

LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE DANS LE MONDE DE L'AUTOMOBILE



Etudiants :

Paul GENDREAU Samy MOUHAB

Francesca PELERIN

Enseignant-responsable du projet :

Abdelaziz BENSRAIR

Date de remise du rapport : 17/06/2023

Référence du projet : STPI/P6/2023 – 04

Intitulé du projet : ***La transition écologique dans le monde de l'automobile***

Type de projet : ***Recherche bibliographique***

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

Notre projet s'est articulé autour de deux problématiques distinctes. La première était d'identifier les technologies essentielles pour une transition durable des déplacements individuels. La seconde était d'analyser et de comparer l'impact environnemental des solutions technologiques choisies.

Mots-clefs du projet (4 maxi) : ***Transition environnementale, Voiture électrique, voiture à hydrogène***

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	5
1. Méthodologie / Organisation du travail	5
2. Étude de la Voiture Électrique	5
2.1. Histoire de la voiture électrique	5
2.2. Un moteur électrique, comment ça marche ?	6
2.3. Quels sont les différents types de moteurs électriques ?	6
2.4. Focus sur la production de l'énergie électrique	7
2.5. Comment se présente l'accessibilité du parc électrique ?	8
2.6. Conduire en toute sécurité	9
2.7. Transition écologique des transports en commun	9
2.8. Économie	9
2.9. Impact écologique	11
3. Étude de la Voiture à Hydrogène	12
3.1. Histoire de la voiture à hydrogène	12
3.2. Fonctionnement du moteur à hydrogène	12
3.3. Bus et véhicules utilitaires	15
3.4. Économie	16
3.5. Impact écologique	18
4. Transitions	22
4.1. Mesures mises en place	22
4.2. Défis à relever	24
5. Conclusions et perspectives	26
5.1. Conclusion sur la transition écologique dans le monde de l'automobile	26
5.2. Conclusion personnelle	26
Bibliographie	28
6. Annexes	31
6.1. Illustrations	31
6.2. Documentation sur la production du dihydrogène	39

INTRODUCTION

Avez-vous déjà imaginé un monde dans lequel vous pouviez conduire sans jamais avoir à vous soucier de l'impact de votre voiture sur l'environnement ? C'est l'objectif que poursuit la transition écologique dans le monde de l'automobile en France et à travers le monde.

Dans le cadre de notre projet P6, nous avons identifié et étudié les innovations technologiques susceptibles de façonner la mobilité de demain. En France, l'empreinte carbone des transports compte pour 31% de nos émissions dont 51 % dues aux déplacements des personnes en voiture particulière. Avec l'aggravation croissante des enjeux climatiques liés à nos activités, il est devenu impératif de trouver rapidement des solutions pour réduire nos émissions. C'est dans cette perspective que nous nous sommes penchés sur la transition écologique dans le monde de l'automobile.

Les objectifs, que nous nous sommes fixés, se divisent en deux points principaux :

Quelles technologies sont nécessaires pour permettre une transition efficace vers une réduction de l'impact environnemental lié aux déplacements individuels ?

Comment la transition vers les voitures électriques et à hydrogène affectera-t-elle la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dans l'ensemble du système énergétique ?

1. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour mener à bien ce projet, nous avons répondu à la problématique posée en considérant les moyens que la France mettrait en place pour réaliser sa transition environnementale dans le transport automobile. Ainsi, nous nous sommes penchés sur les véhicules électriques et les véhicules hydrogènes. Pour ce faire, nous avons réparti le travail en binôme : Paul et Pengyu ont travaillé sur le premier thème et Samy et Francesca ont étudié les voitures à hydrogène. Nous nous sommes intéressés à l'histoire, le fonctionnement qui ont été traités par les deux premiers membres des binômes (Paul et Samy), puis à son application dans les transports en commun, l'impact économique et environnemental de celles-ci (Pengyu, Francesca). Malheureusement, cette répartition a été perturbée par le départ définitif de notre camarade Pengyu. Pour pallier cet imprévu, nous avons revu la première répartition. Paul s'est chargé de l'environnement et Francesca de l'économie de la voiture électrique.

(voir annexe 1)

2. ÉTUDE DE LA VOITURE ÉLECTRIQUE

2.1. Histoire de la voiture électrique

[1] La voiture électrique ne date pas d'hier. Pourtant, nous avons l'impression que cette dernière n'est apparue que dans les années 2000, et qu'elle ne cesse d'évoluer, avec des designs toujours plus élégants et des fonctionnalités avant-gardistes.

Toutefois, c'est en 1830 que le tout premier prototype de véhicule électrique est pensé et fabriqué par Robert Anderson, sous forme d'une calèche.

Quatre ans plus tard, Thomas Davenport, lui, fait voir le jour au premier véhicule électrique (une locomotive), et ce n'est que quelques années après, en 1852, que le premier modèle de voiture électrique est commercialisé. Seulement, à ce moment-là, pas question encore de batteries rechargeables, car la charge n'avait pas encore été inventée.

Ce n'est qu'en 1859 que le physicien français Gaston Planté imagine la batterie rechargeable, et c'est alors, qu'avec les améliorations apportées par Camille Faure en 1881, les véhicules électriques prennent un réel essor. En 1899, une prouesse technologique est réalisée par le modèle "La Jamais Contente" créé par Camille Jenatzy, car la voiture réussit à atteindre les 100 km/h. Dans les années qui suivent, aux alentours de 1900, les véhicules électriques représentent 38% du marché automobile américain.

Malheureusement, alors que l'ère du véhicule électrique paraissait avoir commencé, l'enseigne FORD lance un modèle de voiture à essence bon marché et accessible, ce qui marque la fin des voitures électriques.

Après des années à rouler dans des véhicules thermiques, un tournant s'opère avec la présentation d'un véhicule "zéro émission" en 1990 en Californie. De plus, dès lors, la loi prévoit que toutes les entreprises de véhicules devront produire 2% de véhicules "verts" dans leur production. Ce tournant marque alors le début de l'ère des véhicules électriques que nous connaissons aujourd'hui, et de la course à la production de ces derniers par les constructeurs. Certaines marques comme Toyota et Nissan se sont démarquées dès le début, rejointes par Renault, Volvo, Volkswagen et bien d'autres. Aujourd'hui, la part des véhicules électriques ne cesse d'augmenter sur les marchés automobiles du monde entier.

2.2. Un moteur électrique, comment ça marche ?

[2] Analysons le moteur le plus répandu de l'industrie automobile électrique : le moteur à aimant permanent. Il est composé de deux parties : le stator et le rotor. Comme leur nom l'indique, l'un est statique, alors que l'autre va effectuer des rotations. Le rotor est constitué d'un aimant permanent, c'est-à-dire que ces pôles (positif et négatif) ne vont pas changer. Le stator, lui, est composé de bobines de cuivre la plupart du temps, dont la polarité va changer en fonction du courant envoyé par la batterie dans ces dernières. Le stator, lui, est composé de trois bobines, on l'appelle donc un moteur triphasé. En effet, la batterie d'une voiture électrique est alimentée par un courant continu (les électrons vont toujours dans le même sens), mais envoie un courant alternatif au stator, changeant ainsi sa polarité. De ce fait, on crée une rotation du rotor grâce à la répulsion et l'attraction entre les charges positives et négatives, car le rotor est un aimant permanent (ses pôles ne changent pas). Les moteurs électriques ont un rendement de l'ordre de 80% à 95% selon le type de technologie utilisée.

(voir annexe 2)

2.3. Quels sont les différents types de moteurs électriques ?

[3] Il existe en effet différentes méthodes permettant de produire une énergie mécanique à partir d'énergie électrique. Comme évoqué précédemment, un moteur électrique est composé d'un rotor et d'un stator, mais leur manière d'interagir est différente selon le modèle. Le moteur le plus répandu dans l'industrie est le moteur à aimant permanent, comme évoqué dans la partie précédente. Mais, il existe trois autres types de moteurs électriques : Le moteur à induction, à balais, et celui à réluctance variable.

- Le moteur à induction :

Ce moteur est comparable à celui décrit précédemment, à la différence près que le rotor n'est pas un aimant permanent, mais une cage à écureuil. De la même manière que pour le moteur à aimant permanent, on injecte du courant alternatif dans les trois bobines du stator (triphase), ce qui produit un champ magnétique polarisé tournant. Ce champ magnétique va créer un courant dans la cage à écureuil. Cette dernière étant en métal, le champ magnétique va induire un mouvement des électrons de la couche atomique du métal. Ainsi, d'après la loi de Laplace, le courant dans la cage à écureuil (rotor) va provoquer un champ magnétique qui va interagir avec celui du stator. Cela crée donc une rotation du rotor. Le rendement du moteur à induction est moins bon que celui de ses concurrents, en effet, il est d'environ 85%.

- Le moteur à balais :

La différence avec le moteur à aimant permanent réside dans le fait que le rotor est ici un électro-aimant (change de polarité suivant le courant injecté), et le stator est un aimant permanent. Le courant est amené au rotor au moyen des "balais", éléments conducteurs constitués de cuivre ou de graphite. Le rendement du moteur à balais est d'approximativement 90%.

- Le moteur à réluctance variable :

Cette catégorie de moteur est très peu utilisée dans l'industrie automobile, car il est gourmand à bas régime, et que son principe est plus complexe. En effet, il utilise le principe de la réluctance du champ magnétique (un champ magnétique a certaines "affinités" avec certains matériaux et les traverse plus facilement). Cependant, son rendement est d'approximativement 96% à certains régimes, ce qui peut constituer une alternative intéressante pour le futur des moteurs électriques dans le secteur automobile.

