

**Louvain School of Management**

**Comparatif des coûts de  
distribution des deux modes de  
propulsion des véhicules  
électriques : voitures électriques  
avec batterie et voitures électriques  
avec pile à combustible.**

Auteur : Thibaut Weiser  
Promoteur : Daniel De Wolf  
Année académique 2023-2024  
Travail de fin d'études (TFE) en vue d'obtenir le titre de  
Ingénieur de gestion – Supply chain management  
Horaire de jour

## **Declaration Regarding AI Tool Usage in Master's Thesis**

We recognize that AI tools might be valuable aids during the master's thesis work, but they are not infallible. Remember that transparency fosters trust, and acknowledging AI's role enhances the credibility of your work.

Therefore, when deciding to use such a tool, you need to adhere to the following principles of responsible use of AI.

### **1. Critical Evaluation :**

- We critically assessed the AI-generated output, ensuring its alignment with our research objectives.
- Any modifications or corrections were made based on our expertise and domain knowledge.

### **2. Transparency :**

- We acknowledge the use of "Chatgpt" transparently, emphasizing that it contributed to our work but did not replace human judgment.
- Our commitment to transparency ensures the integrity of this thesis.

### **3. Ethical Considerations :**

- We actively monitored for biases or unintended consequences introduced by the AI tool.
- Our ethical responsibility guided our decisions throughout the research process.

## **Declaration**

During the preparation of this master's thesis, the author(s) utilized "Chatgpt" for the following purpose:

### **1. Help with writing certain passages of the memoir. Chatgpt did not help in the search for information, but only in the writing.**

After using "Chatgpt", the author(s) diligently reviewed and edited the content produced by the tool. We take full responsibility for the final content presented in this thesis.

By signing this declaration, we affirm that the content of this master's thesis reflects our original work, augmented by the responsible use of AI.

## Sommaire

Chapitre 1 : Introduction .....	4
Chapitre 2 : La mobilité électrique à batterie et à hydrogène.....	7
2.1 Avantages et inconvénients des deux modes de déplacements.....	7
Chapitre 3 : Types, coûts et préférence pour les stations de recharge .....	14
3.1 Types de stations de recharge .....	14
3.2 Coûts des stations de recharge .....	16
3.2.1 Coûts des stations de recharge électriques .....	17
3.2.2 Coût des stations d'hydrogène .....	18
3.3 Critères de préférences des consommateurs .....	18
3.3.1 Préférences pour les voitures électriques à batterie.....	18
3.3.2 Préférences pour les voitures électriques à hydrogène .....	19
3.4 Règlement européen.....	20
Chapitre 4 : Cas pratique – La Belgique .....	22
4.1 Analyser la demande actuelle et prévoir la croissance future .....	22
4.1.1 L'évolution de la flotte automobile dans les 3 régions .....	22
4.1.2 Répartition des voitures électriques à batterie par province.....	24
4.1.3 Répartition des voitures électriques à hydrogène par province.....	25
4.2 Évaluer les habitudes des Belges .....	26
4.3 Identifier les emplacements stratégiques : .....	28
4.3.1 Règlement européen .....	29
4.3.2. Les stations-services pour voitures électriques à batterie .....	31
4.4 Estimer le nombre de stations de recharge / hydrogène nécessaires .....	32
4.4.1 Les voitures électriques à batterie .....	32
4.4.2 Les voitures à hydrogène .....	33
4.5 Calculer les coûts de mise en service .....	38
4.5.1 Coûts pour les bornes de recharge.....	38
4.5.1 Coûts pour les stations hydrogène.....	39
Chapitre 5 : Conclusions .....	42
Bibliographie :.....	44

## Chapitre 1 : Introduction

Le réchauffement climatique représente l'un des défis les plus pressants de notre époque, exigeant des actions immédiates et concrètes à l'échelle mondiale. Les effets dévastateurs du changement climatique se font déjà ressentir à travers le monde, avec des phénomènes météorologiques extrêmes, la fonte des glaces, l'élévation du niveau de la mer et la perte de biodiversité (Zafar et Ammara, 2024).

Face à cette réalité, il est impératif de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de promouvoir des modes de vie plus durables et respectueux de l'environnement. Dans ce contexte, la transition vers une mobilité électrique verte émerge comme une solution prometteuse pour atténuer les impacts néfastes du transport routier sur le climat.

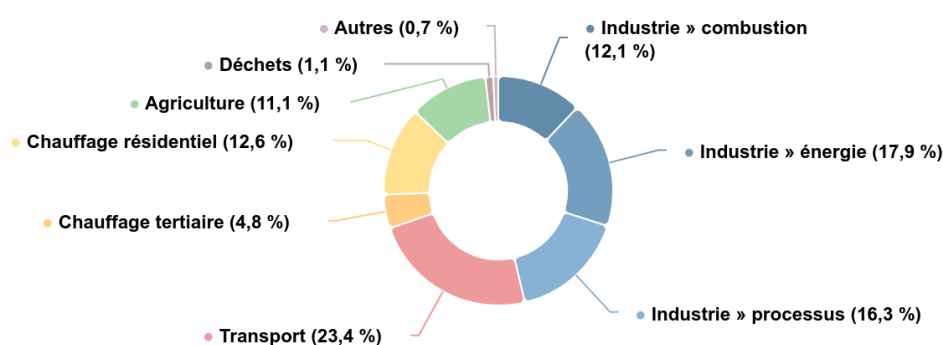


Figure 1 : Part des différents secteurs des émissions totales de CO<sub>2</sub> en 2022 en Belgique - Service Changements climatique (2022)

En 2022, les émissions du secteur des transports constituent 23,4% (contre 14,4% en 1990) des émissions totales en Belgique (Service Changements climatiques, 2022). Le transport routier représente 96% du total des émissions liées au transport. C'est le secteur le plus polluant en Belgique.

En 2021, en Europe, la Belgique est en 6<sup>ième</sup> position dans le classement de la quantité de gaz à effet de serre rejetée par habitant. Le premier pays est le Grand-duché du Luxembourg, suivi de l'Irlande. La moyenne Européenne est de 7,9 tonnes de CO<sub>2</sub> par habitant. Comme montré dans le graphique 2, la Belgique rejette plus de CO<sub>2</sub> que la moyenne, avec un taux de 10 tonnes par habitant (Olivier, 2023).

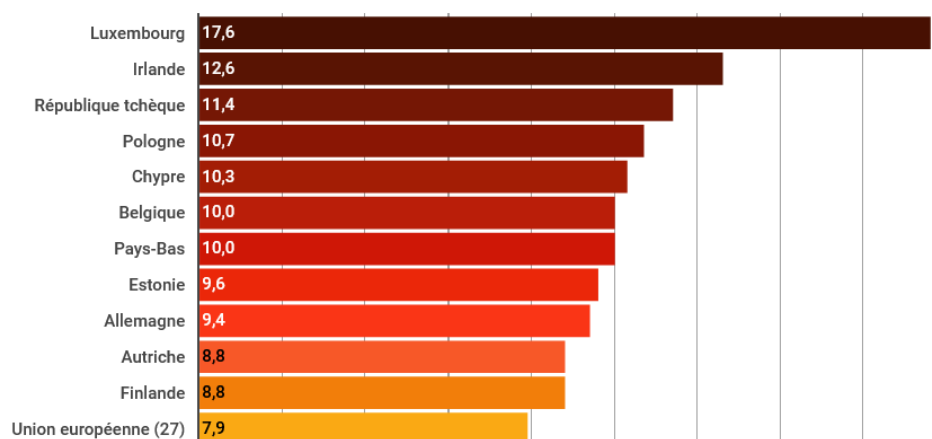


Figure 2 : Emission de gaz à effet de serre dans l'Union européenne (2021, en tCO<sub>2</sub>/habitant) – Olivier (2023)

Il existe deux alternatives à la voiture thermique (diesel et essence) : la voiture électrique avec batterie et la voiture électrique avec pile à combustible :

- Les voitures *électriques à batterie (BEV pour Battery Electric Vehicle)* sont alimentées par des batteries rechargeables, transformant l'électricité en énergie mécanique via des moteurs électriques afin de propulser le véhicule. Le processus de charge se fait généralement via des stations de recharge électrique, ou à la maison.
- Les voitures *électriques à hydrogène (FCEV pour Fuel Cell Electric Vehicle)* utilisent une pile à combustible pour convertir l'hydrogène en électricité, produisant de l'eau comme seul sous-produit, et alimentant ensuite des moteurs électriques.

Le choix entre ces deux types de véhicules dépend des préférences individuelles, des besoins de conduite et de l'infrastructure disponible.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer les besoins en infrastructures de recharge nécessaires pour soutenir cette transition dans le contexte belge, en tenant compte des spécificités locales, des exigences des utilisateurs et des véhicules. Ce mémoire répondra à la problématique suivante : « Comment établir un comparatif des coûts de distribution des deux modes de propulsion des véhicules électriques : voitures électriques avec batterie et voitures électriques avec pile à combustible ».

Pour atteindre nos objectifs, nous articulons notre propos autour des questions de recherche suivantes :

- Quelles sont les caractéristiques respectives des deux modes de déplacement concernant leur recharge ?

- Quels sont les coûts respectifs des infrastructures de recharge pour ces deux types de véhicules ?
- Quels investissements faut-il prévoir pour ces infrastructures de recharge concernant les deux types afin de soutenir la demande d'ici 2030 en Belgique ?

Le chapitre 2 se focalisera sur la mobilité électrique. Ce chapitre consistera à une comparaison en détail entre les deux modes de locomotion (à batterie et à hydrogène). Ceci nous permettra de mieux comprendre leurs spécificités et leurs implications en ce qui concerne leur recharge.

Ensuite, le chapitre 3 mettra en avant les différentes infrastructures de recharge pour véhicules électriques à batterie et à hydrogène. Nous explorerons les caractéristiques des stations de recharge en termes de temps de recharge, de compatibilité et de catégorie. Puis, nous effectuerons une analyse sur les investissements nécessaires en fonction de type de borne afin de mettre en place une infrastructure de recharge adaptée en Belgique.

Le chapitre 4 portera sur un cas pratique, celui de la Belgique. Nous procéderons à une analyse détaillée des besoins en stations de recharge pour les véhicules électriques à batterie et à hydrogène en Belgique. Nous utiliserons des données démographiques et des projections de croissance du parc automobile pour estimer la demande future. Nous prendrons également en compte les préférences des utilisateurs et les caractéristiques du paysage belge pour déterminer les emplacements optimaux des stations de recharge.

Sur base de cette analyse des besoins, nous formulerons ensuite une proposition de plan de déploiement des stations de recharge (bornes de recharge électriques et stations à hydrogène) en Belgique. Nous identifierons les zones prioritaires pour l'installation des stations, en mettant l'accent sur les axes de transport principaux, les zones urbaines densément peuplées et les régions où la demande de recharge devrait être la plus élevée. Nous élaborerons également des recommandations concernant le nombre, le type et la capacité des stations nécessaires pour répondre à la demande croissante en mobilité électrique et à propulsion hydrogène.

Enfin, nous estimerons le coût total de déploiement de cette infrastructure de recharge à travers la Belgique. Cette analyse financière nous permettra d'évaluer la viabilité économique de notre plan de déploiement et de formuler des recommandations stratégiques pour sa mise en œuvre efficace.

## Chapitre 2 : La mobilité électrique à batterie et à hydrogène

### 2.1 Avantages et inconvénients des deux modes de déplacements

Comme indiqué par De Wolf et Smeers (2023), il existe beaucoup plus de modèles de voitures électriques à batterie proposées sur le marché que des voitures à propulsion hydrogène. Les BEV ont été mises en avant plus tôt par les constructeurs que les FCEV, ce qui a permis un plus grand investissement en termes de R&D. La première voiture électrique lancée sur le marché à petite échelle fut dévoilée par l'entreprise Tesla Roadster en 2008, alors que c'est seulement en 2015 que Toyota a sorti son modèle Mirai à hydrogène. Par ailleurs, Mitsubishi et Nissan ont été les premiers à lancer des voitures électriques abordables et accessibles au grand public.

Il y a plusieurs critères importants à prendre en compte afin de faire une analyse des avantages et des inconvénients de chacune des deux options. Dans ces critères nous retrouvons certains utiles à notre analyse :

1. l'autonomie,
2. le temps de recharge,
3. le nombre et la disponibilité des stations de recharge,
4. la psychologie / l'anxiété.

	Type	Prix	Autonomie	Temps de recharge
<b>Moyenne</b>	BEV	37.000€	260 km	13 heures
<b>Moyenne</b>	FCEV	62.000€	575 km	3 minutes

Tableau 1 : Types de voitures électriques - De Wolf et Smeers (2023)

1. Selon l'article écrit par De Wolf et Smeers (2023), l'**autonomie** annoncée pour les BEV est en moyenne 260 km par recharge complète. Le nombre de kilomètres parcourus par recharge double pour les FCEV par rapport aux BEV, avec en moyenne 575 km, ce qui n'est pas négligeable. Ceci constitue donc un avantage pour les FCEV par rapport aux BEV.

2. Le **temps nécessaire** pour recharger un véhicule varie également. La recharge d'une batterie électrique dépend du type de borne utilisée, avec plusieurs variantes allant de la borne « type 1 à 3 ». Ces différentes bornes influent sur la durée requise pour atteindre un niveau de recharge satisfaisant afin de reprendre la route. La borne « type 1 », présente dans la plupart des foyers, est celle ayant le voltage le plus bas, nécessitant en moyenne 13 heures de recharge. Bien que cela puisse freiner l'adoption des voitures électriques, ce mode de recharge permet aux utilisateurs de charger leur véhicule tout au long de la nuit. En revanche, la voiture à pile à combustible (FCEV) offre un temps de recharge similaire à celui des véhicules thermiques, soit

environ 3 minutes. Lorsqu'on arrive à la station de recharge, il suffit de remplir le réservoir d'hydrogène, un processus qui est rapide (De Wolf et Smeers, 2023). Ceci constitue le second avantage principal pour les FCEV par rapport aux BEV.

3. En 2023, les données du rapport de Bibra et al. (2024) révèlent que la Belgique possède un total de **42.434 points de recharge**, 12.496 étant des chargeurs publics, représentant ainsi 29% de l'ensemble, tandis que 29.938 étant des chargeurs semi-publics, soit 71% du total.

2023	Belgique	Pourcentage
<b>Nombre de chargeur publics</b>	12.496	29%
<b>Nombre de chargeur semi-publics</b>	29.938	71%
<b>Total</b>	42.434	100%

Tableau 2: Nombre de bornes de recharge en Belgique en 2023 - Bibra et al. (2024)

Les chargeurs publics, accessibles à tous les utilisateurs, contribuent à assurer une disponibilité généralisée de la recharge, notamment dans les zones urbaines et les espaces publics. En revanche, les chargeurs semi-publics, souvent situés dans des lieux privés accessibles au public, tels que les parkings d'entreprises ou les centres commerciaux, offrent une solution complémentaire en garantissant une recharge pratique et accessible pour les utilisateurs (Bibra et al., 2024).

