ceci est dû aux données peu représentatives des véhicules électriques à pile à combustible étant donné le nombre limité de données utilisées pour les calculs statistiques.

Avec les données de prix et d'autonomie du TABLEAU A.1, un graphique d'autonomie en fonction du prix peut être tracé, comme observé à la FIGURE 1.4.

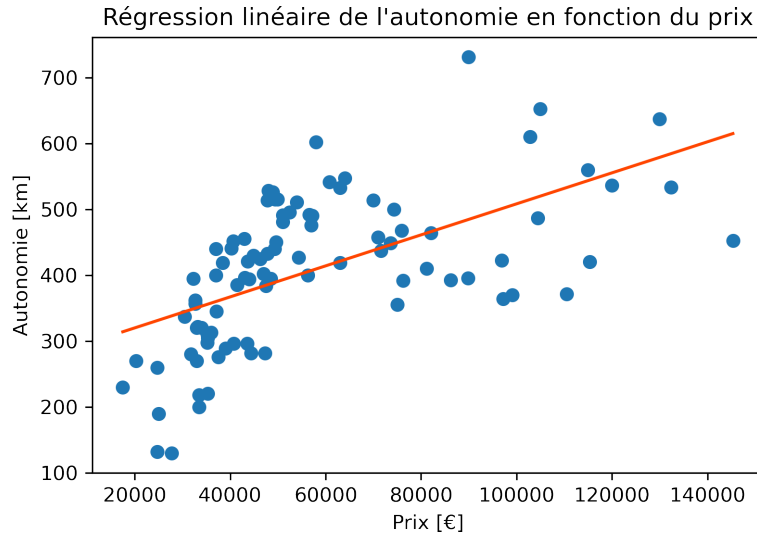


FIGURE 1.4 – Régression linéaire du nuage de points autonomie en fonction du prix

Chaque point représente un modèle de véhicule électrique différent. La tendance est globalement linéaire jusqu'au prix de 60 000 € environ, après lequel les points sont beaucoup plus éparpillés, présentant des prix bien plus élevés avec une augmentation plus faible de l'autonomie que dans la tranche 20 000 - 60 000 €.

Afin d'analyser la tendance de la courbe, une régression linéaire est calculée sur base du nuage de point de la FIGURE 1.4. La régression linéaire permet d'établir une relation linéaire entre le prix et l'autonomie des véhicules électriques à batterie.

Afin d'analyser la qualité de la régression linéaire, le coefficient de détermination R^2 est utilisé. Un coefficient de détermination égal à 1 signifie que la régression linéaire correspond parfaitement à la distribution de points tandis qu'un coefficient de détermination nul ou négatif correspond à une mauvaise régression.

La droite de régression linéaire est tracée en rouge dans la FIGURE 1.4.

Le coefficient de détermination lié à la régression linéaire observée dans la FIGURE 1.4 est de -0.925, ce qui correspond à une mauvaise prédiction, la tendance linéaire étant donc faible dans l'ensemble.

Néanmoins, comme énoncé plus haut, les modèles dont les prix sont inférieurs à environ 62 000 € présentent une tendance linéaire beaucoup plus forte. En effet, une droite de régression linéaire a été calculée sur base des points ayant un prix allant jusqu'à 62 000 €. L'équation de cette régression linéaire est la suivante.

$$y_x^* = 272.911 + 0.00235x \quad \forall x \in [0, 62000] \quad (1.2)$$

La droite de régression linéaire pour cet ensemble de prix peut être observé dans la FIGURE 1.5.

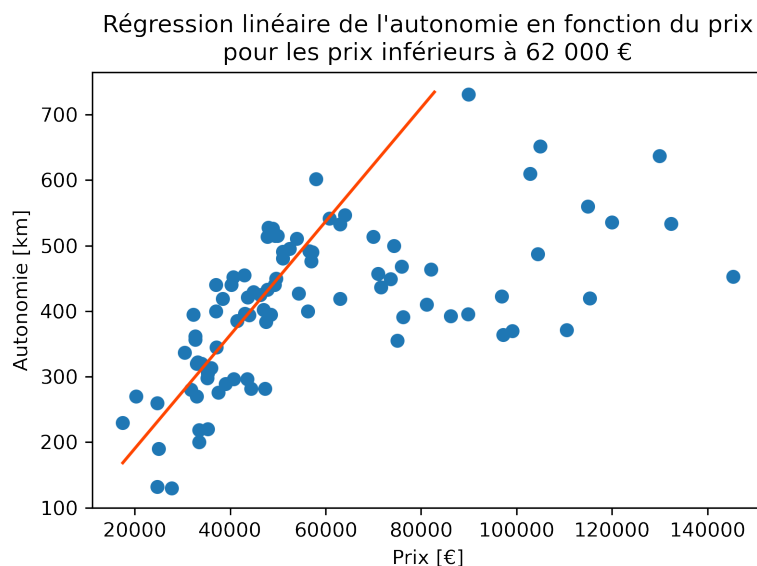


FIGURE 1.5 – Régression linéaire pour les prix inférieurs à 62 000 €

Le coefficient de détermination de la régression linéaire tracée pour les prix inférieurs à 62 000 € est de 0.446 ce qui correspond bien mieux à une tendance linéaire.

Cette analyse porte donc à croire que les modèles ayant un prix supérieur à 62 000 € sont des véhicules de luxe n'offrant pas spécialement une meilleure autonomie, le prix plus élevé étant justifié par des arguments de luxe ou de performance moteur.

Il est ensuite intéressant de comparer les données statistiques du TABLEAU 1.1 entre elles ainsi qu'avec celles des véhicules à moteur thermique afin d'évaluer la concurrence actuelle entre ces trois types de véhicules. Deux caractéristiques principales seront analysées : le prix et l'autonomie. Elles forment l'objet des deux prochains chapitres.

Chapitre 2

Analyse économique

L'analyse du prix peut être décomposée en deux parties. D'une part, le prix d'achat d'un véhicule neuf et d'autre part le coût total sur la durée de vie, c'est-à-dire le prix d'achat auxquels les frais d'utilisation et tous les autres frais sont ajoutés sur l'entièreté de la durée de vie du véhicule.

2.1 Coût d'acquisition des véhicules électriques à batterie

Le prix moyen d'un véhicule électrique à batterie neuf en 2021-2022 est de 57 492 € comme calculé plus haut. Néanmoins, d'après une étude, les Européens dépensent en moyenne 27 500 € pour l'achat d'un véhicule neuf [9]. Le prix d'un véhicule électrique à batterie neuf représente plus du double du prix moyen dépensé par un citoyen moyen européen. Ce prix relativement élevé peut donc dissuader une majorité de personnes à investir dans un véhicule électrique neuf. De plus, le prix des véhicules électriques n'a pas diminué au cours des dernières années en Europe, comme le montre le graphique ci-dessous.

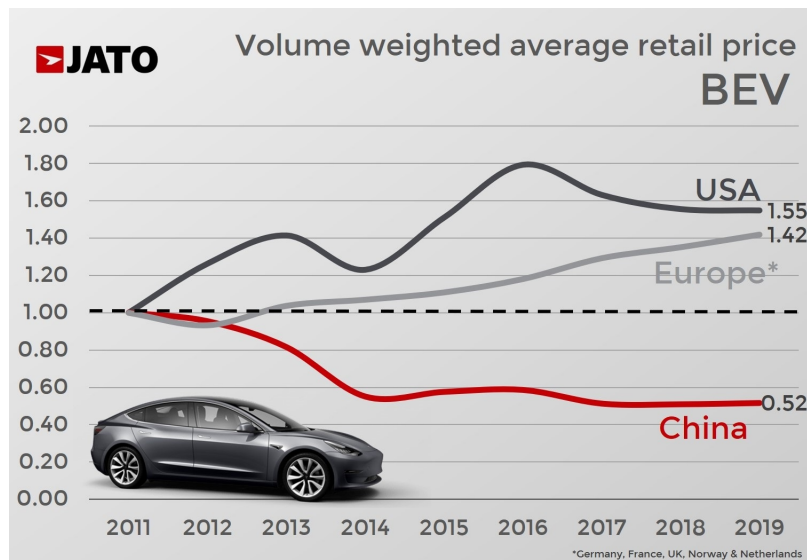


FIGURE 2.1 – Prix de détail moyen pondéré en fonction du volume [10]

La FIGURE 2.1 montre que le prix d’achat d’un véhicule électrique à batterie a augmenté en moyenne de 42 % entre 2011 et 2019. Les marques automobiles occidentales se sont concentrées sur la conception et la fabrication de véhicules électriques premium et de ce fait plus cher. Cela laisse peu d’offres dans les prix d’entrée de gamme. Le coût de production des véhicules électriques devrait néanmoins être inférieur au coût de production des véhicules à moteur thermique après 2027 selon une étude menée par *BloombergNEF*, l’un des principaux fournisseurs de recherche stratégique sur les voies d’adaptation des secteurs de l’énergie, des transports, de l’industrie, du bâtiment et de l’agriculture à la transition énergétique. Ceci peut être observé dans le FIGURE 2.2 avec un croisement entre la courbe de coûts des véhicules électriques et la courbe de coûts des véhicules thermiques aux alentours de 2027.

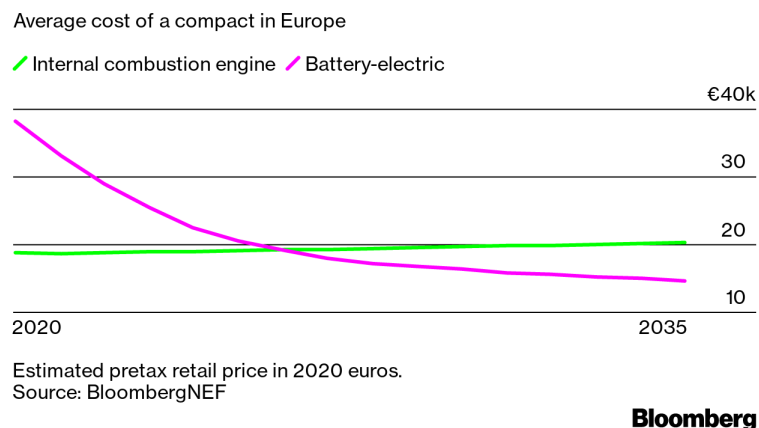


FIGURE 2.2 – Coût moyen avant taxes d’un véhicule compact en Europe [11]

Cette tendance peut être expliquée par plusieurs facteurs. Premièrement, le prix des batteries lithium-ion est en baisse avec une diminution du prix de 89 % de 2010 à 2020 et

une diminution de 13 % en 2020 [12]. En effet, le coût de la batterie représente environ un tiers du coût total de production du véhicule [13]. La baisse du coût des batteries joue donc un rôle majeur dans la baisse du coût des véhicules électriques.

Deuxièmement, la production de véhicules électriques augmente drastiquement comme peut être observé dans la FIGURE 1.1, avec un parc mondial de voitures personnelles électriques à batterie suivant une tendance exponentielle. Selon une étude d'*INTERNATIONAL ENERGY AGENCY* (IEA), la tendance exponentielle continuera dans les années à venir. L'étude a été menée selon deux scénarios, le scénario de développement durable ou sustainable development scenario (SDS), et le scénario des politiques énoncées ou stated policies scenario (STEPS). Le SDS est fondé sur 3 piliers :

- assurer l'accès à l'énergie pour tous d'ici 2030,
- réduire drastiquement les émissions de polluants atmosphériques,
- atteindre les objectifs climatiques relatifs aux accords de Paris.

Le SDS est un scénario selon lequel les émissions nettes sont nulles d'ici 2070 et l'augmentation de la température mondiale reste inférieure à 1.7-1.8°C avec une probabilité de 66 % [6, p. 73]. Le STEPS est le scénario de référence des rapports phares de l'IEA. Ce scénario reflète toutes les politiques existantes, les ambitions politiques et les objectifs qui ont été légiférés ou annoncés par les gouvernements du monde entier [6, p. 73]. Le SDS prévoit une croissance du stock mondial de véhicules électriques à batterie plus importante que le STEPS comme peut être observé dans la FIGURE 2.3.

Prévision du stock mondial de véhicules électriques dans les scénarios de développement durable et des politiques déclarées 2020-2030

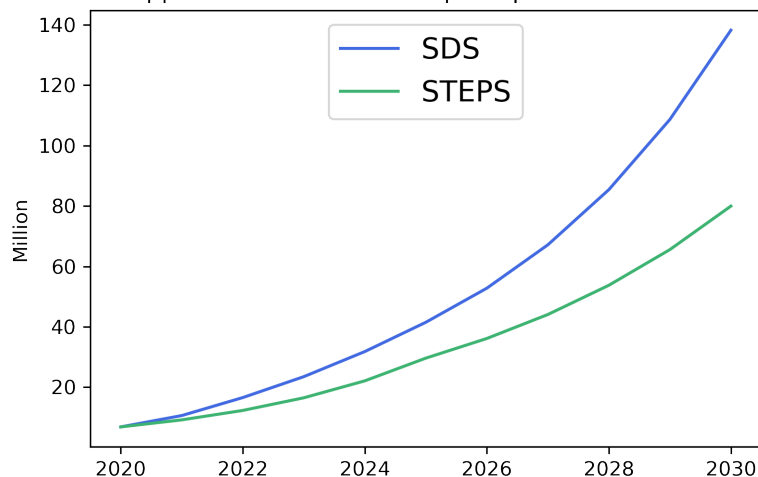


FIGURE 2.3 – Prévision du stock mondial de véhicules électriques dans les scénarios SDS et STEPS [6, p. 74]

Des économies d'échelle peuvent donc être engrangées grâce à l'accroissement de production des véhicules électriques. En plus des économies d'échelle, l'effet d'expérience

permet de diminuer le coût unitaire de production des véhicules électriques. En effet, la loi d'expérience stipule que le coût unitaire d'un produit diminue avec l'augmentation de l'expérience mesurée par la production cumulée [14].