Mais, ces types de moteurs se divisent en différentes catégories : en effet, il existe des moteurs dits « synchrones » et « asynchrones ». Qu'est-ce qui les différencie ?

Les moteurs asynchrones, aussi appelés « à induction », reposent sur la création d'un champ magnétique rotatif par le stator, qui entraîne le rotor dans une rotation perpétuelle, mais à une vitesse non proportionnelle à celle du champ magnétique. Les points positifs de ces moteurs sont notamment le faible coût de leur production, ainsi que leur démarrage quasi instantané. Malheureusement, leur rendement est moins bon que celui des moteurs synchrones (environ 80%), et le retard de rotation du rotor par rapport au champ magnétique entraîne une perte de vitesse de rotation.

Les moteurs synchrones, eux, utilisent le rotor comme électro-aimant (aimant temporaire créé en faisant circuler du courant dans une bobine), ce dernier participe donc de manière active à la création du champ magnétique, il a alors une vitesse de rotation proportionnelle à la fréquence du courant envoyé. Le gros point positif des moteurs synchrones réside dans leur rendement, il est de l'ordre des 93% ! En revanche, ces types de moteurs ne démarrent pas instantanément, et il existe un risque de décrochage si le couple maximum est dépassé.

Le moteur à aimant permanent est un moteur synchrone, le moteur à induction est un moteur asynchrone, le moteur à balais est synchrone, et enfin, le moteur à réluctance est synchrone.

2.4. Focus sur la production de l'énergie électrique

En ce qui concerne la production de l'électricité avec laquelle nous rechargeons nos véhicules électriques, elle est 100% décarbonée (donc soit nucléaire, soit renouvelable) pour les points de recharge publics, en revanche, pour les bornes de recharge privées, cela dépend de l'opérateur chez qui l'on a un contrat. En général, selon l'ADEME, on émet 0,0599 kg de CO₂ pour produire 1 kWh en France, ce qui, ramené à une consommation par

kilomètre roulé dans une voiture électrique, revient à émettre 15 fois moins de CO₂ en circulation comparé à un véhicule thermique.

2.4.1. Comment stocker cette énergie ?

[4] Et oui ! L'électricité qui alimente ces différents moteurs a besoin de batteries pour être stockée puis redistribuée. On peut alors se demander quelles sont les différentes technologies de batteries.

Mais, avant toute chose, qu'est-ce qu'une batterie ? C'est un accumulateur qui convertit de l'énergie chimique en énergie électrique lors des phases de décharge, et inversement lors des phases de charge.

La batterie la plus utilisée est la batterie Lithium-Ion. De quoi est-elle faite et comment la fabrique-t-on ?

D'une manière générale, une batterie est composée « d'éléments », qui, assemblés, vont permettre de délivrer une certaine puissance électrique. Un élément est composé d'une électrode positive et d'une électrode négative, séparées par un séparateur, et mise en forme grâce à une technologie de spiralage pour obtenir un élément cylindrique. L'électrode positive n'est autre qu'une très longue bobine de papier aluminium (ou en oxyde métallique de lithium), et l'électrode négative est une grande bobine de cuivre (ou de graphite), toutes deux ayant une épaisseur de l'ordre du micron. Ces bobines sont appelées « feuillets ». Pour faire simple, les feuillets sont enduits d'une « encre » (composées de NMP (N-Méthyl-2-Pyrrolidone), carbone...), qui sont par la suite séchées. Un séparateur est ensuite posé sur toute la longueur de la bobine (pour éviter les courts-circuits internes), puis l'ensemble anode/cathode est assemblé et spiralé autour d'un axe métallique. Enfin, le tout est introduit dans un godet, lequel est rempli d'électrolyte (substance conductrice en raison de la présence d'ions mobiles).

(voir annexe 3)

Une batterie est constituée de 6 à 14 éléments branchés en série, qui permettent de délivrer une puissance électrique plus ou moins forte.

Le Lithium-Ion n'est pas la seule technologie utilisée par les constructeurs de véhicules électriques, ces derniers optent alors pour une technologie alternative en fonction de la densité d'énergie, de la durée de vie ainsi que de la rapidité de charge souhaitées.

2.5. Comment se présente l'accessibilité du parc électrique ?

[5] Malheureusement, il ne suffit pas d'avoir un moteur et une batterie électrique pour pouvoir rouler, il faut aussi pouvoir s'alimenter en électricité ! Quelle est donc la situation des bornes de recharge en France ?

En ce qui concerne la France, nous sommes plutôt bien équipés, avec un nombre de points de recharge publics qui a augmenté de façon exponentielle entre 2014 et 2023. En effet, selon le Baromètre national des infrastructures de recharge ouvertes au public publié par Avere France, nous sommes passés de 8 600 à 100 000 points de recharge en neuf ans. De plus, ces bornes de recharges sont bien réparties sur le territoire français, avec bien entendu une concentration plus élevée aux abords et dans les grandes villes.

(voir annexe 4)

Au-delà du nombre de bornes accessibles au public, il existe différentes catégories de bornes, plus ou moins efficaces selon la puissance électrique qu'elles délivrent. Aujourd'hui, selon l'Avere, environ 90% d'entre elles délivrent une puissance inférieure à 50 kW.

Seulement 10% des bornes délivrent une puissance pouvant aller de 50 à 350 kW, et peuvent être considérées comme des charges rapides.

Cet essor du nombre de points de recharge qui voient le jour, est accéléré par le fait qu'à partir de 2035, tous les véhicules neufs en France seront électriques. Il faudra donc être capable de répondre aux besoins d'un nombre d'utilisateurs grandissant, toujours de manière plus performante.

2.6. Conduire en toute sécurité

D'un point de vue de la sécurité, le véhicule électrique est parmi ce qui se fait de mieux en automobile. En plus du grand nombre de critères de sécurité à respecter (tension maximale pour éviter une électrocution, surcharge...), le risque qu'un véhicule électrique s'enflamme est de 0,3% contre 1,05% pour un véhicule essence. Ceci, couplé à des dispositifs de sécurité inédits dont ces véhicules disposent (détection des obstacles, freinage automatique...), en font une catégorie de véhicules plus sûre que les véhicules thermiques.

2.7. Transition écologique des transports en commun

Les bus électriques et hybrides ne cessent de se multiplier au sein de nombreuses agglomérations. En effet, les collectivités font face à certaines obligations quant au renouvellement de leur parc. Ces bus électriques émettent jusqu'à six fois moins de CO₂ que leurs prédécesseurs thermiques.

[6] Le réseau Astuce, que nous utilisons au quotidien à Rouen, s'est, lui aussi, mis au vert, et s'est engagé à investir dans des bus à faibles émissions. C'est dans cette optique que cette société et la Métropole de Rouen ont investi dans une quarantaine de bus électriques ainsi que dans 14 bus roulant à l'hydrogène.

2.8. Économie

2.8.1. Marchés

[7] Dans son rapport annuel de 2023, l'Agence Internationale de l'Énergie annonce que les voitures électriques (100% électrique et hybrides rechargeables) représentent 14 % des ventes d'automobiles avec plus de 10 millions de voitures vendues en 2022. En 2021, ce chiffre était de 9 % et en 2020 moins de 5 %. Par ailleurs, depuis 2012, les voitures 100 % électriques ont survendu les hybrides rechargeables.

Trois marchés dominent les ventes mondiales. En-tête, on retrouve la Chine qui concentre environ 60 % des ventes mondiales de voitures électriques. En 2022, son parc de voitures entièrement électriques a atteint 10 700 millions. Ainsi, le pays a déjà dépassé son objectif de 2025 pour les ventes de véhicules à énergies renouvelables.

Comptant pour 25 % du parc de voitures électriques dans le monde, l'Europe est le deuxième marché le plus important. En 2022, plus d'une voiture vendue sur cinq était électrique. Ainsi, l'Europe possède 4 400 millions de voitures 100 % électriques en circulation.

Enfin, le troisième principal marché est les États-Unis où les ventes de voitures électriques ont augmenté de 55 % en 2022 atteignant 8 % des ventes globales.

En dehors de ces principaux marchés, les ventes de voitures électriques sont faibles.

Cette forte croissance de ventes devrait se poursuivre en 2023. Plus de 2,3 millions de voitures électriques ont été vendues au premier trimestre, soit environ 25 % de plus qu'à la même période de l'année dernière.

L'agence estime que les voitures électriques pourraient représenter 18 % des ventes totales de voitures sur l'ensemble de l'année civile. Les politiques et incitations nationales contribueront à stimuler les ventes, tandis qu'un retour aux prix du pétrole exceptionnellement élevés observés l'année dernière pourrait motiver davantage les acheteurs potentiels.

[8] À savoir, dans l'UE et aux États-Unis, le coût total de possession des voitures électriques récentes est moins cher que celui des voitures à essence équivalentes, en raison de la baisse des coûts de carburant et d'entretien.