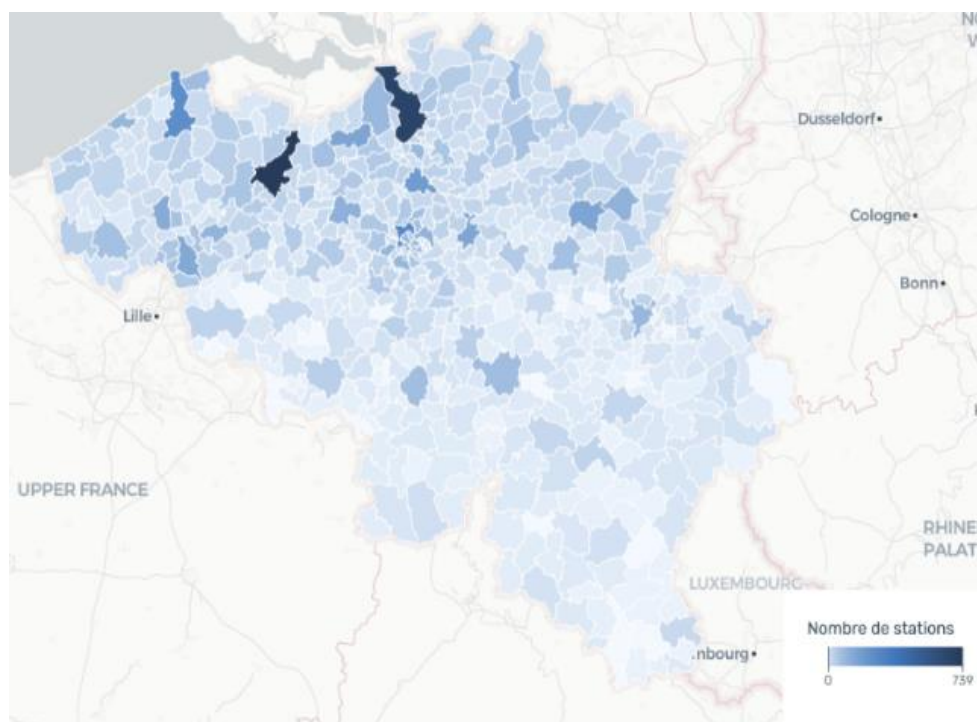


Figure 3 : Répartition des bornes de recharge électrique en Belgique - «Mobility Dashboard » (2024)

Les bornes de recharge ne sont pas réparties équitablement sur tout le territoire belge, comme le montre la carte de la Belgique présentée à la figure 3. En effet, le « Mobility Dashboard, 2024 » indique qu'un certain déséquilibre existe en faveur de la Flandre avec 75% des bornes de recharges. La Wallonie en possède 15%, et Bruxelles-capital 10%. Anvers et Gand sont les deux villes ayant le plus de bornes de recharge en Belgique.

<b>Nombre de chargeurs</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>Pourcentage d'augmentation en 3 ans</b>
<b>Belgique</b>	12.194	23.475	42.434	248%
<b>France</b>	36.611	61.471	93.342	155%
<b>Pays-Bas</b>	84.798	113.968	152.793	80%
<b>Allemagne</b>	57.827	83.559	124.982	116%

*Tableau 3 : Evolution du nombre de bornes de recharge en Belgique, France, Pays-Bas et Allemagne - Bibra et al. (2024)*

Selon les données recueillies par Bibra et al. (2024), le nombre de bornes de recharge pour les voitures électriques à batterie en Belgique a connu une augmentation au cours des dernières années. En 2021, le pays comptait 12.194 points de recharge, un chiffre qui a presque doublé pour atteindre 23.475 en 2022. En 2023, ce nombre a augmenté pour atteindre 42.434 bornes. Cela représente une augmentation de 248 % par rapport à l'année précédente.

Comparativement, d'autres pays européens ont également vu une expansion notable de leurs infrastructures de recharge pour véhicules électriques. Par exemple, la France est passée de 36.611 bornes de recharge en 2021 à 93.342 en 2023, soit une augmentation de 155%. Les Pays-Bas ont également enregistré une croissance significative, passant de 84.798 bornes de recharge en 2021 à 152.793 en 2023, ce qui représente une augmentation de 80%. Il est à remarquer les Pays-Bas sont en avance par rapport aux 3 autres pays cités car ils comptabilisent le plus grand nombre de bornes. Enfin, l'Allemagne a augmenté son nombre de bornes de recharge de 57.827 en 2021 à 124.982 en 2023, soit une augmentation de plus de 116% (Bibra et al., 2024).

Pour mieux visualiser l'évolution, la figure 4 illustre la progression du nombre de bornes de recharge pour les voitures électriques à batterie en Belgique au cours des trois dernières années (Bibra et al., 2024).

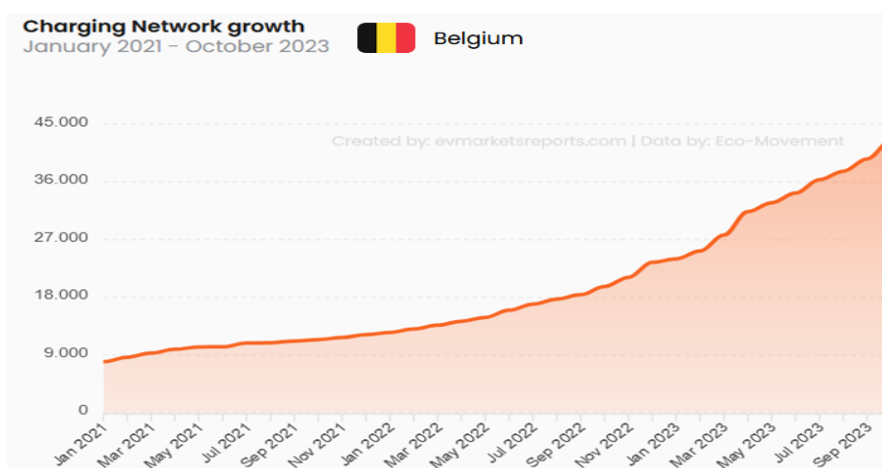


Figure 4 : Evolution du nombre de points de recharge en Belgique - Bibra et al. (2024)

2022	Nombre de bornes	Nombre de BEV	Rapport nombre de BEV par borne
<b>Belgique</b>	23.475	281.700	12
<b>France</b>	61.471	799.123	13
<b>Pays-Bas</b>	113.968	455.872	4
<b>Allemagne</b>	83.559	2.172.534	26

Tableau 4 : Comparaison du nombre de bornes de recharge et de BEV entre la Belgique, la France, les Pays-Bas et l'Allemagne - Bibra et al. (2024)

Fin 2022, selon le rapport de Bibra et al. (2024), le nombre de bornes du rapport de recharge pour les véhicules électriques à batterie (BEV) en Belgique s'élevait à 23.475, tandis que le nombre de véhicules électriques en circulation était de 281.700. Cela représente un rapport d'environ 12 véhicules électriques par borne de recharge.

La directive 2014/94/UE exige que chaque État membre élabore un plan d'action national pour favoriser l'essor des carburants alternatifs dans le domaine des transports, notamment en installant des infrastructures telles que des points de recharge. Chaque État membre doit installer un nombre minimum de points de recharge, dont environ 10% devraient être accessibles au public par rapport au nombre de BEV en circulation (Bradfer, 2019).

En comparaison, la France comptait 61.471 points de recharge pour 799.123 véhicules électriques à batterie, soit un rapport d'environ 13 véhicules par borne de recharge. Les Pays-Bas avaient un ratio plus bas avec 113.968 points de recharge pour 455.872 véhicules électriques à batterie, soit environ 4 voitures électriques par borne de recharge. Quant à l'Allemagne, elle affichait un rapport plus élevé avec 83.559 bornes de recharge pour 2.172.534

véhicules électriques à batterie, soit environ 26 véhicules électriques par point de recharge (Bibra et al., 2024).

Ces données révèlent que la Belgique se situe dans une position intermédiaire par rapport à ses voisins européens en termes de densité de bornes de recharge par véhicule électrique. Bien que le ratio en Belgique soit légèrement inférieur à celui de la France, il est nettement plus élevé que celui des Pays-Bas et bien en deçà de celui de l'Allemagne. Ceci indique une infrastructure de recharge en plein développement en Belgique, mais aussi un besoin de renforcement pour accompagner la croissance continue du parc de véhicules électriques (Bibra et al., 2024).

Au sujet des stations hydrogène, actuellement, la disponibilité de celles-ci demeure limitée, avec seulement huit stations répertoriées.

Localité	Exploitant
Zaventem	Air Liquide
Genk	Air Liquide
Halle	Dats 24
Haasrode	Dats 24
Erpe-Mere	Dats 24
Herve	Dats 24
Anvers	Dats 24
Ollignies	TotalEnergies

Tableau 5 : Disponibilité des stations hydrogène en Belgique et exploitants - H2Benelux (2024)

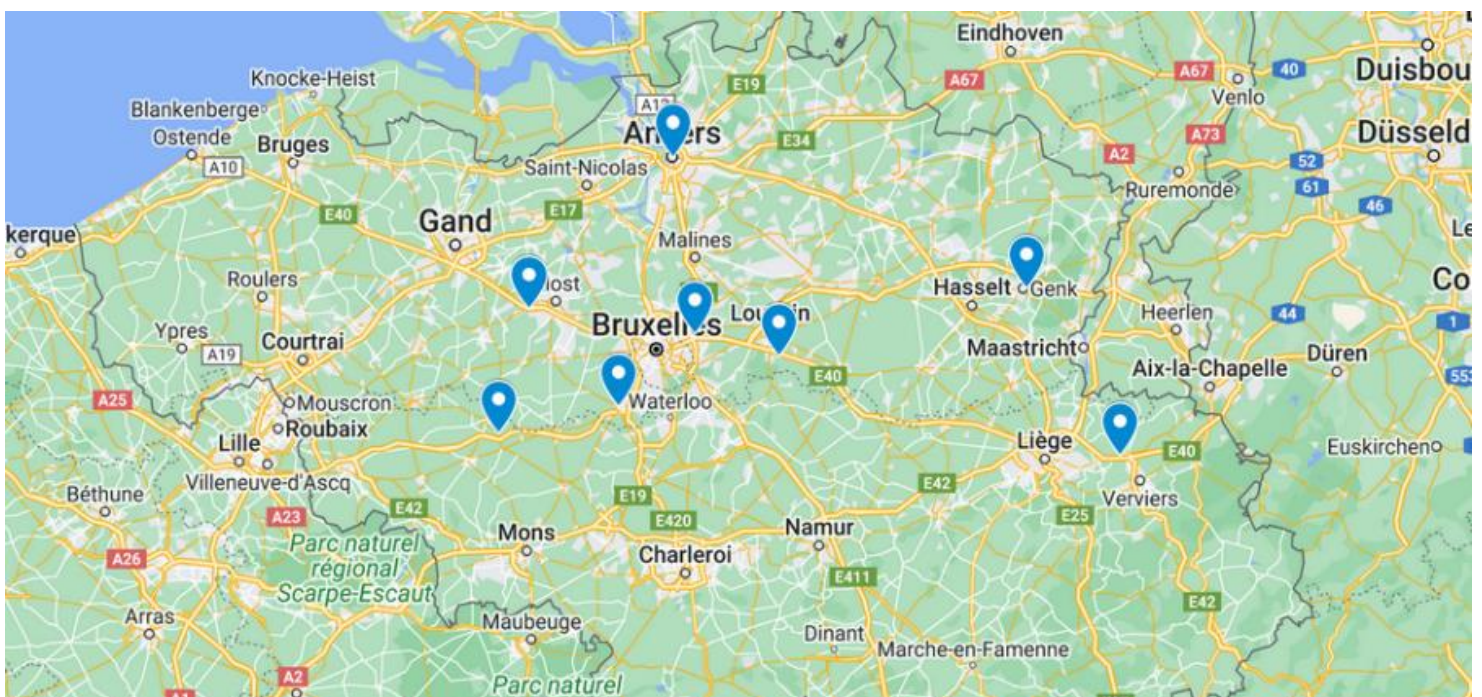


Figure 5 : Répartition des stations à hydrogène en Belgique - H2Benelux (2024)

Malheureusement, l'expansion de cette infrastructure est entravée par des coûts élevés associés à l'installation et à l'entretien des stations à hydrogène. Malgré ces défis, il est prévu que le développement des stations de recharge à hydrogène gagne en dynamisme dans le futur.

4. Les **problèmes psychologiques** peuvent survenir lors de la conduite de voitures BEV et FCEV. L'anxiété liée au fait de ne pas trouver de bornes de recharge sur la route lorsqu'une personne conduit une voiture est également connue sous le nom de "*range anxiety*". En effet, l'autonomie d'une voiture électrique peut être limitée en fonction de différents facteurs, tels que le type de voiture, les conditions météorologiques, le style de conduite et la topographie du terrain. Cette anxiété peut être particulièrement forte lors de longs trajets. Elle peut également être ressentie par les conducteurs qui voyagent dans des zones rurales ou peu peuplées, où les bornes de recharge sont moins nombreuses. Cependant, la grande majorité des trajets peuvent déjà être réalisés avec des BEV. La moyenne belge est de 2,2 déplacements par jour, d'une durée moyenne de 24 minutes et couvrant **une distance moyenne de 16 kilomètres**. La grande majorité des trajets quotidiens des Belges se situent dans des limites bien en deçà de l'autonomie actuelle des véhicules électriques (Service public fédéral Mobilité et Transports, 2019). Cela suggère que pour la plupart des conducteurs belges, l'infrastructure de recharge existante et l'autonomie des véhicules électriques sont plus que suffisantes pour répondre à leurs besoins de déplacements quotidiens. Bien que la plupart des trajets soient envisageables, des parts minoritaires de trajets problématiques pourraient entraver la transition vers une adoption massive des BEV (Melliger et al., 2018).

Rauh et al. (2014) ont également démontré que l'expérience de conduite de BEV réduit l'anxiété liée à l'autonomie, amenant les utilisateurs à se sentir plus à l'aise tant avec les niveaux d'autonomie réduits des BEV qu'avec la réalisation de trajets plus longs.

Les deux tableaux présentés au tableau 6 ont été développés par Paerre et al. (2011), afin de montrer comment l'autonomie des véhicules électriques (BEV) et la disposition des conducteurs à s'adapter à une autonomie limitée affectent la compatibilité des BEV avec les habitudes de conduite actuelles. Ils représentent la même information. Celui de gauche est trié par pourcentage croissant tandis que celui de droite est trié par autonomie croissante.

% conducteurs	Autonomie (km)	Adaptations/an
25	100	4
75	200	6
75	300	3
75	400	1
95	200	15
95	300	10
95	400	5
95	500	3
99,5	300	20
99,5	400	13
99,5	500	8

% conducteurs	Autonomie (km)	Adaptations/an
25	100	4
75	200	6
95	200	15
75	300	3
95	300	10
99,5	300	20
75	400	1
95	400	5
99,5	400	13
95	500	3
99,5	500	8

Tableau 6 : Proportion de conducteurs voulant bien adapter leur trajet en fonction de l'autonomie des véhicules - Paerre et al. (2011)

La colonne « % conducteurs » représente la proportion de conducteurs qui sont d'accord d'agir avec un certain comportement. La colonne « Autonomie (km) » représente l'autonomie de la voiture utilisée. Enfin, « Adaptations/an » représente le nombre de fois maximum où un conducteur est prêt à adapter son itinéraire par an.

Par exemple, si un BEV a une autonomie de 200 km et que les propriétaires sont prêts à s'adapter (c'est-à-dire à aller à une borne de recharge pendant la journée) pendant maximum six jours par an, alors ce véhicule serait compatible avec les habitudes de conduite de 75% des conducteurs de véhicules à essence. En augmentant l'autonomie du véhicule ou en augmentant le nombre de jours où les conducteurs sont prêts à s'adapter, la proportion de conducteurs dont les habitudes de conduite peuvent être accommodées augmente.

Comme déjà discuté, l'autonomie moyenne d'une voiture électrique est de 260 km. Une BEV moyenne peut satisfaire le besoin de 75% des conducteurs si ceux-ci acceptent de s'adapter 4 fois par an, c'est-à-dire une fois tous les 3 mois. Cependant, pour avoir presque l'unanimité des conducteurs, il faut une adaptation toutes les deux semaines.

% conducteurs	Autonomie (km)	Adaptation/an
75	260	4
95	260	12
99,5	260	24

Tableau 7 : Proportion de conducteurs voulant bien adapter leur trajet en fonction de l'autonomie des véhicules - Paerre et al. (2011)

## Chapitre 3 : Types, coûts et préférence pour les stations de recharge

### 3.1 Types de stations de recharge

Il existe plusieurs types de stations de recharge, dépendant de ce que l'utilisateur recherche. Dans ce chapitre, nous allons d'abord parcourir les différentes façons de recharger une voiture électrique à batterie en fonction des besoins. Dans un second temps, nous allons analyser les stations à hydrogènes. Celles-ci sont peu nombreuses en Belgique, mais il est important de comprendre comment elles fonctionnent.