Enfin, le nombre de modèles de véhicules électriques à batterie croît également comme observé dans la FIGURE 2.4, présentant des modèles d'entrée de gamme à des prix plus abordables et accessibles à une plus grande part de la population.

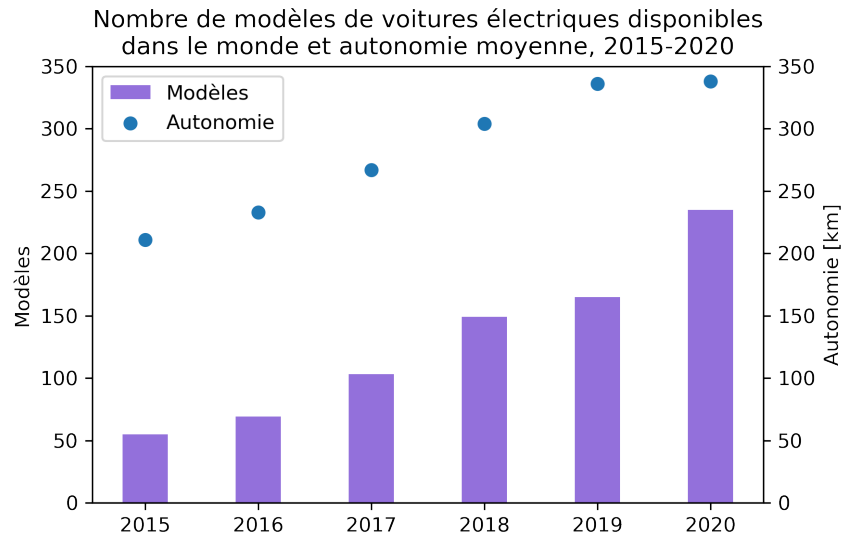


FIGURE 2.4 – Modèles de véhicules électriques disponibles dans le monde et autonomie moyenne entre 2015 et 2020 [6, p. 22]

2.2 Coût d'acquisition de véhicules électriques à pile à combustible

Le prix d'achat d'un véhicule électrique à pile à combustible neuf est en moyenne de 69 234 €, soit 11 742 € de plus qu'un véhicule électrique à batterie et 41 734 € de plus que le prix moyen dépensé par un européen. Le coût d'acquisition des véhicules électriques à pile à combustible représente donc un véritable frein à la transition vers les transports électriques à pile à combustible.

Néanmoins, le prix d'acquisition de ces véhicules électriques à pile à combustible a tout de même diminué au cours des dernières années [15]. Ce prix va continuer à diminuer dans les années à venir. Ceci est dû à plusieurs facteurs.

Le premier concerne les progrès technologiques et de production concernant l'ensemble du véhicule à pile à combustible [15]. Ces progrès comprennent :

- la diminution du prix des réservoirs de stockage de l’hydrogène [15],
- la réduction du coût et la meilleure intégration de la chaîne de traction électrique du véhicule [15],
- l’ajout de batteries permettant de stocker l’électricité produite lors du freinage et permettant de fournir de l’électricité au moteur en cas de besoin [15, 16]. De plus le prix de ces batteries lithium-ion est en diminution comme expliqué plus haut.

De plus, tout comme pour les véhicules électriques à batterie, des économies d’échelle peuvent être réalisées étant donné la forte croissance de production de véhicules électriques à pile à combustible, tout en bénéficiant également d’un effet d’expérience.

En effet, selon un étude menée par le cabinet international *McKinsey*, une réduction de 70 % à 80 % peut être obtenue si la production annuelle de véhicules électriques à pile à combustible atteint 150 000 véhicules [15].

Les économies d’échelle pouvant être réalisées pour les véhicules électriques à pile à combustible sont néanmoins nettement inférieures à celles pouvant être réalisées pour les véhicules électriques à batterie étant donné la production nettement inférieure de véhicules électriques à pile à combustible.

Il en va de même pour l’effet d’expérience qui est fonction de la production totale, bien que la pente de la courbe de prix en fonction de la production cumulée soit plus grande en valeur absolue pour une production cumulée faible.

2.3 Coût total sur la durée de vie (TCO) des véhicules électriques à batterie

Après avoir analysé le coût d’acquisition d’un véhicule électrique à batterie neuf, le coût total sur la durée de vie du véhicule, ou total cost of ownership (TCO), peut être discuté. En plus de prendre en compte le prix d’achat des véhicules, les coûts totaux sur la durée de vie comprennent les entretiens, l’assurance, la dépréciation, les frais d’utilisation etc. Selon une étude menée par *Element Energy Limited*, le TCO des véhicules électriques à batterie devrait être inférieur à celui des véhicules à moteur thermiques et véhicules plug-in hybrides à partir de 2023 [17, p. 3]. Au fil des années à venir, les économies en termes de TCO faites en achetant une voiture électrique par rapport à une voiture à moteur thermique devraient augmenter davantage. Ceci est la conséquence de plusieurs facteurs.

D’une part, les différentes normes et mesures en application ou futures incitent les constructeurs automobiles à augmenter la production de véhicules électriques à batterie ainsi que la recherche et le progrès dans ce secteur, afin de les rendre plus accessibles et adaptés à la majorité des personnes. Par exemple, les groupes VW et BMW prévoient que 60 % et

50 %, respectivement, de leur catalogue sera composé de voitures électriques à batterie, avec le groupe VW abandonnant complètement le développement de nouveaux moteurs thermiques [17, p. 3].

D'autre part, certains coûts pris en compte dans le calcul du TCO sont réduits pour les véhicules électriques à batterie comparé aux véhicules à moteur thermique. Le TCO d'un véhicule peut être divisé en 4 composantes principales, par ordre d'importance :

- la dépréciation du véhicule [18, 19],
- le carburant ou la source d'énergie [18],
- l'assurance [18],
- l'entretien du véhicule [18].

La part la plus importante du coût total sur la durée de vie d'une automobile est donc la dépréciation. Les moteurs électriques sont plus efficaces que les moteurs thermiques, ce qui signifie qu'une plus grande part de l'énergie est convertie en puissance afin de mouvoir le véhicule, réduisant ainsi les pertes thermiques [20]. L'efficacité supérieure des moteurs électriques est la conséquence du moteur en lui-même, complètement différent des moteurs thermiques. Étant donné leur conception et fonctionnement différents, les moteurs électriques ne sont pas soumis à de hautes pressions, frottements ou températures comme le sont les moteurs thermiques. La durée de vie d'un moteur électrique est donc supérieure à celle d'un moteur thermique. Selon *EVEXPERT*, la durée de vie d'un moteur électrique se situe entre 15 et 20 ans contrairement aux moteurs à combustion présentant une durée de vie entre 8 et 10 ans [20]. En plus de la longévité élevée des moteurs électriques, les batteries ont une durée de vie de plus de 10 ans et ont une très faible réduction de capacité au cours du temps [20, 21]. Les voitures électriques à batterie offrent donc une plus grande valeur financière en tant que voiture d'occasion. La Volkswagen Golf et la Volkswagen ID.3 sont prises à termes de comparaison. Selon une étude universitaire, la dépréciation de la Volkswagen Golf est de 40 % la première année, et de 20 % de la valeur résiduelle les années qui suivent [22]. Étant donné que la durée de vie moyenne des véhicules électriques à batterie représente près du double de celle des véhicules à moteur thermique, l'approximation suivante a été faite à propos de la dépréciation : 20 % la première année et 10 % de la valeur résiduelle les années suivantes. Le coût d'achat d'une Volkswagen Golf 8 1.5 TSI est de 32 825 € sans options. Ceci revient donc à une dépréciation de 5 685 € sur 4 ans, soit environ 474 € par mois. En suivant le même raisonnement, la dépréciation mensuelle de la Volkswagen ID.3 est d'environ 334 € par mois.

Le carburant/électricité est le élément part des coûts le plus importante. Les coût de consommation d'énergie des véhicules électriques à batterie est environ la moitié de ceux des véhicules à moteur thermique. La comparaison de la Volkswagen Golf avec la Volkswa-

gen ID.3 illustre cela.

La Volkswagen Golf 8 à essence a une consommation minimale de 5,34 L/100 km avec son moteur 1.5 TSI. L'essence 95 RON (E10) coûte en moyenne 1,8024 €/L en Belgique [23, 29/04/2022]. Les coûts de consommation d'énergie de la Volkswagen Golf 8 1.5 TSI sont donc de $5,34 \cdot 1,8024 \simeq 9,625$ €/100 km. Pour la Volkswagen ID.3, le calcul est similaire. La Volkswagen ID.3 a une consommation moyenne de 155,38 Wh/km [24]. Le coût moyen de l'électricité en Belgique est de 0,293 €/kWh [25, 29/04/2022]. Ceci donne un kilométrage au prix de $155,38 \cdot \frac{0,293}{1000} \simeq 0,0455$ €/km, soit 4,55 €/100 km ce qui représente moins de la moitié du prix du kilométrage de la Volkswagen Golf. De plus, les moteurs électriques ont une meilleure capacité à générer de l'électricité lors du freinage afin de recharger la batterie [20].

La composante suivante est l'assurance. Bien que le prix d'achat d'un véhicule électrique à batterie soit supérieur au prix d'achat d'un véhicule à moteur thermique, pour le même type de véhicule, l'assurance d'une voiture électrique à batterie a un coût moins élevé que celle d'une voiture à moteur thermique. La comparaison peut à nouveau être faite entre la Volkswagen Golf 1.5 TSI et la Volkswagen ID.3. Les prix ont été calculés avec les mêmes paramètres pour les 2 automobiles sur le site d'Ethias assurances [26]. Les paramètres utilisés sont les suivants : un conducteur âgé de 35 ans roulant plus de 10 000 km par an, étant employé et avec 0 sinistre en tort aux cours des 5 dernières années. La comparaison des prix des assurances entre la Volkswagen Golf et la Volkswagen ID.3 est établie dans le TABLEAU 2.1.

<i>Modèle</i>	<i>Pack RC</i>	<i>Pack Mini Omnium</i>	<i>Pack Omnium</i>
Volkswagen Golf 1.5 TSI	365,42 €/an	812,34 €/an	1309,38 €/an
Volkswagen ID.3.	305,26 €/an	698,48 €/an	991,57 €/an

TABLE 2.1 – Comparaison du prix des assurances entre la Volkswagen Golf 1.5 TSI et la Volkswagen ID.3 [26]

La Volkswagen ID.3 présente donc un avantage économique par rapport à la Volkswagen Golf en terme d'assurance. D'autres simulations confirmant cet avantage économique ont été réalisées, par exemple par *Capital.fr* [27].

Enfin, l'entretien du véhicule représente la plus faible part du TCO. Ayant très peu de parties mobiles, les moteurs électriques n'ont pas besoin d'huile comme lubrifiant ni, par conséquent, de filtre d'huile. De plus, les moteurs électriques sont composés de moins de pièces que les moteurs thermiques, limitant ainsi les coûts d'entretien. Comme énoncé plus haut, les moteurs électriques font très bon usage du freinage régénératif qui, non seulement,

permet de recharger la batterie, mais ralentit également considérablement le véhicule. Les contraintes sur le système de freinage sont ainsi réduites, diminuant l'usure des freins. En principe, les coûts d'entretien pour un véhicule électrique à batterie se limitent à la simple révision de la direction, de la climatisation, des roues et des pneus [20]. Il faut néanmoins également prendre en compte l'utilisation et la durée de vie du cycle de la batterie afin de déterminer lorsqu'il faut remplacer la batterie ou la voiture [28]. Heureusement, comme expliqué plus haut, les batteries ont une durée de vie de plus de 10 ans et la durée de vie des batteries est le domaine dans lequel il y a eu le plus d'améliorations au cours des 20 dernières années [28]. Les coûts d'entretien d'un véhicule électrique à batterie sont par conséquent inférieurs aux coûts d'entretien des véhicules à moteur thermique. En effet, la durée de vie du moteur exclue, Volkswagen a calculé que des économies allant jusqu'à 35 % pouvaient être réalisées sur les coûts d'entretien de ses voitures électriques à batterie [20]. L'entretien de la Volkswagen Golf 8 1.5 TSI doit être fait tous les 15 000 km ou tous les ans [29]. Le prix varie entre 138 € et 179 €, ce qui donne une moyenne de 158,5 € [29]. L'entretien d'une Volkswagen ID.3 est quant à lui d'environ 100 € tous les 30 000 km ou tous les 2 ans [30].

La différence de TCO entre les véhicules électriques à batterie et les véhicules à moteur thermique dépend donc des 4 composantes énoncées et de la façon dont les avantages et désavantages économiques se contrebalancent. Un facteur important est le kilométrage annuel du véhicule. Plus le kilométrage est élevé, plus l'avantage économique du prix du kilométrage des véhicules électriques à batterie par rapport aux véhicules à moteur thermique aura de l'importance. Les belges roulaient en moyenne 17 500 km par an avant le Covid [31]. En reprenant l'exemple de la comparaison entre la Volkswagen Golf et la Volkswagen ID.3, ceci correspond à une économie de 888,125 €/an pour la Volkswagen ID.3 par rapport à la Volkswagen Golf 8 1.5 TSI au niveau du prix du kilométrage. Une comparaison entre le TCO de la Volkswagen Golf 8 1.5 TSI et de la Volkswagen ID.3 peut être trouvée dans le TABLEAU 2.2. Ce TCO a été calculé sur une base de 4 ans en reprenant les paramètres cités ci-dessus et en supposant que les véhicules peuvent être revendus aux prix d'acquisition moins la dépréciation, que le conducteur parcourt un total de 15 000 km par an et en prenant une assurance Mini Omnium.