(voir annexe 5)

2.8.2. Industrie Automobile

[9] Sans grande surprise, la partie la plus chère d'une voiture électrique est sa batterie. Elle représente plus du quart du coût total de la voiture. Selon l'étude annuelle de Bloomberg New Energy Finance (BNEF), en 2010, son prix était de 1 000 \$/kWh contre 100 à 300€/kWh pour une batterie de voiture thermique selon son modèle. Cependant, les industriels ont su remédier à cette problématique, le prix d'une batterie électrique a été divisé par 6 pour atteindre 137\$/kWh en 2019.

Actuellement, ce sont les véhicules utilitaires sportifs (VUS) et les grosses voitures qui dominent les options de voitures électriques disponibles. Ils représentent 60 % des options de voitures 100 % électriques. Principalement, disponibles en Chine et en Europe et une part encore plus importante aux États-Unis, les VUS électriques ont permis d'économiser plus de 150 000 barils de pétrole par jour. Ils ont également évité les émissions d'échappement générées par la combustion du carburant dans les moteurs à combustion.

Cependant, ces gros gabarits de voitures posent un problème. Les SUV électriques à batterie ont souvent des batteries deux à trois fois plus grosses que les petites voitures, ce qui nécessitent plus de minéraux critiques.

[10] Aujourd'hui, la rareté et la volatilité des prix du lithium, du nickel et du cobalt, utilisés dans ces batteries, menacent la baisse de prix des batteries vu au-dessus. En 2022, pour la première fois en dix ans, le prix moyen des batteries repart à la hausse, à 151 \$/kWh. Le rapport de juin 2022 d'AlixPartners confirme cette tendance. Le coût des matières premières sur un véhicule électrique moyen est passé de 3 381 \$ en mars 2020 à 8 255 \$ en mai 2022. Pour pallier cette potentielle pénurie, de nouvelles alternatives au lithium-ion conventionnel sont proposées. La Chine a notamment développé des batteries lithium-fer-phosphate (LFP) qui n'utilisent ni cobalt, ni nickel. Des chaînes d'approvisionnement pour des batteries sodium-ion (sans lithium) sont également en cours d'établissement en Chine.

2.8.3. Industrie Énergétique

D'ici à 2030, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime que les voitures électriques consommeront un peu moins de 4 % de la production mondiale d'électricité.

Selon RTE, si le parc automobile français était électrifié à hauteur de 40 %, soit 15 millions de véhicules électriques, cela représenterait une augmentation de 8 % de la consommation d'électricité. Le réseau électrique français pourrait gérer sans difficulté cette augmentation s'il n'y a pas de pic majeur dans la journée.

Pour atteindre cette faible consommation en électricité, il est nécessaire que la recharge du véhicule soit lente. Cette condition est bien respectée actuellement. En 2020, 90 % des recharges sont effectuées à domicile ou sur le lieu de travail. Les stations de recharge publiques servent de complément pour les utilisations occasionnelles.

Cependant, si la France est capable d'absorber la future demande en électricité, cet approvisionnement peut s'avérer être une difficulté pour d'autres nations. En 2015, les géologues américains Stephen Kesler et Adam Simon estimaient que si tous les Américains remplaçaient leur voiture par un modèle Tesla électrique, la consommation annuelle d'électricité doublerait. D'importantes infrastructures sont ainsi à prévoir pour anticiper la demande en électricité dans le monde.

2.9. Impact écologique

[11] Si nous sommes bien sûrs qu'au niveau des émissions en circulation, le véhicule électrique émet 0% de CO₂ et de particules fines, sa production, elle, est plus polluante que la production d'un véhicule thermique. En effet, le véhicule électrique pour sa production nécessite des énergies fossiles et des métaux comme le lithium. Ces éléments de fabrication sont extrêmement polluants et le processus émet une quantité de CO₂ supérieure à celui d'une voiture thermique. Le côté « green » (propre) d'une voiture électrique réside donc dans son bilan carbone sur le long terme. Effectivement, le fait que le véhicule électrique n'émette pas de carbone compense en quelque sorte les émissions de sa production. Selon plusieurs études d'instituts indépendants, il faut rouler au moins 40 000 km pour qu'un véhicule devienne moins polluant que son équivalent thermique. À titre de comparaison, selon HelloCabro, un véhicule thermique émet environ 2,2 tonnes de CO₂ pour 10000 km parcourus, contre 120 kg pour un véhicule électrique. On estime qu'au cours de son cycle de vie, un véhicule thermique émet approximativement 32 tonnes de CO₂, contre 12 tonnes pour un véhicule électrique. Autrement dit, oui, un véhicule électrique a un bilan carbone moins élevé que son équivalent thermique, sous réserve qu'il ait une durée de vie élevée, car sur le long terme, le fait qu'il n'émette pas de CO₂ en circulation compense les émissions liées à la phase de sa production.

Il ne faut également pas oublier qu'au-delà 0% d'émission en circulation, un véhicule électrique a besoin d'être rechargé en électricité, la production de cette dernière produisant des gaz à effet de serre comme le CO₂ par exemple, heureusement en quantités moindres. On estime que la quantité de CO₂ émise en France est de 0,0599 kg de CO₂ par kWh produit.

Le problème de la fin de vie des composants d'une voiture électrique se pose. Effectivement, si les véhicules électriques présentent de réels atouts en circulation, leur fin de vie se doit, elle aussi, d'être réglementée pour éviter le maximum de pollution. Une directive européenne adoptée en 2000 oblige les constructeurs à respecter minutieusement un processus bien défini en ce qui concerne les VHU (Véhicules Hors d'Usage). Ainsi, le taux de réutilisation et de valorisation d'un véhicule électrique doit atteindre les 95%, et le taux de réutilisation et de recyclage, lui, doit égaler les 85%. En ce qui concerne le recyclage des batteries, celui-ci dépend des technologies utilisées dans celles-ci. À l'heure actuelle, nous maîtrisons plusieurs filières de recyclage, dont celles concernant les batteries au nickel-cadmium et au plomb. Le lithium étant une technologie assez nouvelle, les techniques de recyclage ne sont pas encore maîtrisées.

3. ÉTUDE DE LA VOITURE À HYDROGÈNE

3.1. Histoire de la voiture à hydrogène

Au cours des deux derniers siècles, de nombreuses découvertes ont mis en lumière le potentiel de l'hydrogène comme source d'énergie. En 1799, le Français Philippe Lebon a fabriqué un gaz composé d'au moins 50% à partir de bois. Cette avancée a ouvert la voie à d'autres innovations, notamment celles du gaz de houille, un gaz hydrogène carboné découvert vers 1800 par plusieurs scientifiques européens, tels que William Murdoch, Philippe Lebon, Frédéric-Albert Winsor et Jan Pieter Minckelers.

En 1804, le scientifique suisse, François Isaac de Rivaz, crée les premiers moteurs à hydrogène utilisant le gaz de houille comme combustible dans des moteurs à explosions.

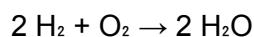
Au cours du 20^e siècle, d'importantes avancées ont été réalisées dans le domaine de la technologie automobile et de l'hydrogène. De nombreuses recherches ont été menées pour trouver des alternatives aux carburants traditionnels afin de réduire la pollution. Dans les années 1970, Paul Dieges a conçu un moteur à combustion modifié fonctionnant à l'hydrogène. Dans les années 1990, Mazda a présenté un moteur rotatif alimenté par l'hydrogène, suivi par d'autres constructeurs automobiles qui ont intensifié leurs recherches sur les véhicules à hydrogène. En parallèle, des progrès ont également été réalisés dans le développement de piles à combustible. Ces avancées ont ouvert la voie à des innovations dans le domaine des véhicules propres et à une transition vers une mobilité plus durable.

Aujourd'hui, deux modèles de voiture à hydrogène sont produites et commercialisées avec la Toyota Mirai II et la Hyundai Nexa.

3.2. Fonctionnement du moteur à hydrogène

Il existe deux types principaux de moteurs à hydrogène dans le secteur de l'automobile.

- Les moteurs à combustion interne à hydrogène sont similaires aux moteurs à combustion interne à essence. La seule différence est l'hydrogène qui remplace l'essence. Dans ce type de moteur, l'hydrogène est injecté dans les chambres de combustion du moteur. Il est alors mélangé à de l'air et notamment au dioxygène. Les gaz sont ensuite enflammés et l'explosion résultante pousse les pistons, qui produisent la puissance mécanique du moteur. Ces moteurs sont plus simples à construire et moins coûteux, mais leur rendement énergétique est seulement de 30 à 40%. Un autre avantage de ce type de moteur est la réutilisation du parc des véhicules thermiques actuels.
- Le second type de moteurs à hydrogène est l'association d'un moteur électrique et d'une pile à combustible. Les piles à combustible à hydrogène sont des dispositifs électrochimiques qui produisent de l'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène. Dans une pile à combustible, l'hydrogène est alimenté à l'anode de la pile, tandis que l'oxygène est alimenté à la cathode. Les deux gaz réagissent pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. Le dihydrogène joue le rôle de combustible et subit une oxydation et le dioxygène est réduit au niveau de la cathode selon la réaction suivante :



Le rendement de ces piles varie de 30 à 70%. Le platine utilisé au niveau des électrodes est, cependant, très onéreux. Le moteur le plus utilisé actuellement sur le marché est le moteur à hydrogène à pile combustible.

Principe de fonctionnement du moteur à hydrogène avec pile à combustible :

1) Stockage de l'hydrogène :

L'hydrogène a une très bonne densité massique d'énergie : 1 kg d'hydrogène contient environ trois fois plus d'énergie qu'1 kg de diesel. Cependant, cette propriété est limitée par sa très mauvaise densité volumique d'énergie : 1 litre d'hydrogène contient très peu d'énergie. Il faut plus de 3 400 litres d'hydrogène gazeux pour équivaloir énergétiquement à un litre de diesel liquide.