Il faut noter que la qualité du réseau électrique est une variable importante, qui peut parfois empêcher la bonne implémentation des bornes de recharges. En effet, si celui-ci est trop faible, les voitures ne pourront pas être rechargées comme prévu. Cependant, dans le cadre de ce mémoire, nous prenons l'hypothèse que le réseau est fiable et assez puissant sur tout l'ensemble du territoire belge.

Il y a deux **critères** principaux qui permettent de différencier les bornes :

La première distinction réside dans **la puissance** de recharge, qui varie de la recharge lente à la recharge ultra-rapide. Les bornes domestiques, ou Wallbox, fournissent une recharge lente ou moyenne, idéale pour une utilisation à domicile ou au travail. Les bornes publiques standard, équipées de connecteurs Type 2 AC, sont adaptées à une recharge sur plusieurs heures dans les lieux publics tels que les parkings ou les centres commerciaux (Saber et Rouhana, 2020).

Ensuite, **la vitesse** de recharge joue un rôle crucial dans le choix d'une borne. Les bornes rapides, utilisant des connecteurs pour la recharge en courant continu (DC), offrent une recharge plus rapide, idéale lors de longs trajets (Saber et Rouhana, 2020).

Selon ces deux critères, trois types de bornes de recharge différentes existent principalement :

- La maison, type 1
- En station, chargeur classique AC, type 2
- En station, chargeur rapide DC, type 3

Une borne de recharge habituelle se présente sous la forme d'un appareil fixe connecté directement à un tableau électrique ou branché sur une prise murale. Elle est équipée de câbles

de recharge munis d'une prise mobile, semblable à un pistolet à essence, permettant de recharger la batterie du véhicule électrique en la branchant au socle de recharge. La borne est dotée de voyants indiquant l'état de connexion et de recharge du BEV, ainsi que d'un bouton de commande. Certaines bornes offrent des fonctionnalités supplémentaires telles qu'un compteur d'énergie, un système de paiement électronique, etc (Saber et Rouhana, 2020).

Le premier type de recharge est celui fait **à la maison**, le lieu de vie devient donc la station elle-même (Saber et Rouhan, 2020). Celle-ci demande une prise d'électricité classique, reliée à la borne de la maison. Les chargeurs privés sont des biens personnels. Ils présentent des avantages par rapport aux chargeurs publics en termes de commodité et de prix de recharge, car ils sont situés dans des zones résidentielles (Fotouhi et al., 2019). Ce type de rechargement est utilisé principalement la nuit, lorsque l'électricité coûte moins cher. Cela permet de récupérer une voiture complètement chargée le lendemain matin, sans avoir perdu de temps à attendre à côté d'une borne. Cependant, ce type de recharge est chronophage, avec en moyenne 13 heures d'attente (De Wolf et Smeers, 2023) pour avoir une batterie complètement chargée. Néanmoins, ce mode exige d'avoir accès à une infrastructure de recharge privée. En Europe, entre 40 et 60% des conducteurs se garent principalement dans la rue, ou dans des zones publiques, rendant impossible l'accès à une borne de recharge privée (Pasaoglu et al., 2014).

Le deuxième type de recharge, dite de **type 2, se fait** en station. Ce type de borne est plus rapide que la recharge à la maison, tout dépendant également de la puissance de la borne. Généralement, ce type de borne est utilisée dans les parkings d'entreprises et les supermarchés. Ces bornes utilisent 3 phases AC, qui permettent une recharge de batterie en 1 heure (Sadeghi-Barzani et al., 2014).

Finalement, la borne de **type 3** est un chargeur plus rapide que le type 2. On retrouve ce type de borne au bord des autoroutes, afin de recharger le plus rapidement possible les batteries des voitures pour qu'elles puissent continuer leur route. Les bornes rapides permettent au conducteur de recharger leurs voitures à 80% de la capacité en moins de 30 minutes, ce qui offre une bonne solution pour les longs voyages en limitant le temps perdu à cause de la recharge (Philipsen et al., 2016). La puissance élevée nécessaire dans la recharge de niveau 3 dépasse la capacité de la plupart des transformateurs des services publics desservant les zones résidentielles. Par conséquent, des mises à niveau du réseau peuvent être nécessaires (Schröder et Traber, 2012).

Concernant le FCEV, les stations de recharge fonctionnent principalement comme les stations à essence/diesel. Il suffit de mettre de l'hydrogène directement dans le réservoir à l'aide d'un pistolet (Wang et al., 2022).

Les stations hydrogènes diffèrent les unes des autres dans leur quantité stockée. En effet, celles-ci peuvent avoir des réservoirs allant de 500 kilogrammes à 10 tonnes. Plus ce réservoir est grand, plus la station pourra servir de voitures, et moins souvent celui-ci devra être rempli à son tour. Une deuxième chose qui varie est le débit. Certaines stations possèdent des pompes plus rapides que d'autres, permettant d'augmenter le nombre de voitures servies par heure (Wang et al., 2022).

### 3.2 Coûts des stations de recharge

Selon une étude menée en 2017 par Serradilla et al., deux grandes catégories de coûts existent : « *CAPEX* », représentant les coûts en capital qu'il faut investir dès le début (coûts initiaux), et « *OPEX* », représentant les dépenses d'exploitation annuelles (Serradilla et al., 2017). Il est difficile de prévoir la répartition des coûts de l'OPEX, car le loyer du site est très variable. De plus, l'OPEX est impacté par les fluctuations du prix de l'électricité et de l'inflation.

#### 1. *CAPEX* :

- achat et livraison des bornes de recharge,
- gestion de projet d'installation,
- nouvelles connexions électriques,
- travaux de préparation du site,
- mise en service.

#### 2. *OPEX* :

- coût de l'électricité,
- loyer du site,
- frais de fonctionnement du back-office,
- coûts de maintenance,
- coûts de maintenance imprévus (le vandalisme et la défaillance de pièces non couvertes par la garantie).

Les types de coûts présentés sont similaires à ceux pour les stations à hydrogène. En effet, l'achat de l'infrastructure, les coûts liés au projet, le site, la mise en service... Pour ce mémoire, uniquement les coûts CAPEX seront pris en compte, car le focus est mis sur les coûts

d'installations, et non les coûts de gestion. Cependant, il est important de savoir que ces coûts existent.

### 3.2.1 Coûts des stations de recharge électriques

Dans le cadre de l'installation d'un nouveau réseau de stations de recharge, l'achat de bornes en grande quantité est inévitable, réduisant le coût par borne grâce aux économies d'échelle. Le tableau 8 présente certains investissements effectués par différents pays, permettant d'estimer le prix d'une borne de **type 2**. La dernière colonne, le « prix d'une borne » est obtenue en divisant l'investissement par le nombre de bornes installées.

<b>Chargeur AC</b>			
<b>Pays</b>	Investissement	Nombre de bornes installées	Prix d'une borne
<i>Belgique</i> <sup>1</sup>	15.000.000 €	6.000	2.500 €
<i>France</i> <sup>2</sup>	320.000.000 €	140.000	2.286 €
<i>Allemagne</i> <sup>3</sup>	6.000.000.000 €	1.000.000	6.000 €
<b>Moyenne</b>	<b>2.111.666.667 €</b>	<b>382.000</b>	<b>3.595 €</b>

Tableau 8 : Estimation du coût d'une borne de recharge AC en fonction des divers investissements faits par différents gouvernements

Le prix moyen d'une borne AC de type 2 est de **3.500€**. Ce chiffre change fortement en fonction des pays. Pour ce travail, nous allons utiliser le prix d'achat déjà obtenu en Belgique, de **2.500€ par borne**.

Concernant les bornes de charges DC, **type 3**, le même raisonnement peut être appliqué. Cependant, aux vues du nombre de DC existants, peu de rapports gouvernementaux mettent en avant les coûts de celles-ci. Seule la France a déjà publié un rapport sur les coûts investis et le nombre de bornes installées. Le prix pour une borne de recharge rapide DC est de **75.000€**.

<b>Chargeur DC rapide</b>			
<b>Pays</b>	Investissement	Nombre de bornes installées	Prix d'une borne
France <sup>4</sup>	330.000.000 €	4.400	75.000 €

Tableau 9 : Estimation du coût d'une borne de recharge DC

<sup>1</sup> Henry, 2022

<sup>2</sup> Anelone, 2024

<sup>3</sup> Bouguerra, 2022

<sup>4</sup> Béchu, 2023

### 3.2.2 Coût des stations d'hydrogène

Le prix d'achat pour une **station d'hydrogène** :

<i>Sources</i>	<i>Prix</i>
(Hamon, 2020)	1.000.000 €
(Venair, 2024)	1.600.000 €
(Veritas France, 2018)	1.250.000 €
(Viviani, 2022)	3.000.000 €
<b><i>Moyenne</i></b>	<b><i>1.712.500 €</i></b>

Tableau 10 : Estimation du coût d'une station d'hydrogène

Aucun gouvernement n'a acheté de station hydrogène en grande quantité. Le coût d'une station hydrogène varie fortement en fonction de la grandeur du réservoir, du débit et de la méthode de conservation de l'hydrogène (Wang et al., 2022). Selon le tableau 10, le coût moyen d'une station d'hydrogène est d'environ **1.700.000€**.

## 3.3 Critères de préférences des consommateurs

### 3.3.1 Préférences pour les voitures électriques à batterie

Lorsque le niveau de recharge de la batterie (SOC) s'approche de zéro, une BEV doit être branchée pour être rechargée. Le SOC, acronyme de « State-of-charge », peut être considéré comme un indicateur de niveau de carburant pour la batterie. Si une recharge est nécessaire en cours de route vers la destination, l'itinéraire peut être ajusté pour inclure une station de recharge. Ainsi, nous pouvons distinguer trois modes de comportement des conducteurs BEV par rapport à l'atteinte de leur destination. La première manière de faire est de simplement recharger à son domicile, sans devoir utiliser des bornes de recharge. La seconde possibilité est que l'utilisateur ne choisisse d'utiliser que des bornes sur sa route (station-service, ...). La dernière option est que l'utilisateur accepte de faire un détour afin de trouver une borne de recharge (Hanabusa et Horiguchi, 2011).

Philipsen et al (2016) ont mené une étude afin d'évaluer les emplacements de recharge rapide. Ils différencient dans leur enquête les utilisateurs et les futurs utilisateurs (appelés non-user dans la figure 6). Ils accordent tous une grande importance aux stations-services autoroutières et aux stations-services. Cependant, les non-utilisateurs mettent également l'accent sur le lieu de travail ainsi que les centres de shopping, contrairement à ceux qui utilisent déjà une BEV.

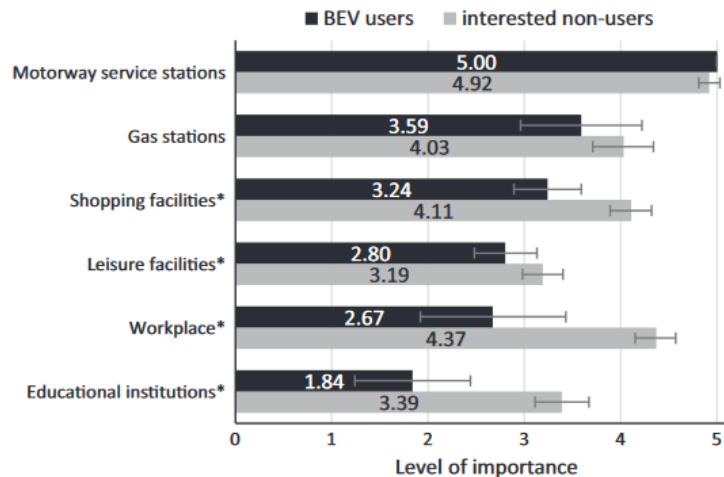


Figure 6 : Importance moyenne des différents emplacements des bornes de recharge selon les utilisateurs et futurs utilisateurs - Philipsen et al. (2016)

### 3.3.2 Préférences pour les voitures électriques à hydrogène

En ce qui concerne l'existence d'une infrastructure publique de ravitaillement d'hydrogène, Martin et al. (2009) ont interrogé les individus sur leur disposition maximale à dévier de leur trajet habituel pour ravitailler les FCEV. Ils ont constaté que 89 % étaient prêts à accepter des déviations de plus de 5 minutes, mais seulement 29 % étaient prêts à accepter des déviations de plus de 15 minutes. Aucun conducteur n'est d'accord de faire un détour de 30 minutes ou plus (Figure 7).

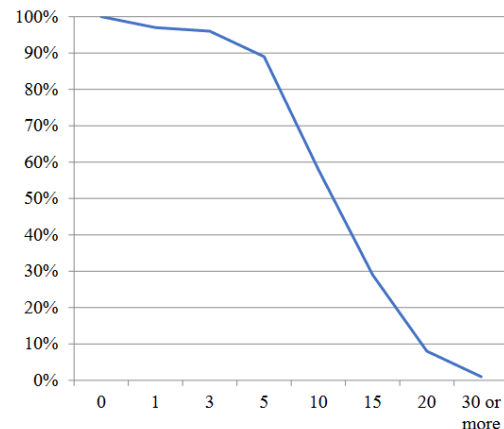


Figure 7: Pourcentage cumulé de tolérance du temps de trajet supplémentaire jusqu'à la station de ravitaillement (min) - Martin et al. (2009)

De même, Brey et al. (2017) ont constaté que le taux d'acceptation est supérieur à 50 % lorsque le temps de conduite jusqu'à une station d'hydrogène est inférieur à 10 minutes.

Rosales-Tristancho et al. (2022) ont également mené une enquête de la durée du détour que les conducteurs sont prêts à faire afin de trouver une station à hydrogène. Les données montrent que 78 % de l'échantillon seraient prêts à voyager entre 5 à 15 minutes en voiture pour atteindre une station-service pouvant leur fournir un carburant alternatif (Figure 8). Le pourcentage de l'échantillon prêt à accepter une distance plus grande (jusqu'à 30 minutes) chute à seulement 29%.

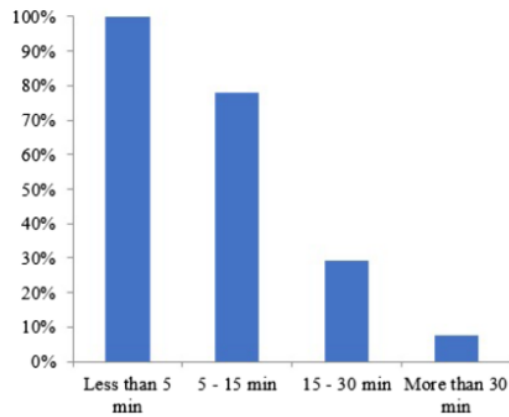


Figure 8 : Durée du détour que les conducteurs sont prêts à faire afin de trouver une station à hydrogène - Rosales-Tristancho et al. (2022)

Il est possible de conclure que 50% des futurs conducteurs de FCEV veulent bien faire un détour pour trouver une station hydrogène si ce détour ne dépasse pas les 10 minutes.

### 3.4 Règlement européen

L'Union européenne met en place diverses règles afin d'améliorer le secteur du transport dans les années futures. Tous les pays de l'union européenne se doivent de les respecter, obligeant les responsables à suivre certaines réglementations.

Le réseau transeuropéen de transport (RTE-T) est un réseau de transport qui vise à connecter les pays de l'Union européenne (UE) et à faciliter la circulation des personnes et des marchandises à travers le continent. Ce réseau comprend des routes, des voies ferrées, des voies navigables, des ports maritimes, des aéroports et d'autres infrastructures de transport. L'objectif principal du RTE-T est de renforcer l'intégration économique et sociale au sein de l'UE en améliorant l'accessibilité et en réduisant les obstacles géographiques. La longueur totale du réseau central européen en Belgique est de 1.000 km pour le réseau routier (Figure 9).