<i>Modèle</i>	<i>Dépréciation</i>	<i>Essence/Electricité</i>	<i>Assurance</i>	<i>Entretien</i>	<i>TCO sur 4 ans</i>
Volkswagen Golf 1.5 TSI	474 €/mois	120 €/mois	68 €/mois	13 €/mois	675 €/mois
Volkswagen ID.3	334 €/mois	57 €/mois	58 €/mois	4 €/mois	453 €/mois

TABLE 2.2 – Répartition du TCO sur 4 ans de la Volkswagen Golf 8 1.5 TSI et de la Volkswagen ID.3 pour un parcours annuel total de 15 000 km et une assurance Mini Omnium

Les TCO de la Volkswagen ID.3 est inférieur à celui de la Volkswagen Golf. Les mêmes calculs peuvent être faits pour un kilométrage annuel de 30 000 km. Les résultats sont repris dans le TABLEAU 2.3.

<i>Modèle</i>	<i>Dépréciation</i>	<i>Essence/Electricité</i>	<i>Assurance</i>	<i>Entretien</i>	<i>TCO sur 4 ans</i>
Volkswagen Golf 1.5 TSI	474 €/mois	241 €/mois	68 €/mois	26 €/mois	809 €/mois
Volkswagen ID.3	334 €/mois	114 €/mois	58 €/mois	8 €/mois	514 €/mois

TABLE 2.3 – Répartition du TCO sur 4 ans de la Volkswagen Golf 8 1.5 TSI et de la Volkswagen ID.3 pour un parcours annuel total de 30 000 km et une assurance Mini Omnium

La différence de TCO entre les 2 véhicules augmente donc avec le kilométrage annuel. Selon les hypothèses utilisées pour les calculs, il est plus avantageux d’opter la Volkswagen ID.3. Un graphique de l’évolution du TCO des véhicules en fonction du kilométrage annuel peut être observé dans la FIGURE C.1 en annexe. De plus, une étude menée par LEASEPLAN confirme que le TCO de la Volkswagen ID.3 est inférieur à celui de la Volkswagen Golf dans 12 pays Européens [32].

L’acquisition d’un véhicule électrique à batterie présente donc un avantage économique par rapport aux véhicules à moteur thermique dans les années à venir, malgré leurs coûts d’acquisition plus élevé. Certains modèles électriques à batterie ont déjà un TCO inférieur au modèle équivalent à moteur thermique. Selon une étude menée par *LeasePlan*, de nombreux pays de l’union Européenne ont, en moyenne, un TCO de véhicules électriques à batterie inférieur à celui des véhicules à moteur thermique comme observé dans le TABLEAU C.1 en annexe [32]. Ceci devrait faciliter la transition vers le transport 100 % électrique.

2.4 Coût total sur la durée de vie (TCO) des véhicules électriques à pile à combustible

Étant donné le nombre de modèles limités ainsi que la faible production de véhicules personnels 100% électriques à pile à combustible, la documentation concernant le coût total sur la durée de vie de ces véhicules est limitée. Une analyse précise du coût total sur la durée de vie reprenant la répartition du TCO en pourcentage par rapport à différents critères comme décrit pour les véhicules 100% électriques à batterie n’a pas été trouvée. Certaines études menées prédisent néanmoins l’évolution du TCO des véhicules électriques à pile à combustible. En effet, un rapport publié par *Deloitte-Ballard, Fueling the Future of Mobility* et une étude menée par *McKinsey* prédisent qu’utiliser un véhicule électrique à pile à combustible coûtera moins cher que d’utiliser un véhicule électrique à batterie ou

un véhicule à moteur thermique au cours des 10 prochaines années [15].

Une autre étude menée par des chercheurs de l'Université de Carnegie Mellon estime que les véhicules électriques à pile à combustible pourraient concurrencer les véhicules électriques et les véhicules à moteur thermique au niveau du TCO d'ici 2035, à condition que la durée de vie des véhicules électriques à pile à combustible soit au minimum de 11 ans. Ceci peut être observé dans la FIGURE 2.5.

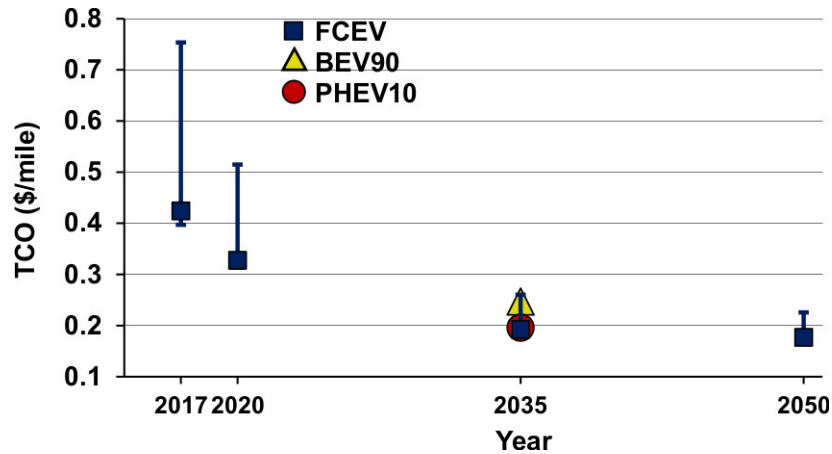


FIGURE 2.5 – Évolution du TCO en [\$/mile] des 3 types de véhicules au cours des prochaines années [33]

Il est intéressant de procéder à une analyse plus précise du TCO en fonction de critères dominants. Étant donné que la différence principale entre les véhicules électriques à pile à combustible et à batterie sont la source de génération de courant électrique, il est supposé que les critères principaux du TCO des véhicules électriques à hydrogène sont les mêmes que ceux des véhicules électriques à batterie ou des véhicules à moteur thermique. Pour rappel, ces critères sont :

- La dépréciation du véhicule
- La source d'énergie
- L'assurance
- L'entretien du véhicule

La dépréciation des véhicules dépend de la durée de vie de ceux-ci. Étant donné que les véhicules électriques à pile à combustible utilisent des moteurs électriques tout comme les véhicules électriques à batterie, la durée de vie du moteur des ces deux types de véhicules est identique, soit entre 15 et 20 ans.

Ce qui diffère réside principalement dans la source de production de courant électrique. Les piles à combustible en circulation dans le parc automobile ont une durée de vie d'environ 5000 heures, ce qui équivaut environ à 160 000 km [34]. Cette durée de vie pourrait être améliorée d'environ 50 % au cours des cinq prochaines années selon les estimations de certains constructeurs automobiles [34]. Ceci est nettement inférieur à la durée de vie des

véhicules électriques à batterie et se compare plutôt aux véhicules à moteur à combustion. De plus, le coût d'acquisition moyen des véhicules électriques à pile à combustible est largement supérieur à celui des autres types de véhicules. La dépréciation mensuelle des véhicules électriques à pile à combustible est donc supérieure aux véhicules électriques à batterie.

Ensuite, le prix de l'hydrogène pour les véhicules est de 9,9 €/Kg [35, 23/07/2022]. La Hyundai NEXO a une consommation moyenne combinée de 0,95 Kg/100 Km, ce qui correspond à $0,95 \cdot 9,9 = 9,405$ €/100 Km [36]. La Toyota Mirai consomme quant à elle 0,79 Kg/100 km [37], soit $0,79 \cdot 9,9 = 7,821$ €/100 Km. Les prix de la source d'énergie des véhicules électriques à pile à combustible se rapprochent donc de ceux du carburant des véhicules à moteur thermique qui, comme il a été expliqué plus haut, représentent environ le double du prix de l'énergie des véhicules électriques à batterie. Le prix de la source d'énergie des véhicules électriques à pile à combustible représente donc un désavantage par rapport aux véhicules électriques à batterie au niveau du coût total sur la durée de vie.

Le prix de l'assurance d'un véhicule électrique à pile à combustible est moins disponible de manière standard. Ethias ne propose pas de prix pour la Hyundai NEXO ou la Toyota Mirai.

En reprenant plus ou moins les mêmes paramètres que pour les véhicules électriques à batterie, Axa propose un prix de 329,10 € par an pour une formule RC avec comme paramètres un conducteur de 35 ans roulant maximum de 15 000 km par an et n'ayant pas fait d'accident ou d'infraction au cours des 5 dernières années [38]. Les mêmes paramètres conduisent à un prix de 287,14 € par an pour la Hyundai NEXO [39].

Afin de pouvoir comparer ces prix avec ceux des véhicules électriques à batterie, le prix de l'assurance pour des modèles similaires électriques à batterie est calculé. En comparaison avec la Hyundai NEXO, l'assurance RC de la Hyundai IONIQ 5 est de 386,50 € par an pour les mêmes paramètres généraux. Ceci représente donc une différence d'environ 100 € par an, avantageant les véhicules électriques à batterie du point de vue économique.

Enfin, tout comme l'entretien d'un véhicule électrique à batterie diffère fortement de l'entretien d'un véhicule à moteur thermique, l'entretien d'un véhicule électrique à pile à combustible est assez différent des autres types de véhicules. Les véhicules électriques à pile à combustible contiennent moins de parties mobiles que les véhicules à moteur thermique, mais plus que les véhicules électriques à batterie [28]. L'entretien de ces parties mobiles coûterait donc plus cher pour un véhicules électrique à pile à combustible que pour un véhicule électrique à batterie. Néanmoins, tout comme pour le véhicules électriques à batterie, il faut prendre en compte l'entretien ainsi que la durée de fonctionnement des piles à combustible [28]. En effet, l'entretien de la dernière génération de piles à combustible

avait un coût supérieur à l'entretien des moteurs thermiques [28]. Ceci est dû au coût élevé des compresseurs d'air et des filtres chimiques étant donné le faible taux de production de ceux-ci [28]. Ces coûts devraient néanmoins diminuer avec l'augmentation de la production.

Le coût total sur la durée de vie des véhicules électriques à pile à combustible est donc actuellement globalement plus élevé que celui des véhicules électriques à batterie, la seule composante la plus avantageuse pour les véhicules électriques à pile à combustible étant l'assurance.

Néanmoins, comme observé dans la FIGURE 2.5, le TCO des véhicules électriques à pile à combustible devrait diminuer afin d'arriver à la parité avec les véhicules électriques à batterie au cours des années à venir, en supposant que la production des véhicules électriques à pile à combustible augmente considérablement.

2.5 Conclusion

Actuellement, le coût d'achat des véhicules électriques est plus élevé en moyenne que le coût d'achat des véhicules à moteur thermique, celui des véhicules électriques à pile à combustion étant plus élevé que celui des véhicules électriques à batterie. Ce coût d'acquisition des véhicules électriques va néanmoins diminuer au cours des prochaines années grâce à l'augmentation de la production, se rapprochant ainsi du prix moyen d'acquisition d'un véhicule à moteur thermique et donc du prix moyen qu'un citoyen européen dépense dans l'achat d'un véhicule.

Le coût total sur la durée de vie des véhicules est rarement considéré par les citoyens recherchant un véhicule. Le coût total sur la durée de vie des véhicules électriques à batterie est actuellement proche de celui des véhicules à moteur thermique. Le TCO des véhicules électriques à batterie va continuer à diminuer par rapport à celui des véhicules à moteurs thermique au cours des années à venir.

Le coût total sur la durée de vie des véhicules électriques à pile à combustible est quant à lui actuellement plus élevé que celui des véhicules électriques à batterie. Ceci peut être expliqué par la différence de volume de production entre ces deux types de véhicules 100 % électriques. Le TCO devrait néanmoins rejoindre celui des autres véhicules au cours des 10 prochaines années en supposant que la production de ces véhicules augmentera.

Chapitre 3

Autonomie

En plus du coût d'achat et du coût total sur la durée de vie, l'autonomie des véhicules électriques joue un rôle important dans la décision des potentiels utilisateurs et donc dans la transition vers le transport électrique.

3.1 Autonomie et types d'utilisateurs

L'autonomie moyenne des véhicules électriques à batterie et à pile à combustible a été calculée dans le CHAPITRE 1 et les données sont reprises dans le TABLEAU 1.1.

En 2019, la distance annuelle moyenne parcourue par un européen est d'environ 11 690 km [40]. Ceci correspond à une moyenne de 32 km par jours. L'autonomie des véhicules 100 % électriques est donc tout à fait suffisante pour satisfaire cet usage moyen quotidien. De plus, l'ensemble des véhicules 100 % électriques à batterie a un écart type de relativement élevé au niveau de l'autonomie du véhicule, offrant ainsi une certaine flexibilité aux acheteurs en fonction de leur utilisation. Étant donné le nombre de modèles de véhicules électriques à pile à combustible réduit, l'autonomie de ces véhicules est très peu flexible, empêchant ainsi le consommateur d'opter pour un modèle offrant une autonomie plus faible au bénéfice d'un coût réduit.

Une étude menée par *GreenCar*, démontre que l'autonomie moyenne actuelle des véhicules électriques à batterie est acceptable pour la majorité des consommateurs et que de nombreux consommateurs sont prêts à acheter un véhicule électrique à batterie possédant une autonomie inférieure à la moyenne (479 km selon *Element Energy*) [17, p. 29].

Le critère le plus important pour les consommateurs est néanmoins le nombre de jours par an que l'utilisateur dépassera l'autonomie maximale et devra recharger le véhicule en cours de trajet. *Element Energy* a prédit le nombre de jours qu'un conducteur de véhicule électrique à batterie dépassera, en moyenne, l'autonomie maximale de son véhicule chaque année pour différentes tailles de batterie [17, p. 30]. Pour le scénario des batteries ayant une autonomie de 200 km, 22 % des conducteurs auront besoin en moyenne de

recharger leur véhicule pendant un trajet un jour par an au plus, et 49 % dépasseront leur autonomie maximale moins de cinq fois par an, ce qui montre que les batteries à plus faible autonomie conviennent à de nombreux consommateurs [17, p. 30]. Seulement 2 % des conducteurs sont susceptibles de devoir recharger leur véhicule plus de 10 fois par an parce que l'autonomie ne suffit pas au trajet parcouru [17, p. 30]. Il n'y a donc qu'une faible partie de la population qui aurait besoin d'une autonomie supérieure à l'autonomie moyenne disponible sur le marché. De plus, ces utilisateurs peuvent opter pour un modèle offrant une autonomie plus élevée que la moyenne tel que la Mercedes EQS Berline. L'augmentation d'autonomie s'accompagne néanmoins d'une augmentation de prix d'achat. Une distribution reprenant le nombre moyen de jours qu'un conducteur doit recharger son véhicule électrique à batterie au cours d'un trajet pour chaque scénario d'autonomie de batterie peut être observée dans la FIGURE 3.1.