Le transport d'une telle quantité de dihydrogène au sein d'une voiture n'est vraisemblablement pas réaliste, c'est pourquoi ce gaz est comprimé à 700-1000 bars dans 2 ou 3 réservoirs d'approximativement 5 kg. Toutefois, malgré cette pression excessivement élevée, la densité énergétique volumique de l'hydrogène n'est pas optimale. Pour parcourir la même distance, les réservoirs des voitures à hydrogène doivent contenir 3 à 4 fois le volume des voitures thermiques.

Ainsi, ces réservoirs nécessitent d'être capables de supporter une très forte pression, mais aussi de pouvoir résister à de forts chocs. En effet, en cas de potentiels accidents, un réservoir pas adapté peut libérer un gaz inflammable et explosif, ce qui n'est pas souhaité. Pour ce faire, la résistance extérieure des réservoirs est assurée par des couches de fibres de carbone. Industriellement, ces contraintes ont des implications en termes de coût et de matériaux.

2) Alimentation en hydrogène :

En appuyant sur la pédale d'accélérateur, l'hydrogène est libéré du réservoir et envoyé vers la pile à combustible.

3) Production d'électricité :

L'électricité est produite par une pile à combustible à partir du dihydrogène libéré. Il existe différents types de piles à combustible et le modèle le plus utilisé dans le secteur de l'automobile est la pile à membrane échangeuse de protons.

Dans la pile à combustible, l'hydrogène réagit avec l'oxygène de l'air pour produire de l'eau et de l'électricité. Le dihydrogène est introduit au niveau de l'anode, il rencontre un catalyseur qui décompose l'hydrogène en protons (ions H^+) et électrons. Les protons passent à travers la membrane électrolyte et rejoignent le dioxygène sur la cathode pour former de l'eau. On a alors une différence de potentiel entre les deux électrodes. Les électrons, quant à eux, ne peuvent pas traverser la membrane et sont donc forcés de suivre un circuit électrique externe jusqu'au moteur électrique, créant ainsi un courant électrique. Les électrons rejoignent ensuite les ions H^+ et le dioxygène au niveau de la cathode pour former de l'eau sous forme de vapeur.

(voir annexe 6)

4) Conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique :

L'électricité produite au niveau de la pile à combustion est ensuite dirigée vers le moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. On retrouve dans tous les modèles commercialisés une batterie tampon qui sert d'appoint ou de solution de secours en cas de défaillance de la pile à combustible.

5) Récupération de la chaleur :

La réaction au niveau de la cathode est exothermique. La chaleur produite est donc récupérée et utilisée pour chauffer l'habitacle de la voiture.

On remarque donc que la seule émission produite par une voiture à hydrogène est de la vapeur d'eau. On pourrait donc penser qu'il s'agit là d'une alternative propre aux moteurs

classiques. Le fonctionnement du moteur en lui-même n'est pas polluant. Cependant, la production du dihydrogène, elle, n'est pas toujours respectueuse de l'environnement.

3.2.1. Accessibilité

3.2.1.1. Bornes de recharge

L'accessibilité de l'hydrogène, présent partout, l'écarte de futures pénuries et garantit la fiabilité de cette énergie. Malgré ce fait, aujourd'hui le ravitaillement en hydrogène est un réel défi pour les utilisateurs de véhicules hydrogènes. Les stations de recharge en hydrogène sont encore rares et ne se limitent qu'à quelques dizaines dans la métropole.

(voir annexe 7)

[12] Sur la carte en annexe, on peut voir en bleu les stations actuellement ouvertes et en orange celles à venir. On peut nettement voir une inégalité de cette répartition sur le territoire français. Ce facteur non négligeable pousse ou non certains à adopter la voiture à hydrogène. On peut notamment comprendre le choix des habitants de la Nouvelle-Aquitaine qui s'y voient sûrement peu favorable.

Une concertation européenne est alors nécessaire pour réfléchir à l'élaboration de stratégies de déploiement et de fonctionnement de ces nouveaux moteurs sur le continent.

Dans le monde, les infrastructures pour le ravitaillement en hydrogène se développent avec plus de 700 stations en service à fin 2021.

(voir annexe 8)

Le graphique présente le nombre de stations de ravitaillement en hydrogène dans le monde entre 2017 et juin 2022. Cette croissance est partiellement due à la Chine qui depuis 2020 compte 185 nouvelles stations, suivie de près par la Corée avec 118 nouvelles stations.

[13] Le ratio de station à hydrogène par rapport aux véhicules est inégal dans le monde. Aux États-Unis, le nombre de voitures à hydrogène, au cours de ces dernières années, a nettement dépassé le déploiement des stations services. Ainsi, il possède le ratio le plus élevé du monde avec une station à hydrogène pour plus de 200 véhicules. D'un autre côté, la Chine a anticipé la demande et pu rapidement développer son ravitaillement pour atteindre un ratio de 30 en juin 2022. Globalement, il y a environ une station service pour 60 véhicules à hydrogène. Approximativement, les trois quarts des FCEV sont des VUL, 15 % sont des bus et 10 % des camions.

3.2.1.2. Compression

Un facteur qu'il faut prendre en compte pour recharger sa voiture à hydrogène est la compression exigée par le fabricant pour ce gaz. Alors que les bus stockent l'hydrogène à des pressions plus basses, la majorité des stations à hydrogène (dans le monde) est configurée pour distribuer de l'hydrogène à 700 bar dédié aux véhicules légers. Particulièrement en Europe, des stations-services ne peuvent être réservées que pour les véhicules lourds et ainsi desservir l'hydrogène qu'à 350 bars. Heureusement, il existe des stations doubles, capables de distribuer à la fois aux véhicules lourds qu'aux véhicules légers.

3.2.2. Sécurité

[14] D'après la National Hydrogen Association, l'hydrogène n'est ni plus ni moins dangereux que les autres combustibles inflammables. Au contraire, dans certaines situations, ses caractéristiques uniques peuvent être considérées comme avantageuses. L'hydrogène est 14 fois plus léger que l'air et se disperse donc rapidement en cas de fuite. Par conséquent, cela minimise la possibilité d'accumulation et d'inflammation. En effet, il suffit de quelques dizaines de minutes pour éliminer toute concentration explosive d'hydrogène.

Dans un espace vraiment confiné, en revanche, son utilisation présente de réels dangers. C'est la raison pour laquelle non seulement le réservoir, mais aussi les parties du véhicule qui l'entourent doivent être sévèrement renforcées pour éviter toute fuite en cas de collisions. Ainsi, tous les véhicules à hydrogène sont équipés d'un couloir au niveau du réservoir (soupape de décompression) protégé par une ventilation forcée ou naturelle. Celle-ci va évacuer le gaz vers l'extérieur lors de potentielles fuites pour garantir un maximum de sécurité. En outre, à l'usage, des évacuations automatiques et régulières du système hydrogène se réalisent.

Dans le cas où l'hydrogène s'enflamme, ses flammes génèrent une faible chaleur rayonnante en raison de l'absence de carbone. En cas d'accident, cela rend l'hydrogène plus sûr que les hydrocarbures conventionnels (tels que l'essence) pour les utilisateurs et les premiers intervenants. De plus, les risques d'asphyxie avec l'hydrogène sont très faibles.

3.3. Bus et véhicules utilitaires

[15] Dès le début des années 90, les ingénieurs cherchaient une alternative aux combustibles fossiles dans le secteur automobile. Pour ce faire, ils comptèrent sur les propriétés prometteuses de l'hydrogène et s'appuyèrent sur les travaux déjà entrepris dans l'industrie pour concevoir un moteur électrique alimenté par une pile combustible.

C'est la société canadienne Ballard qui a élaboré en 1992 le premier projet de bus à pile à combustible de type PEMFC (piles à combustible à membrane échangeuse de protons)¹. Ses ingénieurs, convaincus du potentiel de la pile PEMFC, adaptèrent cette technologie à des moteurs automobiles. Il s'est avéré que la pile était particulièrement disposée au véhicule lourd. En effet, la pile s'appuie sur un équipement technologique volumineux. Ainsi, son encombrement est moins pénalisant sur des gros gabarits de véhicule. Pour ces premiers prototypes, près d'un tiers du volume du bus était occupé par la pile.

(voir annexe 9)

Aujourd'hui, la pile PEMFC, devenue plus compacte et performante, a conquis l'industrie d'autobus mondiale et tous bus fonctionnant à l'hydrogène utilisent cette technologie. En 2020, les bus de Ballard ont parcouru au total plus de 50 millions de km, ce qui représente 1 250 fois le tour de la terre.

Depuis, le succès de l'utilisation de la pile PEMFC assura l'essor et le développement des bus à hydrogène. Sa maturité technologique lui permit d'être exploité par une trentaine de pays et de fabriquer des milliers de bus dans le monde.

Parallèlement, les véhicules utilitaires, en raison de leur kilométrage annuel et de leur poids élevé, ont aussi pu largement profiter de l'hydrogène. Le nombre de camions lourds à hydrogène a considérablement augmenté en 2021. Soit plus de 60 fois par rapport à 2020.