Figure 9 : Le réseau transeuropéen de transport (RTE-T)

L'accord établit des objectifs nationaux minimums obligatoires pour le déploiement des infrastructures de carburants alternatifs, exigeant des pays de l'UE qu'ils soumettent des plans pour les atteindre. Les parlementaires exigent que les bornes de recharge pour les voitures électriques à batterie de 400 kW soient **installées tous les 60 km le long du réseau central RTE-T d'ici 2026**, avec une augmentation de puissance à **600 kW** d'ici 2028. De plus, il est prévu que des stations de recharge soient **disponibles tous les 120 km pour les camions et les bus**, avec une obligation d'installation sur la moitié des routes principales de l'UE d'ici 2028, offrant une puissance de **1.400 kW à 2.800 kW** selon la route (*Fit For 55 : Accord Sur les Stations de Recharge et de Carburants Alternatifs | Parlement Européen, 2023*).

Les obligations Européennes ne s'arrêtent pas uniquement aux bornes de recharge pour BEV. En effet, le règlement UE 2023/1084 a décidé en juin 2023 d'imposer également un nombre minimum de stations à hydrogène d'ici 2030. La Belgique a l'obligation de mettre en place **une station tous les 200 kilomètres** le long du réseau de transport RTE-T pour les voitures, et **tous les 120 kilomètres pour subvenir aux besoins des camions et bus**. Une règle supplémentaire a été adoptée, obligeant les stations d'hydrogène à se trouver dans **un rayon de 10 kilomètres** autour des sorties d'autoroutes (*Fit For 55 : Accord Sur les Stations de Recharge et de Carburants Alternatifs | Parlement Européen, 2023*).

## Chapitre 4 : Cas pratique – La Belgique

### 4.1 Analyser la demande actuelle et prévoir la croissance future

Selon le site Fédération Belge de l'Automobile et du Cycle (*Statistiques / FEBIAC*, 2024), le parc automobile de véhicules électriques en Belgique devrait compter entre 1 et 1,5 million de voitures d'ici 2030. Bien entendu, ce chiffre est difficile à prévoir au vu du futur incertain, des potentielles nouvelles règles imposées par le gouvernement, de l'évolution des infrastructures, etc.

#### 4.1.1 L'évolution de la flotte automobile dans les 3 régions

En 2023, il y avait 280.000 voitures électriques (*Statistiques / FEBIAC*, 2024) en Belgique pour 11,59 millions d'habitants. Un Belge sur 40 possède donc une voiture électrique. En 2030, selon le site Statbel, la Belgique sera composée de 11,75 millions d'habitants. Selon ces prévisions, un peu moins d'un Belge sur 10 conduira une voiture électrique. Le parc automobile électrique augmentera de **450%** d'ici 6 ans.

L'institut de Transport & Mobilité de Leuven a projeté la composition de la flotte de voitures en Belgique pour le futur. Les besoins en Flandre et Wallonie sont semblables au niveau des proportions. Cependant il faut faire attention à la densité de population différente dans les trois régions. A Bruxelles, la demande est différente, avec une adoption plus rapide des voitures électriques, arrivant à son maximum vers 2035 (Vanpée et Mayeres, 2023).

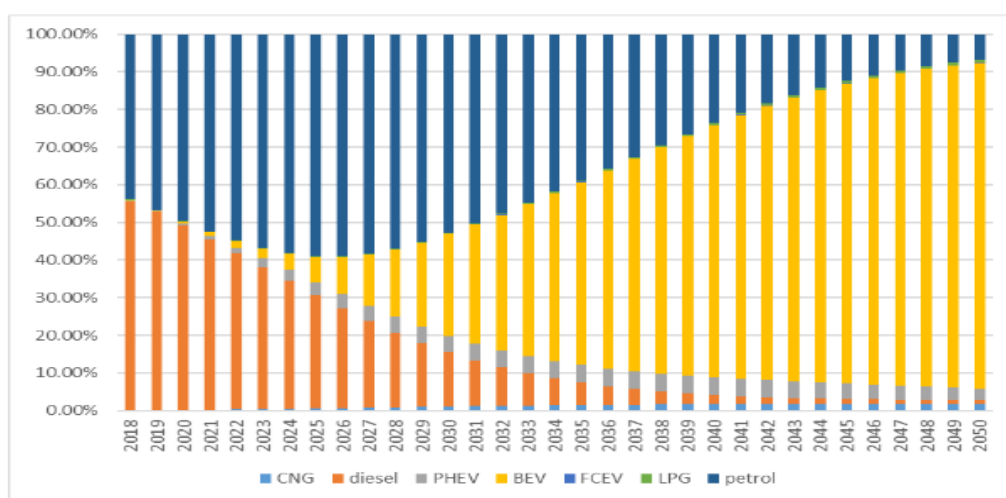


Figure 10 : Répartition de la flotte prévisionnelle de voitures en Wallonie & Flandre - Vanpée et Mayeres (2023)

La figure 10 montre la proportion de voitures en Wallonie et en Flandre pour différentes catégories de motorisation, de 2018 à 2045. En 2024, pour la Wallonie et la Flandre, 35% des automobilistes roulent avec une voiture diesel, et 58% avec une voiture essence. Ces deux types de voitures représentent à elles seules 93% du parc automobile wallon et flamand. Le nombre de voitures diesel diminue depuis le début du graphique (2018), et devrait continuer de baisser jusqu'en 2050 afin de ne représenter qu'une infime partie. Quant aux voitures à essence, leur nombre ne devrait que commencer à diminuer vers 2027, passant de 59% à 8% en 2050 (Vanpée et Mayeres, 2023).

Au sujet des BEV, celles-ci sont peu présentes en 2024, pour une proportion de 4%. Ce nombre va augmenter rapidement, afin de représenter 10% de la flotte automobile en 2026, 20% en 2028, 50% en 2036, et finalement 85% en 2050 (Vanpée et Mayeres, 2023).

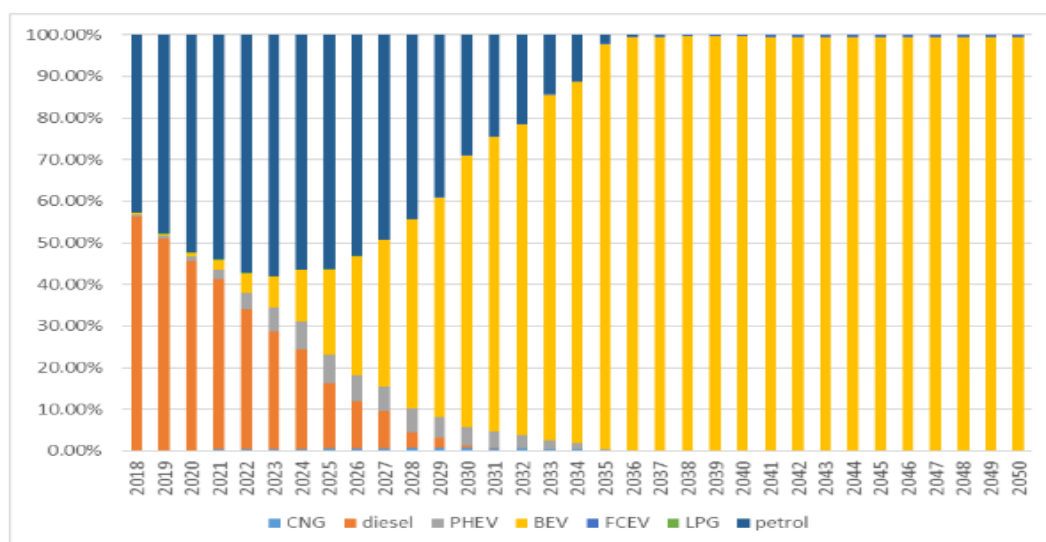


Figure 11 : Répartition de la flotte prévisionnelle de voitures à Bruxelles - Vanpée et Mayeres (2023)

A Bruxelles, les chiffres sont différents. En effet, en se basant sur la figure 11, d'ici 2035, **une interdiction de circulation des véhicules diesel, essence et hybride accélèrera la transition vers le tout électrique**. Les voitures à essence sont déjà en train de diminuer, passant de 58% en 2023 à moins d'un pourcent en 2036. Les voitures diesel devraient disparaître d'ici 2030, supprimant les 25% de voitures diesel présentes en 2024 (Vanpée et Mayeres, 2023).

Les véhicules électriques sont déjà plus présents proportionnellement à Bruxelles qu'en Wallonie et qu'en Flandre, représentant 11% en 2024. En 2035, les voitures électriques représenteront 98% des véhicules en circulation, afin de respecter l'interdiction des voitures non-électriques à Bruxelles (Vanpée et Mayeres, 2023).

#### 4.1.2 Répartition des voitures électriques à batterie par province

De nos jours (2024), il y a 5.300.000 de voitures immatriculées en Belgique (*Statistiques / FEBIAC, 2024*). D'ici 2030, ce nombre de voitures ne devrait pas changer énormément car le nombre d'habitants en Belgique n'augmentera pas non plus de beaucoup. Afin de mieux prévoir la réparation des voitures électriques à batterie en Belgique, nous allons partir sur le postulat que Bruxelles sera composée à **65% de BEV**, tandis que les deux autres régions belges seront composées de **28% de BEV** d'ici 2030 (Vanpée et Mayeres, 2023).

Cette étude se base sur les provinces belges afin de délimiter le territoire. Cela est intéressant car les provinces se différencient par rapport à leur superficie, leur densité, leurs infrastructures. Mais, cela implique, par exemple, qu'une infrastructure à la limite d'une province sera comptée comme non-utilisée par les habitants des provinces voisines, alors que cela ne sera pas le cas en réalité.

Nombre total théorique de bornes pour 2030					
Provinces	Nombre de voitures 2023	% BEV 2030	Résultat	10% de bornes de recharge	% de bornes
<b>Bruxelles</b>	319.288	0,65	207.537	20.754	13%
<b>Brabant Wallon</b>	220.374	0,28	61.705	6.170	4%
<b>Hainaut</b>	635.286	0,28	177.880	17.788	11%
<b>Liège</b>	537.740	0,28	150.567	15.057	9%
<b>Luxembourg</b>	145.162	0,28	40.645	4.065	2%
<b>Namur</b>	251.212	0,28	70.339	7.034	4%
<b>Anvers</b>	870.670	0,28	243.788	24.379	15%
<b>Limbourg</b>	472.395	0,28	132.271	13.227	8%
<b>Brabant Flamand</b>	586.013	0,28	164.084	16.408	10%
<b>Flandre-Orientale</b>	748.884	0,28	209.688	20.969	13%
<b>Flandre-Occidentale</b>	604.027	0,28	169.128	16.913	10%
<b>Total</b>	5.391.051	/	<b>1.627.631</b>	<b>162.763</b>	100%

Tableau 11 : Nombre total théorique de bornes de recharge par province d'ici 2030 – Tableau personnel

Le tableau 11 montre le nombre de voitures électriques à batterie d'ici 2030. Le nombre de voitures en 2023 est multiplié par la future répartition des BEV du parc automobile belge en 2030. Cela permet d'avoir comme solution le nombre projeté de BEV par province. Basé sur les chiffres calculés dans le tableau 11, le nombre total de BEV en 2030 en Belgique sera de 1,6 millions. La province d'Anvers est en avance par rapport aux autres provinces, avec 240.000 BEV, suivi par la Flandre-Orientale avec 210.000 BEV. La Flandre possède globalement plus de BEV, avec un peu moins de 1.000.000 véhicules, contre 500.000 en Wallonie.

Cependant, le chiffre calculé de BEV de 1.600.000 voitures dépasse largement le chiffre prévisionnel de 1.250.000 BEV donné par FEBIAC pour 2030. Etant donné le retard accumulé en matière de transition écologique de la Belgique (Zafar et Ammara, 2024) et le chiffre avancé par la Fédération Belge et Luxembourgeoise de l'Automobile et du Cycle, il est plus raisonnable de se baser sur le chiffre total de **1.250.000**, équivalent à une diminution globale de 21%. Afin de répartir au mieux les BEV au travers de la Belgique, il est important de garder les proportions calculées ci-dessus.

Nombre total théorique de bornes pour 2030	Proportion	Chiffre FEBIAC	10% de points de recharge
<b>Bruxelles</b>	13%	159.386	15.939
<b>Brabant Wallon</b>	4%	47.389	4.739
<b>Hainaut</b>	11%	136.610	13.661
<b>Liège</b>	9%	115.634	11.563
<b>Luxembourg</b>	2%	31.215	3.121
<b>Namur</b>	4%	54.019	5.402
<b>Anvers</b>	15%	187.226	18.723
<b>Limbourg</b>	8%	101.582	10.158
<b>Brabant Flamand</b>	10%	126.014	12.601
<b>Flandre-Orientale</b>	13%	161.038	16.104
<b>Flandre-Occidentale</b>	10%	129.888	12.989
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>1.250.000</b>	<b>125.000</b>

Tableau 12 : Nombre total théorique de bornes pour 2030 – Tableau personnel

Après correction avec les prévisions de FEBIAC, les tendances restent les mêmes grâce aux proportions gardées. En effet, la province d'Anvers reste celle avec le plus de bornes de recharge, suivie de la Flandre-Orientale, et finalement Bruxelles. Le nombre de points de recharge à prévoir est donc **125.000**, représentant 10% du nombre de BEV prévues.

#### 4.1.3 Répartition des voitures électriques à hydrogène par province

Au sujet des voitures à hydrogène, le constat est différent. En effet, les prévisions de FCEV dans la flotte automobile belge sont basses. Pour 2030, selon les informations récoltées auprès de l'institut Transport et Mobility Leuven (Vanpée et Mayeres, 2023), le taux de FCEV sera **de moins d'1%** à Bruxelles, ainsi qu'également **moins d'1%** en Wallonie et Flandre. Ce chiffre n'augmentera pas après 2030, et restera dans les mêmes tranches données.

	Nombre de voitures 2023	% FCEV 2030	Nombre FCEV	% FCEV
<b>Bruxelles</b>	319.288	0,005	1.596	9%
<b>Brabant Wallon</b>	220.374	0,003	661	4%
<b>Hainaut</b>	635.286	0,003	1.906	11%
<b>Liège</b>	537.740	0,003	1.613	10%
<b>Luxembourg</b>	145.162	0,003	435	3%
<b>Namur</b>	251.212	0,003	754	4%
<b>Anvers</b>	870.670	0,003	2.612	16%
<b>Limbourg</b>	472.395	0,003	1.417	8%
<b>Brabant Flamand</b>	586.013	0,003	1.758	10%
<b>Flandre-Orientale</b>	748.884	0,003	2.247	13%
<b>Flandre-Occidentale</b>	604.027	0,003	1.812	11%
<b>Total</b>	5.391.051		<b>16.812</b>	100%

Tableau 13 : Nombre théorique de voitures FCEV par province d'ici 2030 – Tableau personnel

Le nombre de voitures à hydrogène sera d'environ **17.000** véhicules seulement. Ce chiffre rentre dans la fourchette prévisionnelle donnée par le site du gouvernement belge de la transition énergétique, estimant entre 10.000 et 20.000 FCEV d'ici 2030 (Stratégie Fédérale Belge Pour L'hydrogène, 2024). Sachant qu'une voiture prend en moyenne 3 à 5 minutes pour faire le plein (Kurtz et al., 2020), le nombre de stations d'hydrogène ne sera donc pas élevé. Cependant, dans ce cas-ci, la distance à parcourir afin de trouver une station sera importante.

## 4.2 Évaluer les habitudes des Belges

De nos jours, il existe plusieurs moyens de déplacement en Belgique. En effet, la Belgique dispose d'un réseau ferroviaire assez développé, d'un réseau de bus TEC, De Lijn, STIB, de métros et de trams dans certaines grandes villes, ...

Une enquête a été menée par le Service public fédéral (SPF) Mobilité et Transports auprès de 10.632 Belges en 2019, afin de comprendre les habitudes belges en matière de déplacement. Les préférences sont importantes à prendre en compte car elles influencent grandement la mise à disposition de services. Cela influence également l'autonomie minimum que les voitures doivent procurer afin de satisfaire le moyen dans ses déplacements de tous les jours.

