

Louvain School of Management

Comparaison des véhicules électriques à batterie et à pile à combustible

Auteur : Guillaume André
Promoteur : Daniel De Wolf
Année académique 2021-2022
Travail de fin d'études (TFE) en vue d'obtenir le titre de
Master (60) en Sciences de Gestion
Horaire de jour

Résumé

Ce travail va s'atteler à faire la comparaison entre les véhicules électriques à batterie et les véhicules électriques à piles à combustible. Cette comparaison se fera sous 3 axes. Le premier, le point de vue économique, où l'on va comparer les frais d'achats, d'utilisation et d'entretiens. Deuxièmement, le point de vue de l'utilisation, en comparant l'autonomie des véhicules, le temps de recharge et la proximité des stations de recharge. Et finalement, le dernier point de comparaison est le point de vue écologique, en comparant les impacts environnementaux induits par la production et les impacts induits par l'utilisation des voitures à batterie et à pile à combustible. Ces 3 axes de comparaisons se feront dans 3 contextes nationaux différents, la France, la Belgique et l'Allemagne, ayant tous 3 des stratégies énergétiques différentes qui vont induire des impacts différents.

Table des matières

Table des figures	III
Liste des tableaux	V
1 Introduction	1
1.1 Sélection de véhicules représentatifs	3
1.2 Comparer les consommations réelles	3
1.3 Fonctionnement d'une voiture électrique à batterie	4
1.4 Fonctionnement d'une voiture électrique à pile à combustible	5
1.5 Technologies de production de l'électricité	6
1.6 Technologies de production de l'hydrogène	6
2 Comparaison économique	11
2.1 Prix à l'achat	11
2.2 Coûts d'utilisation	12
2.2.1 Coût des recharges	12
2.2.2 Coût d'entretien	13
2.3 Comparaison	14
3 Comparaison dans l'utilisation	16
3.1 Autonomie	16
3.1.1 Véhicules à batterie	17
3.1.2 Véhicules à pile à combustible	18
3.1.3 Comparaison de l'autonomie	18
3.2 Temps de recharge	19
3.2.1 Véhicules à batterie	19
3.2.2 Véhicules à piles à combustibles	20

3.2.3	Comparaison des temps de recharges	20
3.3	Proximité des stations de recharge	21
3.3.1	Véhicules à batteries	21
3.3.2	Véhicules à pile à combustible	22
3.4	Comparaison	22
4	Comparaison environnementale	23
4.1	Véhicules à batterie	23
4.1.1	Impact environnemental à l'utilisation	23
4.1.2	Impacts environnementaux à la production	26
4.1.3	Impacts environnementaux totaux	27
4.2	Véhicules à pile à combustible	28
4.2.1	Impacts environnementaux à l'utilisation	28
4.2.2	Émissions à la production	29
4.2.3	Impacts environnementaux totaux	29
4.3	Comparaison	30
5	Conclusion	31
A	Caractéristiques des véhicules	37
A.1	Véhicules à batterie	37
A.1.1	SUV	37
A.1.2	Monospaces	39
A.1.3	Berlines	40
A.1.4	Citadine	41
A.1.5	Coupé	41
A.2	Véhicules à pile à combustible	41
B	Explication d'une boîte à moustache	42
C	Graphes supplémentaire	43

Table des figures

1.1	Part du secteur du transport dans les émissions européennes de gaz à effet de serre en 2018. Source : ICCT [1]	1
1.2	Parc automobile belge de 2007 à 2021. Source : Statbel[3]	2
1.3	Nombre de véhicules électriques et prévisions	2
1.4	Plan de fonctionnement d'une voiture électrique à batterie [4]	4
1.5	Vue intérieure d'une voiture électrique à batterie [4]	4
1.6	Plan de fonctionnement d'une voiture électrique à pile à combustible [4]	5
1.7	Vue intérieure d'une voiture électrique à pile à combustible [4]	5
1.8	Fonctionnement d'une Toyota Mirai. Source : Toyota	6
1.9	Part des technologies utilisées pour produire de l'hydrogène. Source : IEA [6]	7
1.10	Fonctionnement d'une électrolyse	9
2.1	Distribution des prix d'achat des véhicules à batterie et à pile à combustible	12
2.2	Comparaison du coût total d'un véhicule électrique à batterie et à pile à combustible	15
3.1	Lien entre le prix et l'autonomie des véhicules électriques	17
3.2	Distribution des temps de recharge AC des véhicules à batterie	19
3.3	Distribution des temps de recharge AC des véhicules à batterie	20
3.4	Nombre de véhicules et de bornes de recharges	21
4.1	Comparaison des émissions induites par moyen de production d'électricité de chaque type de véhicules à batterie	25
4.2	Comparaison des émissions induites par pays de chaque type de véhicules à batterie	26
4.3	Émissions induites sur l'ensemble de la vie du véhicule	27
4.4	Impact environnemental total des véhicules à pile à combustible	29

4.5	Comparaison des impacts environnementaux totaux des véhicules à pile à combustible	30
B.1	Différentes parties d'une boîte à moustaches	42
C.1	Impact environnemental total des berlines électriques	43
C.2	Impact environnemental relatif total des berlines électriques	43
C.3	Impact environnemental total des citadines électriques	43
C.4	Impact environnemental relatif total des citadines électriques	43
C.5	Impact environnemental total des SUV électriques	44
C.6	Impact environnemental relatif total des SUV électriques	44

Liste des tableaux

1.1	Modèles de voitures types choisis pour chaque châssis et chaque motorisation	3
1.2	Émissions de gaz à effet de serre par kWh produit sur l'ensemble du cycle de vie	6
1.3	Émissions induites et moyen de production de chaque type d'hydrogène . . .	10
2.1	Prix des véhicules électriques à batterie et à pile à combustible	11
2.2	Coût d'utilisation des véhicules à batterie	13
2.3	Coût d'utilisation des véhicules à pile à combustible	13
3.1	Autonomies des véhicules électriques à batterie	18
3.2	Autonomie des véhicules électriques à pile à combustible	18
3.3	Temps de recharge des véhicules électriques à batterie sur bornes AC	19
3.4	Temps de recharge des véhicules électriques à batterie sur bornes DC	20
4.1	Estimation des consommation réelles des véhicules à batterie	23
4.2	Émissions induites par moyen de production d'électricité de chaque type de véhicules à batterie	25
4.3	Émissions induites par pays de chaque type de véhicules à batterie	26
4.4	Émissions induites par la production de la batterie	26
4.5	Émissions induites par la production de la voiture entière	27
4.6	Émissions induites à l'utilisation d'une voiture à pile à combustible en fonction du mode de production de l'hydrogène	28
4.7	Émissions induites par la production du véhicule à pile à combustible entier	29

Chapitre 1

Introduction

En Europe en 2018, le secteur du transport représente 29% des émissions de gaz à effet de serre. Et dans le secteur du transport, pas moins de 51% des émissions de gaz à effet de serre sont dues aux véhicules personnels, ce qui représente 15% des émissions totales.[1]

Greenhouse gas emissions in the EU

2018 total: 3.8 Gt CO₂e

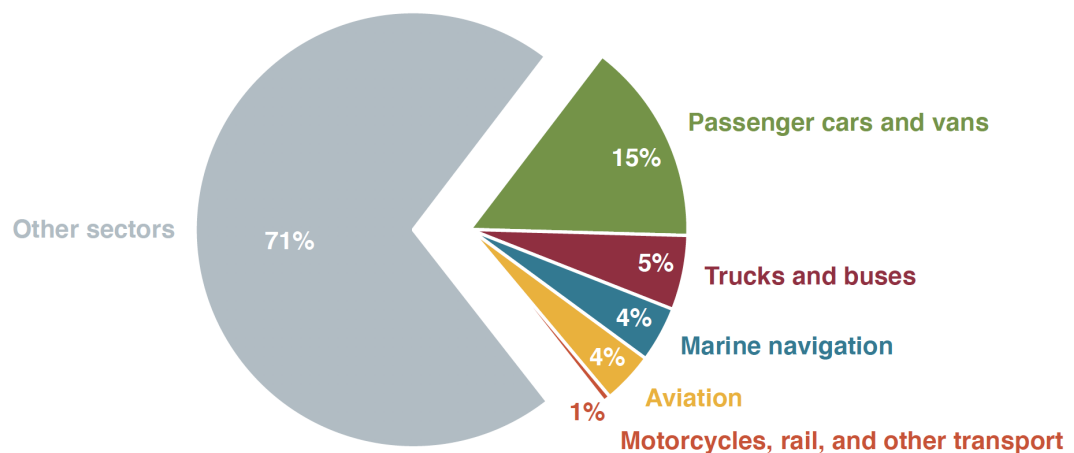


FIGURE 1.1 – Part du secteur du transport dans les émissions européennes de gaz à effet de serre en 2018. Source : ICCT [1]

Aujourd'hui, le parc automobile belge et européen est composé en grande majorité de véhicules thermiques classiques à essence ou au diesel. Cependant on peut noter que depuis 2014 et le Dieselgate[2], le nombre de voitures diesel est en diminution au profit majoritaire-

ment des voitures à essence, un peu des hybrides et de manière plus minoritaire, des véhicules électriques à batterie comme on peut le voir dans la figure 1.2.[3] Cependant, sur la figure 1.3, on peut voir que le nombre de voiture électrique va augmenter dans les prochaines années de manière exponentielle.

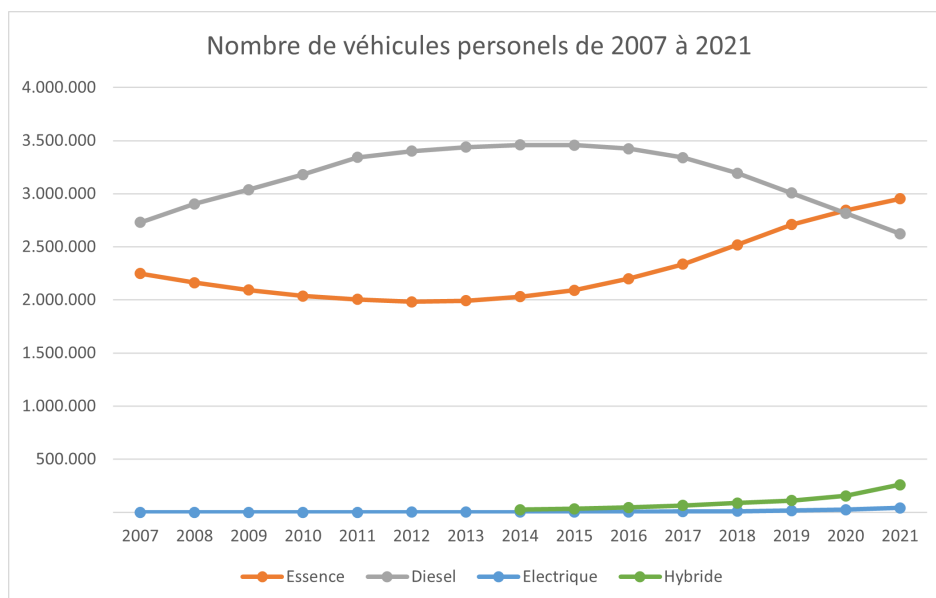


FIGURE 1.2 – Parc automobile belge de 2007 à 2021. Source : Statbel[3]

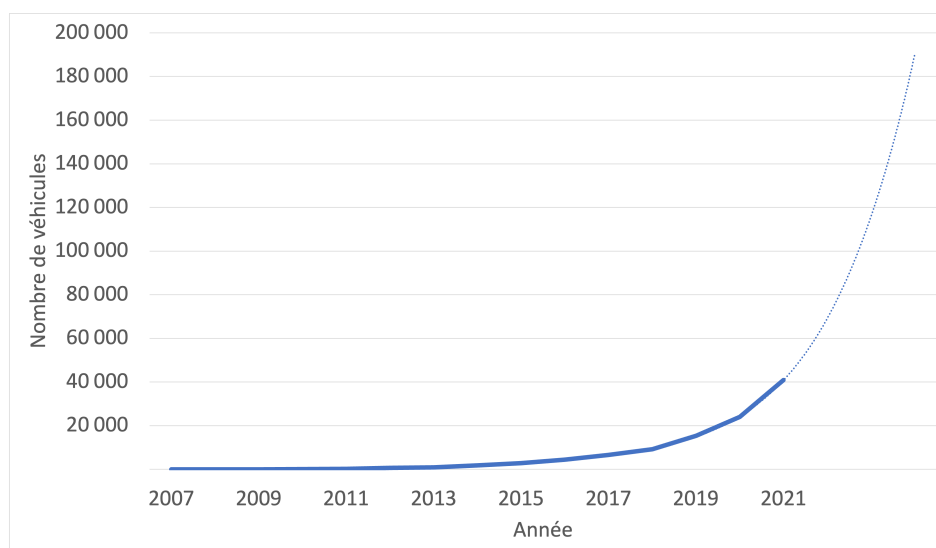


FIGURE 1.3 – Nombre de véhicules électriques et prévisions

Dans le contexte de crise climatique actuelle et au vu de la part des véhicules personnels

dans les émissions totales, il est important de trouver des alternatives aux véhicules thermiques, afin de proposer une solution optimale de transport à la société. Parmi les solutions alternatives possibles, on retrouve 2 candidats potentiels : Les voitures électriques à batterie et les voitures électriques à pile à combustible. Dans ce travail, nous allons nous atteler à la comparaison de ces 2 véhicules sous 3 aspects : Le point de vue économique, le point de vue de la praticité d'utilisation et le point de vue de l'impact environnemental. Afin de comparer les véhicules de chaque type, nous avons récolté auprès des constructeurs, les caractéristiques des différents modèles et variantes en terme de capacité et de motorisations disponibles à la vente ; elles sont visibles en annexe A.