¹ En anglais : proton exchange membrane fuel cells ou polymer electrolyte membrane fuel cells

De plus, en 2021, la demande en hydrogène des véhicules utilitaires a dépassé pour la première fois celle des bus, atteignant 45 % de la demande totale en hydrogène dans le secteur des transports.

C'est la Chine qui domine l'utilisation d'hydrogène dans le transport de poids lourds. Avec plus de 4100 bus et 4300 camions fonctionnant à la pile à hydrogène en 2021, elle compte pour 94 % des bus à pile à combustible dans le monde et 99 % des camions à pile à combustible.

Actuellement, il existe sept producteurs de bus à pile combustible dans le monde : Evobus, Man, SAFRA, Skoda, Solaris, Van Hool et VDL. Mercedes travaille sur un concept de camion à hydrogène avec 1 000 km d'autonomie.

[16] De plus, ce potentiel est revendiqué notamment par le GIEC qui reconnaît l'intérêt d'utiliser l'hydrogène pour les véhicules à poids lourds afin d'atteindre la neutralité carbone.

Toutefois, la promesse et la fiabilité qui lui sont louées sont à nuancer. Le coût de ce type de bus est aujourd'hui un défaut qui lui fait préjudice. Malgré sa constante décroissance, son coût a été divisé par 4 en 25 ans. Cependant, cela reste toujours insuffisant par rapport à un autobus thermique. Présentement, le coût unitaire d'un bus à hydrogène est de 550 000 € contre un autobus traditionnel qui coûte entre 200 000 € et 500 000 €.

3.4. Économie

3.4.1. Marchés

[17] La demande d'hydrogène mondiale dans le transport routier a augmenté de 60 % depuis 2020. Néanmoins, dans la part de l'énergie totale des transports, l'hydrogène ne représente que 0,003 %.

Dans le transport routier, 80 % des véhicules à hydrogène sont des poids légers, ainsi, l'expansion du stock des VEPC lui est légitimement dû.

Commercialisable depuis 2014, le parc mondial de voitures à hydrogène atteint 33 627 voitures en 2020, dont 10 041 en Corée du Sud, 9 135 aux États-Unis, 5 446 en Chine, 4 100 au Japon et 2 402 en Europe.

En 2021, le parc de véhicules électriques à pile à combustible (VEPC) (en anglais : fuel cell electric vehicle (FCEV)) a augmenté de plus de 55 % par rapport à la fin de 2020 avec plus de 51 000 véhicules dans le monde. On doit cette forte augmentation en partie à la Corée qui en 2021 a connu une croissance impressionnante. Le pays a presque doublé son parc de voitures électriques à pile à combustible avec l'ajout de plus de 9 200 véhicules sur l'année, représentant plus de 0,5 % des ventes de voitures en Corée.

Cependant, cette forte croissance de la demande s'est atténuée. Fin juin 2022, le stock mondial de VEPC s'élevait à plus de 59 000, soit une augmentation de 15 % par rapport à fin 2021.

[18] Alors que la Corée et les États-Unis se sont nettement affranchis de la voiture à hydrogène, c'est la Chine qui domine l'utilisation de l'hydrogène dans la filière du transport des véhicules lourds.

Avec une forte croissance et un investissement massif, la Chine privilégie exclusivement l'hydrogène pour ses véhicules lourds alors que pour la Corée, cette source d'énergie est davantage considérée pour les véhicules légers.

Il est intéressant de voir que les opinions divergent selon les nations sur la place de l'hydrogène dans le milieu du transport. Certains s'y voient très défavorables alors que

d'autres y voient un potentiel apparent. Ces positionnements et questionnements sont des indicateurs quant à l'avenir de cette énergie dans le secteur du transport.

Par ailleurs, alors que les voitures à hydrogène sont les plus demandées dans le marché, ce sont les camions et les bus qui dominent largement la demande et la consommation d'hydrogène.

Il est pertinent de noter que ces immatriculations restent inférieures de trois ordres de grandeur à celles des véhicules électriques.

(voir annexe 10)

(voir annexe 11)

3.4.2. Industries Automobiles

[19] L'industrie de l'hydrogène demande de grandes dépenses économiques. Pour le stocker, il faut énormément le compresser avant de l'utiliser dans la mobilité. Cela demande des tests, des homologations et des précautions qui ont nécessairement des répercussions en termes de coût.

De plus, le transport de l'hydrogène est plus compliqué que les hydrocarbures. Un camion transportant de l'hydrogène aux stations services est confronté au même problème de réservoirs que les voitures à hydrogène. Comme le poids de l'hydrogène transporté est très faible devant le poids des récipients qui le contiennent, le transport est très énergivore.

Ainsi, l'hydrogène pose un problème quant à son stockage, son transport et à sa distribution. Naturellement, ces défis nécessitent une infrastructure hydrogène coûteuse, et ce prix se répercute sur l'utilisateur.

Le coût et le volume de la pile à combustible, ainsi que de ses réservoirs, poussent l'hydrogène vers un secteur de grosses voitures. Peu abordable pour la majorité des particuliers, un déploiement massif de ces voitures est ainsi très peu probable.

Par ailleurs, la faible demande de la population pour ce type de voiture se répercute sur l'industrie. Elle ne verra que peu de raisons pour investir dans cette technologie et dans son développement (pour faire chuter son prix notamment). Prisonnier de ce cycle, le marché des voitures à hydrogène peut se voir paralyser.

3.4.3. Industries Énergétiques

[20] Aujourd'hui, les entreprises pétrolières sont très intéressées par l'hydrogène. Capables de mener des projets industriels de grandes tailles, et de développer des infrastructures conséquentes, ces grands acteurs industriels sont indispensables pour le développement de l'hydrogène.

La recherche et l'innovation dans l'hydrogène sont un enjeu de taille. Elle permettrait de diversifier leur portefeuille de technologies. Maîtresses de multiénergies, elles pourront s'imposer comme piliers dans le secteur de l'énergie verte.

Les coûts de production de l'hydrogène varient selon le mode de production. Selon la Commission européenne, l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau est 3 à 6 fois plus cher à produire que la production par vaporeformage du gaz naturel (5€ contre 1,5€) en 2020. Il est donc nécessaire pour les industriels de trouver une solution pour faire chuter le prix de l'électricité renouvelable afin que celle-ci devienne accessible et commerciale.

En complément, pour réduire cet écart de coût de production, une solution envisageable serait de taxer davantage le carbone.

[21] Finalement, selon un groupement industriel, il faudrait 70 milliards de dollars d'investissements dans l'hydrogène, soit 5 % des dépenses énergétiques mondiales chaque année.

Pour ce qui est du coût de recharge, une voiture à l'hydrogène ne se distingue pas des voitures thermiques. Le prix du kilogramme de l'hydrogène varie entre 10 et 15 euros. Il faut compter environ 14 euros pour 100 km d'autonomie.

3.5. Impact écologique

3.5.1. Production d'hydrogène

[22] En 2021, la production mondiale d'hydrogène s'élève à 70 millions de tonnes (hors production en tant que coproduit, sinon 116 millions de tonnes). Pour parvenir à une telle quantité, diverses méthodes de production d'hydrogène existent avec un impact environnemental variant.

L'hydrogène peut être divisé en trois catégories selon la méthode de production détaillée en annexe (Documentation sur la production de dihydrogène) :

- l'hydrogène "vert" produit par le biais d'électricité renouvelable
- l'hydrogène "bleu" produit par vaporeformage, l'oxydation partielle et gazéification en utilisant le captage de CO₂
- l'hydrogène "noir" produit par vaporeformage, oxydation partielle et gazéification sans l'utilisation du captage de CO₂

[23] Aujourd'hui, l'industrie mondiale se repose à 99 % sur l'utilisation d'énergies fossiles pour la produire. Cette part importante s'explique par le coût et la complexité des techniques ne recourant pas aux hydrocarbures.

(voir annexe 12)

[24] Depuis 2010, la Chine est le premier producteur mondial d'hydrogène et produit 33 millions de tonnes d'hydrogène, soit approximativement 30 % de la production mondiale. Pour ce faire, la gazéification du charbon est principalement employée. Représentant deux tiers de la production d'hydrogène chinoise, elle engendre l'équivalent de 360 millions de tonnes de CO₂. Par cette production d'hydrogène "noir", les espoirs de cette énergie sont contrebalancés par leur impact environnemental.

La Chine est loin d'être la seule à profiter du faible coût des énergies fossiles pour produire cet hydrogène. Sur les 37 milliards de tonnes d'émissions mondiales de CO₂ d'origine fossile chaque année, environ 800 millions de tonnes de CO₂ par an sont dus à la production fossile d'hydrogène.

Dans cette lumière, les slogans prônant sur ce gaz zéro émission sont trompeurs. L'hydrogène comme énergie verte est à nuancer. Malgré l'impact soi-disant nul de son utilisation, on ne peut pas négliger le poids environnemental de sa production.

3.5.2. Production Française

[25] En France, la production d'hydrogène industriel dépasse les 900 000 tonnes par an, soit 1.43 % de la production mondiale. Elle est produite à 94 % par les énergies fossiles, ce qui émet l'équivalent de 11,5 millions de tonnes de CO₂, approximativement 3 % des émissions nationales.

Dans son dossier de presse pour France 2030 intitulé "*Accélérer le déploiement de l'hydrogène, clé de voûte de la décarbonation de l'industrie*", la France s'engage à recourir à

différentes techniques pour produire son hydrogène et favoriser une production décarbonée afin de respecter ces promesses environnementales.