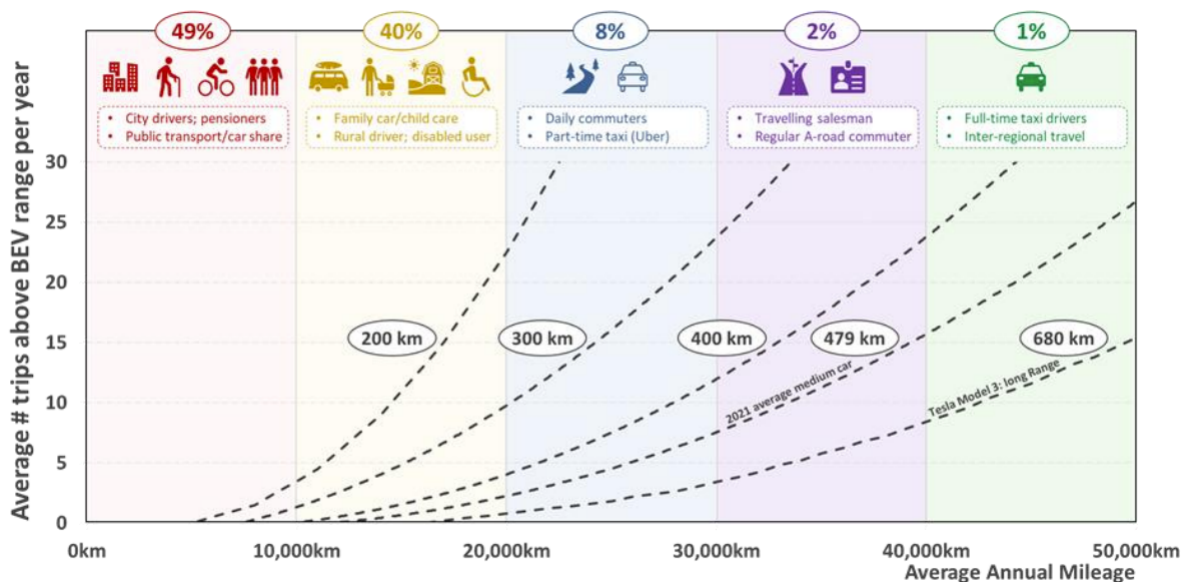


FIGURE 3.1 – Distribution du nombre moyen de jours qu'un utilisateur doit recharger son véhicule électrique à batterie au cours d'un trajet pour chaque scénario d'autonomie de batterie [17, p. 31]

Les recharges en cours de trajet ne posent néanmoins pas de problème. En effet, lors d'un trajet long, il est recommandé de faire une pause d'environ 20 minutes toutes les 2 heures [41, 42]. Cette durée peut être utilisée afin de recharger le véhicule, pour autant qu'une station de recharge rapide soit à disposition. En effet, la norme de recharge rapide en Europe est la recharge CSS (Combined Charging System) [43]. Cette recharge rapide permet par exemple de recharger la Volkswagen ID.4, dont l'autonomie est de 514 km, à 80 % en 30 minutes, avec une puissance de recharge de 100 à 125 kW [43]. Tesla propose également des *Superchargeurs* permettant de recharger la model 3 de 275 km en 15 minutes [44].

Afin de recharger son véhicule rapidement, il faut néanmoins faire une pause à un endroit

possédant ce genre de stations de recharge rapide impliquant une planification préalable de ses pauses. Ceci sera analysé dans la prochaine section.

Les véhicules électriques à pile à combustible ont quant à eux un temps de recharge comparable aux véhicules à moteur thermique. Le problème du temps de recharge ne se pose donc pas pour ces véhicules. Il faut néanmoins disposer d'un point de recharge d'hydrogène, qui sont relativement rares actuellement. Le nombre de points de recharge et leur localisation sera étudiée dans la section 3.2.

3.2 Stations de recharge en Europe

3.2.1 Stations de recharge pour véhicules électriques à batterie

Concernant les véhicules électriques à batterie, il existe plusieurs catégories de stations de recharge. La première catégorie de station de recharge est la recharge à domicile. Afin d'installer le système de recharge à domicile, il faut disposer d'une maison 3 ou 4 façade, ou bien avoir accès à un garage personnel. Ceci n'est malheureusement pas toujours le cas. La deuxième catégorie de station de recharge est la recharge sur le lieu de travail. Si le lieu de travail dispose d'un parking, il est possible d'installer des stations de recharge pour véhicules électriques à batterie. Cette décision revient néanmoins à la direction et peut être influencée par les employés et les politiques régionales ou nationales. Finalement, les stations de recharge publiques sont la dernière catégorie de station de recharge. Ces stations publiques sont nécessaires pour les utilisateurs ne disposant pas des deux autres catégories de stations. Le nombre et la localisation de ces stations de recharge publiques sont donc importants non seulement pour les utilisateurs ne disposant pas des deux premières catégories mais également pour les conducteurs parcourant des distances supérieures à l'autonomie de leur batterie.

Au cours des dernières années, le nombre de stations de recharge publiques lentes au rapides en Europe a fortement augmenté, comme il peut être observé dans les FIGURES 3.2 et 3.3. Ce nombre approche donc actuellement près de 250 000 stations de recharge en Europe.

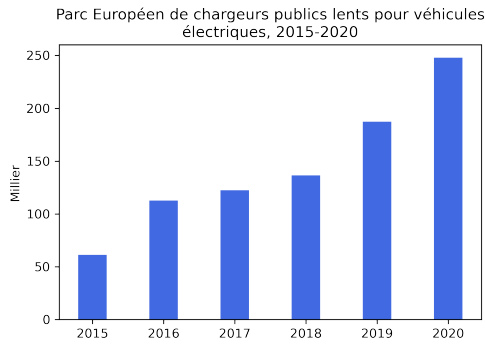


FIGURE 3.2 – Parc Européen de chargeurs lents pour véhicule électrique à batterie, 2015-2020 [6, p. 38]

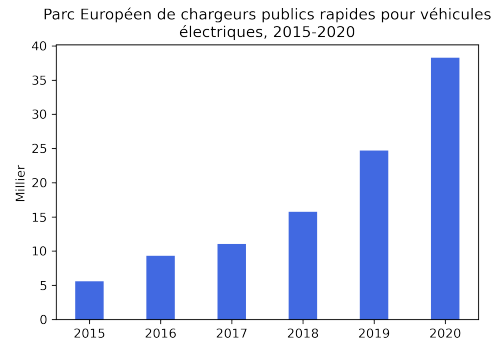


FIGURE 3.3 – Parc Européen de chargeurs rapides pour véhicule électrique à batterie, 2015-2020 [6, p. 38]

Il est prévu que le nombre de stations de recharge publiques augmente fortement d'ici 2025 et 2030. Selon le scénario *Road2Zero*¹, 1.3 millions de stations de recharge publiques supplémentaires sont prévues d'ici 2025 et près de 3 millions d'ici 2030 [45, 46]. Cet ajout de stations de recharge nécessiterait un investissement de 1.8 millions d'euros en 2025, ce qui représente uniquement 3 % de l'investissement annuel de l'Europe dans l'infrastructure de transport routier [46, p. 3].

Il est ensuite intéressant de déterminer le nombre de véhicules électriques à batterie par station de recharge publique. En 2014, une commission nommée par l'Union Européenne a dicté que l'objectif est d'avoir un maximum de 10 véhicules électriques par point de recharge public (PCP) en Europe, afin de garantir suffisamment de stations de recharge pour que chaque utilisateur puisse recharger son véhicule en cas de besoin [47]. En 2021, le ratio est d'environ 7,5 véhicules électriques à batterie par point de recharge public, suivant ainsi les recommandations établies par l'Union Européenne [47].

En plus du nombre suffisant de stations de recharge publiques par rapport au nombre de véhicules électriques à batterie en Europe, il faut s'assurer de la localisation de ces points de recharge publics afin d'assurer les longs trajets. La répartition des stations de recharge rapides publiques en 2020 est reprise dans la FIGURE 3.4.

1. partenariat coprogrammé financé dans le cadre du programme Horizon Europe et visant à accélérer la transition vers une mobilité routière à zéro émission d'échappement à travers l'Europe

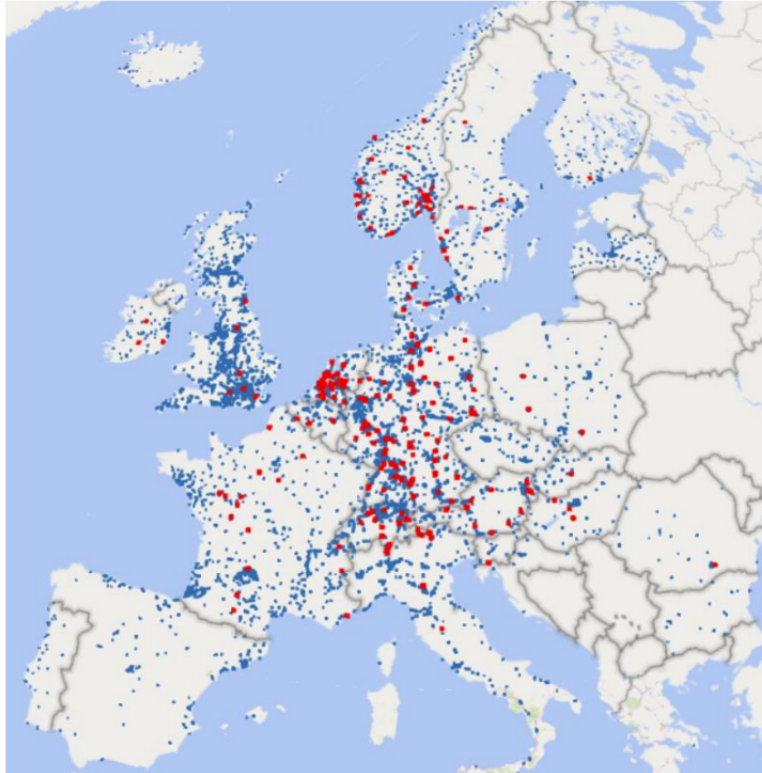


FIGURE 3.4 – Répartition des stations de recharge publiques CSS rapide (bleu) et CSS ultra-rapide (rouge) en Europe en 2020 [46, p. 17]

Il peut être observé que certains pays présentent une part importante des stations de recharge rapide publiques européennes. En effet, les Pays-Bas, l'Allemagne, les Royaumes-Unis, la Suisse et la Norvège possèdent une densité de stations de recharge rapide publiques nettement supérieure à la plupart des autres pays de l'Union Européenne, en particulier les pays du Sud et de l'Est de l'Europe. Ceci peut être expliqué par le fait que les pays dans lesquels la densité de stations de recharge rapide publiques ont un produit intérieur brut par habitant plus élevé que les pays dont la densité de stations de recharge est inférieure. En effet, selon l'ACEA, la mise en place d'infrastructure pour les véhicules 100 % électriques est fortement corrélée à la part de marché des véhicules 100 % électriques et au produit intérieur brut par habitant d'un pays [48].

Malgré une plus faible densité de stations de recharge rapide publiques dans certains pays, l'Union Européenne offre en moyenne 5 stations de recharge rapide publiques tous les 100 km en 2020, ce qui permet de recharger son véhicule électrique à batterie lors de longs trajets, sachant que l'autonomie moyenne de ces véhicules est de 408 km [46, p. 18]. De plus, cette moyenne va augmenter étant donné les prévisions d'infrastructure de stations de recharge publiques pour 2025 et 2030. Ce raisonnement est basé sur l'hypothèse que les stations de recharge sont libres lorsque le conducteur en a besoin.

3.2.2 Stations de recharge pour véhicules électriques à pile à combustible

Malgré l'autonomie moyenne plus élevée des véhicules électriques à pile à combustible, les bornes de recharge d'hydrogène sont également nécessaires, non seulement pour les longs trajets, mais également pour l'usage quotidien étant donné qu'il n'y a pas encore de stations de recharge à domicile. Certains projets de stations de recharge à domicile ont émergés afin de permettre de recharger son véhicule électrique à pile à combustible sans devoir chercher une station de recharge publique, mais aucun ne semble avoir réellement abouti, d'où la nécessité d'un nombre suffisant de stations de recharge publiques.

L'Union Européenne compte actuellement 161 stations de recharge d'hydrogène, dont 96 se situent en Allemagne, le reste étant réparti dans 12 autres pays de l'Union Européenne [49]. Le nombre de stations de recharge d'hydrogène par pays peut être observé dans le TABLEAU 3.1.

<i>Pays</i>	Allemagne	Suisse	Pays-Bas	Royaume-Uni	Autriche	Danemark	
<i># stations de recharge</i>	96	11	10	10	6	6	
<i>Pays</i>	Belgique	France	Suède	Norvège	Islande	Italie	Lettonie
<i># stations de recharge</i>	5	4	4	4	2	2	1

TABLE 3.1 – Nombre de stations de recharge d'hydrogène par pays de l'Union Européenne [49]

Il y a donc un net manque de stations de recharge à hydrogène au sein des pays de l'Union Européenne, ce qui constitue un frein au passage aux véhicules à pile à combustible. L'Union Européenne prévoit néanmoins environ 300 stations de recharge d'hydrogène d'ici 2025 et au moins 1000 stations de recharge d'ici 2030 [50]. Ce nombre prévu reste tout de même faible comparé au nombre de stations de recharge électrique pour véhicules électriques à batterie.

3.3 Types d'usage

Les véhicules personnels électriques à batterie sont actuellement plus attrayants que les véhicules électriques à pile à combustible étant donné leur coût inférieur et l'infrastructure mise en place.