1.1 Sélection de véhicules représentatifs

On peut voir qu'il existe un grand nombre de véhicules à batterie sur le marché, contrairement aux véhicules à pile à combustible, qui ne sont que 2. Afin de comparer des véhicules de gabarit et d'utilisation similaire, nous avons trié les véhicules à batterie en 3 types de châssis représentatifs, à savoir, les berlines, les citadines et les SUV, ayant le plus de modèles existants. Pour les véhicules à pile à combustible, nous avons pris les 2 modèles. Ces modèles sont visibles dans le tableau 1.1

Véhicule	Motorisation	Châssis
Kia EV6 Earth AWD	Batterie	Berline
Honda e	Batterie	Citadine
Mercedes EQA 250	Batterie	SUV
Toyota Mirai	Hydrogène	Berline
Hyundai Nexo	Hydrogène	SUV

TABLE 1.1 – Modèles de voitures types choisis pour chaque châssis et chaque motorisation

1.2 Comparer les consommations réelles

Afin de fournir une comparaison réaliste des véhicules, il est utile de comparer non pas uniquement les consommation et autonomie fournies par le constructeur, mais également les consommation et autonomie réelles constatées par les utilisateurs.

Pour obtenir une estimation des consommations réelles constatées par les utilisateurs de véhicules électriques, le choix s'est porté sur le site internet www.spritmonitor.de. Ce site

permet aux propriétaires de reporter leurs consommations à chaque recharge, afin d'établir une meilleure impression de la consommation réelle. Il est important de noter que les chiffres fournis sont les chiffres constatés entre la charge et les kilomètres parcourus, ce qui inclut donc les pertes à la charge, en plus des différences entre le comportement du véhicule neuf en test, et du véhicule dans l'utilisation quotidienne du consommateur.

1.3 Fonctionnement d'une voiture électrique à batterie

Une voiture électrique à batterie fonctionne grâce à un ou plusieurs moteurs électriques. Ces moteurs peuvent être de puissance et de taille variables, dépendamment de la puissance du véhicule et du type de transmission.

Ces moteurs électriques sont alimentés en électricité par une batterie rechargeable située dans le plancher de la voiture (figures 1.5 et 1.4).

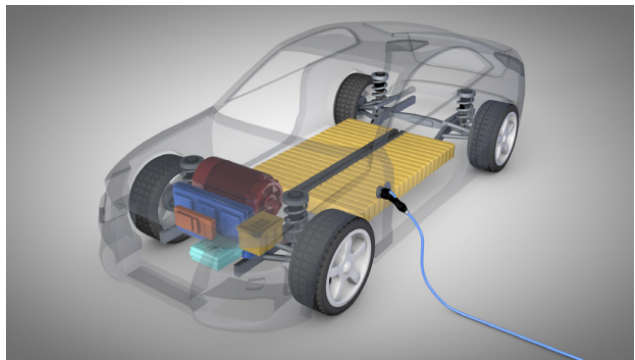
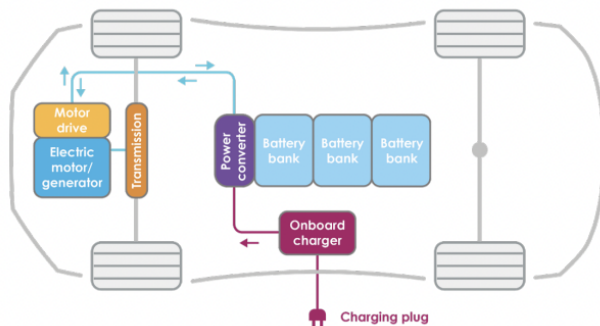


FIGURE 1.4 – Plan de fonctionnement d'une voiture électrique à batterie [4]

FIGURE 1.5 – Vue intérieure d'une voiture électrique à batterie [4]

Cette batterie doit être rechargée par une alimentation électrique. Pour cela, plusieurs solutions sont possibles :

- la recharge en courant alternatif monophasé sur prise domestique (max 2,4kW),
- la recharge en courant alternatif triphasé sur borne domestique (max 22kW),
- la recharge en courant alternatif triphasé sur borne publique (max 43 kW),
- la recharge en courant continu sur borne publique (de 20kW à 350 kW dépendamment du véhicule).

Les véhicules électriques à batterie possèdent aussi la possibilité de transformer leur moteur électrique en générateur afin de retransformer l'énergie cinétique en énergie électrique,

et recharger les batteries. Ce procédé est appelé le freinage régénératif, et permet d'augmenter grandement l'autonomie des voitures, tout en réduisant l'usage et donc l'usure des freins mécaniques.

1.4 Fonctionnement d'une voiture électrique à pile à combustible

Les voitures à pile à combustible sont mises en mouvement par un moteur électrique. Contrairement aux véhicules à batterie, il n'existe que des modèles possédant un moteur et pas plusieurs. Ce moteur unique est alimenté en électricité par une batterie. Cette batterie est à la fois rechargée par l'électricité récupérée par le freinage régénératif comme sur les voitures électriques à batterie, et par la pile à combustible.

La pile à combustible est alimentée en hydrogène par les réservoirs d'hydrogène, et en oxygène par l'air extérieur capté à l'avant de la voiture. Le résultat de la production d'électricité est simplement de l'eau liquide rejetée par la voiture.

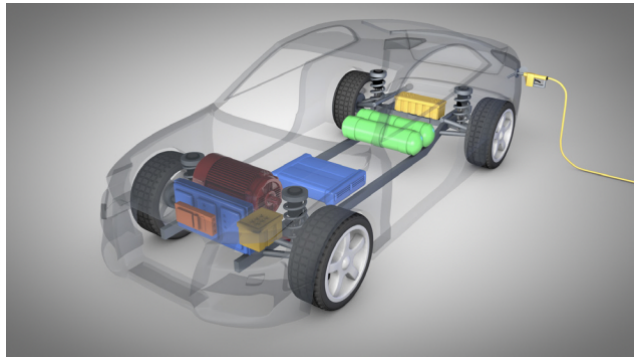
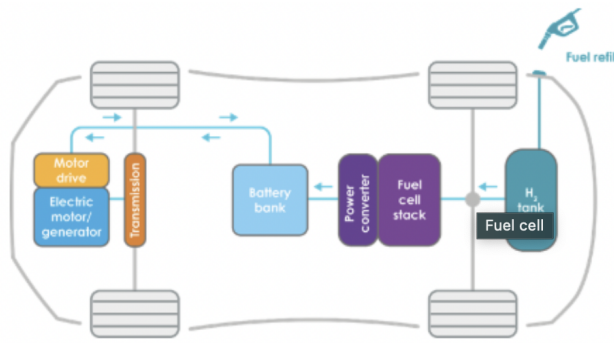


FIGURE 1.6 – Plan de fonctionnement d'une voiture électrique à pile à combustible [4] FIGURE 1.7 – Vue intérieure d'une voiture électrique à pile à combustible [4]

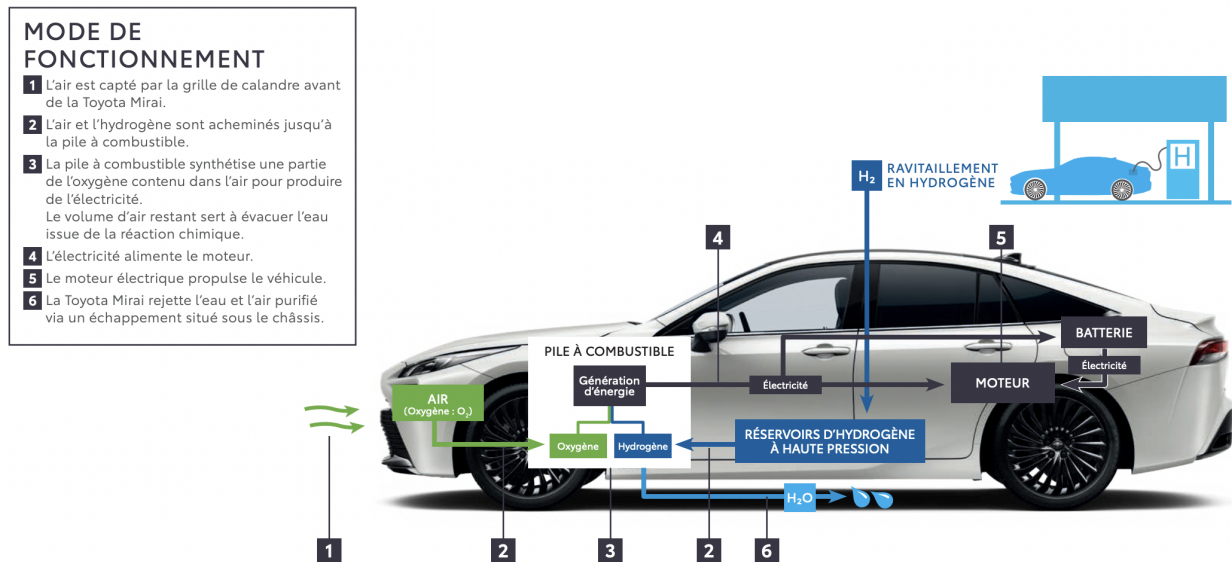


FIGURE 1.8 – Fonctionnement d'une Toyota Mirai. Source : Toyota

1.5 Technologies de production de l'électricité

Il existe plusieurs technologies pour produire de l'électricité. Ces technologies et leurs émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de leur cycle de vie sont fournis par le rapport du GIEC de 2014[5] et sont visibles dans le tableau 1.2

Technologie	Emissions [$g_{eq.CO_2}/kWh$]
Éolien	12
Solaire	41
Hydraulique	24
Nucléaire	12
Gaz	490
Charbon	820

TABLE 1.2 – Émissions de gaz à effet de serre par kWh produit sur l'ensemble du cycle de vie

1.6 Technologies de production de l'hydrogène

Selon les chiffres de l'Agence Internationale de l'Energie, visibles sur la figure 1.9, en 2020, 90 Mt d'hydrogène ont été produites dans le monde, dont 21% sont co-produites par

d'autres procédés. La quasi totalité du reste de l'hydrogène produit l'a été par des ressources fossiles.[6]

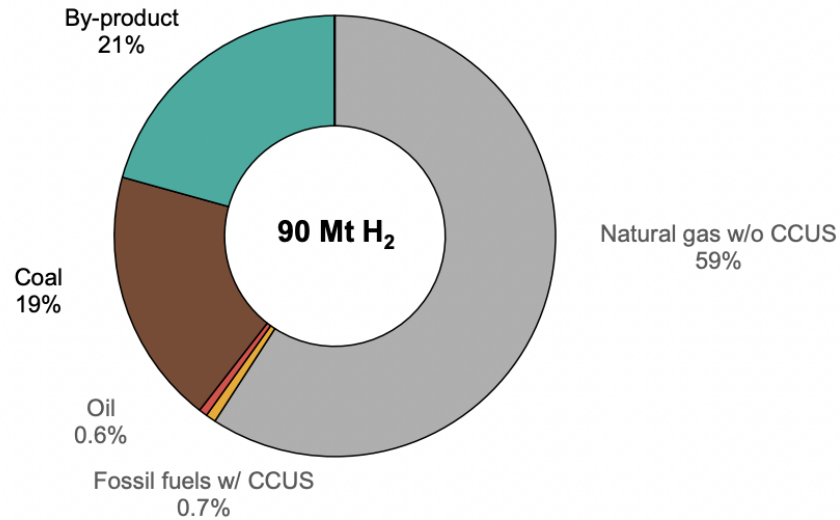


FIGURE 1.9 – Part des technologies utilisées pour produire de l'hydrogène. Source : IEA [6]

Production par vapo-réformage de méthane (SMR)

La production d'hydrogène par vapo-réformage du méthane est actuellement la technologie la plus développée et la plus largement répandue. Le procédé est constitué de 3 étapes principales :

1. Une réaction de vapo-réformage du méthane : $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$
2. Une conversion du CO par réaction du gas à l'eau : $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$
3. Augmentation de la pureté en hydrogène par adsorption du CO_2

Ces réactions ont lieu à la température d'environ 800°C et en présence de catalyseurs fabriqués en métaux précieux ou en alliages à base de Nickel.[7]

Production par gazéification du charbon (CG)

La gazéification du charbon se compose de 2 à 3 étapes :

1. La première opération consiste à engendrer une combustion du charbon via un apport d'oxygène : $C + O_2 \rightarrow CO_2$

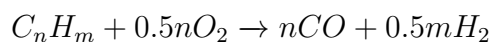
2. Lors de la deuxième étape, l'apport en oxygène est stoppé et la chaleur est stockée dans le charbon, on y injecte ensuite de la vapeur d'eau qui va réagir avec le charbon à haute température : $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
3. Finalement, la mixture de gaz générée est convertie lors d'une étape de réaction du gaz à l'eau, afin de diminuer la concentration en CO, et d'augmenter la concentration d'hydrogène : $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$

La première étape est facultative et peut être remplacée par un apport de chaleur extérieur, ce qui va réduire considérablement les émissions de CO_2 du procédé.

Ce procédé est largement utilisé dans les pays où le charbon est abondant, et où le prix du gaz naturel est trop élevé pour que le vapo-réformage du méthane soit rentable, comme la Chine. Aujourd'hui, ce procédé produit environ 18% de l'hydrogène mondial.[7]

Production par oxydation partielle des produits pétroliers (POX)

L'oxydation partielle (POX) aussi appelée "Gazéification", est le procédé le plus adapté pour convertir les produits avec un grand rapport carbone-hydrogène, comme le pétrole brut ou encore le naphta. Le principe est similaire à l'oxydation partielle du méthane : on brûle des combustibles avec un apport en oxygène inférieur à la valeur stoechiométrique, pour produire un mix de CO et d'hydrogène à une très haute température (1200-1350°C).[7]



Production par électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est, historiquement, le premier procédé avec lequel l'homme a synthétisé de l'hydrogène. Ce procédé consiste à "casser" une molécule d'eau en y faisant circuler un courant électrique, afin d'obtenir du dioxygène et du dihydrogène. Aujourd'hui, il est utilisé pour la production de 4% de l'hydrogène mondial. Il existe 2 type d'électrolyses :

- Les méthodes conventionnelles d'électrolyse de l'eau
- L'électrolyse à haute température ou électrolyse à oxyde solide

Concernant les méthodes conventionnelles d'électrolyse, les 2 technologies les plus matures et les plus utilisées sont l'électrolyse alcaline (AEL), et l'électrolyse à membrane électrolyte polymère (PEM). Ces 2 procédés sont réalisés à quelques dizaines de degrés Celsius. Pour l'électrolyse alcaline, les électrodes sont plongées dans une solution hautement concentrée en

alcanes (du KOH ou DU NaOH en général). Le bain est séparé en 2 parties par une membrane poreuse qui va pouvoir laisser circuler les ions OH^- . Un courant électrique va circuler entre elles, et effectuer les 2 réactions suivantes :

- A la cathode : $4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4OH^-$
- A l'anode : $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$

L'électrolyse à membrane électrolyte polymère fonctionne sur le même principe de base, à la différence que la réaction a lieu dans un environnement acide. De plus, elle utilise une membrane électrolyte solide ; ce qui implique que le transport des charges dans l'électrolyte se fait via les ions H^+ . La PEM offre un rendement énergétique supérieur à l'AEL, ainsi qu'une plus grande compacité. Cependant, elle nécessite des métaux nobles comme de l'iridium ou du platine, alors que l'AEL utilise des électrodes basées sur du nickel ou du fer.