Dans le rapport, une première solution serait de valoriser sa production par électrolyse dans l'industrie française. Actuellement, la part de la production de l'hydrogène par électrolyse est de 6 % (février 2023). Pour dynamiser l'essor de cet hydrogène "vert", le gouvernement français a alloué 1,5 milliard d'euros pour développer des usines géantes d'électrolyseurs. Avec cet investissement, il ambitionne d'installer 6,5 GW d'électrolyseurs en 2030 pour produire 600 kt d'hydrogène décarboné par an.

[26] Une autre piste envisagée pour pallier ces productions fossiles trop gourmandes est le captage du CO₂. Mentionnée précédemment, cette méthode permettrait de réduire massivement l'émission de CO₂ dans l'industrie et par conséquent de limiter l'impact sur le climat des GES. Malgré l'aspect prometteur de cette solution, il faut qu'elle parvienne à être déployée à coût acceptable pour être industrialisée. Sur le court terme, son coût est de l'ordre de 200 € / tCO₂ et atteint à long terme 50€ / tCO₂. Des acteurs importants tels que l'Ifpen, Air Liquide, Total, Engie et Storengy se mobilisent et cherchent activement à répondre à cette problématique. Actuellement, 40 millions de tonnes de CO₂ sont captées chaque année en mer du Nord.

(voir annexe 13)

3.5.3. *Empreinte Carbone*

Sur le bilan de vie d'une voiture, l'émission de CO₂ due à la production d'hydrogène à un impact significatif qui questionne le réel intérêt d'une telle source d'énergie.

Pour illustrer cette idée, on peut étudier la Toyota de série Mirai, une voiture d'hydrogène, et la comparer à son équivalent thermique, une BMW série 5 520d fonctionnant au diesel. Pour avoir une comparaison pertinente, on se place dans un cas de figure avantageux pour la voiture thermique qui fonctionne au diesel.

[27] La construction de la voiture à hydrogène émet un équivalent de 11 tonnes de CO₂ alors que la fabrication de la BMW émet presque deux fois moins : 6 tonnes de CO₂ d'après Climobil. Ainsi, la voiture à hydrogène démarre sa vie avec une pénalité, une dette carbone.

À présent, en considérant les différentes façons de produire l'hydrogène, différents scénarios sont envisageables sur l'émission globale d'une voiture à hydrogène en fonction de son kilométrage. En fin de vie, le kilométrage d'une voiture diesel moyenne autour de 250 000 kilomètres et émet un peu plus de 220 g de CO₂ par km. De plus, on considère que l'acheminement aux stations services et la compression de cet hydrogène émet 30 g de CO₂. Avec ces données, nous parvenons aux résultats suivants :

(voir annexe 14)

(voir annexe 15)

[28] Sur le graphique, la courbe rouge représente l'empreinte carbone de la voiture selon les kilomètres qu'elle effectue. Si l'on s'intéresse aux différents modes de production de l'hydrogène, on obtient des émissions de CO₂ divergentes.

Scénario 1 : Pour une production seulement à base de gaz par le procédé de vaporeformage (courbe orange), la Toyota Mirai émet l'équivalent de 125 g de CO₂ par km. La voiture à hydrogène rembourse sa dette au bout de 45 000 km et en fin de vie fait économiser l'équivalent de 19,55 tonnes de CO₂.

Scénario 2 : En respectant les parts respectives des technologies utilisées pour produire l'hydrogène dans le monde (vu précédemment), la voiture émet l'équivalent de 158 g de CO_2 par km. Ce cas de figure reflète l'empreinte actuelle des voitures à hydrogène (courbe bleue) et l'on peut constater qu'il ne se distingue pas véritablement de l'empreinte carbone de son équivalent thermique.

Scénario 3 : À présent, si l'on s'intéresse à la production d'hydrogène par électrolyse, c'est-à-dire une production d'hydrogène appelée "verte", sans énergies fossiles, la voiture électrique émet plus que la voiture thermique.

Il est important de comprendre que les avantages de la production de l'électrolyse dépendent de l'origine de l'électricité utilisée. Selon le mix américain, l'électrolyse émet 21 tonnes de CO_2 par tonne d'hydrogène produite (chiffre utilisé dans l'étude pour l'électrolyseur mondiale). Ainsi, la production par électrolyse est aussi mauvaise que l'utilisation de gazéification. La France, par son électricité fortement décarbonée, par le nucléaire notamment, fait chuter ce nombre à 3 tonnes. Représentée par la courbe bleu clair, la Toyota Mirai émet 55,8 g de CO_2 par km, ce qui permettrait d'économiser l'équivalent de 37 tonnes de CO_2 . Ce cas de figure est beaucoup plus convaincant et prometteur sur le potentiel de l'hydrogène dans l'automobile.

Pour conclure, une voiture à hydrogène, sur l'ensemble de sa durée de vie, émet beaucoup moins de gaz à effet de serre que son équivalent thermique si et seulement si l'hydrogène est produit par électrolyse à partir d'électricité basse carbone. Elle compense largement l'impact de sa production en ayant de très faibles émissions à l'utilisation. Cependant, les conditions à réunir pour avoir ce cas de figure ne sont pas d'actualité.

L'étude a été faite à partir des chiffres d'émissions selon la production, donnés par les Notes Scientifiques de l'Office publié par le Sénat. Les résultats trouvés sont limités notamment par les hypothèses prises et les simplifications faites. L'estimation des émissions engendrées par le transport de l'hydrogène est également critiquable, le manque de données nous a contraint à faire de grandes approximations. Cependant, cette étude est pertinente pour illustrer le coût environnemental de l'hydrogène dans le secteur automobile en regardant le bilan de vie de ces voitures.

3.5.4. Platine et pollution

[29] D'après l'article "Analyse du cycle de vie des systèmes de pile à combustible pour les véhicules légers, état actuel et impacts futurs"² publié par l'Université Norvégienne de Sciences et de Technologie, la production d'un système hydrogène émettrait autour de 5 tonnes d'équivalent CO_2 . Environ 40 % de cet impact vient de la production des réservoirs en fibre de carbone et 40 % de la pile à combustible. Pour cette dernière, la moitié de son impact vient du platine qui sert de catalyseur.

Le problème est qu'il s'agit d'un métal géologiquement rare et coûteux, dont l'extraction est polluante. Effectivement, pour obtenir un kilo de platine, il faut extraire 2 millions à 6 millions de kg de minerai. Ainsi, le platine est, au kilogramme, un des métaux les plus polluants. À titre de comparaison, il émet plusieurs milliers de fois plus qu'un kilogramme de cuivre. Cet impact énorme par kg est tempéré pour la voiture à hydrogène qui n'utilise que quelques dizaines de grammes par voiture. De plus, le prix du platine est autour de 28 000€ le kilogramme.

² En anglais : "Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts"

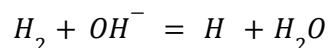
[30] Il est intéressant de savoir que 50 % de la demande mondiale de platine est pour les catalyseurs automobiles. Ils sont utilisés dans les pots catalytiques des voitures thermiques pour réduire la pollution de l'air en détruisant une partie des molécules toxiques qu'elles émettent. On utilise 2 à 7 grammes de platinoïde (mélange de platine et palladium) pour une voiture à essence et 5 à 10 grammes pour une voiture diesel.

Inversement, les voitures à hydrogène et à batterie ne nécessitent pas de tels pots catalytiques puisqu'il n'y a pas de combustion. Ainsi, ces véhicules n'engendrent pas de pollution supplémentaire en comparaison aux voitures thermiques. Cependant, elles ne représentent pas, non plus, une solution satisfaisante à cette pollution minière.

3.5.5. Fuites d'hydrogène

[31] La molécule de dihydrogène est l'une des plus petites connue pour une taille de 74,14 pm. Par conséquent, quelles que soient les conditions de son stockage et de son transport, à moyen ou au long terme, les fuites de dihydrogène sont inévitables. Ce phénomène, bien que considéré inoffensif pour l'homme, ne l'est malheureusement pas pour l'environnement.

La durée de vie du dihydrogène est longue, ce qui lui permet d'atteindre la stratosphère. À cette altitude, il rencontre des radicaux hydroxyles OH^- avec lesquels il réagit et libère alors de l'hydrogène et de l'eau sous forme de vapeur.



La libération de ce produit est problématique puisque la vapeur d'eau est recensée parmi les gaz à effet de serre. En-tête du classement, ce gaz à effet de serre naturel est nécessaire pour garder la température de la Terre à un niveau viable pour notre écosystème. Un excès n'est pas souhaitable, car il encouragerait la hausse des températures et participerait au dérèglement climatique.

En temps normal, et à altitude moindre, les radicaux hydroxyles OH^- réagissent avec le méthane CH_4 ainsi qu'avec d'autres corps tels que le monoxyde de carbone (CO) ou l'oxyde d'azote (NOx). Cette réaction naturelle permet de réguler la quantité de ces derniers et donc de limiter la production d'ozone troposphérique, également un GES.

(voir annexe 16)

[32] Par conséquent, le déficit en radicaux hydroxyles OH^- ayant réagi avec le dihydrogène à cause des fuites de gaz dans l'atmosphère aura un impact qu'aggravant pour l'effet de serre.