L'enquête du monitor Belge (Service public fédéral Mobilité et Transports, 2019) a révélé que la population réalise en moyenne 2,2 déplacements par jour, avec une durée moyenne de 24 minutes par trajet **et une distance moyenne de 16 kilomètres**. En général, les Belges consacrent environ 58 minutes par jour à leurs déplacements, **et 92% de ces déplacements durent une heure ou moins**.

La voiture personnelle reste le mode de transport le plus fréquemment utilisé, que ce soit en nombre de déplacements ou de distance parcourue. En matière de nombre de déplacements, la voiture (conducteur ou passager) représente 61%, tandis que, en ce qui concerne la distance parcourue, elle est responsable de trois quarts des kilomètres (Service public fédéral (SFP) Mobilité et Transports, 2019).

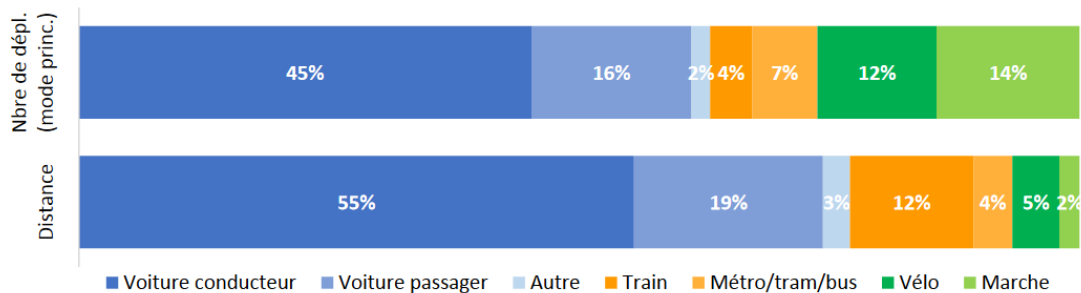


Figure 12 : Répartition du nombre de déplacements et de la distance en fonction du type de transport - Service public fédéral Mobilité et Transports, 2019

Les Bruxellois, en raison du caractère exclusivement urbain de leur région, adoptent des modes de déplacement bien différents. Ils optent pour une alternative à la voiture dans plus de la moitié de leurs déplacements, favorisant souvent la marche ou les transports en commun (métro, tram, bus).

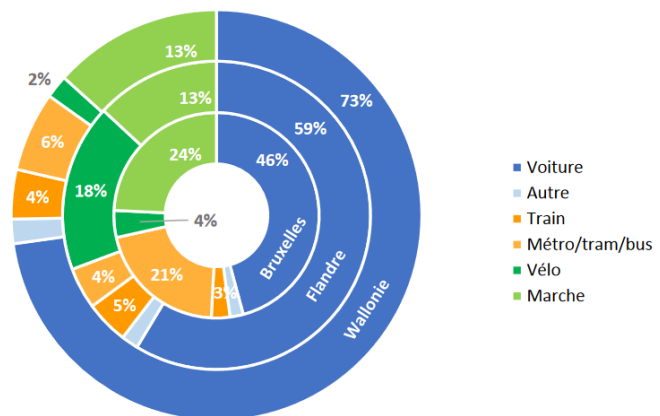


Figure 13 : Répartition du type de transport en fonction de la région - Service public fédéral Mobilité et Transports, 2019

La distance à parcourir exerce une influence significative sur le choix du mode de transport lors d'un déplacement. Pour des distances inférieures à deux kilomètres, les modes actifs sont prédominants, c'est-à-dire la marche à pied ou le vélo. Cependant, 17% des déplacements de moins d'un kilomètre se font encore en voiture.

Les transports en commun sont donc largement sous-utilisés par rapport à ce qu'ils pourraient desservir. La part des déplacements en voiture est la plus importante entre 10 et 50 kilomètres, frôlant les 80% pour cette plage de distance. **La voiture est donc le moyen de déplacement le plus utilisé par les Belges afin de se déplacer pour de plus longues distances.** C'est pourquoi la mise en place de nouveaux services pour répondre à la demande croissante de bornes électriques et de stations hydrogène est importante à l'horizon 2030.

Les temps de déplacement ne sont pas équitablement répartis tout au long de la journée (Figure 14). On observe deux pics qui correspondent aux heures de pointe du matin et du soir. La période de pointe du soir est plus étendue dans le temps et plus dense que celle du matin. Cette différence peut s'expliquer par le fait qu'en plus des retours du travail, d'autres motifs générateurs de déplacements (courses/loisirs) contribuent au pic des temps de déplacement du soir. Un pic d'utilisation peut provoquer une demande élevée de bornes de recharge.

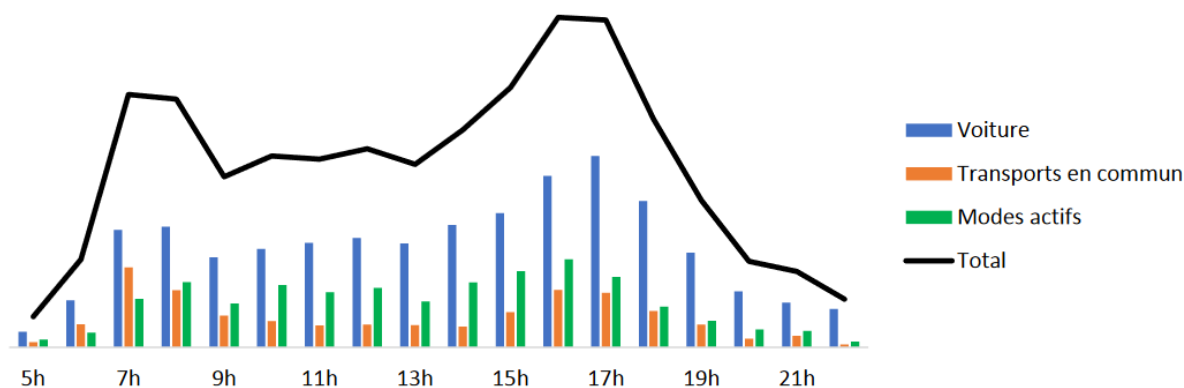


Figure 14 : Répartition de l'utilisation des transports en fonction de l'heure de la journée - Service public fédéral Mobilité et Transports, 2019

### 4.3 Identifier les emplacements stratégiques :

La densité de population joue un rôle primordial dans le placement des stations de recharge. En effet, plus la densité de population est élevée, plus un nombre élevé de points de recharge sera nécessaire. Pour ce faire, une analyse de la population par province est nécessaire, car la répartition de la population belge n'est pas uniforme. Dans le cadre de ce travail, nous distinguons la capitale et le brabant flamand, car la demande diffère sur les deux territoires.

Belgique - 01/01/2023	Habitant/km <sup>2</sup> par province	Population par province	% population par province	Superficie par province (km <sup>2</sup> )	% superficie par province
<b>Bruxelles-Capital</b>		1.241.175	11%	161	1%
<b>Brabant Wallon</b>	373	412.934	4%	1.091	4%
<b>Hainaut</b>	356	1.356.895	12%	3.786	12%
<b>Liège</b>	290	1.115.518	10%	3.862	13%
<b>Luxembourg</b>	66	293.967	3%	4.440	15%
<b>Namur</b>	137	502.261	4%	3.666	12%
<b>Anvers</b>	673	1.910.952	16%	2.867	9%
<b>Limbourg</b>	371	895.030	8%	2.422	8%
<b>Brabant Flamand</b>	553	1.187.483	10%	2.074	7%
<b>Flandre-Orientale</b>	518	1.561.316	13%	2.982	10%
<b>Flandre-Occidentale</b>	384	1.220.026	10%	3.144	10%
<b>Total</b>		<b>11.697.557</b>	<b>100%</b>	<b>30.495</b>	<b>100%</b>

Tableau 14 : Répartition de la densité de population en fonction des provinces de Belgique - Structure de la Population | Statbel (2023)

Selon les chiffres qui viennent du site belge « Statbel » (*Structure de la Population / Statbel*, 2023) repris dans le tableau 14, la Belgique est plus peuplée dans la partie Flamande (57%) que Wallonne (33%), c'est donc logiquement dans cette communauté que le nombre de bornes est le plus élevé.

Dans la province du Luxembourg, la densité de population est nettement plus faible (3% de la population totale), limitant le besoin de stations. Cependant, c'est dans cette région que les **déplacements y sont les plus longs**, avec une moyenne de 45 minutes le déplacement (Gerber et Ramm, 2003) demandant donc des rechargements plus réguliers. Il est important de noter que c'est dans cette province que la superficie est la plus grande, avec 4.440 km<sup>2</sup>, suivie par Namur avec une dimension de 3.666 km<sup>2</sup>. Anvers est la province la plus peuplée (après Bruxelles), et sa superficie n'est que de 2.867 km<sup>2</sup>. La colonne « % répartition » représente la répartition du territoire en pourcentage en fonction des provinces.

### 4.3.1 Règlement européen

#### 4.3.1.1 Règlement européen pour les BEV

Le réseau RTE-T s'étend sur une distance de 1.000 kilomètres au travers de la Belgique. Cependant, il est acceptable d'inclure le reste des autoroutes qui ne font pas partie du réseau Européen dans la règle de l'Union européenne. Il y a donc 1.800 kilomètres d'autoroutes à couvrir (*Réseau Routier Régional*, 2023). La loi Européenne stipule qu'il faut avoir des bornes disponibles tous les 60 kilomètres. Un parc de recharge d'autoroute dispose de 15 bornes, incluant 2 points de recharge chacune (HR Government, 2022). De plus, il faut mettre un parc de chacun des côtés de la route afin de subvenir au besoin des voitures venant des deux sens. Il faut donc prévoir 900 bornes en tout, incluant à chaque fois deux points de recharge par borne, pour un total de 1.800 points de recharge .

Autoroutes (km)	Intervalles (km)	Nombre de bornes	Deux sens	Total	Avec 2 points de recharge par borne
1.800	60	15	2	900	1.800

$$(1800 \text{ km} : 60 \text{ km}) * 15 \text{ bornes} * 2 \text{ sens} = 900 \text{ bornes}$$

En plus des autoroutes, la Belgique dispose d'un réseau de routes nationales développé, rendant les déplacements inter-Belgique pratiques et rapides. C'est pourquoi ces routes méritent également de disposer de certains points de recharge. En effet, en inclure sur le réseau national d'ordre 1 et 2, permettra d'éviter au Belge de devoir faire des détours par des autoroutes afin

de trouver des bornes si celles-ci sont uniquement installées sur ces grands axes routiers. Les routes nationales d'ordre 1 sont des artères principales qui assurent la liaison entre les grandes villes et régions du pays. Elles sont conçues pour permettre un transport rapide et efficace sur de longues distances. Les routes nationales d'ordre 2 jouent un rôle secondaire par rapport aux routes d'ordre 1. Elles assurent les connexions entre des villes ou des régions moins importantes ou servent de liaisons complémentaires au réseau de premier ordre. Les routes d'ordre 3 et 4 sont les moins importantes du réseau routier belge (*Réseau Routier Régional*, 2023).

Sur le réseau national, il ne faut pas autant de bornes de recharge par station que sur l'autoroute, ni aussi souvent. En effet, malgré que ces routes soient utiles, elles sont un peu moins fréquentées que les grands axes routiers. Les routes nationales ont une longueur totale de 1.500 km, il faut installer 375 bornes de recharge.

Routes nationales (km)	Intervalles	Nombre de bornes	Deux sens	Total	Avec 2 points de recharge par borne
1.500	80	10	2	375	750

$$(1.500 \text{ km} : 80 \text{ km}) * 10 \text{ bornes} * 2 \text{ sens} = 375 \text{ bornes}$$

Le nombre total de bornes à inclure le long des axes routiers (autoroutes et routes nationales) est de  $900 + 375 = 1.275$  bornes.

En 2024, il y a une grande différence entre le nombre de chargeurs lents et rapides. En effet, 96% des chargeurs en Belgique sont des chargeurs lents AC, contre 4% de chargeurs rapides DC. Les chargeurs rapides ont un coût plus conséquent que les chargeurs lents, et sont surtout importants sur les grands axes routiers tels que les autoroutes.

Il est important que les 1.275 bornes sur autoroutes et routes nationales soient des chargeurs rapides. Le reste des chargeurs peuvent être des chargeurs lents AC, en fonction des moyens mis en place (IEA, 2023).

#### 4.3.1.2 Règlement européen pour les FCEV

Concernant l'implantation des stations à hydrogène le long des autoroutes, celles-ci doivent être mises tous les 200 kilomètres, à minimum 10 kilomètres des sorties d'autoroutes. Pour les nationales, la mise en place de station d'hydrogène à un rythme aussi soutenu que sur les autoroutes n'a pas d'utilité. En effet, comme pour les stations de recharge, il est préférable d'en

mettre moins car ces routes sont moins fréquentées que les autoroutes, bien que celles-ci soient très utiles pour les déplacements des Belges.

Autoroutes (km)	Intervalles	Total
1.800	200	9

$$(1800 \text{ km} : 200\text{km}) = 9 \text{ stations}$$

National (km)	Intervalles	Total
1.500	300	5

$$(1500 \text{ km} : 300\text{km}) = 5 \text{ stations}$$

Sur les axes routiers importants, il faut mettre en place un minimum de **14 stations hydrogène**.

#### 4.3.2. Les stations-services pour voitures électriques à batterie

Là où il y a des avantages à adopter des véhicules électriques par rapport aux véhicules conventionnels, il reste néanmoins des défis concernant le manque d'infrastructures de recharge publiques. Le nombre de bornes dans des stations-services traditionnelles est bien moins élevé et est considéré comme l'un des principaux obstacles à l'usage des véhicules électriques (Sun et al., 2020). Comme vu précédemment, la présence de bornes de recharge sur les autoroutes est le critère numéro 1 pour les conducteurs ou futurs conducteurs de BEV. Dans un second temps, les stations-services sont également prisées (Philipsen et al., 2016).

Stations-services	Nombre existant	Répartition	50% des stations avec bornes	2 bornes par station	Avec deux points de recharge par borne
Flandres	1.714	55%	857	1.714	3.428
Wallonie	1.244	40%	622	1.244	2.488
Bruxelles	161	5%	81	161	322
<b>Total</b>	<b>3.119</b>	<b>100%</b>	<b>1.560</b>	<b>3.119</b>	<b>6.238</b>

Tableau 15 : Répartition des stations-services en Belgique – Statbel

En Belgique, il existe 3.119 stations-services, non uniformément réparties. En effet, 55% de ces stations se trouvent sur la partie Nord du pays, contre seulement 40% au Sud (Statbel, 2023). Seulement 60 d'entre-elles ont mis en place des bornes de recharge, représentant 2% des stations-services (Leclercq, 2022). Afin de répondre à la demande grandissante, un minimum de 50% des stations pourraient être munies de bornes de recharge pour 2030. Une moyenne de 2 bornes de recharge par station est appliquée (Leclercq, 2022).

$$\text{Flandre} \rightarrow \frac{1.714 \text{ stations} - \text{services}}{50\% \text{ stations avec bornes}} * 2 \text{ bornes par station} = 1.714 \text{ bornes}$$

Il faut installer **3.119 bornes** de recharge dans **les stations-services** afin de répondre aux attentes des utilisateurs.

## 4.4 Estimer le nombre de stations de recharge / hydrogène nécessaires

### 4.4.1 Les voitures électriques à batterie

Maintenant que le nombre de bornes pour autoroutes (900), routes nationales (375) et stations-services (3.119) est calculé, il faut répartir le reste de bornes à travers la Belgique en fonction de la population. Le tableau 16 reprend les bornes déjà calculées. Il reste donc **32.286** bornes à placer, pour **64.572** points de recharge. On néglige ici dans le calcul le fait qu'il y a déjà un certain nombre de bornes installées sur les autoroutes/nationales et en stations-services.