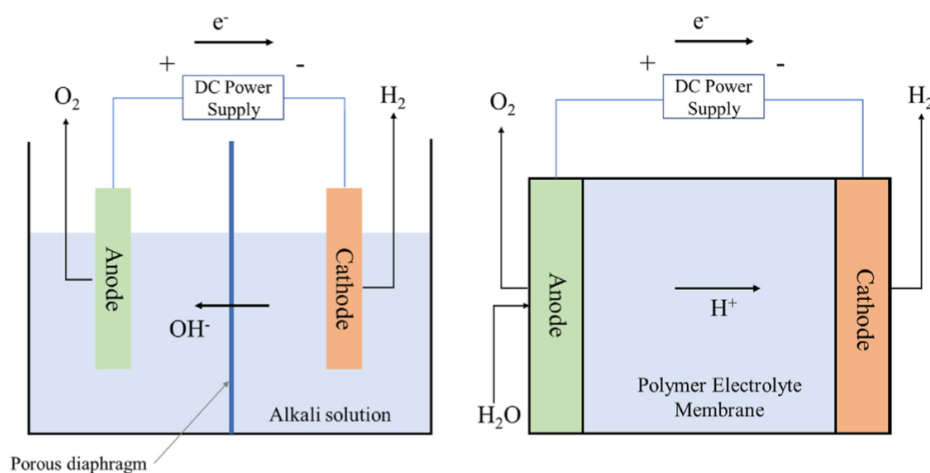


FIGURE 1.10 – Fonctionnement d'une électrolyse

Classification de l'hydrogène

L'hydrogène est généralement classifié suivant son mode de production. Une couleur lui est donnée, et permet de le désigner et de le distinguer facilement des autres. On retrouve donc les différents types d'hydrogène[8] et leurs émissions induites[7] dans le tableau 1.3.

Couleur	Mode de production	Émissions [kg_{CO_2}/kg_{H_2}]
Noir	Gazéification du charbon	22,90
Gris	Vapo-réformage du méthane	11,98
Bleu	Gris avec séquestration géologique du CO ₂	3,70
Rose	Electrolyse avec électricité d'origine nucléaire	0,71
Vert - Solaire	Electrolyse avec électricité d'origine photovoltaïque	1,82
Vert - Eolien	Electrolyse avec électricité d'origine éolienne	1,08

TABLE 1.3 – Émissions induites et moyen de production de chaque type d'hydrogène

Ces dernières années, avec l'augmentation du nombre d'installations de production d'électricité renouvelable, il arrive de plus en plus fréquemment dans des pays avec une forte pénétration de renouvelable, qu'il y ait plus d'électricité produite que d'électricité consommée. Ceci implique que le prix de l'électricité devient négatif, et que si elle n'est pas consommée elle sera perdue[9][10]. Une solution dans ce genre de cas serait de produire de l'hydrogène par électrolyse, comme c'est le cas dans les stations d'électrolyse de Ostende[11] et de Bretagne[12]. De plus, avec les derniers événements géopolitiques en Ukraine, et la crise énergétique qui a suivi, il est arrivé que le prix de l'hydrogène gris soit devenu supérieur au prix de l'hydrogène vert.[13]

Chapitre 2

Comparaison économique

Pour comparer les deux types de véhicules, nous allons d’abord comparer le prix à l’achat du véhicule et ensuite les frais d’utilisation et d’entretien.

2.1 Prix à l’achat

Comme on peut le voir sur la figure 2.1 (qui est une boîte à moustache dont le fonctionnement est expliqué en annexe B.1), le prix des citadines à batterie est compris entre 20.000€ et 45.000€. De manière générale, la majorité des véhicules à batterie coûtent moins de 65.000€, et les moyennes et médianes des prix sont disponibles dans le tableau 2.1.

Chassis	Prix moyen	Prix médian	Prix véhicule type
Berline	65.750	53.340	53.890
Citadine	33.351	33.537	35.680
SUV	56.372	51.467	54.329
Monospace	52.835,75	52.648,50	-
Coupé	112.710	105.100	-
Toyota Mirai	-	-	64.400
Hyundai Nexa	-	-	74.000

TABLE 2.1 – Prix des véhicules électriques à batterie et à pile à combustible

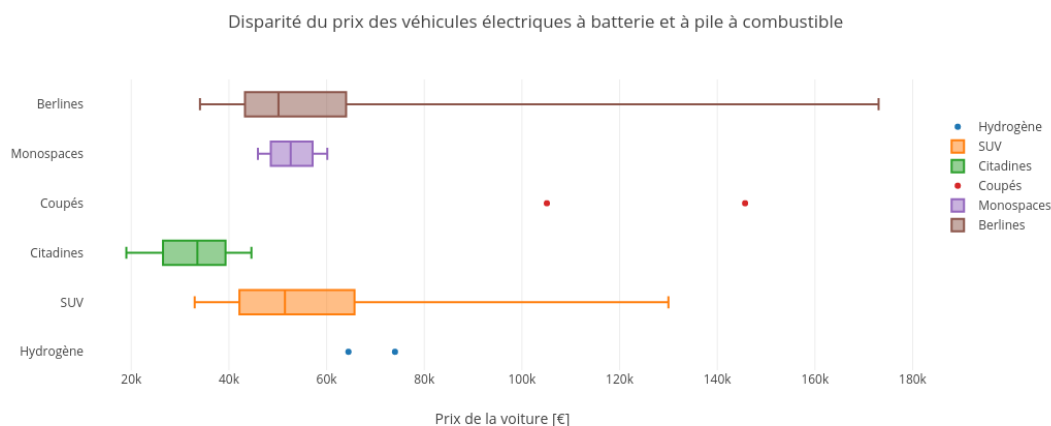


FIGURE 2.1 – Distribution des prix d’achat des véhicules à batterie et à pile à combustible

2.2 Coûts d’utilisation

2.2.1 Coût des recharges

En ce qui concerne les recharges pour les véhicules à batterie, elles peuvent se faire soit sur des bornes publiques, appartenant à des magasins ou à des réseaux de recharge, soit à domicile sur des bornes murales.

Pour les recharges électriques à domicile en Septembre 2021, le prix moyen est en Belgique de 0.291€/kWh, en France de 0.185€/kWh et en Allemagne de 0.317€/kWh.[14]

Pour les recharges électriques sur une borne en Belgique, il existe une multitude de formules dépendamment du réseau de bornes utilisé. Certaines ont des tarifs à la minutes et d’autres au kWh. Certaines ont un prix au branchement en plus du prix au kWh. Et d’autres ont un prix d’abonnement au réseau à ajouter au prix du kWh. De plus les prix varient en fonction de la puissance fournie. Après des recherches, on peut constater que les prix tournent autour de 0.35€/kWh pour les bornes de recharge lente, 0.65€/kWh pour les bornes de recharge rapide en courant continu 50kW, voire 0.9€/kWh pour les recharges ultra rapides.[15]

En ce qui concerne les pleins d’hydrogène en Belgique, il est disponible en stations équipées au prix de 9,9€/kg_{H₂}[16]. En France, dépendamment des station, on peut le retrouver entre 10 et 15€/kg_{H₂}[17]. En ce qui concerne l’Allemagne, S&P Global Platts a lancé des évaluations

du prix de l'hydrogène à la pompe dans ses 90 stations, et est arrivé à une estimation de $9.5\text{€}/kg_{H_2}$. [18]

En repartant des données de SpritMonitor pour les consommations à la charge des véhicules types, on obtient les prix en euros pour 100 kilomètres suivants :

Véhicule	Consommation [kWh/100km]	A domicile [€/100km]			Borne lente [€/100km]	Borne rapide [€/100km]
		Belgique	France	Allemagne		
Berline - BEV	20,47	5,957	3,787	6,489	7,165	13,306
Citadine - BEV	18,92	5,506	3,500	5,998	6,622	12,298
SUV - BEV	23,25	6,766	4,301	7,370	8,137	15,112

TABLE 2.2 – Coût d'utilisation des véhicules à batterie

Véhicule	Consommation [kg_{H_2} /100km]	A la station [€/100km]		
		Belgique	France	Allemagne
FCEV	1,06	10,494	12,72	10,07

TABLE 2.3 – Coût d'utilisation des véhicules à pile à combustible

2.2.2 Coût d'entretien

Selon plusieurs sources, on peut estimer les coûts d'entretien d'une voiture électrique à batterie à environ 800€ par an [19]. Cela est assez peu élevé par rapport à un véhicule thermique. En effet, il y a moins de pièces d'usure dans le moteur, et moins de complexité. Les seules pièces d'usure sont les pneumatiques, les freins (mais avec moins d'usure grâce au freinage régénératif) et, dans certains cas, la transmission. En estimant qu'un véhicule personnel fait en moyenne 15.000km/an, on se retrouve avec un coût d'entretien de 5.33€/100km

La principale source de frais viendra de la batterie, qui est en général garantie de 70 à 75% de sa capacité pour de 5 à 8 ans, ou de 100.000 à 150.000 km [20]. Au delà d'une de ces limites, lorsque la capacité de la batterie (et donc l'autonomie du véhicule) sera inférieure à une limite acceptable par l'utilisateur, il faudra procéder à un changement. Aujourd'hui, une batterie coûte environ 160€/kWh, ce qui porte le prix d'une batterie de 50 kWh à 8000€. [20] Ce qui donne un coût supplémentaire de 6.66€/100km, en estimant une durée de vie de 8 ans pour une batterie de 50kWh et 15.000km parcourus par an.

En ce qui concerne les véhicules à pile à combustible, les coûts d'entretien sont globalement les mêmes que pour un véhicule à batterie, à l'exception du prix d'un changement de batterie, qui est plus faible et moins rapidement nécessaire, la batterie n'ayant qu'un rôle tampon entre la pile à combustible et les moteurs.

2.3 Comparaison

En termes de prix d'achat, on se rend bien compte que les véhicules à hydrogène sont bien plus chers que les véhicules à batterie.

En ce qui concerne les frais d'utilisation (recharge ou plein), les véhicules à batterie sont moitié moins chers que les véhicules à hydrogène, si la recharge est faite à domicile. Si la recharge se fait sur des bornes publiques lentes, les coûts d'utilisation sont de 20 à 30% moins chers que ceux des voitures à hydrogène. Seules les voitures électriques à batterie, rechargées exclusivement sur bornes publiques rapides présentent des frais d'utilisations équivalents à ceux des voitures à pile à combustible.

Finalement, pour les frais d'entretien, on retombe sur des valeurs similaires en ce qui concerne les entretiens de base (freins, pneumatiques, pièces mobiles, moteurs électriques). Cependant, sur les véhicules à batterie, la capacité de la batterie se dégrade avec le temps et les cycles de recharge. Donc, passé un certain nombre d'années ou de kilomètres, la capacité de la batterie, et donc l'autonomie, est devenue trop faible pour être acceptable par l'utilisateur ; ce qui implique de la remplacer. Ce remplacement a un coût non négligeable pour l'utilisateur.

De manière générale, en prenant en compte tous les frais, un véhicule à hydrogène est plus cher à l'achat pour un véhicule similaire mais moins cher à l'utilisation. Cependant, malgré une utilisation moins chère, le véhicule à pile à combustible va rester plus cher sur une vie complète qu'un véhicule à batterie, si celle-ci est rechargée sur une borne publique AC ou à domicile. Le véhicule à pile à combustibles est moins cher qu'un véhicule à batterie, si celui-ci est rechargé sur borne publique rapide DC (comme on peut le voir sur la figure 2.2).