Enfin, la durée de vie du méthane (CH_4) dans l'atmosphère augmente avec la présence d'hydrogène. Le méthane produit, par ailleurs, de l'ozone (O_3) et de la vapeur d'eau dans la stratosphère, des gaz à effet de serre avec des propriétés radiatives.

[33] Les scientifiques de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et l'Union européenne estiment que les fuites d'hydrogène causées par sa production, stockage et transport comptent pour 1 à 3 % de l'hydrogène utilisé. Cette portion bien que faible n'est malheureusement pas négligeable.

Effectivement, d'après de nombreux scientifiques, le processus de remplacement des énergies fossiles par le dihydrogène se verra nécessairement accompagné d'une augmentation des températures planétaires par effet de serre.

[34] Un rapport issu de l'ONG Environmental Defense Fund datant de février 2022 chiffrait ce phénomène. On y apprenait que les fuites engendrées par cette technologie pourraient à elles seules être responsables d'une hausse globale des températures atteignant un tiers de degrés.

3.5.6. Rendement

[35] Pour ce qu'il s'agit du bilan, malgré l'abondance de ce gaz dans l'univers, il n'est malheureusement que peu présent à l'état pur dans la nature. Il est donc nécessaire de l'extraire avec d'autres éléments tels que les ressources fossiles ou l'eau.

- Soit par reformage de gaz / pétrole, par gazéification charbon / bois ou par électrolyse de l'eau, ces procédés possèdent un rendement tournant autour de 70 %.
- Les pertes énergétiques induites par la compression et liquéfaction du gaz produit représentent 10 %.
- Une fois l'hydrogène dans le véhicule, le rendement dans la pile à combustible est faible : seul 50 % de l'énergie apportée est restituée sous forme d'électricité.
- Le courant produit étant de type continu, pour alimenter les moteurs asynchrones du véhicule, il est nécessaire d'utiliser des batteries tampons ainsi qu'un onduleur. Le rendement de cette étape est de 90 %.
- Il reste enfin le rendement du moteur électrique de l'ordre de 95 %.

[36] L'ensemble de la chaîne hydrogène aboutit au rendement global de 27 % selon un rapport de l'ADEME datant de janvier 2020. Comparée aux solutions existantes sur le marché, la voiture à hydrogène arrive dernière en termes de rendement énergétique. Ce rendement, significativement faible, représente une perte d'énergie non négligeable. À titre de comparaison, une voiture à hydrogène consomme deux à trois fois plus d'électricité pour la même distance qu'une voiture à batterie.

(voir annexe 17)

(voir annexe 18)

4. TRANSITIONS

4.1. Mesures mises en place

4.1.1. Prime à la Conversion

La France a mis en place des incitations financières pour promouvoir la transition écologique de son parc automobile. Connu sous le nom de « Bonus écologique », il accorde une prime à l'achat qui offre une aide financière aux particuliers qui achètent de nouveaux véhicules électriques ou hybrides rechargeables. Le montant de la prime dépend des caractéristiques telles que l'autonomie électrique du véhicule et des revenus de l'acheteur. En plus de la prime à l'achat, le gouvernement propose également une prime à la conversion pour les ménages les plus modestes. Cette initiative offre une aide financière pour aider les familles à faible revenu à passer d'un véhicule plus ancien et plus polluant à un véhicule propre.

4.1.2. Label Écologique Crit'Air

Le label Crit'Air est un système de vignettes de couleur utilisé en France pour classer les véhicules en fonction de leur niveau de pollution. Instauré en 2016, il vise à lutter contre la pollution atmosphérique. Les véhicules circulant dans les zones à faibles émissions (ZFE) doivent obligatoirement afficher une vignette Crit'Air spécifique pour être autorisés à circuler.

Ce système est basé sur la norme européenne des émissions de polluants, appelée "norme Euro", qui fixe des limites pour les émissions de divers polluants tels que le CO₂, les NO_x, les particules fines et les hydrocarbures. Les véhicules sont classés en fonction de leur âge, de leur type de moteur, de leurs émissions et de leur niveau sonore.

Il existe six vignettes Crit'Air, allant de 0 à 5, chaque niveau correspondant à un degré de pollution différent. Les véhicules les plus propres sont classés Crit'Air 1. Les véhicules les plus polluants, comme les anciens véhicules diesel sans filtre à particules, sont classés Crit'Air 5. Les véhicules à hydrogène et électriques bénéficient de la vignette "zéro".

4.1.3. Dispositifs gouvernementaux

[37] Partout dans le monde, les politiques de développement des voitures électriques ont gagné en popularité ces dernières années. Les engagements mondiaux reflètent la volonté des nations à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et d'encourager le transport durable. Ainsi, diverses politiques ont été mises en place pour fournir : un soutien financier à la fois aux consommateurs et aux fabricants, des subventions pour le déploiement d'infrastructures de recharge et des réglementations à long terme avec des objectifs spécifiques. La France s'est engagée, par la loi Climat, à interdire la vente de voitures neuves les plus polluantes (émettant plus de 95g de CO₂/km) à partir de 2030 et s'est fixée pour objectif de mettre fin à la vente de véhicules à essence et diesel d'ici à 2040. Cette mesure a pour objectif de réduire les émissions de CO₂ et de promouvoir les véhicules propres. Pour assurer cette transition, plusieurs initiatives ont été proposées pour promouvoir la mobilité électrique et à hydrogène.

4.1.3.1. Soutiens du secteur électrique

[38] Pour soutenir davantage la croissance des véhicules électriques, la France investit dans l'expansion des infrastructures de recharge. Le gouvernement vise à installer un réseau de bornes de recharge à travers le pays pour assurer un accès pratique à la recharge pour les propriétaires de voitures électriques. Comme énoncé précédemment, le nombre de recharges publiques déployées a atteint le nombre de 100 000 en mai 2023.

De similaires mesures ont été prises dans le monde. On peut toutefois citer les initiatives financières comme les exonérations de péages routiers comme urbains. Parmi les incitations non monétaires, il existe plusieurs avantages donnés aux véhicules électriques tels que l'accès aux voies réservées aux autobus, le stationnement gratuit et la recharge gratuite.

4.1.3.2. Soutiens du secteur hydrogène

[39] Pour résoudre le coût onéreux que présente l'achat d'un véhicule à hydrogène et son entretien, un certain nombre de gouvernements ont financé des projets et politiques à différentes échelles.

Localement, les gouvernements ont sollicité la construction de stations de ravitaillement d'hydrogène et ont déployé des bus et des camions publics, tels que des

camions à ordures. Cette dernière mesure assure à un certain niveau l'utilisation des stations services.

À l'échelle européenne, on retrouve H2 Accelerate qui a été lancé fin 2020 dans le cadre d'une collaboration entre les producteurs d'hydrogène, les opérateurs d'infrastructures et les constructeurs de véhicules. Leur objectif est de permettre l'utilisation de l'hydrogène dans le transport routier lourd long-courrier à travers l'Europe.

Une politique adoptée à travers le monde est la loi Californienne : "Advanced clean truck regulation" ainsi que "Global Memorandum of Understanding on Zero Emission Medium and Heavy Duty Vehicles". Signée par 16 pays, et approuvée par un certain nombre d'acteurs de l'industrie, la loi fait pression sur les constructeurs de camions pour qu'ils augmentent leurs offres de camion zéro émission.

Finalement, en s'associant, les nations comprennent l'intérêt et la nécessité d'une telle collaboration pour assurer l'essor de cette industrie à l'avenir.

4.2. Défis à relever

4.2.1. *Cette transition écologique globale dans le monde de l'automobile est-elle réaliste ?*

On a beau dire que l'idéal pour notre planète serait que tout le monde roule à l'électrique, encore faut-il que tout le monde puisse se le permettre, et que la production de ces véhicules soit viable sur le long terme. Alors est-ce que cette fameuse transition écologique est réalisable ?

[40] D'une part, il est vrai que malgré les primes à la conversion et les aides de l'État pour acheter un véhicule électrique, tout le monde n'a pas les moyens d'en acheter un. Selon une étude de l'INSEE, les Français dépenseraient 11% de leurs revenus dans leurs véhicules, dont environ 1400€ dans le carburant. Malheureusement, au-delà du fait que les utilisateurs économiserait une grande partie de cet argent, l'électricité étant moins chère que le carburant, cela ne compense pas l'investissement que représente l'achat d'une voiture électrique.

D'une autre part, un autre point sensible et indispensable pour cette transition écologique est la production de ces véhicules. Ainsi, de ce côté-là, tout ne va pas aller en s'arrangeant. En effet, la production des batteries des véhicules électriques nécessite de nombreux métaux et terres rares comme le lithium, le cobalt et le nickel par exemple, dont la quantité disponible constitue une véritable incertitude. Selon plusieurs entreprises comme Tesla ou Audi, nous allons faire face à une pénurie de ces matières premières très convoitées, que se disputent les mondes de l'automobile et du numérique. Ces matières premières sont effectivement utilisées pour produire les batteries de nos téléphones, ainsi que la quasi-totalité des équipements numériques que nous retrouvons dans nos foyers.

Face à ce gros problème d'approvisionnement en matières premières, plusieurs solutions restent à développer. Le recyclage de ces matières premières en est une, car il permettrait, à terme, une indépendance totale des industries quant à l'importation de ces matières premières. Une autre solution, moins certaine, réside dans l'espoir que les évolutions technologiques à venir permettent un jour de réduire à zéro notre dépendance en ces matières premières, ou tout du moins de diminuer la quantité nécessaire à la production d'un véhicule.