Le mode de fonctionnement électrique à pile à combustible pourrait néanmoins être intéressant pour le transport routier par poids lourds. Les camions doivent effectivement parcourir de longues distances en perdant le moins de temps possible. L'autonomie et le temps de recharge sont donc des éléments cruciaux pour ce type d'usage. Les camions

électriques à pile à combustible ont une autonomie supérieure aux camions électriques à batterie, ainsi qu'un temps de recharge inférieur. Les législations européennes peuvent néanmoins résoudre les problèmes d'autonomie réduite et de temps de recharge importants des camions électriques à batterie. En effet, un conducteur de poids lourd ne peut rouler que 9 heures par jour, voire 10 heures dans les cas exceptionnels [51, p. 11]. Ceci correspond à une distance maximale de 800 km pour une vitesse moyenne de 80 km/h. Néanmoins, l'autonomie maximale d'un camion électrique à batterie est de 800 km [51, p. 2]. De plus, les conducteurs de poids lourds sont tenus de faire une pause d'un minimum de 30 minutes toutes 4 heures et demi [51, p. 11]. Un conducteur de camion ne peut donc pas parcourir plus de 360 km sans prendre de pause. De plus, une station de recharge ultra-rapide permet de recharger un camion électrique à batterie de 400 km en 30 minutes, soit deux fois plus de kilomètres que les stations de recharge rapide [51, p. 11]. Compte tenu de ces informations, l'autonomie ainsi que la période de recharge des camions électriques à batterie ne posent plus de problème, en admettant que les stations de recharge nécessaires soient à disposition des conducteurs lorsqu'ils en ont besoin.

Chapitre 4

Analyse environnementale

Malgré les émissions de CO₂ nulles lors de l'utilisation des véhicules 100 % électriques, il est intéressant d'analyser les émissions de CO₂ sur la durée de vie totale des véhicules. Cette analyse comprend les calculs des émissions de CO₂ lors de la production du véhicule, son utilisation et son recyclage.

4.1 Méthodologie

Le calcul peut être décomposé en 3 parties. D'une part, le calcul des émissions de CO₂ liées à la production des véhicules; d'autre part, le calcul des émissions de CO₂ liées à l'utilisation des véhicules, et dernièrement l'économie d'émission de CO₂ réalisée grâce au recyclage du véhicule [52, p. 3]. L'émission totale de CO₂ en kilogrammes est la somme des trois termes :

$$E_{vie,tot} = E_{prod,tot} + E_{util,tot} + E_{recyc,tot} \quad (4.1)$$

avec $E_{vie,tot}$ les émissions totales de CO₂ sur la durée de vie du véhicule, $E_{prod,tot}$ les émissions totales de CO₂ lors de la production du véhicule, $E_{util,tot}$ les émissions totales de CO₂ lors de l'utilisation du véhicule, et $E_{recyc,tot}$ les émissions totales de CO₂ lors du recyclage du véhicule.

Les émissions de CO₂ totales lors de la production du véhicule peuvent être calculées de la manière suivante [52, p. 3] :

$$E_{prod,tot} = m_{veh,chas} \cdot e_{prod,chas} + C_{bat} \cdot e_{prod,bat} \quad (4.2)$$

avec $m_{veh,chas}$ la masse du châssis du véhicule en kg (sans la masse de la batterie s'il s'agit

d'un véhicule électrique), $e_{prod,chas}$ les émissions de CO₂ pour la construction du châssis en kg CO₂-eq/kg, C_{bat} la capacité de la batterie en kWh (ce terme est nul s'il ne s'agit pas d'un véhicule électrique), et $e_{prod,bat}$ les émissions de CO₂ pour la fabrication de la batterie en kg CO₂-eq/kWh.

La masse des véhicules 100 % électriques peut se décomposer en la masse du châssis et la masse de la batterie [52, p. 3]. Ceci permet de trouver la valeur de la masse du châssis des véhicules 100 % électriques.

$$m_{veh} = m_{veh,chas} + m_{veh,bat} = m_{veh,chas} + \frac{C_{bat}}{\xi_{bat}} \quad (4.3)$$

avec m_{veh} la masse totale du véhicule, $m_{veh,bat}$ la masse de la batterie, C_{bat} la capacité de la batterie du véhicule électrique en kWh, et ξ_{bat} la densité d'énergie de la batterie en kWh/kg.

Les émissions totales de CO₂ lors de l'utilisation des véhicules sont calculées de la façon suivante [52, p. 3] :

$$E_{util,tot} = c_{WLTP} \cdot e_{WTW} \cdot S_{dur} \quad (4.4)$$

avec c_{WLTP} la consommation d'énergie ou de fuel selon la procédure d'essai mondiale harmonisée pour les véhicules légers ou Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP)¹, e_{WTW} les émissions de CO₂ produites lors de la production, de la distribution et de l'utilisation d'un carburant ou d'énergie en kg CO₂-eq/unité de fuel ou énergie, et S_{dur} la durée de vie du véhicule en km.

Finalement, les émissions totales de CO₂ lors du recyclage du véhicule sont calculées comme suit [52, p. 4] :

$$E_{recyc,tot} = m_{veh,chas} \cdot e_{recyc,chas} + C_{bat} \cdot e_{recyc,bat} \quad (4.5)$$

avec $e_{recyc,chas}$ le coefficient de recyclage du châssis en kg CO₂-eq/kg et $e_{recyc,bat}$ le coefficient de recyclage de la batterie en kg CO₂-eq/kWh.

Sur base de ces équations, les trois types de véhicules sont comparés en termes d'émissions de CO₂ sur la durée de vie du véhicule. Les modèles utilisés pour la comparaison sont la Volkswagen Golf, la Volkswagen ID.3 ainsi que la Toyota Mirai afin de comparer des

1. norme d'essais d'homologation des véhicules qui permet de mesurer la consommation de carburant, l'autonomie électrique et les rejets de CO₂ et de polluants [53]

modèles équivalents avec des modes de fonctionnement différents. Pour les véhicules électriques à batterie, les émissions de CO₂ sont calculées pour l'électricité venant du réseau, ainsi que de deux sources d'énergie renouvelable : le photovoltaïque et l'éolien. Concernant les véhicules électriques à pile à combustible, deux sources d'hydrogène sont considérées : l'hydrogène provenant du reformage de gaz naturel ainsi que l'hydrogène provenant de l'électrolyse. De plus, l'analyse est faite pour 2020 et 2030 afin d'évaluer l'évolution des émissions de CO₂. L'évolution des coefficients e_{WtW} n'a néanmoins pas été trouvée pour le photovoltaïque, l'éolien et le reformage de gaz naturel. Les mêmes coefficients seront donc utilisés pour 2020 et 2030.

Les paramètres utilisés pour les calculs sont repris dans le TABLEAU 4.1 et le TABLEAU 4.2.

<i>Source d'émission</i>	<i>Coefficient</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unités</i>	<i>Année</i>	<i>Référence</i>
Émissions de production châssis	$e_{prod,chas}$	4.56	kg CO ₂ -eq./kg	/	[52, p. 6]
Émissions de production batterie	$e_{prod,bat}$	83.50	kg CO ₂ -eq./kWh	/	[52, p. 6]
Essence - WtW	e_{WtW}	2.83	kg CO ₂ -eq./L	2020 - 2030	[52, p. 6]
Diesel - WtW	e_{WtW}	3.18	kg CO ₂ -eq./L	2020 - 2030	[52, p. 6]
Électricité du réseau - WtW	e_{WtW}	0.421	kg CO ₂ -eq./kWh	2020	[54]
Électricité du réseau - WtW	e_{WtW}	0.296	kg CO ₂ -eq./kWh	2030	[54]
Électricité du photovoltaïque - WtW	e_{WtW}	0.048	kg CO ₂ -eq./kWh	2020 - 2030	[55]
Électricité de l'éolien - WtW	e_{WtW}	0.0115	kg CO ₂ -eq./kWh	2020 - 2030	[55]
H2 reformage gaz naturel - WtW	e_{WtW}	10.6	kg CO ₂ -eq./kg	2020 - 2030	[54]
H2 électrolyse - WtW	e_{WtW}	0.18	kg CO ₂ -eq./kg	2020	[54]
H2 électrolyse - WtW	e_{WtW}	0.08	kg CO ₂ -eq./kg	2030	[54]
Émissions de recyclage châssis	$e_{recyc,chas}$	-2.93	kg CO ₂ -eq./kg	/	[52, p. 6]
Émissions de recyclage batterie	$e_{recyc,bat}$	-48.4	kg CO ₂ -eq./kWh	/	[52, p. 6]
Distance moyenne de durée de vie	S_{dur}	230 000	km	/	[52, p. 6]
Densité d'énergie	$x_{i,bat}$	0.200	kWh/kg	/	[52, p. 6]

TABLE 4.1 – Tableau des paramètres de calcul des émissions totales de CO₂ sur la durée de vie des véhicules

<i>Source d'énergie</i>	<i>Modèle</i>	m_{veh}	c_{WLTP}	C_{bat}
Essence	Volkswagen Golf 8 1.0 TSI	1157 kg	4.6 L/100 km	0 kWh
Diesel	Volkswagen Golf 8 2.0 TDI	1280 kg	3.5 L/100 km	0 kWh
Electricité	Volkswagen ID.3	1705 kg	15.5 kWh/100 km	58 kWh
Hydrogène	Toyota Mirai	1900 kg	0.79 kg/100 km	2 kWh

TABLE 4.2 – Spécifications des modèles choisis pour la comparaison

4.2 Résultats

Les émissions totales de CO₂ pour chaque véhicule et type de production d'énergie utilisée par les véhicules sont reprises dans le TABLEAU 4.3.

<i>Modèle</i>	<i>Énergie et origine de production</i>	<i>Émissions totales</i>
Volkswagen Golf 8 1.0 TSI	Essence	31827 kg CO ₂ -eq.
Volkswagen Golf 8 2.0 TDI	Diesel	27685 kg CO ₂ -eq.
Volkswagen ID.3	Électricité du réseau 2020	19351 kg CO ₂ -eq.
	Électricité du réseau 2030	14895 kg CO ₂ -eq.
	Électricité d'origine photovoltaïque	6053 kg CO ₂ -eq.
	Électricité d'origine éolienne	4752 kg CO ₂ -eq.
Toyota Mirai	Hydrogène du reformage de gaz naturel	22411 kg CO ₂ -eq.
	Hydrogène provenant de l'électrolyse 2020	3477 kg CO ₂ -eq.
	Hydrogène provenant de l'électrolyse 2030	3296 kg CO ₂ -eq.

TABLE 4.3 – Émissions totales des 3 véhicules pour différentes origines de source d'énergie

Les véhicules à moteur thermique sont ceux qui ont un taux d'émissions totales de CO₂ le plus important. Les véhicules électriques à batterie ont ensuite un meilleur taux d'émissions de CO₂ que les véhicules électriques à pile à combustible si l'hydrogène utilisé provient du reformage de gaz naturel. Les sources d'énergie renouvelable permettent quant à elles d'améliorer fortement le le taux d'émissions totales de CO₂. En effet, les véhicules électriques à batterie utilisant de l'électricité produite par le photovoltaïque ou l'éolien permettent de diminuer les émissions de CO₂ de plus de la moitié par rapport à l'utilisation d'électricité provenant du réseau. Si l'hydrogène utilisé par les véhicules électriques à pile à combustible est issu de l'électrolyse, ces véhicules ont le taux d'émissions de CO₂ le plus faible, près de 10 fois moins élevé que les véhicules à essence (en comparant la Toyota Mirai et la volkswagen Golf 8 1.0 TSI).

La décomposition des émissions de CO₂ pour chaque véhicule peut être observée dans laFIGURE 4.1. Le graphique reprend les émission de production, d'utilisation et de recyclage sur une même barre, et les émissions totales de CO₂ sur la barre rouge respective.

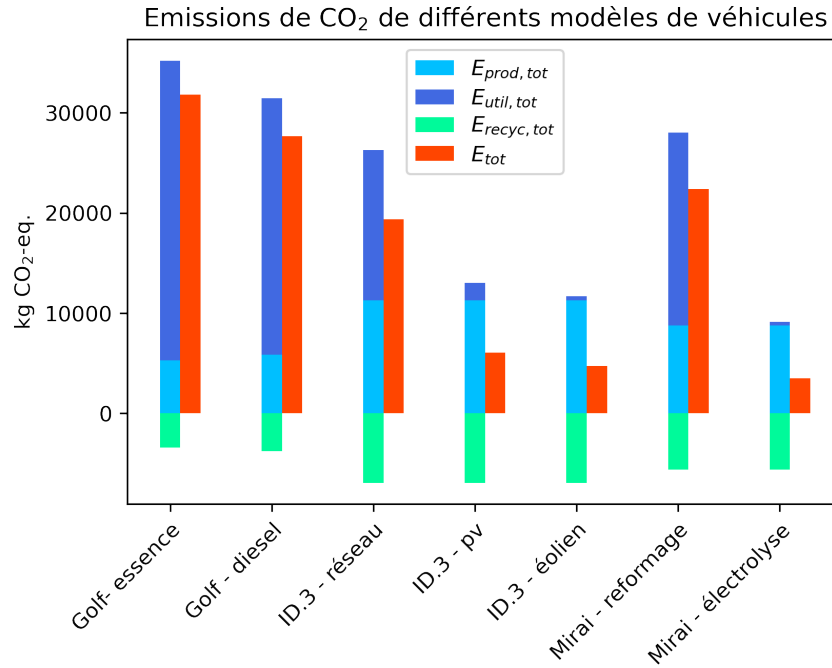


FIGURE 4.1 – Emissions de CO₂ de différents modèles de véhicules avec différents types de moteur

Pour les véhicules à moteur thermique, il peut être observé que la majorité des émissions de CO₂ proviennent de l'utilisation. De plus, ces véhicules sont moins bien recyclés que les véhicules 100 % électriques. Les émissions de CO₂ lors de la production des véhicules 100 % électriques sont néanmoins plus élevées que pour la production de véhicules à moteur thermique. Ceci provient du coût en CO₂ élevé pour la production de batteries lithium-ion. De plus, les émissions de CO₂ lors de l'utilisation des véhicules est minimale pour l'électricité provenant d'une source photovoltaïque ou éolienne et pour l'hydrogène issu de l'électrolyse.