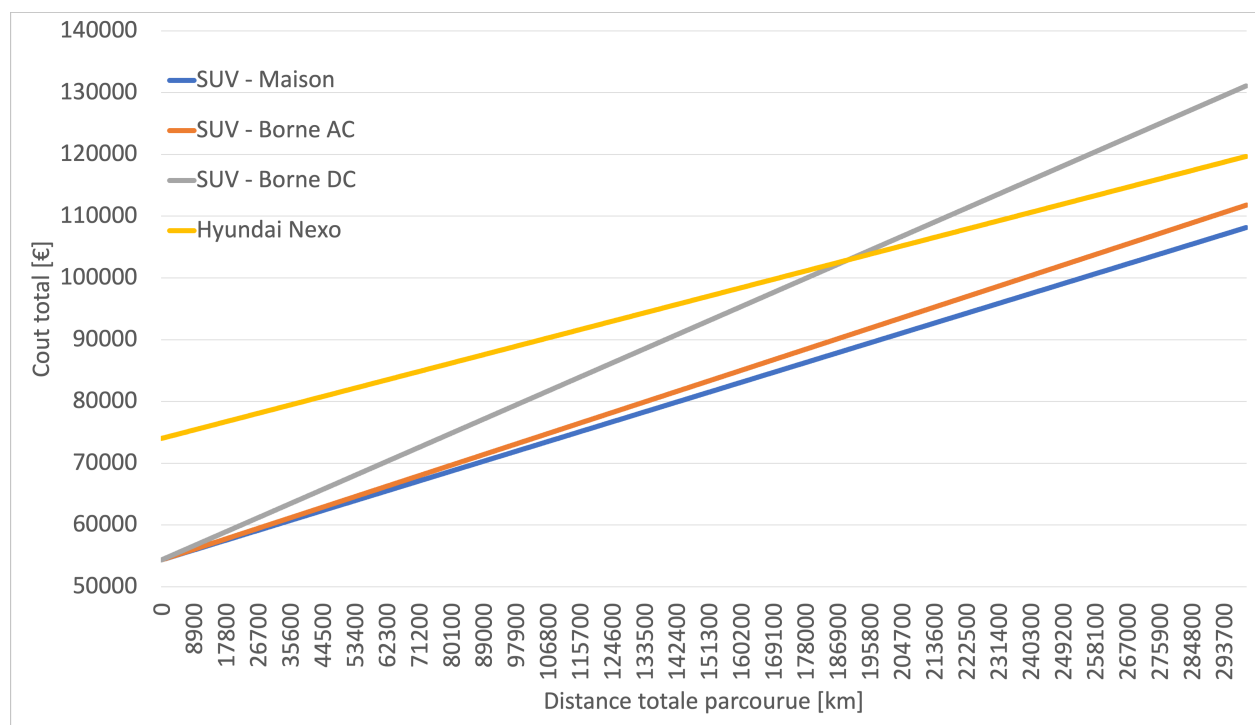


FIGURE 2.2 – Comparaison du coût total d'un véhicule électrique à batterie et à pile à combustible

Chapitre 3

Comparaison dans l'utilisation

Dans ce chapitre, nous allons effectuer la comparaison de l'utilisation des voitures électriques à batterie et des véhicules électriques à pile à combustible. Pour ce faire, on peut noter 3 critères déterminants :

- L'autonomie
- Le temps de recharge
- La proximité des stations de recharge

3.1 Autonomie

L'autonomie est un facteur de détermination à l'achat pour un bon nombre d'utilisateurs. En effet, certains profils d'utilisateurs, comme les taxis, les représentants commerciaux ou les véhicules de transport de fret, vont avoir besoin de leur véhicule pour effectuer un grand nombre de déplacements de suite ou une longue distance. Afin de pouvoir comparer les autonomies des véhicules entre eux, un nouveau protocole a été mis en place en 2017, et généralisé en 2018, le WLTP, afin que tous les véhicules commercialisés en Europe soient évalués au plus près de leur consommation et autonomie réelles. Ce protocole est plus long et plus précis que son prédécesseur, le NEDC, atteignant des vitesses plus élevées, et prenant en compte l'impact des différentes options pouvant avoir une influence. Il est aussi très intéressant de noter la forte dépendance de l'autonomie au prix du véhicule, comme présenté sur la figure 3.1.

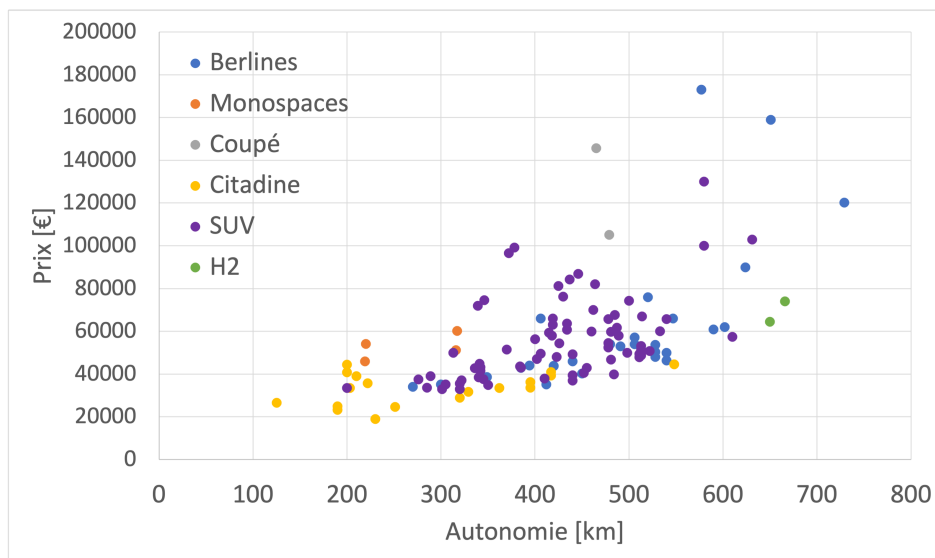


FIGURE 3.1 – Lien entre le prix et l'autonomie des véhicules électriques

3.1.1 Véhicules à batterie

Pour les véhicules électriques à batterie, les autonomies annoncées par les constructeurs suivant le protocole WLTP peuvent être assez éloignées des valeurs perçues par les utilisateurs. En effet, les comportements parfois brutaux et les conduites sportives de certains utilisateurs peuvent influencer négativement sur l'autonomie et sur la consommation du véhicule. De même que les routes vallonnées ou ayant un revêtement dégradé vont induire une augmentation de la consommation et une réduction de l'autonomie.

Pour s'approcher au maximum de l'autonomie réelle qu'un utilisateur peut rencontrer avec son véhicule, je me suis basé sur les valeurs de consommation à la borne fournies par le site Spritmonitor. Cependant, cette valeur est peu précise, car elle prend en compte non seulement la différence entre la consommation réelle et théorique des véhicules, mais également les pertes à la charge.

La source choisie est un test réalisé par Autobest, une organisation regroupant des journalistes automobiles provenant de 32 pays. Le test met en compétition 15 véhicules électriques à batterie, en les faisant rouler de la charge pleine à la panne complète, en se suivant autour d'une boucle sur route ouverte autour de la ville de Terrassa en Espagne. La boucle est composée à 50% d'autoroute, à 20% de route extra-urbaine et à 30% de route urbaine. De plus, les journalistes changeaient de véhicules tous les 30km, et les systèmes d'info-divertissements

et de climatisations étaient activés à la convenance des pilotes.

Les résultats de ce test sont repris dans les tableaux en annexe et conduisent à des valeurs d'autonomie entre 74% et 98%. Avec en moyenne une autonomie réelle à 84% de l'autonomie WLTP en cycle mixte annoncée par le constructeur.

Ce qui nous permet d'estimer l'autonomie réelle à 84% de l'autonomie WLTP pour les véhicules types choisis :

Véhicule	Autonomie WLTP	Autonomie réelle estimée
Berline - BEV	506 km	425 km
Citadine - BEV	222 km	186 km
SUV - BEV	426 km	358 km

TABLE 3.1 – Autonomies des véhicules électriques à batterie

3.1.2 Véhicules à pile à combustible

Pour les véhicules à pile à combustible, obtenir l'autonomie réelle est plus aisée. En repartant de la consommation réelle relevée sur Spritmonitor (à savoir $1.06 kg_{H_2}/100km$ pour les 2 modèles de véhicules) et du volume maximal du réservoir, on obtient les autonomies suivantes :

Véhicule	Autonomie WLTP	Autonomie réelle estimée
Toyota Mirai	650 km	528 km
Hyundai Nexo	666 km	597 km

TABLE 3.2 – Autonomie des véhicules électriques à pile à combustible

3.1.3 Comparaison de l'autonomie

Pour conclure sur l'autonomie, on peut voir que les véhicules à hydrogène possèdent une autonomie réelle estimée supérieure aux véhicules électriques à batterie.

3.2 Temps de recharge

3.2.1 Véhicules à batterie

Les véhicules à batterie sont rechargés par un apport d'électricité constant au départ d'une borne ou d'une prise. Il existe autant de bornes que de puissances de recharge possibles. La puissance de recharge correspond à la vitesse à laquelle la batterie reçoit de l'énergie. Ceci a pour implication que plus la puissance fournie est grande, plus le temps de recharge va être court. On distingue 2 types de recharges :

- La recharge par courant continu
- la recharge par courant alternatif

Le courant alternatif étant le courant disponible sur le réseau électrique, il est donc disponible partout, et ce y compris à domicile, alors que le courant continu nécessite l'installation d'un convertisseur.

Recharge en courant alternatif

Les constructeurs fournissent des estimations du temps de recharge des véhicules en courant alternatif, en général sous une puissance entre 7 et 10kW. La distribution des temps de recharge AC est visible sur la figure 3.2. Et les temps médians, moyens et des véhicules types sont repris dans le tableau 3.3.

Chassis	Temps moyen	Temps médian	Temps véhicule type
Berline	7h	7h30	7h40
Citadine	4h40	4	4
SUV	6h30	6h30	5h45

TABLE 3.3 – Temps de recharge des véhicules électriques à batterie sur bornes AC

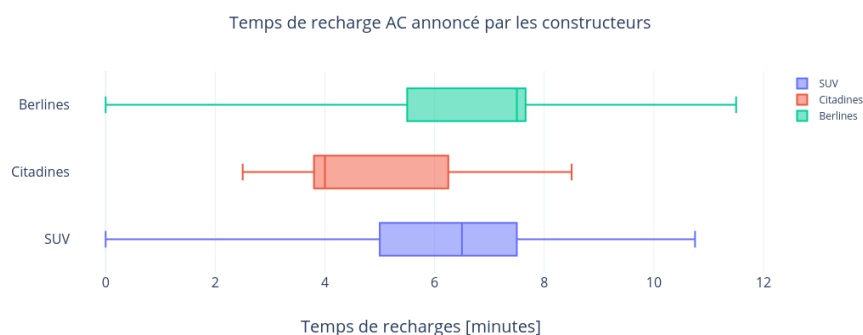


FIGURE 3.2 – Distribution des temps de recharge AC des véhicules à batterie

Recharge en courant continu

Sur la quasi totalité des modèles, il est possible de procéder à une recharge rapide en courant continu. La durée de recharge sur ce type de bornes est nettement inférieure à celle d’une recharge AC. La distribution des temps de recharge DC est visible sur la figure 3.3 et les temps moyens, médians et des véhicules types sont listés dans le tableau 3.4.

Chassis	Temps moyen	Temps médian	Temps véhicule type
Berline	46m	44m	45m
Citadine	44m	35m	30
SUV	41m	35m	32m

TABLE 3.4 – Temps de recharge des véhicules électriques à batterie sur bornes DC

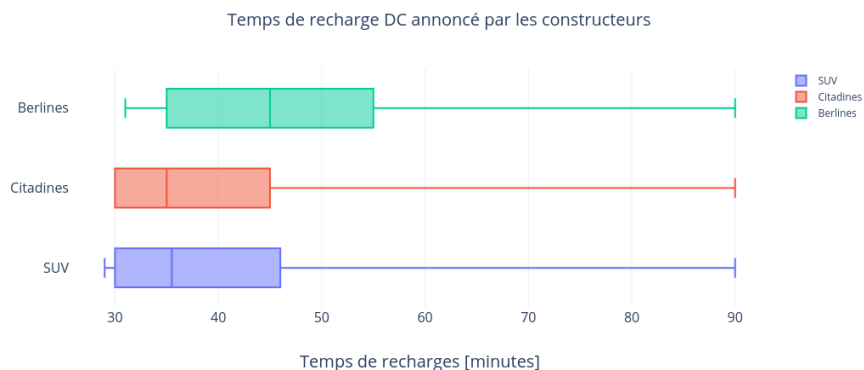


FIGURE 3.3 – Distribution des temps de recharge AC des véhicules à batterie

3.2.2 Véhicules à piles à combustibles

La recharge en hydrogène se fait uniquement dans une station dédiée et ne prend que 5 minutes.

3.2.3 Comparaison des temps de recharges

En comparant les temps de recharge des 2 types de véhicules, on voit bien que les véhicules à pile à combustible sont largement meilleurs que les véhicules à batterie.

3.3 Proximité des stations de recharge

3.3.1 Véhicules à batteries

Il est assez facile de trouver une borne de chargement pour voiture électrique en Belgique, car chaque prise électrique peut servir à recharger son véhicule bien que la vitesse des prises murales classiques soit très lente (environ 24h pour une charge complète). En dehors des prises murales, il est possible d'installer une borne AC plus rapide à domicile (typiquement pour une charge nocturne de la voiture) ou à son lieu de travail (pour la recharger pendant les heures de travail) ou encore de trouver une borne AC ou DC publique.

Comme on peut le voir sur la figure 3.4, le nombre de bornes de recharges publiques est en constante augmentation. Cependant, on peut remarquer qu'elle ne suit pas directement le nombre de véhicules qui semble monter plus rapidement. Cela reste tout de même dans les valeurs recommandées par la commission européennes de 10 véhicules par bornes.