<b>Tableau récapitulatif</b>	<b>Nombre de bornes théoriques</b>	<b>Nombre de points de recharge théorique</b>
Nombre de bornes théorique pour 2030	62.500	125.000
Nombre de bornes déjà existantes (Mars, 2024) <sup>5</sup>	- 25.820	- 51.640
Nombre de bornes sur autoroutes/nationales	- 1.275	- 2.550
Nombre de bornes en stations-services	- 3.119	- 6.238
<i>Nombre de bornes restantes à placer</i>	<b>= 32.286</b>	<b>= 64.572</b>

Tableau 16 : Tableau récapitulatif – Tableau personnel

Le tableau 17 présente le nombre de points de recharge à implémenter d'ici 2030 en Belgique en fonction des provinces. Les points de recharge sur les autoroutes et sur les routes nationales sont répartis en fonction de la longueur des routes dans la province.

	<i>Prévisions points de recharge 2030</i>	Chargeurs existants	Autoroutes + Stations-services	<b>Prévisions - Chargeurs existants - Axes routiers</b>
<b>Bruxelles</b>	15.939	5.527	342	10.070
<b>Province du Brabant wallon</b>	4.739	961	633	3.145
<b>Province de Hainaut</b>	13.661	1.820	814	11.027
<b>Province de Liège</b>	11.563	2.392	737	8.434
<b>Province du Luxembourg</b>	3.121	784	672	1.665
<b>Province de Namur</b>	5.402	935	699	3.768
<b>Province d'Anvers</b>	18.723	11.331	1.029	6.363
<b>Province du Limbourg</b>	10.158	4.531	868	4.759
<b>Province du Brabant flamand</b>	12.601	5.707	1.030	5.864
<b>Province de Flandre-Orientale</b>	16.104	9.164	1.015	5.925
<b>Province de Flandre-Occidentale</b>	12.989	8.488	949	3.552
<b>Total</b>	125.000	51.640	8.788	<b>64.572</b>

Tableau 17 : Calcul du nombre de points de recharge à mettre en place d'ici 2030 – Tableau personnel

<sup>5</sup>Bibra et al. (2024)

La dernière colonne est calculée en soustrayant la colonne « Prévisions » par la colonne « Chargeurs existants » et la colonne « Autoroutes + stations-services ». D’ici 2030, la Belgique devra mettre en place 64.500 points de recharge sur tout son territoire, afin d’arriver à un total de 125.000 points de recharge. Il est important de prendre en compte la superficie de chaque territoire, afin de vérifier si ce nombre de bornes est suffisant ou non pour couvrir celui-ci.

	<b>Superficie km<sup>2</sup></b>	<b>Nombre de point de recharge</b>	<b>Nombre bornes</b>	<b>5 bornes par station</b>	<b>Superficie recouverte par station (km<sup>2</sup>)</b>
<b>Bruxelles</b>	161	15.939	7.970	1.594	0,1
<b>Brabant Wallon</b>	1.091	4.739	2.370	474	2
<b>Hainaut</b>	3.786	13.661	6.831	1.366	3
<b>Liège</b>	3.862	11.563	5.782	1.156	3
<b>Luxembourg</b>	4.440	3.121	1.561	312	14
<b>Namur</b>	3.666	5.402	2.701	540	7
<b>Anvers</b>	2.867	18.723	9.362	1.872	2
<b>Limbourg</b>	2.422	10.158	5.079	1.016	2
<b>Brabant Flamand</b>	2.074	12.601	6.301	1.260	2
<b>Flandre-Orientale</b>	2.982	16.104	8.052	1.610	2
<b>Flandre-Occidentale</b>	3.144	12.989	6.495	1.299	2
<b>Total ou moyenne</b>	30.495	125.000	62.500	12.500	2

Tableau 18 : Répartition des bornes de recharge au travers du pays d’ici 2030 – Tableau personnel

La colonne « Superficie recouverte par station (km<sup>2</sup>) » est calculée en divisant la superficie de chaque province par le nombre de stations de chaque province. En suivant cette méthodologie, il est possible de juger si oui ou non, le nombre de stations est suffisant. Cependant, ce type de technique a des limites. En effet, en divisant par le nombre de stations, seule la distance à vol d’oiseau est prise en compte, et non les routes existantes. De plus, ceci ne prend pas en compte la topographie du terrain ou autres.

La province du Luxembourg est la province la plus étendue sur le territoire belge, et est celle qui comportera le moins de BEV d’ici 2030. D’après les analyses menées, il y aura une station pour 14 km<sup>2</sup> de superficie.

#### 4.4.2 Les voitures à hydrogène

Au sujet des stations d’hydrogène, il en existe 8 en Belgique. Ceci a pour conséquence que des provinces entières se retrouvent sans aucune possibilité de remplir leur réservoir. En 2024, toutes les stations sont installées à côté d’autoroutes, ce qui simplifie leur accessibilité, et celles-ci respectent également les règles européennes. Il est à noter que la plupart des stations installées

se situent au nord de la Belgique, dans la région flamande. La région wallonne est desservie à Liège, mais pas du tout dans les autres provinces. Il est important de prendre en compte l'autonomie des voitures à hydrogène, qui diffère de celle des BEV. L'autonomie des FCEV est en moyenne de 575 kilomètres par recharge, comme vu précédemment (De Wolf et Smeers, 2023). La moyenne kilométrique belge par jour est de 26 kilomètres. Cela veut dire que si on divise l'autonomie par la moyenne, les conducteurs de FCEV se doivent de charger leur voiture en moyenne tous les **22 jours**. Cela signifie une obligation de faire le plein **17 fois sur l'année**.

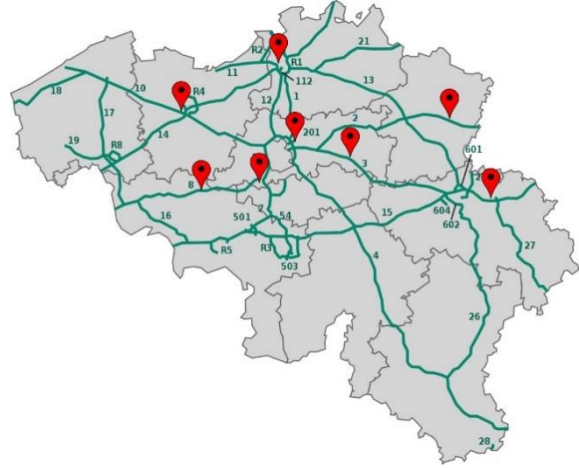


Figure 15 : Répartition des stations hydrogène en Belgique

$$\text{Nombre de jours entre deux pleins} \rightarrow \frac{575 \text{ km}}{26 \frac{\text{km}}{\text{jour}}} = 22 \text{ jours}$$

$$\text{Nombre de pleins par an} \rightarrow \frac{365 \text{ jours}}{22 \text{ jours}} = 17 \text{ pleins par an}$$

Précédemment dans ce travail, le nombre de FCEV pour 2030 en Belgique a été évoqué. Le nombre prévisionnel est de 17.000 voitures pour les 3 régions confondues. Il est alors possible de calculer le nombre de voitures par station par jour en moyenne, afin de voir le nombre minimum de stations qu'il faut mettre en place au travers du pays.

$$\text{Nombre de pleins par jour par station} \rightarrow 17.000 \text{ voitures} : 22 \text{ jours} = 800 \text{ voitures/jour}$$

Une station à hydrogène a un nombre limité de ravitaillement de voitures par jour. Celles-ci peuvent en moyenne s'occuper de 100 voitures par jours (Voelcker, 2015). Il faut donc au minimum théorique,  $800/100 = 8$  stations. C'est le nombre de stations déjà existantes en Belgique. L'offre proposée répond déjà à la demande des utilisateurs. Cependant, l'offre actuelle ne prend pas en compte l'emplacement de ces stations qui ne répond pas aux besoins des conducteurs de FCEV. De plus, une étude a été menée au sujet du nombre de voiture FCEV qu'une station peut ravitailler par jour, et celle-ci a montré qu'une station peut suffire pour 3.000 FCEV (McKinsey et Co, 2010). Avec 17.000 FCEV en 2030, il faudra avoir au minimum 6 stations, chiffre déjà atteint par la Belgique.

Prédire le nombre de stations suffisantes afin de que les consommateurs soient satisfaits du service est assez compliqué. Nonobstant, différents gouvernements ont mis en place certains objectifs pour les années à venir.

	Superficie du pays (km <sup>2</sup> )	Nombre de stations hydrogène en 2023	Nombre de stations hydrogène : Objectif 2030	Rapport superficie / Objectif 2030
<b>France<sup>6</sup></b>	551.695	100	1.000	552
<b>Espagne<sup>7</sup></b>	506.030	50	150	3.374
<b>Allemagne<sup>8</sup></b>	357.592	100	400	894
<b>Pays-Bas<sup>9</sup></b>	41.850	10	50	837
<b>Moyenne</b>	367.433	86	490	<b>1.414</b>

Tableau 19 : Comparaison des objectifs de divers pays en termes de nombre de stations d'hydrogène pour une certaine superficie

Le tableau 19 reprend les objectifs des différents gouvernements pour la fin de la décennie. La colonne « Nombre de stations hydrogène en 2023 » représente le nombre de stations d'hydrogène déjà présentes en 2023. La colonne « Nombre de stations hydrogène : Objectif 2030 » est l'objectif visé. Pour finir, la dernière colonne « Rapport superficie / 2030 » représente la superficie recouverte par une station d'hydrogène dans chaque pays. Plus ce rapport est grand, moins la disponibilité des stations est grande. Le pays le plus grand est la France, mais c'est également celui qui a le plus grand objectif. Les Pays-Bas est le plus petit pays en superficie. Ils ont également le plus petit nombre de stations comme objectif en 2030. L'Espagne est le pays ayant la plus grande superficie recouverte pour une station. La moyenne du rapport est de 1.400 km<sup>2</sup> par station.

Cependant, il est important de prendre en compte le fait que cette moyenne est fortement influencée par l'Espagne qui affiche un rapport assez élevé par rapport aux autres pays. Il est donc plus judicieux de réduire cette moyenne afin de se rapprocher des objectifs des autres pays avec une superficie de 1.000 km<sup>2</sup> de moyenne. La Belgique étant rependue sur 31.000 km<sup>2</sup>, il faudra y retrouver alors **31 stations au minimum**. C'est ce qui est visé dans le tableau 20.

<sup>6</sup> Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2021

<sup>7</sup> Stations Hydrogène Espagne, 2024

<sup>8</sup> Riepe, 2022

<sup>9</sup> Iyer, 2023

	Stations existantes	Superficie (km <sup>2</sup> )	14 Stations	Superficie / 14 Stations	35 stations	Superficie / 35 Stations	Racine carré
<b>Bruxelles</b>	0	161	1	161	1	161	13
<b>Brabant Wallon</b>	0	1.091	1	1.091	2	545	23
<b>Hainaut</b>	1	3.786	1	3.786	4	946	31
<b>Liège</b>	1	3.862	1	3.862	4	965	31
<b>Luxembourg</b>	0	4.440	1	4.440	5	888	30
<b>Namur</b>	0	3.666	1	3.666	4	916	30
<b>Anvers</b>	1	2.867	2	1.434	3	955	31
<b>Limbourg</b>	1	2.422	1	2.422	3	807	28
<b>Brabant Flamand</b>	3	2.074	3	691	3	691	26
<b>Flandre-Orientale</b>	1	2.982	1	2.982	3	994	32
<b>Flandre-Occidentale</b>	0	3.144	1	3.144	3	1.048	32
<b>Total / Moyenne</b>	8	30.495	<b>14</b>	2.178	<b>35</b>	871	29

Tableau 20 : Calcul du nombre de stations d'hydrogène en fonction de la superficie selon différents scénarios – Scénario 1 et 2 – Tableau personnel

La colonne “14 stations” représente un premier scénario avec une répartition où il existerait uniquement une station par province (en plus de celles déjà existantes). Cette répartition amènerait des problèmes, comme au Luxembourg par exemple à la vue de sa grande superficie. A part Bruxelles et le Brabant Flamand, aucune province ne posséderait une couverture de moins de 1000 km<sup>2</sup> par station à hydrogène.

Le deuxième scénario repris dans la colonne « 35 stations », considère qu’il faut une station pour une surface de 1.000 km<sup>2</sup>. La province du Luxembourg devrait posséder alors 5 stations, alors que celle-ci est la province qui aura le moins de voitures à hydrogène d’ici 2030. La dernière colonne est la racine carrée de la colonne « Superficie/35 stations », ce qui nous donne la longueur d’un côté du carré, pour aider à la représentation.

Le troisième scénario repris dans le tableau 21 prend en compte les attentes des conducteurs. En effet, comme déjà cité, 50% des conducteurs de FCEV sont prêts à faire un détour de maximum 10 minutes afin de trouver une station-service à hydrogène comme indiqué par Rosales-Tristancho et al., (2022), Martin et al. (2009), Brey et al., (2017). Si un conducteur roule à une vitesse de 90 km/h<sup>10</sup>, alors celui-ci parcourra 15 kilomètres, distance moyenne qu’un Belge fait par sortie (Service public fédéral (SFP) Mobilité et Transports, 2019). La zone à couvrir au minimum est de plus ou moins 15 km \* 15 km = **225 km<sup>2</sup>**. Afin de couvrir les

<sup>10</sup> En Flandre, la vitesse maximale est de 70km/h pour les routes nationales. Il faut alors compter 12 km de distance pour la même durée.

différentes zones géographiques, le nombre de stations augmente énormément, avec un total de 137. Installer autant de stations d'hydrogène d'ici 2030 n'est pas possible comme objectif, cependant celui-ci peut en être un à long-terme. La province du Luxembourg serait en possession d'une vingtaine de stations, contre 5 dans le Brabant Wallon.

	Nombre de stations d'hydrogène pour recouvrir 225 km <sup>2</sup> de superficie	Superficie (km <sup>2</sup> ) couverte par station	Racine carré
<b>Bruxelles</b>	1	161	13
<b>Brabant Wallon</b>	5	218	15
<b>Hainaut</b>	17	223	15
<b>Liège</b>	17	227	15
<b>Luxembourg</b>	20	222	15
<b>Namur</b>	16	229	15
<b>Anvers</b>	13	221	15
<b>Limbourg</b>	11	220	15
<b>Brabant Flamand</b>	10	207	14
<b>Flandre-Orientale</b>	13	229	15
<b>Flandre-Occidentale</b>	14	225	15
<b>Total / Moyenne</b>	<b>137</b>	<b>223</b>	<b>15</b>

Tableau 21 : Calcul du nombre de stations d'hydrogène - scénario 3 – Tableau personnel

Un dernier scénario (tableau 22) consiste à prendre en compte les files d'attente aux stations. Comme expliqué auparavant, les habitudes des horaires des Belges sont importantes à prendre en compte. Les Belges se déplacent principalement de 7 heures du matin jusqu'à 20 heures, avec un pic entre 14 heures à 19 heures. Cela veut dire que les Belges sont « sur les routes » 13 heures par jour.

	13 heures (min)	FCEB prévues par province	FCEB qui font le plein par jour (/22 jours)	Cadence de voitures (min)
<b>Bruxelles</b>	780	1.596	73	11
<b>Brabant Wallon</b>	780	661	30	26
<b>Hainaut</b>	780	1.906	87	9
<b>Liège</b>	780	1.613	73	11
<b>Luxembourg</b>	780	435	20	39
<b>Namur</b>	780	754	34	23
<b>Anvers</b>	780	2.612	59	13
<b>Limbourg</b>	780	1.417	64	12
<b>Brabant Flamand</b>	780	1.758	27	29
<b>Flandre-Orientale</b>	780	2.247	102	8
<b>Flandre-Occidentale</b>	780	1.812	82	9

Tableau 22 : Calcul du nombre de stations d'hydrogène - scénario 4 – Tableau personnel

La colonne « Cadence de voitures (min) » montre combien de temps il faut attendre pour qu'une voiture vienne faire le plein à la station en fonction des provinces. Par exemple, pour la ligne de la province de Namur, il y a 754 FCEV prévues pour 2030, dont en moyenne, 34 font le

plein par jour, ce qui signifie qu'une voiture fait le plein toutes les 23 minutes. Sachant qu'un plein d'hydrogène prend en moyenne 3 à 5 minutes (Kurtz et al., 2020), toutes les provinces devraient être capables de servir toutes les voitures le long de la journée, même si celles-ci ne possèdent qu'une station.