Finalement, une comparaison entre les émissions de CO₂ produites en 2020 et 2030 a été établie. Cette comparaison reprend uniquement l'électricité provenant du réseau et l'hydrogène issu de l'électrolyse. Une diminution des émissions d'utilisation est observée pour les véhicules électriques à batterie alimentés par le réseau. La diminution d'émissions liées à l'utilisation est plus faible pour les véhicules électrique à pile à combustible utilisant de l'hydrogène provenant de l'électrolyse.

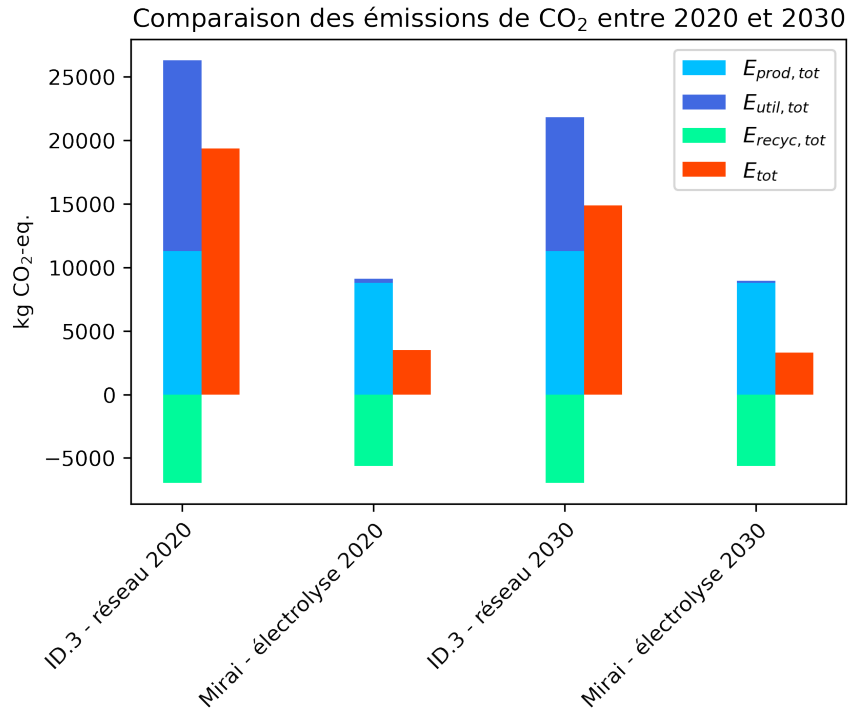


FIGURE 4.2 – Comparaison des émissions de CO₂ entre 2020 et 2030 pour l'électricité provenant du réseau et l'hydrogène issu de l'électrolyse

Le transport électrique permet donc la réduction de l'empreinte carbone au niveau du transport routier. La réduction des émissions de CO₂ lors de la production des véhicules électriques et l'utilisation d'énergie renouvelable ou provenant de l'électrolyse permettent de réduire fortement les émissions totales de CO₂ au niveau du transport routier. Les recherches au niveau des batteries jouent donc un rôle important au niveau de la réduction de l'empreinte carbone du transport électrique.

Chapitre 5

Conséquence sur les infrastructures de production et de transport

5.1 Réseau électrique belge et infrastructures de production d'électricité

Selon une étude de *BloombergNEF*, une augmentation de 500 millions de véhicules électriques à batterie supplémentaires n'augmenterait la consommation électrique mondiale que de 5 % [56]. En Belgique, un million de véhicules électriques en circulation ne représentaient que 4 % de la consommation totale d'électricité nationale [57]. La majorité de l'électricité nationale est consommée par l'industrie, le secteur des services, et le résidentiel [57]. De plus, une étude menée par la *CREG*¹ estime que la capacité actuelle de production d'électricité en Belgique permettrait de recharger 2 millions de véhicules électriques à batterie, en sachant que les prévisions estiment que le parc automobile belge atteindra 1,5 millions de véhicules à batterie en 2030 [57].

Il faut néanmoins s'assurer que l'ensemble des véhicules électriques à batterie ne chargent pas simultanément afin d'éviter des pics de consommation sur le réseau et de risquer une congestion du réseau. Cette congestion locale est évitée si les recharges sont réparties dans le temps et l'espace [58].

Selon le Professeur Damien Ernst, si l'ensemble du parc automobile belge passait entièrement à l'électrique, 20 TWh devraient être ajoutés à la production d'électricité annuelle belge [57]. Afin de répondre à l'augmentation de demande d'électricité pour la recharge de véhicules électriques à batterie, différentes techniques sont envisageables.

L'augmentation de production et d'utilisation d'énergie renouvelable joue un rôle majeur et est une des solutions principales. En 2019, la production d'électricité provenant de source d'énergie renouvelable était de 15 TWh, ce qui représenterait 18 % de la production

1. Commission de Régulation du Gaz et de l'Electricité

totale d'électricité en Belgique en 2019 [57]. Ces 18 % de la production globale d'électricité permettraient de recharger environ 4 millions de véhicules électriques à batterie [57].

Une autre solution est le smart charging. Le smart charging est un système de recharge où les véhicules électriques à batterie, les stations de recharge ainsi que les opérateurs de recharge partagent des connexions de données [59]. Ce système permet d'optimiser la recharge des véhicules électriques et d'éviter les pics de consommation. Le smart charging permet par exemple :

- de programmer la recharge du véhicule électrique à batterie de manière automatique lorsque l'installation photovoltaïque produit de l'électricité [57],
- de répartir de manière optimale la puissance de recharge disponible entre plusieurs véhicules branchés sur un même site [57].

Finalement, une dernière solution consisterait à utiliser un véhicule électrique à batterie ou à pile à combustible comme source d'énergie. Cette technologie s'appelle le Vehicle to Grid (VtoG) ou le Vehicle to Home (VtoH) permettant d'alimenter le réseau ou un domicile [57]. Le véhicule est alors utilisé comme alimentation résidentielle de secours ou pour augmenter la consommation personnelle d'énergie [60]. Un système de recharge bidirectionnel est néanmoins nécessaire pour que cette solution soit d'application [57]. Cette solution n'est actuellement pas encore disponible mais plusieurs constructeurs automobiles annoncent cette nouvelle fonctionnalité pour les modèles futurs. Kia annonce par exemple le Vehicle to Everything (VtoE) permettant de recharger n'importe quel appareil électronique via un câble relié au véhicule lorsqu'il est à l'arrêt [57].

De plus, selon Bart Massin, Managing Director de Strohmann², un black-out électrique n'est pas à craindre [57]. En effet, les échanges internationaux d'électricité sont plus libres et les plus grands consommateurs d'électricité ont davantage étalé leur consommation sur les périodes de la journée où la consommation générale est plus faible [57].

L'électrification massive du réseau belge lié à l'augmentation du parc automobile électrique à batterie ne devrait donc pas poser de problèmes. Il faut par contre gérer et optimiser l'utilisation du réseau belge afin d'éviter d'éventuels pics de consommation entraînant une congestion locale du réseau.

5.2 Réseau de transport et infrastructures de production d'hydrogène vert

En 2021, la Belgique et la Namibie ont signé un d'accord concernant la production d'hydrogène vert lors de la COP26 [61]. L'hydrogène vert est de l'hydrogène issu de l'électrolyse

2. société spécialisée dans le conseil et développement de solutions de recharge

de l'eau en utilisant de l'électricité issue de source d'énergie renouvelable. Cet hydrogène sera importé de Namibie en Belgique. La Belgique deviendra une plaque tournante de l'importation et du transit [62].

De plus, *Luminus* et *IDETA* se lancent également dans la production d'hydrogène vert [63]. Le but est de développer 4 stations d'hydrogène vert en Wallonie [63]. *IDETA* se concentre principalement sur la contribution à la production d'hydrogène vert destiné au transport lourd [63]. L'hydrogène serait produit sur base d'électricité provenant de parcs éoliens grâce à la collaboration avec *Luminus*.

La production d'hydrogène vert ne devrait donc pas être un problème face à l'augmentation du parc de véhicules électriques à pile à combustible. Le réseau de stations d'hydrogène mis en place doit néanmoins être amélioré comme expliqué dans le chapitre 3.

Concernant les parts de marché belges des deux types de véhicules, la part de marché des véhicules électriques à batterie en Belgique est de 21 % en 2021 [64]. La part de marché des véhicules électriques à pile à combustible en Belgique est quant à elle infime.

Conclusion

Avec les mesures récentes prises par l'Union Européenne concernant le transport routier, une transition vers le transport routier 100 % électrique s'impose. Cette transition entraîne une augmentation exponentielle du nombre de véhicules électriques sur les routes Européennes. C'est pourquoi il est nécessaire d'analyser ces véhicules électriques pour qu'ils conviennent aux citoyens et répondent aux normes écologiques. Les quatre points analysés au cours de cette étude sont :

1. le prix,
2. l'autonomie,
3. le taux d'émissions de CO₂,
4. et les conséquences sur l'infrastructure et le réseau belge.

En moyenne, le prix d'achat des véhicules électriques est plus élevé que celui des véhicules à moteur thermique. En moyenne, un citoyen européen est prêt à dépenser 27 000 € dans l'achat d'un véhicule neuf [9]. Le prix d'achat des véhicules électriques à batterie dépasse le prix moyen qu'un citoyen européen est prêt à dépenser d'environ 30 000 €. Le coût d'achat moyen d'un véhicule électrique à pile à combustible est quant à lui d'environ 69 234 €, ce qui est encore plus élevé que celui des véhicules électriques à batterie. Ces coûts sont néanmoins censés diminuer au cours des prochaines années grâce à l'augmentation de la production et la diminution de coût de certains composants tels que les batterie lithium-ion ou les réservoirs de stockage de l'hydrogène [12, 15].

Une caractéristique moins connue et que la plupart des acheteurs omettent est le coût total sur la durée de vie du véhicule. Ce coût est principalement composé de la dépréciation du véhicule, le coût du carburant ou de l'énergie, l'assurance et l'entretien du véhicule. Le TCO des véhicules électriques à batterie est compétitif par rapport aux véhicules à moteur à combustion dans de nombreux pays européens [32]. Une comparaison a été faite entre la Volkswagen Golf 8 1.5 TSI et la Volkswagen ID.3. Cette comparaison montre que le TCO de la Volkswagen ID.3 est inférieur à celui de la Volkswagen Golf à partir de 15 000 km par an. Les véhicules électriques à pile à combustible possèdent quant à eux un TCO supérieur à celui des véhicules électriques à batterie. Les TCO des deux types de véhicules électriques devraient néanmoins diminuer dans les années à suivre.

L'autonomie moyenne des véhicules électriques à batterie est de 408 km. Ceci convient parfaitement pour des distances courtes à moyennes mais n'est pas suffisant pour parcourir une longue distance sans recharge. Les véhicules électriques à batterie peuvent néanmoins être rechargés lors d'une des pauses de minimum 20 minutes recommandées toutes les 2 heures. La plupart des véhicules électriques à batterie disposent d'un système de recharge rapide permettant de recharger la majorité de la batterie en 30 minutes ou moins. Il suffit que l'utilisateur ait à disposition une station de recharge rapide. Le nombre de stations de recharge rapide a fortement augmenté au cours des dernières années et continuera à augmenter. Actuellement, 5 stations de recharge rapide publiques sont disponibles tous les 100 km en moyenne [46, p. 18]. Ceci permet de parcourir de longues distances sans problèmes, pour autant que les arrêts soient prévus à l'avance et que les stations de recharge rapide publiques soient disponibles.

Les véhicules électriques à pile à combustible disposent d'une autonomie moyenne de 658 km. De plus, le temps de recharge de ces véhicules est similaire au temps de recharge des véhicules à moteur thermique. La limitation de ces véhicules vient d'un manque de stations de recharge publiques d'hydrogène. En effet, seules 161 stations de recharge publiques d'hydrogène sont disponibles au sein de l'Union Européenne, dont 5 en Belgique [49]. Le nombre de stations de recharge publiques d'hydrogène devrait néanmoins augmenter à 300 stations de recharge d'ici 2025 et 1000 d'ici 2030 au sein de l'Union Européenne [50].

Les émissions de CO₂ des véhicules électriques sont inférieures à celles des véhicules à moteur thermique. L'utilisation d'énergie verte telle que le photovoltaïque, l'éolien ou l'électrolyse de l'eau permettent de réduire les taux d'émissions de CO₂ des véhicules électriques de manière drastique. En effet, une comparaison a été faite entre la Volkswagen Golf 8, la Volkswagen ID.3 et la Toyota Mirai. Cette comparaison montre que l'utilisation d'énergie verte permet d'émettre environ 5 fois moins de CO₂ qu'un véhicule à moteur thermique, pour les modèles considérés. La majeure partie des émissions de CO₂ pour les véhicules utilisant de l'énergie verte provient de la production du véhicule, en particulier des batteries lithium-ion. Une amélioration dans la production de ces batteries permettrait une réduction encore plus importante du taux d'émissions de CO₂ des véhicules électriques.

Enfin, le réseau belge est largement capable de supporter l'électrification des véhicules, pour autant que leurs recharges soient réparties dans le temps et l'espace. L'augmentation de production d'énergie verte et des techniques telles que le smart charging devraient permettre d'alimenter les véhicules électriques à batterie, et ce malgré l'augmentation importante du nombre de véhicules électriques sur les routes belges. Il en va de même pour la production d'hydrogène.