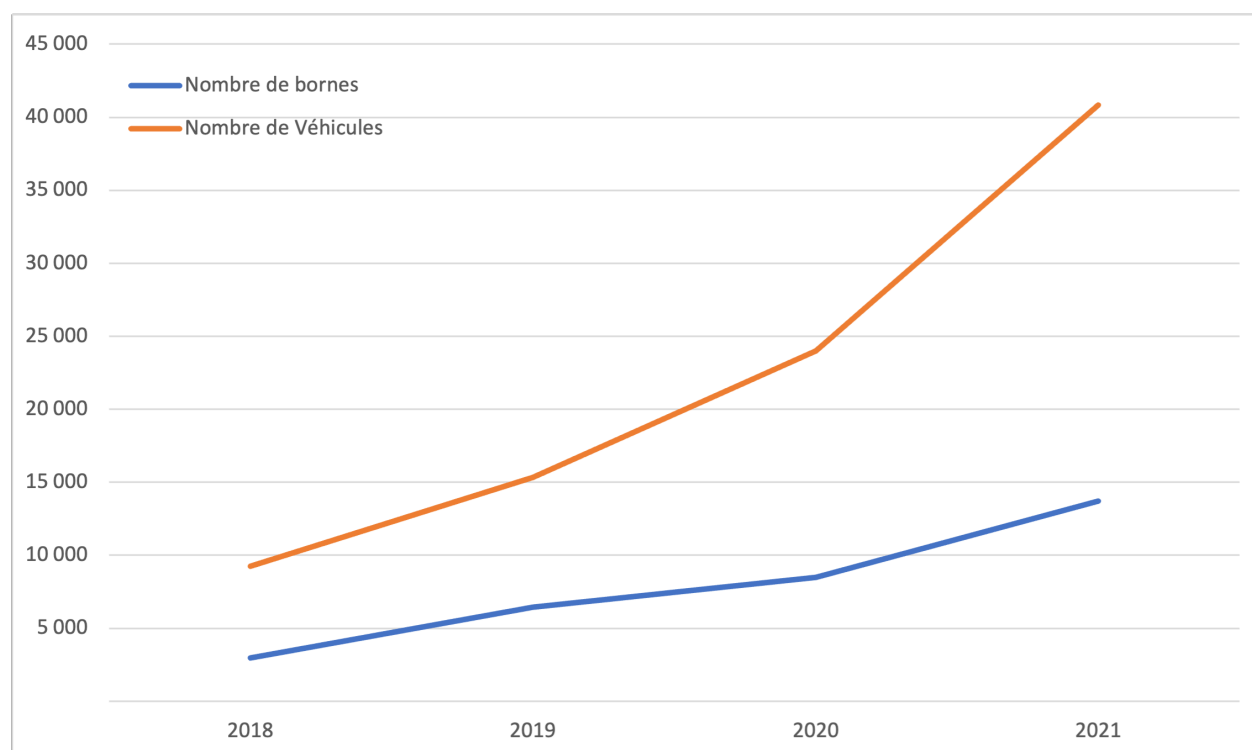


FIGURE 3.4 – Nombre de véhicules et de bornes de recharges

3.3.2 Véhicules à pile à combustible

Il n'existe actuellement, en mai 2022, que très peu de stations publiques de remplissage d'hydrogène. On en dénombre que 7 en Belgique, dont 4 ont été ouvertes depuis le début de l'année, 29 en France et 91 en Allemagne.[21][22][23]

3.4 Comparaison

En ce qui concerne l'utilisation, les 3 points de comparaison nous ont donné des résultats intéressants. En ne regardant que l'autonomie et les temps de recharge, on peut voir que la voiture à hydrogène est largement supérieure à la voiture à batterie. En effet, elle offre une plus grande autonomie pour un temps de recharge très court, limite instantanée. Cependant, le faible nombre et donc le manque de proximité des stations de recharge posent réellement problème. Il est inconcevable de posséder une voiture à hydrogène, si l'on ne vit pas à proximité d'une station.

A contrario, la voiture à batterie possède une autonomie entre 30 et 50% plus faible que la voiture à hydrogène et est handicapée par des temps de recharge plus longs ; de l'ordre de l'heure pour une charge rapide, voire d'une nuit dans le cas d'une recharge sur borne AC domestique ou publique. Mais la voiture à batterie a le grand avantage d'avoir un réseau de transport et de distribution déjà presque totalement équipé, et opérationnel sur l'ensemble du continent, le nombre de bornes étant, lui, largement supérieur au nombre de stations à hydrogène.

Chapitre 4

Comparaison environnementale

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux impacts environnementaux liés à l'utilisation des véhicules, et ensuite aux impacts environnementaux liés à leur production

4.1 Véhicules à batterie

4.1.1 Impact environnemental à l'utilisation

Consommation réelle des véhicules

En observant les consommations annoncées par les constructeurs sous protocole WLTP et les consommations réelles observées par les utilisateurs de Spritmonitor, on peut remarquer une déviation de 0 à 50% sur certains modèles, avec des valeurs moyennes reprises dans le tableau 4.1. En appliquant ces variations moyennes aux consommations de nos véhicules types on obtient les valeurs suivantes :

Véhicule type	Variation moyenne	Consommation réelle
Berlines	19%	20.47 kWh/100km
Citadines	10%	18.92 kWh/100km
SUV	23%	23.25 kWh/100km

TABLE 4.1 – Estimation des consommation réelles des véhicules à batterie

Attention, il est important de noter que la consommation dépend fortement du comportement du conducteur et de l'utilisation du véhicule. La consommation est bien plus élevée à haute vitesse et pour de grosses accélérations, que à faible vitesse ou pour des accélérations

douces. Les données de Spritmonitor ne sont donc pas à prendre comme des données générales, mais comme une visualisation des comportements empiriques moyens des utilisateurs partageant leurs données sur Spritmonitor. Ces consommations sont bien le rapport entre l'énergie fournie au véhicule par la borne, et la distance parcourue, ce qui prend en compte non seulement le comportement du conducteur mais également les pertes à la charge.

Rendement du réseau de transport et de distribution d'électricité

Pour prendre la bonne mesure de l'énergie réelle consommée, il faut donc prendre en compte tous les rendements de la production à la charge ; ce qui inclut les pertes sur le réseau de distribution et transport. En Belgique, selon le bilan annuel 2020 d'Elia, le gestionnaire du réseau électrique belge, le taux de perte sur le réseau de transport s'élevait à 1.45% pour les heures pleines et à 1.35% pour les heures creuses. Ceci donne des rendements de transport aux heures pleines et creuses respectivement de 98.55% et de 98.65%.[24]

En France, selon le Bilan 2021 de RTE, le gestionnaire du réseau électrique français, le taux de perte pour l'année 2021 s'élevait à 2.28%[25]. Ce qui amène le rendement du réseau de transport à 97.72%. En ce qui concerne le réseau de distribution, Enedis, estime son taux de pertes sur son réseau de distribution pour 2019 à 6.11%.[26]

Il est donc tout à fait crédible d'estimer une perte sur le réseau de distribution de 6% et une perte sur le réseau de transport de 2%.

Émissions à la production d'électricité

Les émissions dues à la production d'électricité sont dépendantes de la technologie avec laquelle elle est produite. Selon le GIEC en 2014, les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie des différentes technologies varie de 11 à 820 $g_{eq.CO_2}/kWh$ et sont reprises dans le tableau 4.2.[5]

En prenant donc en compte maintenant les rendements des réseaux de transport et distribution, ainsi que la consommation réelle entre la charge et l'utilisation, nous obtenons donc les valeurs suivantes pour les différentes technologies et les différents châssis.

Technologie	Em. [$g_{eq.CO_2}/kWh$]	Berline [g/km]	Citadine [g/km]	SUV [g/km]
Éolien	12	2,67	2,46	3,03
Solaire	41	9,11	8,42	10,35
Hydraulique	24	5,33	4,93	6,06
Nucléaire	12	2,67	2,46	3,03
Gaz	490	108,88	100,64	123,67
Charbon	820	182,21	168,42	206,96

TABLE 4.2 – Émissions induites par moyen de production d'électricité de chaque type de véhicules à batterie

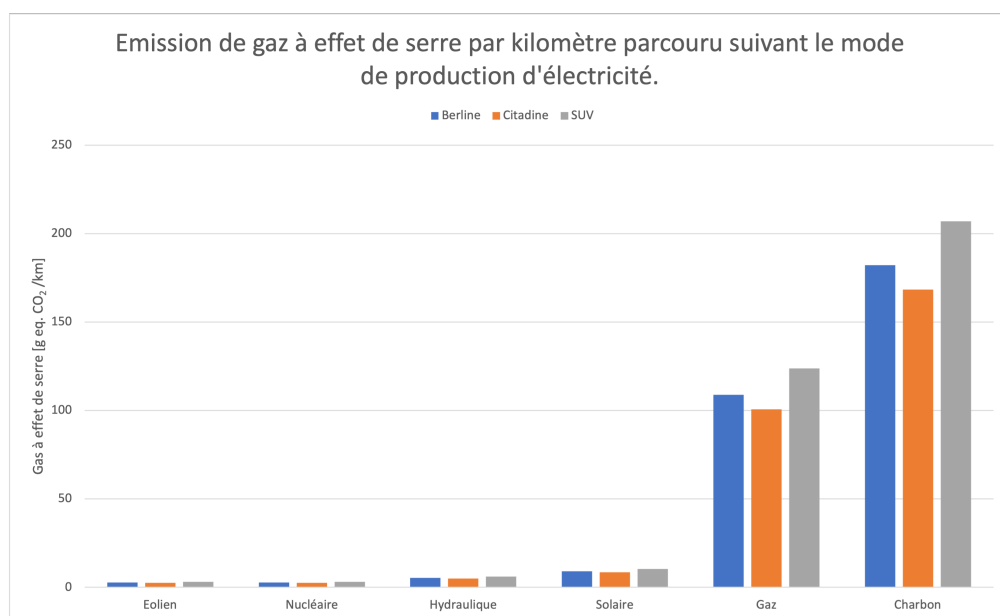


FIGURE 4.1 – Comparaison des émissions induites par moyen de production d'électricité de chaque type de véhicules à batterie

Cependant, l'électricité fournie n'est pas issue d'une et une seule technologie. Chaque pays possède son propre mix électrique ayant des sources plus ou moins émettrices de CO₂. Pour la Belgique, la France, l'Allemagne et la moyenne de l'union européenne en 2019, les émissions sont reprises dans le tableau 4.3 ainsi que les émissions au kilomètre parcouru par les différents châssis.

Pays	Em. [$g_{eq.CO_2}/kWh$]	Berline [g/km]	Citadine [g/km]	SUV [g/km]
France	44	9,78	9,04	11,11
Belgique	134	29,78	27,52	33,82
Allemagne	397	88,22	81,54	100,20
EU-28	267	59,33	54,84	67,39

TABLE 4.3 – Émissions induites par pays de chaque type de véhicules à batterie

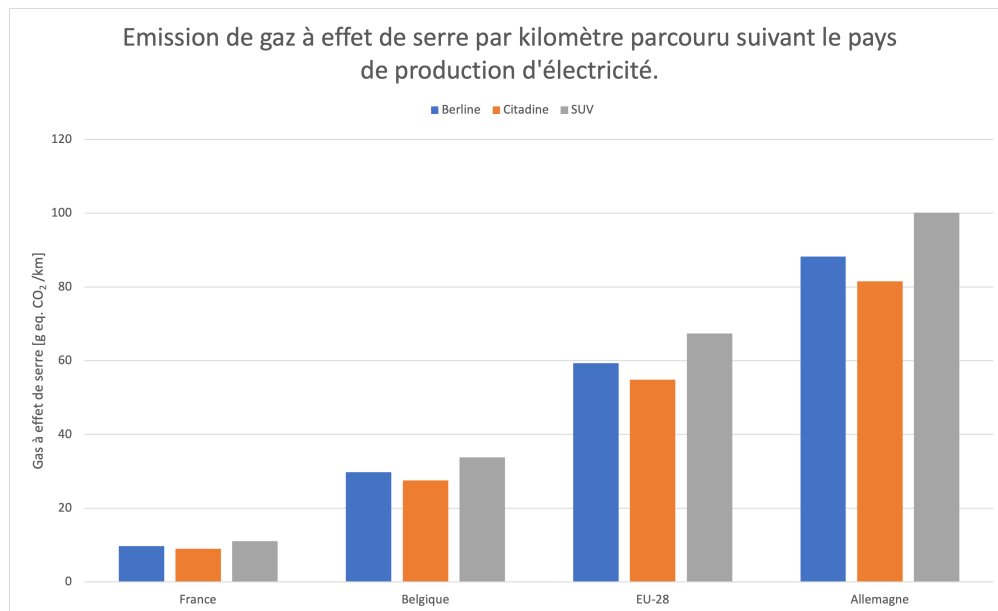


FIGURE 4.2 – Comparaison des émissions induites par pays de chaque type de véhicules à batterie

4.1.2 Impacts environnementaux à la production

Production de la batterie

Selon l'article de Hoekstra et al. de 2019, la comparaison de différentes sources de différents pays a conclu à une estimation moyenne induite de $65 \text{ } kg_{eq.CO_2}/kWh$. [27] Ceci donne pour chaque véhicule type les valeurs d'émissions suivantes à la production de la batterie :

Batterie	Capacité [kWh]	Emissions [$kg_{eq.CO_2}$]
Berline	77,4	5031
Citadine	35,5	2307,5
SUV	66,5	4322,5

TABLE 4.4 – Émissions induites par la production de la batterie

Production de la voiture entière

Selon Burbeger et al. en 2022, on peut estimer que les émissions de gaz à effet de serre lors de la production de la voiture hors batterie sont équivalentes à $4,65 kg_{eq.CO_2}/kg_{veh.}$ [28] Ce qui donne les émissions suivantes à la production des véhicules types :

Châssis	m [kg]	$Em_{prod.voit.} [kg_{eq.CO_2}]$	Bat. [kWh]	$Em_{prod.Bat.} [kg_{eq.CO_2}]$	$Em_{tot.prod.} [kg_{eq.CO_2}]$
Berline	1433	6534,48	77,4	5031	11575,48
Citadine	1286	5864,16	35,5	2307,5	8171,66
SUV	1625	7410	66,5	4322,5	11732,5

TABLE 4.5 – Émissions induites par la production de la voiture entière

On se rend donc compte que les émissions à la production d’une berline et d’un SUV sont similaire, alors que les émissions à la production d’une citadine sont 30% inférieures.

4.1.3 Impacts environnementaux totaux

Comme on peut le voir sur les figures 4.3 et de C.1 à C.6 en annexe, les véhicules à batterie circulant en Allemagne sont plus de 2 fois plus polluants sur une durée de vie complète, que les véhicules à batterie circulant en France, voire plus de 3 fois dans le cas d’une citadine.