En conclusion, le nombre de voitures FCEV ne sera pas élevé en Belgique d'ici 2030, ce qui a pour conséquence que le nombre minimum de stations d'hydrogène est déjà atteint. Le nombre de voitures par jour qui viennent se ravitailler est telle qu'une station suffit par province. Cependant, si la demande des conducteurs devait être prise en compte, alors il faudrait avoir 137 stations réparties dans toutes la Belgique afin que ceux-ci ne soient pas dans l'obligation de faire de trop longs détours. Afin de trouver un équilibre entre ce que les consommateurs souhaitent et les objectifs possibles, le nombre de 35 stations apparait comme un bon compromis. En effet, ce nombre permet un déploiement minimum d'une station pour une surface de 1000 km<sup>2</sup>, avec le peu de pleins requis par an, les conducteurs peuvent s'adapter afin de faire un détour pour trouver une station si ceux-ci n'en trouvent pas directement sur leur chemin. Finalement, cela est en ligne avec ce que les autres gouvernements des pays voisins visent comme objectif.

## 4.5 Calculer les coûts de mise en service

Ce mémoire se penche sur la question des coûts totaux des mises en services d'ici 2030. Les coûts seront donc calculés et répartis sur 5 ans, allant de 2025 à 2030.

### 4.5.1 Coûts pour les bornes de recharge

Pour obtenir le coût total, il faut prendre en compte les coûts des **1.275 bornes DC** pour les grands axes routiers, les **3.119 bornes AC** prévues pour les stations-services et enfin les **32.286 bornes AC restantes**.

- L'investissement des chargeurs rapides DC le long des grands axes routiers, avec un prix unitaire de 75.000€, pour 1.275 unités, le coût total sera de  $1.275 * 75.000€ = 95.625.000€$ . Sachant que les règles européennes doivent être respectées pour 2026, ces bornes rapides ont la priorité d'installation.
- Les coûts des stations-services : il est prévu d'en disposer 3.119, à un coût de 2.500€ chacune. Le coût total sera donc de  $3.119 * 2.500€ = 7.797.500€$ . Cependant, si les stations-services veulent investir dans des stations plus rapides, cela est également possible, mais les coûts augmentent rapidement. En effet, Grube et al. (2017) proposent

également de se limiter aux grandes villes uniquement pour ce qui est des chargeurs rapides.

- Il y a 32.286 nouvelles bornes AC à mettre en place dans les diverses provinces, autrement dit, une implantation de  $32.286 / 5 = 6.457$  bornes de recharge par an, si on choisit une répartition constante. Chaque borne coûtant 2.500€, l'investissement à faire par an est de **16 millions d'euro**, avec un total de **81 millions d'euros au bout de 5 ans**.

	Nombre de bornes par an	Investissement par année (€)	Nombre total de bornes pour 2030	Investissement total 5 ans (€)
<b>Bruxelles</b>	986	2.517.500 €	5.035	12.587.500 €
<b>Brabant Wallon</b>	305	786.250 €	1.573	3.931.250 €
<b>Hainaut</b>	1.111	2.756.750 €	5.514	13.783.750 €
<b>Liège</b>	844	2.108.500 €	4.217	10.542.500 €
<b>Luxembourg</b>	161	416.250 €	833	2.081.250 €
<b>Namur</b>	374	942.000 €	1.884	4.710.000 €
<b>Anvers</b>	647	1.590.750 €	3.182	7.953.750 €
<b>Limbourg</b>	471	1.189.750 €	2.380	5.948.750 €
<b>Brabant Flamand</b>	598	1.466.000 €	2.932	7.330.000 €
<b>Flandre-Orientale</b>	602	1.481.250 €	2.963	7.406.250 €
<b>Flandre-Occidentale</b>	358	888.000 €	1.776	4.440.000 €
<b>Total</b>	<b>6.457</b>	<b>16.143.000 €</b>	<b>32.286</b>	<b>80.715.000 €</b>

Tableau 23 : Calcul de l'investissement pour les bornes de recharge BEV – Tableau personnel

En prenant en compte les 3 composantes, le coût total à investir afin de soutenir la demande future d'ici 2030 en Belgique est de **184 millions d'euros**.

<i>Budget Total – Bornes de recharge</i>	
Bornes sur autoroutes et nationales	95.625.000 €
Stations-services	+ 7.797.500 €
Bornes dans les provinces	+ 80.715.000 €
<b>Total</b>	<b>= 184.137.500 €</b>

Tableau 24 : Calcul du budget total pour l'installation des bornes de recharge – Tableau personnel

#### 4.5.1 Coûts pour les stations hydrogène

L'implémentation de stations hydrogène n'est pas rapide. Il est donc important de créer un ordre de priorité. Dans un premier temps, un développement prioritaire sur le réseau RTE-T européen afin de respecter les règles dictées par l'Union européenne. Toutes les stations déjà existantes sont proches des autoroutes, répondant aux normes. Il faut donc trouver les endroits vacants le long des axes. Une station hydrogène est mise par tranche de 200 km. Dans le tableau 25, la troisième colonne, « Stations pour respecter règles » montre où il faut implanter les stations. La dernière colonne met en avant les endroits où il manque une station, en fonction de celles déjà existantes.

	Stations existantes	Longueur autoroutes (km)	Stations pour respecter règles	Provinces où il faut des stations
<b>Bruxelles</b>	0	20	0	0
<b>Brabant Wallon</b>	0	91	0	0
<b>Hainaut</b>	1	178	1	0
<b>Liège</b>	1	142	1	0
<b>Luxembourg</b>	0	145	1	<b>1</b>
<b>Namur</b>	0	111	0	<b>0</b>
<b>Anvers</b>	1	320	2	<b>1</b>
<b>Limbourg</b>	1	165	1	0
<b>Brabant Flamand</b>	3	223	1	0
<b>Flandre-Orientale</b>	1	270	1	0
<b>Flandre-Occidentale</b>	0	145	1	<b>1</b>
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>1.810</b>	<b>9</b>	<b>3</b>

Tableau 25 : Répartition des stations d'hydrogène afin de respecter les règles Européennes – Tableau personnel

Afin de respecter les règles de l'Union européenne, il est obligatoire de construire un minimum de **3 nouvelles stations lors de la première année.**

Ensuite, il reste les stations le long des axes des nationales. Celles-ci sont au nombre de 5, comme précédemment calculé. Le même raisonnement peut y être également appliqué.

	Routes nationales (km)	Station sur routes nationales (300km)
<b>Bruxelles</b>	0	0
<b>Brabant Wallon</b>	92	0
<b>Hainaut</b>	283	<b>1</b>
<b>Liège</b>	199	<b>1</b>
<b>Luxembourg</b>	61	0
<b>Namur</b>	185	<b>1</b>
<b>Anvers</b>	51	0
<b>Limbourg</b>	38	0
<b>Brabant Flamand</b>	250	<b>1</b>
<b>Flandre-Orientale</b>	123	0
<b>Flandre-Occidentale</b>	243	<b>1</b>
<b>Total</b>	<b>1.525</b>	<b>5</b>

Tableau 26 : Répartition des stations d'hydrogène sur les routes nationales – Tableau personnel

Les provinces du Hainaut, Liège, Namur, Brabant Flamand et de la Flandre Occidentale auront une station d'hydrogène sur leurs routes nationales, lors de la deuxième année. Cependant, la province du Brabant Flamand dispose déjà d'assez de stations pour l'objectif 2030. Son objectif restera donc à 3 stations, et n'augmentera pas à 4 pour respecter les objectifs fixés.

Finalement, lors de la troisième année, le chantier pour le reste des stations commencera. Il est important de noter que la construction d'une station d'hydrogène demande entre un à deux ans (Cwhite, 2017). La construction doit donc commencer en 2028 pour les inaugurer en 2030.

	<b>Objectif 2030</b>	<b>Stations existantes</b>	<b>Autoroutes</b>	<b>Routes Nationales</b>	<b>Répartition du reste</b>
<b>Bruxelles</b>	1	0	0	0	1
<b>Brabant Wallon</b>	2	0	0	0	2
<b>Hainaut</b>	4	1	0	1	2
<b>Liège</b>	4	1	0	1	2
<b>Luxembourg</b>	5	0	1	0	4
<b>Namur</b>	4	0	0	1	3
<b>Anvers</b>	3	1	1	0	1
<b>Limbourg</b>	3	1	0	0	2
<b>Brabant Flamand</b>	3	3	0	0	0
<b>Flandre-Orientale</b>	3	1	0	0	2
<b>Flandre-Occidentale</b>	3	0	1	1	1
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>20</b>

Tableau 27 : Répartition des stations d'hydrogène afin d'atteindre l'objectif fixé – Tableau personnel

L'objectif final est d'avoir en service 35 stations. La colonne « répartition du reste » représente toutes les stations non-reprises dans les colonnes « stations existantes », « autoroutes » ou « routes nationales ». Ces stations doivent être implantées pour répondre aux objectifs fixés. Afin de calculer le coût total, il est important de rappeler que le prix d'une station hydrogène est de **1.700.000€**.

<b>Coût total des stations à hydrogène</b>		
<b>Autoroutes</b>	3	5.100.000 €
<b>Nationales</b>	4	6.800.000 €
<b>Répartition</b>	20	34.000.000 €
<b>Total</b>	<b>27</b>	<b>45.900.000 €</b>

Tableau 28 : Coût total d'investissement pour les stations à hydrogène – Tableau personnel

L'investissement total est de **46 millions d'euro**. Lors de la première année, 5 millions seront nécessaires, suivant 7 millions lors de la deuxième année, et 34 millions lors de la dernière.

Ces deux sommes sont assez conséquentes, la Belgique peut participer directement en y mettant une partie des fonds, ou alors des investisseurs peuvent également vouloir investir dans des infrastructures, si celles-ci leur rapportent un montant d'argent suffisant. Cependant, du point de vue de l'investisseur, la mauvaise utilisation des infrastructures est considérée comme une menace car elle a un impact négatif sur le retour sur investissement. Toutefois, le soutien des pouvoirs publics, ainsi que les modèles de financement fondés sur des partenariats public-privé, pourraient réduire le niveau de risque perçu. En outre, la mauvaise utilisation des infrastructures est également liée à la disponibilité limitée des BEV et des FCEV (Robinus et al., 2017).

## Chapitre 5 : Conclusions

Le réchauffement climatique est un des problèmes les plus pressants de notre société. Les dérèglements climatiques se font ressentir de plus en plus à travers le monde (Zafar et Ammara, 2024). Nous devons absolument y faire face en prenant des actions concrètes et immédiates.

Ce mémoire établit les coûts de mise en service des bornes de recharge pour voitures électriques à batterie et des stations hydrogène pour voitures électriques à pile à combustible afin de répondre à la demande d'ici 2030 en Belgique.

Les différences entre ces deux types de véhicules sont significatives. D'une part, la voiture électrique possède une plus petite autonomie, avec 260 km de moyenne contre 575 km pour les FCEV. La BEV a besoin d'un temps de recharge de 13 heures contre seulement 3 à 5 minutes pour les FCEV. D'autre part, la façon de les charger diffère également. Une BEV peut être rechargée à la maison, alors que la FCEV demande obligatoirement d'aller à une station à hydrogène. N'étant pas repris dans ce travail, il est important de noter la différence de coût d'achat des voitures. La BEV coûte en moyenne 37.000€, contre 62.000€ pour une FCEV. C'est une différence significative, qui peut pousser les consommateurs à se pencher vers la BEV (De Wolf et Smeers, 2023).

D'un point de vue pratique, la Belgique doit faire face à plusieurs défis pour répondre à la demande future en BEV. Dans un premier temps, les règles données par l'Union européenne obligent l'installation de bornes de recharge le long des grands axes routiers. Deuxièmement, les conducteurs souhaitent l'installation de bornes de recharge le long des axes routiers et dans les stations-services. Pour arriver à soutenir le marché, il faut disposer de 125.000 points de charges à travers le pays. Il en existe déjà à ce jour 51.640, il reste donc 73.300 points de recharge à construire. Un peu moins de 10.000 connexions sont prévues pour les axes routiers et stations-services. Il en reste donc 64.000 à répartir dans la Belgique, en fonction du nombre de BEV potentielles, de la densité de population et de la superficie à couvrir dans chaque province.

Pour arriver à cet objectif, nous avons déterminé qu'un investissement total de **184 millions d'euro est nécessaire. Cet investissement sera réparti sur 5 ans.**

La logique pour l'implémentation de stations hydrogène est différente. Celles-ci ne sont pas nombreuses vu la faible demande. Le plus grand problème est la répartition de celles-ci pour réduire au maximum les détours que les conducteurs de FCEV acceptent de faire. En effet,

théoriquement le nombre de stations minimum est déjà atteint, et aucun problème de pic de demande n'est ressenti. Le développement de stations d'hydrogène en est à ses débuts dans beaucoup de pays, ce qui ne permet pas d'en déployer n'importe où. Afin de réduire au maximum les détours, et avoir des objectifs réalisables, l'objectif est d'avoir 35 stations en Belgique d'ici 2030, nécessitant l'installation de 27 nouvelles stations. Sachant qu'une station coûte en moyenne 1,7 millions d'euro, le prix final au bout de 5 ans est estimé à **46 millions d'euro**.

Malgré que les BEV et FCEV soient considérées comme les voitures de l'avenir, il est difficile d'estimer leur nombre futur. En effet, les politiques financières en matière d'avantages fiscaux peuvent changer rapidement et influencer fortement les prévisions (SPF finances, 2024). À partir du 3 février 2024, de nouvelles dispositions entrent en vigueur, notamment la prolongation de la déductibilité fiscale pour les voitures thermiques commandées avant le 31 décembre 2025, étendue jusqu'au 31 décembre 2028 (SPF finances, 2024).

Bien que les BEV et les FCEV soient perçues comme des voitures non polluantes, il est également important d'examiner les émissions de CO<sub>2</sub> par kilomètre, ainsi que la méthode utilisée pour produire l'électricité ou l'hydrogène. L'impact environnemental de ces véhicules doit être évalué en tenant compte de la source de leur énergie. Si l'hydrogène est produit de manière non écologique, ou si l'électricité provient de sources polluantes, l'avantage environnemental de ces véhicules est réduit. C'est pourquoi des recherches supplémentaires sont nécessaires afin d'estimer comment cette énergie peut être produite, tout en respectant les enjeux climatiques.

De plus, plusieurs scientifiques estiment que l'hydrogène n'est pas une solution d'avenir pour les voitures. En effet, le rendement est 4 fois inférieur à celui de l'électricité. L'hydrogène serait alors plus utile pour les habitations ou pour les industries (Leclercq, 2024).

En conclusion, la transition vers les véhicules électriques et les FCEV dépend non seulement du développement des infrastructures mais aussi d'une production d'énergie durable. Des actions coordonnées entre les gouvernements, les entreprises et les consommateurs sont essentielles pour bâtir un avenir respectueux de l'environnement. Cette transition représente une opportunité de repenser nos systèmes énergétiques et de contribuer à la lutte contre le changement climatique.