Appendices

Annexe A

Tableaux des données de véhicules électriques

<i>Marque</i>	<i>Modèle</i>	<i>Prix</i>	<i>Autonomie</i>
Tesla	Model 3	50 990 €	491 km
	Model 3 Grande Autonomie	57 990 €	602 km
	Model 3 performance	63 990 €	547 km
	Model Y Grande Autonomie	63 000 €	533 km
	Model Y Performance	70 000 €	514 km
	Model S	104 990 €	652 km
	Model S Plaid	129 990 €	637 km
	Model X	114 990€	560 km
	Model X Plaid	119 990 €	536km
Mercedes	EQS Berline	89 903 €	731 km
	EQA	54 329 €	424 - 430 km
	EQB	63 041 €	419 km
	EQC	76 230 €	370 - 413 km
	EQV	75 008 €	355 km
Ford	Mustang Mach-E RWD	49 300 €	440 km
	Mustang Mach-E AWD	56 250 €	400 km
	Mustang Mach-E GT	74 300 €	500 km

<i>Marque</i>	<i>Modèle</i>	<i>Prix</i>	<i>Autonomie</i>
BMW	i4 eDrive40	60 800 €	493 - 590 km
	i4 M50	75 900 €	416 - 520 km
	iX xDrive40	81 200 €	394 - 426 km
	iX xDrive50	102 850 €	590 - 630 km
	iX M60	132 400 €	503 - 564 km
	iX3	71 000 €	453 - 462 km
	i3 (120Ah) Advanced	43 600 €	285 - 308 km
	i3 (120Ah)	40 750 €	285 - 308 km
	i3s (120Ah) Advanced	47 250 €	279 - 284 km
	i3s (120Ah)	44 399,99 €	279 - 284 km
Audi	e-tron	71 570 €	437 km
	e-tron Sportback	73 580 €	449 km
	e-tron S	97 150 €	364 km
	e-tron S Sportback	99 160 €	370 km
	e-tron GT quattro	104 440 €	487 km
	RS e-tron GT	145 350 €	433 - 472 km
Volkswagen	ID.3 Pro	38 445 €	419 km
	ID.4 Pro	47 845 €	514 km
	ID.4 GTX	56 930 €	476 km
	ID.5	49 430 €	515 km
	ID.5 GTX	57 205 €	490 km
Renault	Megane E-Tech V40 electric	35 200 €	294 - 302 km
	Megane E-Tech V60 electric	40 200 €	427 - 454 km
	Zoe E-Tech electric	32 300 €	395 km
	Twingo E-Tech electric	20 300 €	270 km
Peugeot	e-208	32 700 €	362 km
	e-2008	37 100 €	345 km

<i>Marque</i>	<i>Modèle</i>	<i>Prix</i>	<i>Autonomie</i>
Citroën	Ë-C4	32 708 €	357 km
Toyota	bZ4X	49 650 €	450 km
	e-Soul	37 490 €	276 km
	e-Soul	40 590 €	452 km
KIA	e-Niro	39 040 €	289 km
	e-Niro	42 940 €	455 km
	EV6	43 990 €	394 km
	EV6	47 990 €	528 km
	KONA	35 299 €	305 km
Hyundai	IONIQ	35 200 €	311 km
	IONIQ 5	47 499 €	384 km
	IONIQ 5	50 999 €	481 km
Nissan	LEAF	32 940 €	270 km
	LEAF e+	41 490 €	385 km
Dacia	Spring	17 490 €	230 km
Fiat	500 Action	24 990 €	190 km
	500 "La Prima"	35 990 €	313 km
	Taycan	86 185,88 €	354 - 431 km
Porsche	Taycan 4 Cross Turismo	96 870,18 €	389 - 456 km
	Taycan Sport Turismo	89 796,62 €	358 - 433 km
	Taycan 4S	110 533,50 €	335 - 408 km
	Taycan 4S Cross Turismo	115 383,18 €	388 - 452 km
	ZS EV	32 985 €	320 km
MG	ZS EV long range	36 985 €	440 km
	MG5	33 985 €	320 km
	MG5 long range	36 985 €	400 km
	MARVEL R	46 985 €	402 km

<i>Marque</i>	<i>Modèle</i>	<i>Prix</i>	<i>Autonomie</i>
Volvo	XC40 Recharge	46 301 €	425 km
	C40 Recharge	47 800 €	433 km
Polestar	Polestar 2 Standard range	44 899 €	415 - 444 km
	Polestar 2 Long range	48 899 €	510 - 542 km
Jaguar	I-PACE EV400	82 075 €	464 km
Cupra	Born	43 646.85 €	421 km
Opel	Corsa-e	30 495 €	337 km
	Mokka-e	33 185 €	322 km
	Combo-e Life	31 765 €	280 km
Honda	Honda e	35 330 €	220 km
Mini	Electric	33 500 €	203 - 234 km
	ENYAQ iV 60	43 090 €	385 - 408 km
Skoda	ENYAQ iV Sportline 60	48 485 €	388 - 402 km
	ENYAQ iV 80	49 890 €	498 - 532 km
	ENYAQ iV Sportline 80	53 990 €	499 - 522 km
	ENYAQ iV 80 X	52 470 €	478 - 513 km
	ENYAQ iV Sportline 80 X	56 570 €	480 - 503 km
	Smart	EQ fortwo	24 684 €
	EQ fortwo cabrio	27 709 €	130 km
Mazda	MX-30	33 490 €	200 km
<i>Moyenne</i>		57 492 €	408 km
<i>Écart type</i>		27 963 €	112 km

TABLE A.1 – Tableau des voitures 100 % électriques à batterie de 2021-2022

<i>Marque</i>	<i>Modèle</i>	<i>Prix</i>	<i>Autonomie</i>
Hyundai	NEXO	73 999 €	666 km
Toyota	Mirai	64 470 €	650 km
BMW	iX5 hydrogène	(2022)	500 km
<i>Moyenne</i>		69 234 €	658 km
<i>Écart type</i>		4 764 €	8 km

TABLE A.2 – Tableau des voitures électriques à pile à combustible de 2021-2022

Annexe B

Analyse du rapport autonomie-prix

Le rapport autonomie-prix peut également être établi en fonction des données du TABLEAU A.1. Ce rapport est calculé en divisant l'autonomie par le prix. Il permet d'obtenir le véhicule présentant la meilleure autonomie par rapport au prix d'achat du véhicule. Le véhicule électrique offrant le meilleur rapport autonomie-prix est la Renault Twingo E-Tech electric avec un rapport de 13.3 ‰ pour une autonomie de 270 [km] pour un prix d'achat de 20 300 €. Ce véhicule peut être observé par le point vert dans la FIGURE B.1.

La voiture présentant la plus grande autonomie est la Mercedes EQS Berline vendue au prix d'entrée de 89 903 € avec une autonomie de 731 km. Afin d'analyser le rapport autonomie-prix de ce véhicule, la moyenne ainsi que l'écart type des rapports autonomie-prix de l'ensemble des véhicules sont calculés. La moyenne du rapport est d'environ 7.9 ‰ et son écart type est de 2.4 ‰. Le rapport autonomie-prix de la Mercedes EQS Berline est quant à lui de 8.1 ‰ ce qui est supérieur à la moyenne. De plus, la Mercedes EQS Berline est assez proche de la droite de régression linéaire établie pour les prix inférieurs à 62 000 €, comme observé dans la FIGURE B.1 avec le point rouge, suivant ainsi la tendance du rapport entre autonomie et prix.

L'ensemble de ces données est repris dans le TABLEAU B.1, comprenant également les modèles présentant le rapport autonomie-prix le plus faible, l'autonomie minimale et le prix minimal et maximal.

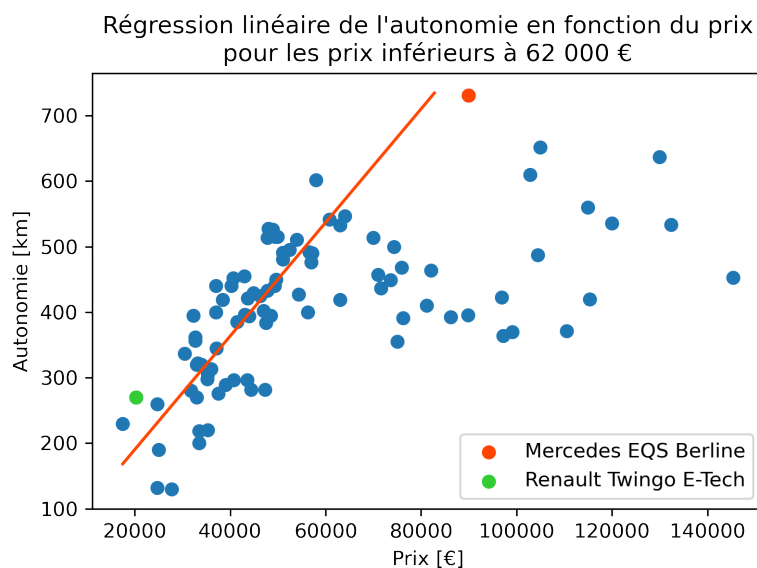


FIGURE B.1 – Régression linéaire pour les prix inférieurs à 62 000 € avec points importants

<i>Données</i>	<i>Marque</i>	<i>Modèle</i>	<i>Prix</i>	<i>Autonomie</i>	<i>Rapport $\frac{a}{p}$</i>
Meilleure rapport $\frac{a}{p}$	Renault	Twingo E-Tech electric	20 300 €	270 km	13.3
Plus faible rapport $\frac{a}{p}$	Audi	RS e-tron GT	145 350 €	433 - 472 km	3.11
Autonomie la plus élevée	Mercedes	EQS Berline	89 903 €	731 km	8.13
Autonomie la moins élevée	Smart	EQ fortwo cabrio	27 709 €	130 km	4.69
Prix le plus élevé	Audi	RS e-tron GT	145 350 €	433 - 472 km	3.11
Prix le moins élevé	Dacia	Spring	17 490 €	230 km	13.15

TABLE B.1 – Tableau des minima et maxima de certaines données des véhicules 100 % électriques à batterie 2021-2022

Annexe C

Coût total sur la durée de vie

C.1 Coût total sur la durée de vie de la Volkswagen Golf 8 1.5 TSI et de la Volkswagen ID.3

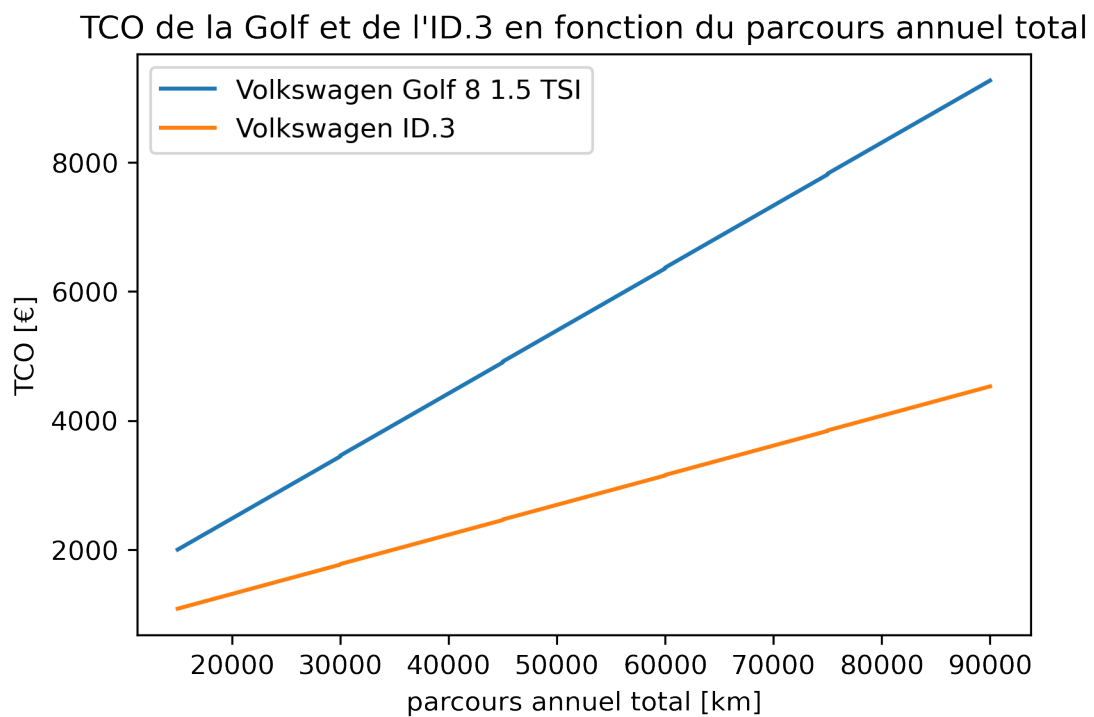


FIGURE C.1 – Évolution du TCO de la Volkswagen Golf 8 1.5 TSI et de la Volkswagen l'ID.3 en fonction du parcours annuel total

C.2 TCO de certains pays de l'Union Européenne pour plusieurs types de véhicules

<i>Pays</i>	<i>Dépréciation</i>	<i>Essence/Electricité</i>	<i>Electrique</i>
Grèce	824 €	772 €	746 €
Allemagne	878 €	960 €	760 €
Suède	987 €	929 €	769 €
Autriche	1156 €	1038€	832 €
Finlande	945 €	923 €	856 €
Danemark	984 €	939 €	857 €
Slovaquie	970 €	967 €	865 €
Portugal	1541 €	1445 €	891 €
France	1039 €	1027 €	899 €
Italie	1106 €	1032 €	899 €
Belgique	1014€	1039 €	905 €
Norvège	1168 €	1152 €	908 €
Espagne	1092 €	1063 €	936 €
Royaume-Uni	1087 €	1085 €	945 €
Pays-Bas	1172 €	1299 €	950 €
Irlande	1037 €	964 €	976 €
Luxembourg	928 €	916 €	1018 €
Hongrie	802 €	818 €	1052 €
Suisse	1258 €	1216 €	1061 €
République Chèque	994 €	1008 €	1222 €

TABLE C.1 – TCO moyen par pays pour le segment de véhicules de taille moyenne [32]

Bibliographie

- [1] C. Garret, “Effet de serre : définition et conséquences sur l’environnement.” <https://climate.selectra.com/fr/comprendre/effet-de-serre>, [Consulté le 06/08/2022].
- [2] P. Européen, “Le changement climatique en europe : faits et chiffres.” <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20180703ST007123/le-changement-climatique-en-europe-faits-et-chiffres>, 2022.
- [3] Vie-publique, “Union européenne : vers l’interdiction de voitures neuves à moteur thermique dès 2035.” <https://www.vie-publique.fr/en-bref/285406-les-eurodeputes-votent-linterdiction-des-moteurs-thermiques-en-2035>, [consulté le 07/08/2022].
- [4] Touring, “Fin des moteurs thermiques à bruxelles ?” <https://www.touring.be/fr/articles/fin-moteurs-thermiques-bruxelles>, [consulté le 07/08/2022].
- [5] J. Bonnet, “Tout comprendre - zfe : Ces millions de voitures bientôt (ou déjà) interdites de circuler dans les grandes villes.” <https://www.bfmtv.com/auto/tout-comprendre-zfe-ces-millions-de-voitures-bientot-ou-deja-interdites-de-circuler-dans-les-grandes-ville/AN-202201220038.html>, 2022.
- [6] IEA, “Global ev outlook 2021.” IEA, Paris, 2021.
- [7] IEA, “Fuel cell electric vehicle stock by region, 2017-2020.” IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fuel-cell-electric-vehicle-stock-by-region-2017-2020>, 2021.
- [8] D. T. Zero, “The program.” <https://globaldrivetozero.org/>.
- [9] n26, “How much does a car cost? a guide to the average cost of owning a car.” <https://n26.com/en-fr/blog/cost-of-owning-a-car>, 2020.
- [10] F. M. (Jato), “Ev prices have been growing during the last 8 years.” <https://www.jato.com/ev-prices-have-been-growing-during-the-last-8-years/>, 2019.
- [11] C. McKerracher et al., “At least two-thirds of global car sales will be electric by 2040.” <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-08-09/at-least-two-thirds-of-global-car-sales-will-be-electric-by-2040>, 2021.