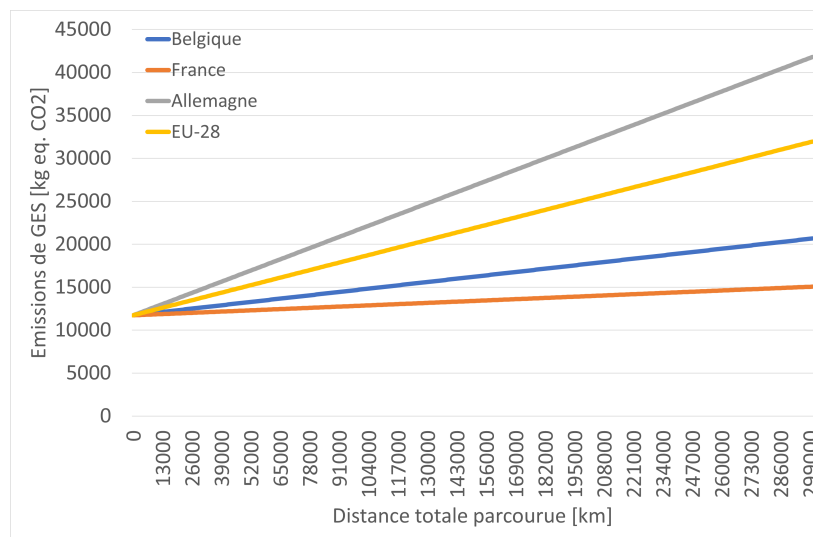


FIGURE 4.3 – Émissions induites sur l’ensemble de la vie du véhicule

4.2 Véhicules à pile à combustible

4.2.1 Impacts environnementaux à l'utilisation

Consommation d'hydrogène réelle

Tout comme pour les véhicules électriques à batterie, les données du site Spritmonitor ont été compilées, afin d'obtenir la consommation réelle des véhicules à pile à combustible. Les 2 modèles de véhicules à hydrogène révèlent tous les 2 une consommation réelle de $1,06 \text{ kg}_{H_2}/100\text{km}$.

Émissions liées à la production d'hydrogène

Pour les différents procédés de production de l'hydrogène, en se référant au travail des chercheurs de l'université de Tsinghua à Beijing en 2021 publié dans le journal international de l'hydrogène, on obtient les valeurs présentées dans le tableau 4.6 par kg d'hydrogène produit[7], et pour les véhicules par kilomètres effectués.

Technologies	Emissions [$\text{kg}_{\text{eq.CO}_2}/\text{kg}_{H_2}$]	Emissions [$\text{g}_{\text{eq.CO}_2}/\text{km}$]
SMR	11,98	126,99
CG	22,99	243,69
Electrolyse - Nucléaire	0,71	7,53
Electrolyse - Eolien	1,08	11,45
Electrolyse - Solaire	1,82	19,29

TABLE 4.6 – Émissions induites à l'utilisation d'une voiture à pile à combustible en fonction du mode de production de l'hydrogène

Ne connaissant pas les émissions liées à la production d'hydrogène lorsque celui-ci est un co-produit d'un procédé servant à produire autre chose, nous allons repartir de la valeur totale des émissions liées à la production d'hydrogène fournis par l'agence internationale de l'énergie, et de la quantité totale d'hydrogène produite sur la même année, pour estimer les émissions par kg produit. L'A.I.E. nous fournit les chiffres de 900 Mt d'équivalent CO_2 pour 90 Mt d' H_2 produites ; ce qui donne $10 \text{ kg}_{\text{eq.CO}_2}/\text{kg}_{H_2}$. Ce qui est du même ordre de grandeur que les émissions des différentes technologies et le mix fournis par l'A.I.E. [6]

Ceci donne une émission de gaz à effet de serre indirecte des véhicules à pile à combustible de $106 \text{ g}_{\text{eq.CO}_2}/\text{km}$ pour le mix de production actuel.

4.2.2 Émissions à la production

Toujours selon Burbeger et al. en 2022[28], on peut estimer que les émissions de gaz à effet de serre lors de la production de la voiture hors batterie sont équivalentes à $4,65 kg_{eq.CO_2}/kg_{veh.}$. Pour les batteries, l'article de Hoekstra et al. de 2019[27] qui a comparé différentes sources de différents pays conclut à une estimation de 65 kg de CO_2 par kWh. Ceci donne les émissions suivantes à la production :

Véhicule	m [kg]	$Em_{prod.voit.}$	Bat. [kWh]	$Em_{prod.Bat.}$	$Em_{tot.prod.}$
Toyota Mirai	1900	$8835 kg_{eq.CO_2}$	1,24	$80,6 kg_{eq.CO_2}$	$8915,6 kg_{eq.CO_2}$
Hyundai Nexo	1814	$8435,1 kg_{eq.CO_2}$	1,56	$101,4 kg_{eq.CO_2}$	$8536,5 kg_{eq.CO_2}$

TABLE 4.7 – Émissions induites par la production du véhicule à pile à combustible entier

4.2.3 Impacts environnementaux totaux

Comme on peut le voir sur la figure 4.4, les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie sont sensiblement différentes. En effet, dans le cas où l'hydrogène serait produit par une électrolyse alimentée à l'électricité éolienne, les émissions sont de l'ordre de 10 fois plus faibles.

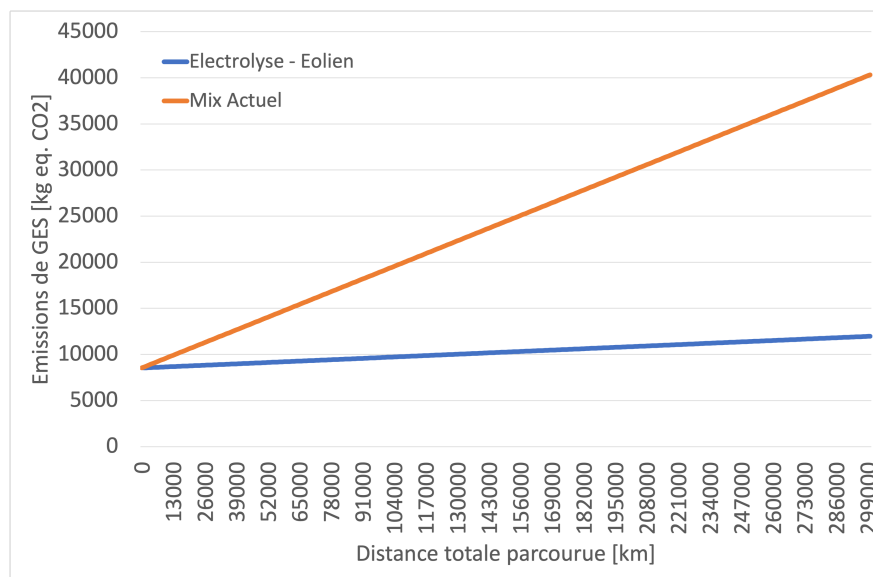


FIGURE 4.4 – Impact environnemental total des véhicules à pile à combustible

4.3 Comparaison

Tout d'abord en ce qui concerne les émissions liées à la production, on remarque que les véhicules à batterie émettent plus que les véhicules à pile à combustible. Cela est lié à la batterie, dont la production induit 10 fois plus d'émissions par kg que le reste de la voiture.

Ensuite, en regardant le cycle complet, on constate que dans l'état actuel des choses, il est bien plus intéressant d'un point de vue des rejets, de rouler avec une voiture électrique, à moins de se trouver dans un pays comme l'Allemagne, avec une électricité à haute intensité carbone, où les émissions totales restent légèrement supérieures à un véhicule à hydrogène. Cependant, la figure 4.5 nous montre que lorsque l'hydrogène est produit par une électrolyse fonctionnant sur base d'électricité éolienne comme sur le site d'électrolyse en Bretagne[12] ou à Ostende[11], on se retrouve dans une situation, où les véhicules à hydrogène sont bien moins émetteurs de gaz à effet de serre.

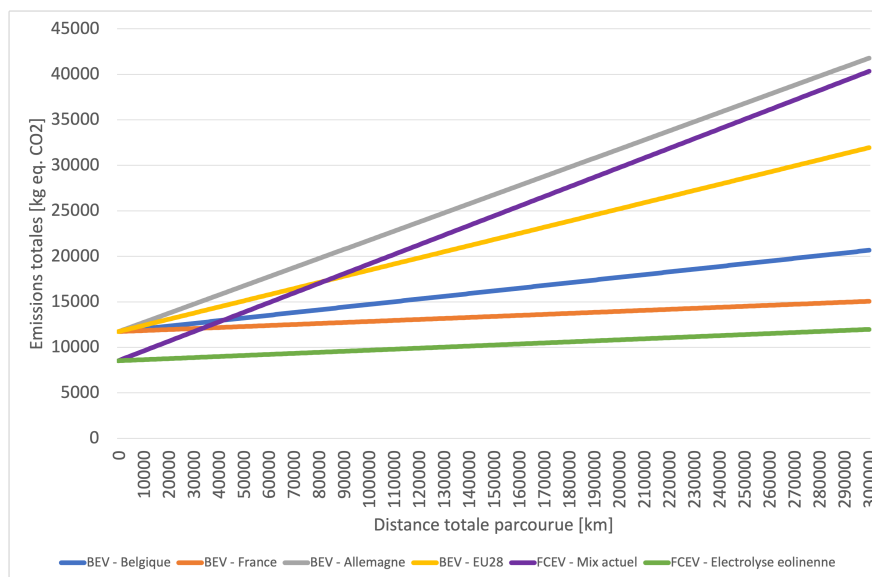


FIGURE 4.5 – Comparaison des impacts environnementaux totaux des véhicules à pile à combustible

Chapitre 5

Conclusion

En conclusion, on peut voir que les véhicules électriques à batteries sont d'un point de vue économique actuellement bien meilleur que les véhicules à piles à combustibles. En effet ils sont moins cher à l'achat et à l'utilisation en prenant en compte les recharges et les entretiens, sauf dans le cas où la recharge se fait exclusivement sur bornes publiques rapides à courant continu, auquel cas le coût total devient supérieur pour une durée de vie de plus de 190.000 km.

Au niveau de la facilité d'utilisation, les véhicules à pile à combustible se démarquent. En effet, l'autonomie est de 50 à 100% plus élevée et le temps de recharge est incomparablement plus court que pour un véhicule à batterie. On parle de 5 minutes pour un plein d'hydrogène, contre une recharge de l'ordre de l'heure sur bornes rapides DC ,à plusieurs heures sur bornes domestique ou publique AC, voire une journée sur prise secteur en fonction de la puissance électrique fournie. Ceci peut impliquer de devoir garer son véhicule assez loin de chez soi, afin de trouver une borne de recharge publique, si l'on n'a pas la possibilité d'en installer une à son domicile. Cependant, ces avantages sont limités par la faible densité de stations à hydrogène qui limite le nombre de possibles utilisateurs en raison de l'éloignement potentiel et de la dépendance à la proximité d'une station pour les déplacements plus longs, ce qui peut être réellement handicapant pour l'utilisateur. Il est intéressant de noter tout de même que l'autonomie proposée par les véhicules à batterie est suffisante pour des déplacements classiques du quotidien (domicile-travail, école, courses, etc.). L'autonomie allongée des véhicules à hydrogène n'est nécessaire que pour certains profils d'utilisateurs comme les taxis, les représentants de commerce, les livreurs, en résumé les profils ayant besoin de parcourir de longues distances sans avoir le temps de s'arrêter pour recharger.

Pour finir, au niveau de l'impact environnemental, à l'heure actuelle dans les pays dont l'électricité est assez peu carbonée, comme la France ou la Belgique, il est plus intéressant de se tourner vers un véhicule électrique à batterie. Par contre, à l'avenir, avec l'augmentation des sources d'électricité renouvelables et l'installation de production d'hydrogène par électrolyse, les véhicules à pile à combustible pourraient se révéler être plus écologique que les véhicules à batterie.

Actuellement, le choix d'un véhicule électrique à pile à combustible à la place d'un véhicule électrique à batterie se fera donc pour les utilisateurs ayant besoin de faire de très long trajets avec peu de temps d'arrêts et une certaine indépendance du trajet afin de pouvoir passer par des stations de recharges. Pour d'autres utilisateurs ayant un profil de transport plus classique, faisant plutôt des trajets quotidiens domicile-travail en journée, il sera moins cher de s'équiper d'un véhicule électrique à batterie, qui possède une autonomie suffisante pour effectuer ce genre de trajet, ainsi que d'une borne de recharge à domicile AC pour une recharge nocturne. Ce qui est largement suffisant pour cette utilisation.

Bibliographie

- [1] C. Buysse & J. MILLER. *Transport could brun up the EU's entire carbon budget*. 2018. URL : <https://theicct.org/transport-could-burn-up-the-eus-entire-carbon-budget> (visité le 24/05/2022).
- [2] WIKIPEDIA. *L'affaire Volkswagen*. Mai 2022. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Affaire_Volkswagen (visité le 24/05/2022).
- [3] STATBEL. *Parc de véhicule*. 2021. URL : <https://statbel.fgov.be/fr/themes/mobilite/circulation/parc-de-vehicules#panel-11> (visité le 24/05/2022).
- [4] P. Bauer & G. R. C. Mouli A. HOEKSTRA M. Wagemaker. *DelftX eCARS2X Electric Cars : Technology*. n.d.
- [5] Steffen SCHLOEMER et al. "Annex III : Technology-specific cost and performance parameters". English. In : *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change*. Sous la dir. d'O EDENHOFER et al. This annex should be cited as : Schl mer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wiser, 2014 : Annex III : Technology-specific cost and performance parameters. In : *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schl mer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. United Kingdom : Cambridge University Press, 2014, p. 1329-1356. ISBN : 978-1-107-65481-5.
- [6] International Energy AGENCY. *Global Hydrogen Review 2021*. 2021. URL : <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>.