## Bibliographie :

- Abel Rosales-Tristancho, Raúl Brey, Ana F. Carazo, J. Javier Brey, Analysis of the barriers to the adoption of zero-emission vehicles in Spain, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 158, 2022, Pages 19-43, ISSN 0965-8564, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.01.016>. Consulté le 4 mai 2024.
- Anelone, S. (2024, 18 mars). Développer les bornes de recharge pour véhicules *électriques*. *Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires*. <https://www.ecologie.gouv.fr/bornes-electriques-developpement-des-infrastructures-recharge> .Consulté le 2 mai 2024.
- Béchu, C. (2023). DÉPLOIEMENT DES BORNES DE RECHARGE En route pour 2030 ! [Communiqué de presse]. <https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/0001/07/f74b604a7c975bf6f83c6d28656df3a96ee485b1.pdf> .Consulté le 3 mai 2024.
- Bouguerra, K. (2022, 21 octobre). L'Allemagne va investir 6 milliards d'euros pour l'électrique. *InsideEVs France*. <https://insideevs.fr/news/617670/allemand-investissement-electrique-borne/> .Consulté le 1 mai 2024.
- Bradfer, F. (2019). *DEPLOIEMENT DES BORNES DE RECHARGEMENT DE VEHICULES ELECTRIQUES EN WALLONIE* (ISSN 2033-5024). Ir Etienne WILLAME. Consulté le 7 mars 2024, à l'adresse [http://mobilite.wallonie.be/files/cematheque/cematheque\\_0049.pdf](http://mobilite.wallonie.be/files/cematheque/cematheque_0049.pdf)
- Brey, J.J., Brey, R., Carazo, A.F., 2017. Eliciting preferences on the design of hydrogen refueling infrastructure. *Int. J. Hydrogen Energy* 42, 13382–13388. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.135>. Consulté le 8 mars 2024.
- Cwhite. (2017). *July 2017 Hydrogen Station Update Webinar - Questions & Answers / Hydrogen Fuel Cell Partnership*. <https://h2fc.org/blog/july-2017-hydrogen-station-update-webinar-questions-answers> .Consulté le 3 mai 2024.
- Béchu, C. (2023). DÉPLOIEMENT DES BORNES DE RECHARGE En route pour 2030 ! [Communiqué de presse]. <https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/0001/07/f74b604a7c975bf6f83c6d28656df3a96ee485b1.pdf>. Consulté le 18 mars 2024.
- De Wolf, D., & Smeers, Y. (2023). Comparison of battery electric vehicles and fuel cell vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 14(9), 262. <https://doi.org/10.3390/wevj14090262> . Consulté le 13 janvier 2024.
- Ekta Meena Bibra, Elizabeth Connell, Shobhan Dhi, Michael Drtil, Pauline Henriot, Jean-Baptiste le Marois, Sarah McBain, Leonardo Paoli, & Jacob Teter. (2024). Global EV Outlook 2024. *International Energy Agency*. <https://evmarketsreports.com/global-ev-outlook-2024/> .Consulté le 6 janvier 2024.
- Fit for 55 : accord sur les stations de recharge et de carburants alternatifs | Actualité | Parlement européen*. (2023, mars 28). Consulté le 9 mars 2024 à l'adresse : <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20230327IPR78504/fit-for-55-accord-sur-les-stations-de-recharge-et-de-carburants-alternatifs>

- GERBER, P., & RAMM, M. (2003). Vers une catégorisation des déplacements domicile - travail. Dans *CEPS/INSTEA*. <https://statistiques.public.lu/dam-assets/catalogue-publications/population-territoire-CEPS/2004/population-territoire-03-04.pdf>. Consulté le 18 février 2024.
- Grube, T.; Linke, A.; Xu, D.; Robinius, M.; Stolten, D.: *Kosten von Ladeinfrastrukturen für Batteriefahrzeuge in Deutschland*. In *proceedings*: 10. Internationale Energiewirtschaftstagung Wien, 2017, Vienna, 15.-17.02.2017, TU Wien, 2017. Consulté le 16 mars 2024.
- H2Benelux. (s. d.). H2Benelux. <https://h2benelux.eu/> Consulté le 4 janvier 2024.
- Hamon, G. (2020, 3 décembre). *Le coût d'une station hydrogène*. Bus & Car Connexion. <https://www.busetcar.com/archives/2020/le-cout-dune-station-hydrogene-pourrait-baisser-de-30-624841.php> .Consulté le 18 avril 2024.
- Hanabusa, H., & Horiguchi, R. (2011). A Study of the Analytical Method for the Location Planning of Charging Stations for Electric Vehicles. Dans *Lecture Notes in Computer Science* (p. 596-605). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23854-3\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23854-3_63). Consulté le 24 février 2024
- Henry, P. (2022, 24 novembre). *Vers un déploiement uniforme des bornes de chargement électriques en Wallonie*. Vers un Déploiement Uniforme des Bornes de Chargement Électriques En Wallonie. <https://henry.wallonie.be/home/communiqués-de-presse/presse/vers-un-déploiement-uniforme-des-bornes-de-chargement-electriques-en-wallonie.html> .Consulté le 18 avril 2024.
- HR Government. (2022). *Taking charge : the electric vehicle infrastructure strategy* <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6245ba40e90e075f15381cf0/taking-charge-the-electric-vehicle-infrastructure-strategy.pdf>. Consulté le 2 avril 2024.
- IEA (2023), *Global EV Outlook 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0. Consulté le 2 avril 2024.
- Iyer, K. (2023, 6 octobre). Comment la région de la Hollande du Nord transforme l'hydrogène en carburant du futur. Silicon Canals. <https://siliconcanals.com/fr/news/startups/energy-startups/hydrogen-north-holland-energy-transition-fuel-sustainability/> .Consulté le 20 avril 2024.
- Kurtz, J., Bradley, T. H., Winkler, E., & Gearhart, C. (2020). Predicting demand for hydrogen station fueling. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 45(56), 32298-32310. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.014>. Consulté le 2 avril 2024.
- Leclercq, D. (2022, 24 août ). Seulement 60 stations-service équipées de bornes en Belgique. *Gocar.be*. <https://gocar.be/fr/actu-auto/electrique/seulement-60-stations-service-equipees-de-bornes-en-belgique> .Consulté le 2 février 2024.
- Leclercq, D. (2024, 31 mai). L'hydrogène n'aurait « pas d'intérêt » pour les transports ? *Gocar.be*. <https://gocar.be/fr/actu-auto/hydrogene/lhydrogene-naurait-pas-dinteret-pour-les-transport-jancovici>. Consulté le 31 mai 2024.
- Martin, E., Shaheen, S.A., Lipman, T.E., Lidicker, J.R., 2009. Behavioral response to hydrogen fuel cell vehicles and refueling: Results of California drive clinics. *Int. J. Hydrogen Energy* 34 (20), 8670–8680. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.098>

- McKinsey & Co.: *A Portfolio of Powertrains for Europe: a Fact Based Analysis – The Role of Battery Electric Vehicles, Plug-in-Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles*. McKinsey & Co., 2010. Consulté le 3 avril 2024.
- Melliger, M., Van Vliet, O., & Liimatainen, H. (2018). Anxiety vs reality – Sufficiency of battery electric vehicle range in Switzerland and Finland. *Transportation Research. Part D, Transport And Environment*, 65, 101-115. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.08.011>. Consulté le 12 avril 2024.
- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. (2021). *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique*. Dans Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan\\_deploiement\\_hydrogene.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf). Consulté le 18 avril 2024.
- Mobility Dashboard (2024) . <https://www.mobilitydashboard.be/fr/main/dashboard/> .Consulté le 4 mai 2024.
- Olivier, A. (2023, 14 décembre). Infographies ; : les émissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne. *Touteurope.eu*. <https://www.touteurope.eu/environnement/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-dans-l-union-europeenne/> .Consulté le 3 mai 2024.
- Pasaoglu, G., Fiorello, D., Martino, A., Zani, L., Zubaryeva, A., Thiel, C., 2014. Travel patterns and the potential use of electric cars – Results from a direct survey in six European countries. *Technol. Forecasting Soc. Change* 87, 51–59. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004016251300276X>. Consulté le 11 mai 2024.
- Pearre, N. S., Kempton, W., Guensler, R., & Elango, V. (2011). Electric vehicles : How much range is required for a day's driving ? *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 19(6), 1171-1184. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.12.010> . Consulté le 4 février 2024.
- Philipsen, R., Schmidt, T., Van Heek, J., & Ziefle, M. (2016). Fast-charging station here, please ! User criteria for electric vehicle fast-charging locations. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology And Behaviour*, 40, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.04.013>. Consulté le 12 février 2024.
- Rauh, N., Franke, T., & Krems, J. F., (2014). Understanding the impact of electric vehicle driving experience on range anxiety. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. Consulté le 12 février 2024.
- Réseau routier régional*. (2023, 16 octobre). Géoportail de la Wallonie. Consulté le 2 mai 2024, à l'adresse <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/bdcb789c-4b02-4c0c-863a-98dac4ed0240.html>
- Riepe, S. (2022, 28 novembre). Communiqué de presse : Déploiement des stations hydrogène : H2 MOBILITY Deutschland poursuit son développement avec une levée de fonds de 110 millions d'euros et l'entrée de Hy24 comme actionnaire financier de référence. Hy24. <https://www.hy24partners.com/fr/deploiement-des-stations-hydrogene-h2-mobility-deutschland-poursuit-son-developpement-avec-une-leeve-de-fonds-de-110-millions-deuros-et-lentree-de-hy24-comme-actionnaire-financier/> .Consulté le 14 mai 2024.

- Robinius, M.; Linsen, J.; Grube, T.; Reus, M.; Stenzel, P.; Syranidis, K.; Kuckertz, P.; Stolten, D. (2017). Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. *Energy Environ*, 408, 1–126. Consulté le 3 avril 2024.
- Saber, C.; Rouhana, N. Chargeurs de batteries de véhicule électrique. *Cult. Sci. L'Ingénieur* 2020, 99. Available online: <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/12099/12099-chargeurs-de-batteries-pour-ve-ensps.pdf> . Consulté le 20 mars 2024.
- Sadeghi-Barzani, P., Rajabi-Ghahnavieh, A., & Karegar, H. K. (2014). Optimal fast charging station placing and sizing. *Applied Energy*, 125, 289-299. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.077>. Consulté le 10 mars 2024.
- Schröder, A., & Traber, T. (2012). The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles. *Energy Policy*, 43, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.041>. Consulté le 10 mars 2024.
- Serradilla, J., Wardle, J., Blythe, P., & Gibbon, J. (2017). An evidence-based approach for investment in rapid-charging infrastructure. *Energy Policy*, 106, 514-524. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.007>. Consulté le 11 mars 2024.
- Service Changements climatiques. (2022). *Émissions par secteur*. Klimaat | Climat. <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/emissions-des-gaz-a-effet-de-serre/emissions-par-secteur> .Consulté le 3 mars 2024.
- Service public fédéral Mobilité et Transports. (2019, décembre). Enquête monitor sur la mobilité des belges. *Belgium.be*. Consulté le 10 janvier 2024, à l'adresse [https://news.belgium.be/sites/default/files/news-items/attachments/2019-12/2019\\_Monitor\\_FINAL\\_FR.pdf](https://news.belgium.be/sites/default/files/news-items/attachments/2019-12/2019_Monitor_FINAL_FR.pdf) .Consulté le 14 janvier 2024.
- SPF Finances (2024, 12 mars). Voitures de société. [https://finances.belgium.be/fr/entreprises/impot\\_des\\_societes/avantages\\_toute\\_nature/voitures\\_de\\_societe](https://finances.belgium.be/fr/entreprises/impot_des_societes/avantages_toute_nature/voitures_de_societe) .Consulté le 13 mai 2024.
- Stations hydrogène Belgique. Carte et liste mises à jour. (s. d.). <https://www.glpautogas.info/fr/stations-hydrogene-belgique.html> .Consulté le 18 janvier 2024.
- Stations Hydrogène Espagne. (2024). [glpautogas.info](https://www.glpautogas.info/fr/stations-hydrogene-espagne.html). <https://www.glpautogas.info/fr/stations-hydrogene-espagne.html> .Consulté le 20 avril 2024.
- Statistiques / FEBIAC. (2024). FEBIAC. <https://www.febiac.be/fr/statistiques> Consulté le 12 février 2024.
- Stratégie fédérale belge pour l'hydrogène. (s. d.). SPF Economie. <https://economie.fgov.be/fr/themes/energie/transition-energetique/strategie-federale-belge-pour>. Consulté le 4 mai 2024.
- Structure de la population | Statbel. (s. d.). Consulté le 25 février 2024 à l'adresse <https://statbel.fgov.be/fr/themes/population/structure-de-la-population>
- Sun, Z., Gao, W., Li, B., & Wang, L. (2020). Locating charging stations for electric vehicles. *Transport Policy*, 98, 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.07.009>. Consulté le 14 janvier 2024.

- Vanpée, R., & Mayeres, I. (2023). The market potential for V2G in Belgium. *Transport & Mobility Leuven*. <https://www.tmleuven.be/en/project/EPOC/projectfile/565>. Consulté le 15 janvier 2024.
- Venair. (2024, 2 janvier). *Quel est le coût moyen (BOP) d'une station d'approvisionnement en hydrogène ?* | Venair. Venair. <https://venair.com/fr/nouvelles/articles/cout-h2-station-de-carburant> .Consulté le 13 mai 2024.
- Veritas France. (2018, 7 octobre). *La voiture à hydrogène va-t-elle se démocratiser ?* Bureau Veritas France. <https://www.bureauveritas.fr/magazine/la-voiture-hydrogene-va-t-elle-se-democratiser> .Consulté le 13 mai 2024.
- Viviani, M. (2022b, octobre 21). *Mondial de l'auto : la voiture à l'hydrogène déjà dans le rétroviseur des électriques*. Les Echos. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/automobile/mondial-de-lauto-la-voiture-a-lhydrogene-deja-dans-le-retroviseur-des-electriques-1871243> .Consulté le 13 mai 2024.
- Voelcker, J. (2015, août 26). *Gas, electricity, hydrogen : How many cars can « Fuel » and what will it cost ?* Green Car Reports. [https://www.greencarreports.com/news/1099548\\_gas-electricity-hydrogen-how-many-cars-can-fuel-and-what-will-it-cost](https://www.greencarreports.com/news/1099548_gas-electricity-hydrogen-how-many-cars-can-fuel-and-what-will-it-cost) . Consulté le 26 janvier 2024.
- Wang, Y., Wang, S., & Decès-Petit, C. (2022). Less is more : Robust prediction for fueling processes on hydrogen refueling stations. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 47(67), 28993-29005. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.239>. Consulté le 30 janvier 2024.
- Z. Fotouhi, M. R. Hashemi, H. Narimani and I. S. Bayram, "A General Model for EV Drivers' Charging Behavior," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 7368-7382, Aug. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2923260. Consulté le 2 février 2024.
- Zafar, S., & Ammara, S. (2024). Variations in climate change views across Europe : An empirical analysis. *Journal Of Cleaner Production*, 141157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141157>. Consulté le 13 mars 2024.

**Résumé :**

Le réchauffement climatique est un problème urgent qui exige une action immédiate et coordonnée à l'échelle mondiale. Ses effets, tels que des phénomènes météorologiques extrêmes, la fonte des glaces, l'élévation du niveau de la mer et la perte de biodiversité, se manifestent déjà dans le monde entier (Zafar et Ammara, 2024). Pour lutter contre ces changements, il est essentiel de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'adopter des modes de vie plus durables. Dans ce contexte, passer à une mobilité électrique est une solution prometteuse pour réduire l'impact environnemental du transport routier.

Il existe deux principales alternatives aux voitures à moteur thermique : les voitures électriques à batterie (BEV) et les voitures électriques à hydrogène (FCEV). Les BEV utilisent des batteries rechargeables, tandis que les FCEV utilisent l'hydrogène pour produire de l'électricité, rejetant uniquement de l'eau comme sous-produit. Le choix entre ces technologies dépend des préférences personnelles, des besoins de conduite et des infrastructures de recharge disponibles.

Ce mémoire aborde la question : « Comment établir un comparatif des coûts de distribution des deux modes de propulsion des véhicules électriques : voitures électriques avec batterie et voitures électriques avec pile à combustible ? ». Cette recherche est accompagnée d'un cas pratique sur la Belgique.

Pour les BEV, la Belgique devrait installer 125.000 points de recharge d'ici 2030, nécessitant un investissement de 184 millions d'euros sur cinq ans. Actuellement, il existe 51.640 points de recharge, donc 73.360 sont encore à construire. Ces stations doivent être stratégiquement placées le long des principaux axes routiers et dans les zones urbaines.

Pour les FCEV, le plan prévoit d'avoir 35 stations à hydrogène d'ici 2030, avec 27 nouvelles stations à construire, pour un coût estimé à 46 millions d'euros. Ces stations doivent être situées pour minimiser les détours pour les conducteurs, facilitant ainsi leur utilisation.

**UNIVERSITE 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](http://www.uclouvain.be/lsm)