- [12] C. McKerracher et al., “Electric vehicle outlook 2021.” <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>, 2021.
- [13] C. McKerracher, “The ev price gap narrows.” <https://about.bnef.com/blog/the-ev-price-gap-narrows/>, 2021.
- [14] C. d. M. Jean-Jacques Lambin, “Marketing stratégique et opérationnel.” DUNOD, 2008. p. 272.
- [15] N. Pocard, “Fuel cell price to drop 70-80% as production volume scales.” Ballard.com <https://blog.ballard.com/fuel-cell-price-drop>, 2022.
- [16] DriveClean, “Hydrogen fuel cell electric cars.” <https://driveclean.ca.gov/hydrogen-fuel-cell>, 2021.
- [17] E. E. Limited, “Electric cars : Calculating the total cost of ownership for consumers.” https://www.beuc.eu/publications/beuc-x-2021-039_electric_cars_calculating_the_total_cost_of_ownership_for_consumers.pdf, 2021.
- [18] beev, “Le tco (total cost of ownership) : comment le calculer et l’optimiser ?.” <https://www.beev.co/fiscalite/tco-total-cost-of-ownership/>, 2022.
- [19] LeasePlan, “Total cost of ownership : How electric vehicles and ice vehicles compare.” <https://www.leaseplan.com/en-ix/blog/tco/ownership-cost-ev-ice/>. [consulté le 02/05/2022].
- [20] EVEXPERT, “Cost of operating and maintaining ev.” <https://www.evexpert.eu/eshop1/knowledge-center/cost-of-operating-and-maintaining-electrocar-ev>. [consulté le 29/04/2022].
- [21] O. D. A. Plus), “Tesla, renault, peugeot, volkswagen Électriques... quelle est la durée de vie de leur batterie ?.” <https://www.autoplus.fr/environnement/duree-vie-batterie-electrique-573233.html#item=1>, 2022.
- [22] C. King et al., “Alleviating a form of electric vehicle range anxiety through on-demand vehicle access.” Internal Journal Of Control, 2013. p. 13.
- [23] STATBEL, “Tarif officiel moyen des produits pétroliers en euros.” <https://bestat.statbel.fgov.be/bestat/crosstable.xhtml?view=74d181b1-7074-4c9f-9a71-85303980d41f>. [consulté le 29/04/2022].
- [24] Volkswagen, “L’id.3 active.” <https://www.volkswagen.be/fr/modeles/id3-active.html>.
- [25] Callmepower.be, “Prix de l’électricité en belgique 2022 : les tarifs aujourd’hui.” <https://callmepower.be/fr/energie/guides/tarifs/electricite>. [consulté le 29/04/2022].
- [26] E. A. Auto. <https://www.ethias.be/part/fr/devis/mobilite/devis-assurance-auto.html/quote/find-car>. [consulté le 02/05/2022].

- [27] Capital, “Assurance auto : quelle différence de prix entre un même modèle électrique et essence? notre comparatif.” <https://www.capital.fr/auto/assurance-auto-quelle-difference-de-prix-entre-un-meme-modele-electrique-et-essen> [consulté le 03/05/2022].
- [28] J. C. B. M. Solutions), “Fuel cell maintenance and the “moving parts” fallacy.” <https://www.ballardmotivesolutions.com/insights/fuel-cell-maintenance-and-the-moving-parts-fallacy>, [Consulté le 24/07/2022].
- [29] Vroomly, “Devis pour votre volkswagen (vw) golf 8.” <https://www.vroomly.com/vehicules/volkswagen/golf-8/revision/>, [Consulté le 05/08/2022].
- [30] V. Volkswagen, “Vw nivauto,” [Consulté le 05/08/2022].
- [31] Gocar.be, “Les belges ont plus roulé en 2021.” <https://gocar.be/fr/actu-auto/actualite/les-belges-ont-plus-roule-en-2021>. [consulté le 03/05/2022].
- [32] LeasePlan, “Car cost index 2021,” 2021.
- [33] M. M. W. et al, “Total cost of ownership of fuel cell electric vehicles using expert assessments.” <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/MA2018-02/42/1419>, 2018. Meet. Abstr. MA2018-02 1419.
- [34] W. C. (RPM), “Comment fonctionne une pile à combustible à hydrogène?.” <https://rpmweb.ca/actualites-et-chroniques/chroniques/technologies/comment-fonctionne-une-pile-a-combustible-a-hydrogene>, 2021.
- [35] V. H. (Touring), “L’hydrogène, carburant idéal pour nos voitures?.” <https://www.hyundai.com/be/fr/tools/catalogues/nexo.html>, 2021.
- [36] Hyundai, “Spécifications techniques nexo.” <https://www.touring.be/fr/articles/lhydrogene-carburant-ideal-nos-voitures>, [Consulté le 23/07/2022].
- [37] Toyota, “Mirai.” <https://fr.toyota.be/modeles/mirai>, [Consulté le 23/07/2022].
- [38] Axa, “Votre assurance.” https://www.fo.axa.be/eauto/risk/brand?utm_source=google&utm_medium=cpc&dsfns=customers.be.axa.retail.mobility.contract.new.auto&LANG=fr, [Consulté le 23/07/2022].
- [39] Axa, “Votre assurance.” https://www.fo.axa.be/eauto/risk/brand?utm_source=google&utm_medium=cpc&dsfns=customers.be.axa.retail.mobility.contract.new.auto&LANG=fr, [Consulté le 23/07/2022].
- [40] Odysee-Mure, “Change in distance travelled by car.” <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/transport/distance-travelled-by-car.html>, [Consulté le 24/07/2022].
- [41] S. routière gouvernement français, “La fatigue et la conduite.” <https://www.securite-routiere.gouv.fr/dangers-de-la-route/la-fatigue-et-la-conduite>, [Consulté le 25/07/2022].

- [42] Matmut, “Pourquoi et quand prendre des pauses lors des longs trajets en voiture?” <https://www.matmut.fr/assurance/auto/conseils/pause-longes-trajets-voiture>, 2019.
- [43] Volkswagen, “Comment puis-je recharger?” <https://www.volkswagen.be/fr/e-mobility-et-id/toutes-les-informations-sur-la-conduite-electrique/recharge-autonomie-d-une-voiture-electrique/comment-puis-je-recharger.html>, [Consulté le 25/07/2022].
- [44] Tesla, “Assistance relative au superchargeur.” https://www.tesla.com/fr_BE/support/supercharger, [Consulté le 25/07/2022].
- [45] 2ZeroEmission, “2zero.” <https://www.2zeroemission.eu/who-we-are/2zero/>, [Consulté le 27/07/2022].
- [46] W. T. Transport & Environment, “Recharge eu : How many charge points will europe and its member states need in the 2020s.” <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/01%202020%20Draft%20TE%20Infrastructure%20Report%20Final.pdf>, [Consulté le 27/07/2022].
- [47] Virta, “The state of ev charging infrastructure in europe by 2030.” <https://www.virta.global/blog/ev-charging-infrastructure-development-statistics>, [Consulté le 27/07/2022].
- [48] Intertraffic, “Electric vehicle charging infrastructure in europe 2021.” <https://www.intertraffic.com/news/infrastructure/electric-vehicle-charging-2021-europe/#>, [Consulté le 27/07/2022].
- [49] H2.live, “Filling up with h2.” <https://h2.live/en/>, [Consulté le 28/07/2022].
- [50] ACEA, “Interactive map – truck hydrogen refuelling stations needed in europe by 2025 and 2030, per country.” <https://www.acea.auto/figure/interactive-map-truck-hydrogen-refuelling-stations-needed-in-europe-by-2025-and-2030>, 2021.
- [51] F. U. Transport & Environnement, “Comparison of hydrogen and battery electric trucks.” https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2020_06_TE_comparison_hydrogen_battery_electric_trucks_methodology.pdf, 2020.
- [52] J. Buberger et al., “Total co₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars.” <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122000867>, 2021.
- [53] Wikipedia, “Procédure d’essai mondiale harmonisée pour les véhicules légers.” https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9dure_d'essai_mondiale_harmonis%C3%A9e_pour_les_v%C3%A9hicules_l%C3%A9gers, [consulté le 03/08/2022].

- [54] A. Sternberg et al., “Greenhouse gas emissions for battery electric and fuel cell electric vehicles with ranges over 300 kilometers.” https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/190815_LCA-BEV-FCEV_Results_EnglishVersion.pdf, 2019. p. 16.
- [55] S. Schlömer, “Technology-specific cost and performance parameters, annex iii.” https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf. p. 7.
- [56] FLEET, “Le réseau belge est-il prêt pour le transport électrique?.” <https://www.fleet.be/le-reseau-belge-est-il-pret-pour-le-transport-electrique/?lang=fr>, 2021.
- [57] V. Hayez, “Électricité : black-out en vue après le boom des voitures électriques?.” <https://www.touring.be/fr/articles/electricite-black-out-vue-apres-boom-voitures-electriques>, 2021.
- [58] Belga, “Voitures de société électriques : le réseau de distribution pourra faire face, déclare une étude.” <https://www.rtbf.be/article/voitures-de-societe-electriques-le-reseau-de-distribution-pourra-faire-face-declara>, 2021.
- [59] Wikipedia, “Smart charging.” https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_charging, [Consulté le 06/08/2022].
- [60] Wikipedia, “Vehicle-to-grid.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle-to-grid#Bidirectional_local_V2G_\(V2H_,_V2B_,_V2X\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle-to-grid#Bidirectional_local_V2G_(V2H_,_V2B_,_V2X)), [Consulté le 06/08/2022].
- [61] Belga, “Cop26 : la Belgique importera de l’hydrogène vert produit en Namibie.” <https://www.rtbf.be/article/cop26-la-belgique-importera-de-l-hydrogene-vert-produit-en-namibie-10873065>, 2021.
- [62] Premier.be, “Hydrogène vert : La Belgique présente ses atouts et ses ambitions à la Namibie.” <https://www.premier.be/fr/hydrogene-vert-la-belgique-presente-ses-atouts-et-ses-ambitions-a-la-namibie>, 2021.
- [63] IDETA, “Énergie – production et distribution d’hydrogène vert en Wallonie picarde.” <https://ideta.be/projets/energie-production-et-distribution-dhydrogene-vert-en-wallonie-picarde/>, [Consulté le 06/08/2022].
- [64] P. Pillon, “La Belgique à la conquête de l’Électrique.” <https://www.monsieurvintage.com/a-la-une/2022/05/la-belgique-a-la-conquete-de-lelectrique-52465>, 2022.

Abstract : Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'Union Européenne met en place des réglementations en faveur de la transition vers le transport 100 % électrique. Deux types de véhicules 100 % électriques sont actuellement disponibles sur le marché : les véhicules électriques à batterie et les véhicules électriques à pile à combustible. De nombreuses personnes restent sceptiques par rapport au transport électrique et des questions persistent. Le but de cette étude est d'analyser et de comparer les deux types de véhicules électriques afin de répondre aux questions que les citoyens se posent. Quatre critères sont analysés : prix, autonomie, empreinte carbone et infrastructure belge. Le prix d'achat des véhicules électriques est nettement plus élevé que celui des véhicules à moteur thermiques. Par contre, le coût total sur la durée de vie des véhicules électriques à batterie est compétitif par rapport aux véhicules à moteur thermique. Le coût total sur la durée de vie des véhicules à pile à combustible reste toutefois trop élevé actuellement en comparaison avec les autres types de véhicules. Étant donné l'usage des véhicules, les progrès au niveau de l'autonomie et l'infrastructure, l'autonomie ne constitue plus un frein objectif à l'usage des véhicules électriques à batterie, même si les citoyens ont encore des craintes à ce sujet. Le manque d'infrastructure de recharge à hydrogène constitue un frein à l'adoption des véhicules électriques à pile à combustible. La réduction de l'empreinte carbone constitue le principal atout des véhicules électriques, en particulier en cas d'utilisation d'énergie verte. Moyennant l'augmentation de la production d'énergie et des techniques telles que le smart charging, le réseau belge est capable de supporter l'augmentation des véhicules électriques en circulation au cours des prochaines années. Il en va de même pour l'hydrogène en Belgique.