- [7] Mengdi JI et Jianlong WANG. “Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators”. In : *International Journal of Hydrogen Energy* 46.78 (2021), p. 38612-38635. ISSN : 0360-3199. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.142>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921036697>.
- [8] S. GIOVANNINI. *L’hydrogène et ses 50 nuances de gris, vert, bleu ...* Nov. 2020. URL : <https://energy-cities.eu/fr/lhydrogene-et-ses-50-nuances-de-gris-vert-bleu/> (visité le 24/05/2022).
- [9] BELGA. *Vents forts en Europe : les prix de l’électricité sont devenus négatifs ce week-end*. Déc. 2019. URL : <https://www.rtbef.be/article/vents-forts-en-europe-les-prix-de-l-electricite-sont-devenus-negatifs-ce-week-end-10383741> (visité le 24/05/2022).
- [10] G. GUICHARD. *L’électricité s’est bradée brièvement à prix négatifs*. Nov. 2020. URL : <https://www.lefigaro.fr/societes/l-electricite-s-est-bradee-brievement-a-prix-negatifs-20201102> (visité le 24/05/2022).
- [11] CFE GROUP. *HYPORT : UNE USINE D’HYDROGÈNE VERT À OSTENDE*. Jan. 2020. URL : <https://www.cfe.be/fr/hyportr-une-usine-dhydrogene-vert-ostende> (visité le 24/05/2022).
- [12] T. GRASLAND. *Produire de l’hydrogène vert dans les Côtes-d’Armor... oui, mais pour quels usages ?* Sept. 2021. URL : <https://www.ouest-france.fr/bretagne/saint-brieuc-22000/produire-de-l-hydrogene-vert-dans-les-cotes-d-armor-oui-mais-pour-quels-usages-bb6512d4-0c08-11ec-a9d0-17d58ac484e5> (visité le 24/05/2022).
- [13] F. NORMAND. *L’hydrogène vert est rendu moins cher que l’hydrogène gris*. Mars 2022. URL : <https://www.lesaffaires.com/secteurs-d-activite/ressources-naturelles/l-hydrogene-vert-est-rendu-moins-cher-que-l-hydrogene-gris/631636> (visité le 24/05/2022).
- [14] Global Petrol PRICE. *Prix de l’électricité dans le monde*. Sept. 2021. URL : https://fr.globalpetrolprices.com/electricity_prices/ (visité le 24/05/2022).
- [15] B. WATTENBERGH. *À combien revient le rechargement d’une voiture électrique chez soi ?* Oct. 2021. URL : <https://www.rtl.be/info/belgique/economie/combien-coute-de-le-rechargement-d-une-voiture-electrique-chez-soi-ou-sur-une-borne-publique--1330965.aspx> (visité le 24/05/2022).

- [16] V. Hayez - TOURING.BE. *L'hydrogène, carburant idéal pour nos voitures ?* Jan. 2021. URL : <https://www.touring.be/fr/articles/lhydrogene-carburant-ideal-nos-voitures#:~:text=En%5C%20Belgique%5C%2C%5C%201%5C%27hydrog%C3%A8ne%5C%20est,%5C%E2%82%AC%5C%209%5C%2C9%5C%2Fkg.> (visité le 24/05/2022).
- [17] Auto News GREEN. *Hydrogène*. 2022. URL : <https://www.autonews.fr/green/voiture-hydrogene#:~:text=Quant%5C%20au%5C%20plein%5C%20d%5C%27hydrog%C3%A8ne, en%5C%20embarquent%5C%206%5C%20kg%5C%20environ.> (visité le 24/05/2022).
- [18] THEFREEPRESS. *Platts lance les prix de la pompe à hydrogène en Allemagne, au Japon et en Californie*. Sept. 2021. URL : <https://thepressfree.com/platts-lance-les-prix-de-la-pompe-a-hydrogene-en-allemande-au-japon-et-en-californie/> (visité le 24/05/2022).
- [19] Y. NUSSBAUMER. *Quel est le coût d'entretien d'une voiture électrique ?* Avr. 2022. URL : <https://www.automobile-propre.com/dossiers/cout-dentretien-dune-voiture-electrique/> (visité le 24/05/2022).
- [20] BEEV. *Quel est le prix de la batterie d'une voiture électrique ?* Avr. 2022. URL : <https://www.beev.co/voitures-electriques/prix-batterie-voiture-electrique/> (visité le 24/05/2022).
- [21] R. FREY. *Stations-service d'hydrogène en Belgique à Mai 2022*. Mai 2022. URL : <https://www.glpautogas.info/fr/stations-hydrogene-belgique.html> (visité le 24/05/2022).
- [22] R. FREY. *Stations-service d'hydrogène en Allemagne à Mai 2022*. Mai 2022. URL : <https://www.glpautogas.info/fr/stations-hydrogene-allemande.html> (visité le 24/05/2022).
- [23] R. FREY. *Stations-service d'hydrogène en France à Mai 2022*. Mai 2022. URL : <https://www.glpautogas.info/fr/stations-hydrogene-france.html> (visité le 24/05/2022).
- [24] ELIA. *Pertes actives sur le réseau 380-220-150 kV : Rapport annuel 2020*. 2021.
- [25] R.T.E. *Consommation pertes électriques*. 2022. URL : <https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/consommation-pertes-electriques/#1> (visité le 24/05/2022).
- [26] ENEDIS. *Bilan électrique ENEDIS : analyse annuelle 2019*. 2020.

- [27] Auke HOEKSTRA. “The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions”. In : *Joule* 3.6 (2019), p. 1412-1414. ISSN : 2542-4351. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.002>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435119302715>.
- [28] Johannes BUBERGER et al. “Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars”. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159 (2022), p. 112158. ISSN : 1364-0321. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112158>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122000867>.

Annexe A

Caractéristiques des véhicules

A.1 Véhicules à batterie

Noms des colonnes des tableaux :

1. Le prix d'achat minimum hors bonus, primes ou remises en euros.
2. La puissance du moteur électrique en kW
3. L'autonomie annoncée par le constructeur en protocole WLTP en kilomètre
4. Le temps de recharge sur borne DC avec une puissance maximale de 100kW en minute
5. Le temps de recharge sur borne AC avec une puissance maximale de 10 kW en heure
6. La capacité nette de la batterie en kWh
7. La consommation en cycle mixte WLTP en kWh/100km
8. La consommation réelle constatée par les utilisateurs de Spritmonitor en kWh/100km
9. L'autonomie en condition réelle mesurée par Autobest en km

A.1.1 SUV

Modèle	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Aiways U5 Standard	37.900	150	410	35	10	63	16,60	24,24	NC
Audi e-tron 50 quattro	71.900	230	339	60	6,50	71	25,50	25,49	NC
Audi e-tron 50 quattro Sb.	74.500	230	346	60	6,50	71	25,20	NC	NC
Audi e-tron 55 quattro	84.200	265	437	60	8,50	95	26	25,86	NC
Audi e-tron 55 quattro Sb.	86.800	265	446	60	8,50	95	25,70	NC	NC
Audi e-tron S	96.600	370	372	60	8,50	95	28,40	NC	NC

Modèle	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Audi e-tron S Sb.	99.200	370	378	60	8,50	95	28	NC	NC
Audi Q4 35 e-tron	42.800	125	336	30	NC	55	18,80	NC	NC
Audi Q4 35 e-tron Sb.	44.800	125	341	30	NC	55	18,60	NC	NC
Audi Q4 40 e-tron	48.700	150	513	30	7,50	82	19,10	NC	NC
Audi Q4 40 e-tron Sb.	50.700	150	522	30	7,50	82	18,80	NC	NC
Audi Q4 45 e-tron quattro	59.700	195	481	30	7,50	82	19,50	NC	NC
Audi Q4 45 e-tron quattro Sb.	61.700	195	487	30	7,50	82	19,40	NC	NC
Audi Q4 50 e-tron quattro	65.700	220	478	30	7,50	82	21,20	NC	NC
Audi Q4 50 e-tron quattro Sb.	67.700	220	485	30	7,50	82	19,50	NC	NC
BMW iX xDrive 40	81.200	240	425	31	7,25	76	21	NC	NC
BMW iX xDrive 50	102.850	385	631	35	10,75	111,50	21,40	NC	NC
BMW iX3 M Sport	69.950	210	462	32	7,50	73,80	18,90	20,69	NC
Citroën ë-Berlingo	33.627	100	285	NC	NC	50	17,50	NC	NC
Citroën ë-C4	34.900	100	350	30	5	50	16,20	20,86	262,54
DS 3 Crossback e-tense	38.400	100	340	30	8	50	16,10	NC	NC
Ford Mustang Mach-e AWD-E	65.725	216	540	45	6,50	99	18,70	26,46	NC
Ford Mustang Mach-e AWD-S	56.250	198	400	38	5	76	19,50	26,46	NC
Ford Mustang Mach-e GT	74.300	358	500	45	6,50	99	20	NC	NC
Ford Mustang Mach-e RWD-E	57.450	216	610	45	6,50	99	16,50	21,70	NC
Ford Mustang Mach-e RWD-S	49.300	198	440	38	5	76	17,20	NC	NC
Hyundai Ionic 5 58	43.600	125	384	29	5	58	16,70	22,70	NC
Hyundai Ionic 5 73	46.800	160	481	39	6,15	73	16,80	24,66	NC
Hyundai Ionic 5 73 HTRAC	59.900	225	460	39	6,15	73	17,70	NC	NC
Hyundai Kona electric 39	35.100	104	305	47	6	39	14,30	NC	NC
Hyundai Kona electric 64	39.900	170	484	47	9,25	64	14,70	16,06	NC
Jaguar I-Pace	82.075	294	464	90	9,25	90	25,20	22,64	NC
Kia e-Niro 39,2	39.040	100	289	54	4,50	39,20	15,30	NC	NC
Kia e-Niro 64	42.940	150	455	54	7	64	15,90	16,95	433,35
Kia e-Soul 39,2	37.490	100	276	54	4,50	39,20	15,60	NC	NC
Kia e-Soul 64	40.590	150	452	54	7	64	15,70	16,10	NC
Lexus UX 300e	49.990	150	313	50	8,25	54,30	17	NC	NC
Mazda MX-30	33.490	107	200	36	5	35,50	19	19,96	183,32
Mercedes EQA 250	54.329	140	426	32	5,75	66,50	18,90	23,19	NC
Mercedes EQA 300	60.742	168	434	30	5,75	66,50	18,50	25,03	NC
Mercedes EQA 350	63.646	215	434	30	5,75	66,50	18,50	NC	NC
Mercedes EQB 300	63.041	168	419	32	5,75	66,50	19,20	NC	NC
Mercedes EQB 350	65.945	215	419	32	5,75	66,50	19,20	NC	NC
Mercedes EQC 400	76.230	300	430	40	7,50	80	23,60	30,29	NC
MG Marvel R Luxury	46.985	132	402	43	3	70	19,40	NC	NC
MG Marvel R Performance	51.485	212	370	43	3	70	20,90	NC	NC
MG ZS EV Comfort Long	36.985	115	440	40	4,66	72	17,80	17,46	NC
MG ZS EV Comfort Standard	32.985	130	320	44	5,50	51	17,30	NC	NC
MG ZS EV Luxury Long	39.485	115	440	60	4,66	72	17,80	18,72	NC
MG ZS EV Luxury Standard	35.485	130	320	44	5,50	51	17,30	19,05	NC

Modèle	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Opel Mokka-e	37.050	100	322	30	4	50	17,80	NC	NC
Peugeot e-2008	37.650	100	345	30	4	50	16	21,83	NC
Seres 3	32.990	120	301	30	8	53	18	22,10	NC
Skoda Enyaq iV	43.090	132	385	NC	6,25	58	16,90	25,51	NC
Skoda Enyaq iV	49.890	150	498	NC	7,50	77	17,40	24,84	NC
Skoda Enyaq iV	52.470	195	478	NC	7,50	77	18,40	NC	NC
Tesla Model X	99.990	350	580	43	6,50	95	22,60	22,55	NC
Tesla Model X Plaid	129.990	750	580	43	6,50	95	22,60	NC	NC
Tesla Model Y long Range	59.990	258	533	33	5	72,50	14,40	25,31	NC
Tesla Model Y Performance	66.990	340	514	33	5	72,50	15,10	NC	NC
Volvo C40 Recharge	49.550	170	406	56	7	67	19,40	NC	NC
Volvo C40 Recharge Twin	59.400	300	415	68	8	75	22,30	NC	NC
Volvo XC40 Recharge	48.050	170	423	32	7	69	19,70	28,14	NC
Volvo XC40 Recharge Twin	57.900	300	418	32	8	78	25	NC	NC
VW ID 4 GTX	54.450	220	478	35	5	77	18,90	21,57	NC
VW ID 4 Pro	47.800	128	511	35	5	77	18	NC	NC
VW ID 4 Pro Performance	49.400	150	511	35	5	77	18	21,36	NC
VW ID 4 Pure	41.500	109	342	35	5	52	17,40	NC	NC
VW ID 4 Pure Performance	43.100	125	342	35	5	52	17,40	NC	NC
VW ID 5 GTX	57.950	220	489	36	7,50	77	18,70	NC	NC
VW ID 5 pro	51.450	128	513	29	7,50	77	17,80	NC	NC
VW ID 5 Pro Performance	53.050	150	513	29	7,50	77	17,80	NC	NC
Moyenne	56.372	196	426	41	6,50	70,75	19,10	22,59	293,07
Mediane	51.467	169	432	35	6,50	72,25	18,55	22,60	262,54

A.1.2 Monospaces

Modèle	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Citroën ë-SpaceTourer 50	45.928,00	100,00	219,00	30,00	4,75	50,00	NC
Citroën ë-SpaceTourer 75	51.179,00	100,00	316,00	45,00	7,00	75,00	NC
Opel Zafira e-life 50	54.118,00	100,00	220,00	30,00	5,00	50,00	25,30
Opel Zafira e-life 75	60.118,00	100,00	317,00	40,00	7,00	75,00	26,70
Moyenne	52.835,75	100,00	268,00	36,25	5,94	62,50	26,00
Médiane	52.648,50	100,00	268,00	35,00	6,00	62,50	26,00

A.1.3 Berlines

Modèle	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
BMW i4 eDrive40	60.800	250	590	31	8,25	83,90	19,10	22,30	NC
BMW i4 M50	75.900	400	520	31	8,25	83,90	22,50	NC	NC
Cupra Born V 45	38.646,86	110	349	31	6,25	45	15	NC	NC
Cupra Born V 58	43646,85	150	420	35	7,50	58	16,80	21,69	339,11
Cupra Born V eboost 58	43856,85	170	420	35	7,50	58	NC	NC	NC
Cupra Born V eboost 77	46306,86	170	540	NC	NC	77	NC	NC	NC
Hyundai Ioniq Electric	35.200	100	412	55	6	38,30	13,80	14,29	NC
Kia EV6 Air 58	43.990	125	394	40	6	58	16,60	21,61	NC
Kia EV6 Air 77	47.990	168	528	45	7,66	77,40	16,60	22,10	NC
Kia EV6 Earth AWD	53.890	239	506	45	7,66	77,40	17,20	NC	NC
Kia EV6 Earth RWD	50.390	168	528	45	7,66	77,40	16,60	NC	NC
Kia EV6 GT	65.990	429	406	45	7,66	77,40	19,10	NC	NC
Kia EV6 GT Line RWD	53.690	168	528	45	7,66	77,40	16,60	NC	NC
Kia EV6 GT Line AWD	57.190	239	506	45	7,66	77,40	17,20	NC	NC
Mercedes EQS 350	89.903	215	624	50	4,75	90	20	NC	NC
Mercedes EQS 450+	120.153	245	729	60	5,50	107,80	19,80	NC	NC
Mercedes EQS 53 AMG	173.030	484	577	60	5,50	107,80	23,40	NC	NC
Mercedes EQS 580	158.873	385	651	60	5,50	107,80	21,30	NC	NC
Nissan Leaf 40	34.070	110	270	60	7,50	39	17,10	16,94	NC
Nissan Leaf 62	42.920	160	385	90	11,50	59	18,50	19,17	311,06
Polestar 2 L.R. dual	53.900	300	480	35	8	78	19,40	25,11	NC
Polestar 2 L.R. single	49.900	170	540	35	8	78	17,10	21,92	NC
Polestar 2 S.R. single	45.900	165	440	35	7	64	16,70	NC	NC
Renault Mégane E-Tech	35.200	96	300	NA	6,30	40	15,80	NC	NC
Renault Mégane E-Tech	40.200	160	450	75	9,25	60	16,10	NC	NC
Tesla Model 3 Intégrale	65.990	377	547	36	5,25	76	16,60	20,95	NC
Tesla Model 3 Long range	61.990	324	602	36	5,25	76	16	18,80	NC
Tesla Model 3 Prop	52.990	202	491	32	4	57	14,90	NC	NC
Tesla Model S	99.990	350	652	43	6,50	95	19	21,25	NC
Tesla Model S plaid	129.990	750	628	43	6,50	95	19	NC	NC
Moyenne	65.750	246	500	46	6,97	73,23	17,78	20,51	325,09
Médiane	53.340	186	513	44	7,50	77,40	17,10	21,43	325,09

A.1.4 Citadine

Modèle	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
BMW i3	40.750	125	200	45	3	42,20	13,10	15,92	NC
BMW i3s	44.400	135	200	45	3	42,20	14,60	17,44	NC
Dacia Spring	18.990	33	230	64	4,50	27,40	13,90	16,01	221,03
Fiat 500e 70	24.900	70	190	30	2,50	21,30	13	16,28	NC
Fiat 500e 87	28.900	87	320	35	4,25	37,30	14	NC	265,46
Honda e	35.680	100	222	30	4	35,50	17,20	NC	NC
Honda e Advance	38.995	113	210	30	4	35,50	17,80	20,54	174,18
Mini Cooper SE	33.500	135	203	35	2,50	28,90	17,60	17,11	NC
Opel Corsa-e	31.695	100	329	30	4	50	16,80	18,18	284,11
Peugeot e-208	33.450	100	362	30	4	50	16	19,45	269,67
Renault Twingo E	23.250	60	190	NC	4	22	16	15,30	NC
Renault Zoé 110	33.575	80	395	90	8,50	50	NC	17,89	NC
Renault Zoé 135	36.250	100	395	90	8,50	50	NC	17,86	334,22
Smart Fortwo EQ	26.500	60	125	40	3,80	17,60	18,60	NC	NC
VW e-up!	24.690	61	251	45	4,50	32,30	16,40	14,54	NC
VW ID 3 Pro	39.300	107	417	35	6,25	58	16,40	18,90	338,53
VW ID 3 Pro Perf.	40.900	150	417	35	6,25	58	16,40	20,45	NC
VW ID 3 Pro S	44.600	150	548	35	6,25	77	15,90	19,50	NC
Moyenne	33.351	98	289	44	4,66	40,84	15,86	17,69	269,6
Médiane	33.537	100	240	35	4	39,75	16,20	17,86	269,67

A.1.5 Coupé

Modèle	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Audi e-tron GT quattro	105100	350	479	36	9.5	93.4	21.6
Audi e-tron GT RS	145690	440	465	36	9.5	93.4	21.6
Porsche Taycan	88340	300	371	45	9.5	71	23.5

A.2 Véhicules à pile à combustible

Modèle	(1)	(2)	$P_{F.Cell}$ [kW]	(3)	Réservoir [kg]	(6)	(7)	(8)
Toyota Mirai	64470	134	128	700	5.6	1.24	0.8	1.06
Hyundai Nexa	74000	120	135	666	6.33	1.56	0.95	1.06

Annexe B

Explication d'une boîte à moustache

Une boîte à moustache est composée de plusieurs parties : la moustache inférieure représentant les 25% des valeurs les plus faibles de la série de donnée, la moustache supérieure représentant les 25% des valeurs les plus élevées de la série de données, la boîte représentant les 50% des valeurs médianes et la ligne médiane au milieu de la boîte représentant la médiane de la série de donnée, comme on peut le voir sur la figure B.1.

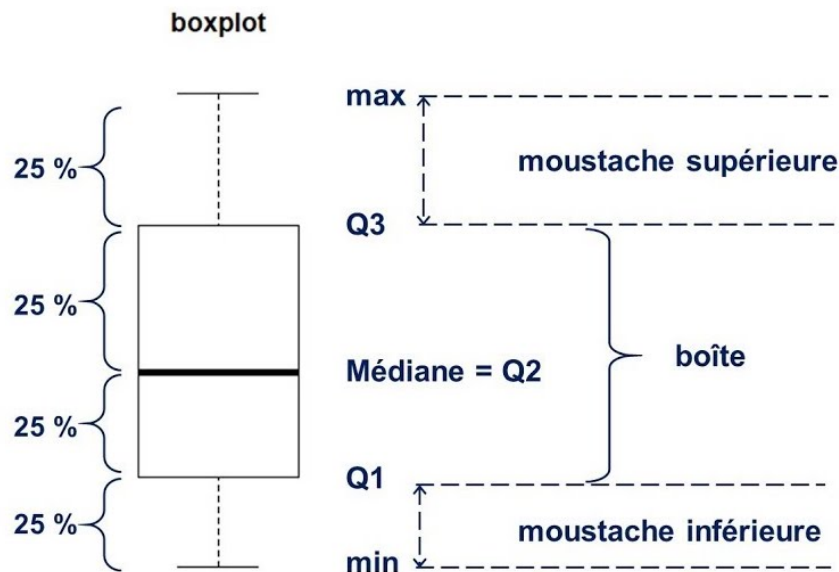


FIGURE B.1 – Différentes parties d'une boîte à moustaches

Annexe C

Graphes supplémentaire

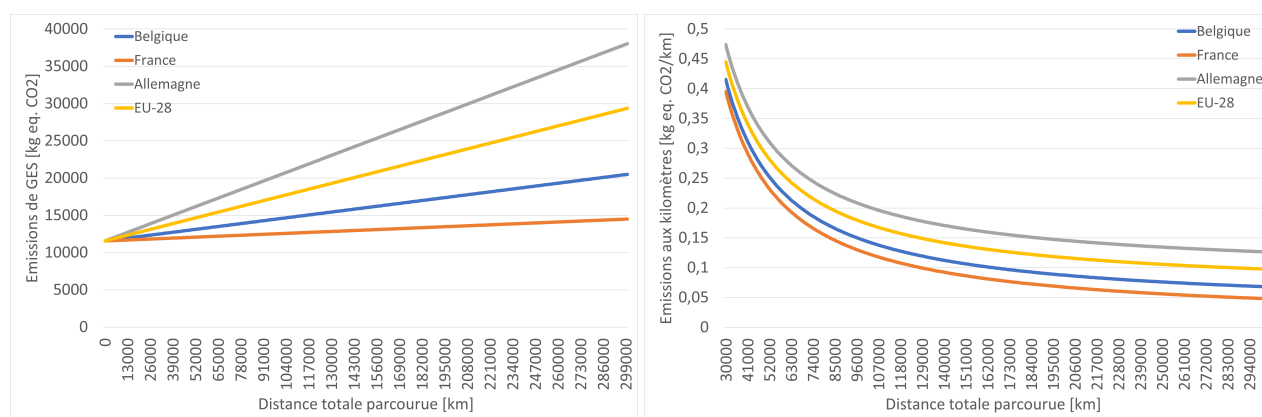


FIGURE C.1 – Impact environnemental total des berlines électriques

FIGURE C.2 – Impact environnemental relatif total des berlines électriques

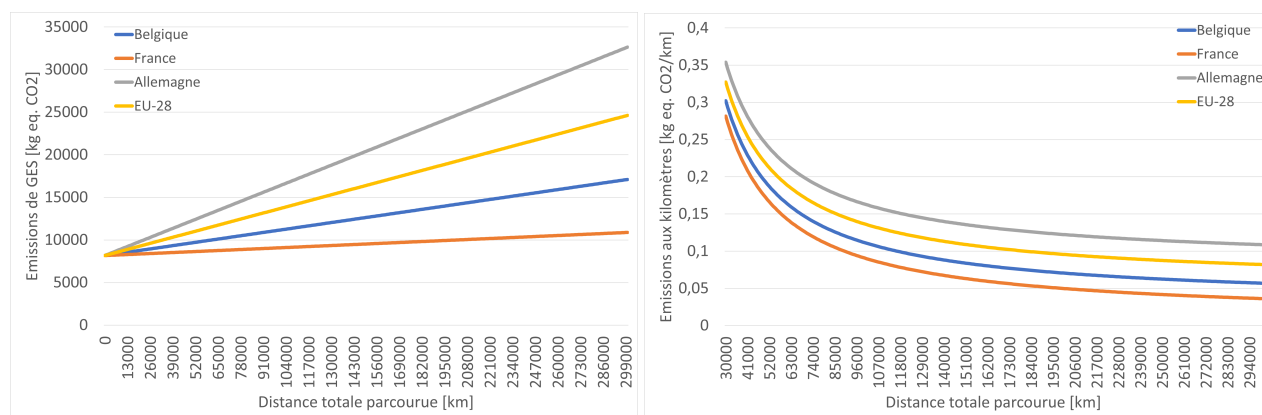


FIGURE C.3 – Impact environnemental total des citadines électriques

FIGURE C.4 – Impact environnemental relatif total des citadines électriques

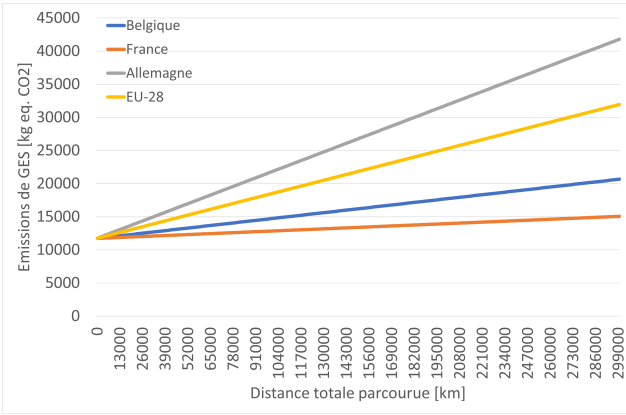


FIGURE C.5 – Impact environnemental total des SUV électriques

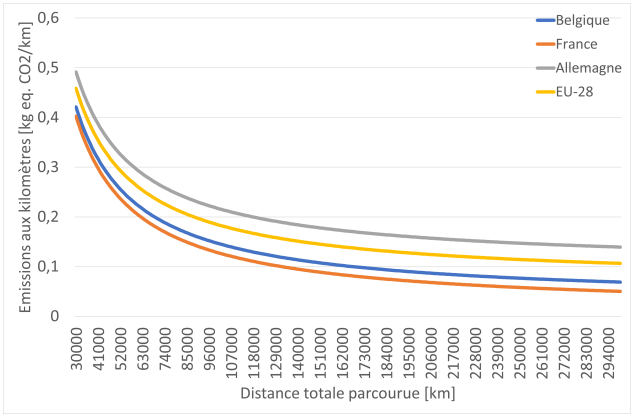


FIGURE C.6 – Impact environnemental relatif total des SUV électriques

Abstract : This work will compare battery electric vehicles with fuel cell electric vehicles. This comparison will be made from three angles. Firstly, the economic point of view, where we will compare the purchase, use and maintenance costs. Secondly, the point of view of use, by comparing the autonomy of the vehicles, the recharging time and the proximity of the recharging stations. And finally, the last point of comparison is the ecological point of view, by comparing the environmental impacts induced by the production and the impacts induced by the use of battery and fuel cell cars. These three areas of comparison will be carried out in three different national contexts, France, Belgium and Germany, all of which have different energy strategies that will lead to different impacts.

Résumé : Ce travail va s'atteler à faire la comparaison entre les véhicules électriques à batterie et les véhicules électriques à piles à combustible. Cette comparaison se fera sous 3 axes. Le premier, le point de vue économique, où l'on va comparer les frais d'achats, d'utilisation et d'entretiens. Deuxièmement, le point de vue de l'utilisation, en comparant l'autonomie des véhicules, le temps de recharge et la proximité des stations de recharge. Et finalement, le dernier point de comparaison est le point de vue écologique, en comparant les impacts environnementaux induits par la production et les impacts induits par l'utilisation des voitures à batterie et à pile à combustible. Ces 3 axes de comparaisons se feront dans 3 contextes nationaux différents, la France, la Belgique et l'Allemagne, ayant tous 3 des stratégies énergétiques différentes qui vont induire des impacts différents.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Louvain School of Management

Place des Doyens, 1 bte L2.01.01, 1348 Louvain-la-Neuve
Boulevard Emile Devreux 6, 6000 Charleroi, Belgique
Chaussée de Binche 151, 7000 Mons, Belgique

www.uclouvain.be/lsm