En 2022, 190 000 tonnes de cobalt ont été extraites dans le monde, dans les mines de la République Démocratique du Congo (130000 Tonnes), en Indonésie (10000 Tonnes)... Or

cette production va se voir dépassée par la demande. Le graphique suivant illustre le phénomène :

(voir annexe 19)

Mais, le cobalt n'est pas la seule matière à poser le problème d'une pénurie imminente, le nickel en est une autre, car comme nous pouvons le voir sur le graphique ci-après, la demande va dépasser l'offre d'ici à quelques années.

(voir annexe 20)

Enfin, le lithium, élément star des batteries des véhicules électriques, et sans lequel rien ne serait possible aujourd'hui, constitue, par son indispensabilité, la pierre angulaire de cette industrie, dont la pénurie est la plus redoutée par l'industrie automobile. Malheureusement, le lithium tend inévitablement à poser un problème d'approvisionnement, comme nous le montre le prochain graphique :

(voir annexe 21)

Pour conclure, la transition vers un parc de voitures 100% électriques semble être une utopie, qui au mieux prendra des décennies à se concrétiser. Stopper les ventes de véhicules thermiques paraît déjà être une belle étape pour atteindre cet objectif, cependant, cela ne veut pas dire que tous les Français laisseront leur voiture thermique pour une voiture électrique neuve. Ajoutons à cela les pénuries de métaux et terres rares à venir, l'augmentation du coût des matières premières, et les inflations à venir et auxquelles les Français devront faire face au quotidien, et nous obtenons un projet "vert" et valable de l'extérieur, mais complexe et incertain à l'intérieur.

4.2.1.1. Production d'électricité

[41] La production électrique a d'autres impacts que les émissions de gaz à effet de serre. Si l'on remplaçait toutes les voitures françaises par des voitures à batterie, il faudrait une centaine de TWh de plus, soit une augmentation de la production électrique française d'environ 20 %. De la même façon, si on les remplaçait par des voitures à hydrogène, il en faudrait probablement autour de 250 TWh, soit une augmentation de près de 50 % de la production électrique française. Cette différence est loin d'être négligeable.

C'est pourquoi il est justifiable pour l'État de subventionner les voitures à batterie et pourquoi, à l'inverse, il serait beaucoup plus discutable de subventionner le déploiement des voitures à hydrogène. Avec la même quantité d'électricité, vous pouvez déplacer beaucoup plus de personnes en voiture à batterie qu'en voiture à hydrogène.

4.2.2. Véhicules Autonomes

L'intelligence artificielle s'est largement développée dans le secteur automobile ces dernières années. Au-delà du confort de conduite, elle représente un réel atout pour réduire l'impact environnemental des véhicules électriques et à hydrogène.

Les algorithmes d'apprentissage automatique sont une occasion d'optimiser les performances énergétiques de la voiture en gérant les paramètres de fonctionnement du véhicule, tels que le volume d'hydrogène injecté pour la propulsion. L'IA optimise l'utilisation de l'énergie et peut aider, par exemple, à prolonger la durée de vie de la batterie, ce qui permet d'économiser les ressources nécessaires pour fabriquer de nouvelles batteries. Cette optimisation de la gestion de l'énergie peut aussi avoir un impact positif sur l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

L'IA peut aussi être utilisée pour surveiller et identifier les problèmes potentiels de la voiture et améliorer sa fiabilité. La surveillance permanente des données de performance du

véhicule permet d'anticiper les pannes et problèmes de maintenance avant qu'ils ne deviennent graves et coûteux à réparer.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

5.1. Conclusion sur la transition écologique dans le monde de l'automobile

Pour conclure, la voiture à hydrogène présente une solution intéressante afin de proposer une alternative aux voitures thermiques d'aujourd'hui dans le cadre de la lutte climatique. Cependant, d'importants facteurs, comme sa production énergivore, son stockage difficile causant des fuites, son faible rendement et son transport, nuisent à son potentiel environnemental. À cela s'ajoutent son prix et son gabarit qui posent un véritable défi aux industriels.

En lumière de tous ces arguments, il est difficile actuellement de défendre son existence et pertinence avec des arguments écologiques dans le secteur des automobiles légères. Toutefois, il est important de rappeler que l'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs automobiles est très récente. D'importants progrès et développements laissent espérer que des solutions soient trouvées dans le futur.

En attendant, l'industrie des poids lourds, elle, répond favorablement à plusieurs de ces difficultés. La recherche et l'innovation dans ces technologies sont prometteuses. Elles offrent une place privilégiée pour l'hydrogène dans le développement des transports communs et les véhicules utilitaires en faveur de l'environnement.

C'est pour cela que nous estimons que la voiture électrique correspond mieux aux attentes des véhicules personnels dans la transition écologique. Cependant, cette transition écologique ne se fera pas sans rencontrer d'embûches, car plusieurs points clés vont amener à poser un problème dans les années à venir : le budget des particuliers et l'approvisionnement en matières premières. En effet, avec les inflations récurrentes, le budget accordé par les consommateurs à l'achat d'un nouveau véhicule a fortement diminué. Malheureusement, cela ne va pas aller en s'arrangeant, puisque le contexte économique de notre pays est inquiétant, et que notre dette augmente de manière continue. Mais, le budget ne sera pas le seul problème. Des pénuries de matières premières comme le lithium, le cobalt et le nickel ne vont pas tarder à entraver le processus de fabrication. Car ces matières premières sont aussi très utilisées dans le domaine du numérique. La demande va donc surpasser l'offre.

Pour conclure, cette transition vers des véhicules plus verts serait un réel booster pour limiter notre empreinte carbone. En revanche, l'idée d'un parc 100% électrique est une utopie que nous ne sommes pas près de voir se concrétiser.

5.2. Conclusion personnelle

Lorsqu'il a fallu choisir un projet P6, nous avons été pris de curiosité pour celui-ci. Audacieux, il confronte deux sujets qui s'opposent : l'avenir des transports (secteur le plus polluant), et la protection de l'environnement. L'urgence de la crise climatique étant au cœur de l'actualité, il a été très pertinent et enrichissant d'étudier cette problématique. Ainsi, nous avons acquis des connaissances solides sur les enjeux environnementaux et les changements qu'ils imposent. Finalement, nous avons pu constater que la situation est contrastée. Les énergies renouvelables ne sont pas une solution miracle, et à l'inverse, les énergies fossiles ne sont pas nécessairement l'ennemi. Vraisemblablement, il faudrait

changer collectivement notre mode de vie et notre consommation, en privilégiant les transports communs et modes de transport à plusieurs.

Ce travail en groupe a favorisé la mise en commun de nos connaissances et compétences. Il nous a permis de créer une synergie qui a renforcé la qualité et l'ampleur de notre projet. Nous avons pu mettre à profit les points forts individuels de chaque membre de notre équipe, ce qui a facilité l'adoption d'une approche holistique et équilibrée dans notre développement et notre recherche de solutions. En divisant le projet, notre efficacité s'est vue décuplée, nous permettant ainsi d'étudier notre problématique en profondeur. Cela nous a aussi posé un problème puisque, trop enthousiastes, nous avons collectivement dépassé le quota exigé pour le rapport. Nous avons dû réaliser un tri des informations et retenir uniquement les aspects les plus importants. En se réorganisant, nous avons toutefois réussi à construire un travail concis, structuré et pertinent pour le lecteur. Notre groupe était initialement composé de quatre étudiants, mais l'un de nos camarades, Pengyu Liu, a quitté le projet courant avril. Ce changement brusque nous a contraints à repenser l'organisation prévue au préalable. Nous nous sommes alors répartis ses tâches et avons dû renoncer à traiter des sujets connexes comme les voitures hybrides pour respecter les limites de volume imposées.

Au cours de nos recherches et de notre analyse, nous avons été frappés par plusieurs éléments qui reflètent l'ampleur du changement qui s'opère actuellement dans ce secteur crucial.

Notre projet étant purement fondé sur des textes papiers et numériques, cela nous a permis de découvrir des nouveaux moyens de s'informer sur les avancées scientifiques. Cependant, il a été primordial de bien vérifier la fiabilité et la qualité des données. En effet, sur internet, les informations ne sont pas toujours sourcées ni scientifiquement prouvées. La quantité de fausses informations sur des sujets très récents ou sur des sujets sensibles comme l'environnement est considérable. De plus, certains journalistes peuvent être biaisés, et promouvoir ou non les voitures propres.

Lors de nos recherches, nous nous sommes retrouvés confrontés à plusieurs incohérences entre les faits annoncés et les données scientifiques que nous avons. Par exemple, un journaliste, d'un média connu, a affirmé que l'on pouvait s'attendre à ce que le prix de l'hydrogène lors de la recharge du véhicule baisse prochainement puisque la production d'hydrogène renouvelable se développait et était moins chère. Cela n'est pas entièrement faux : la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables croît et ainsi ce développement participe à réduire son coût. Cependant, lorsqu'on considère la portion des énergies renouvelables pour produire l'hydrogène (6%), il est difficile de croire cette affirmation. Pour obtenir ce cas de figure, il faudrait attendre 2050, soit un peu moins de 30 ans. Ainsi, hors contexte, ou sans l'intégrité de l'information, il peut être facile de fausser son jugement.

Conscients de l'impact des informations incorrectes présentes dans les médias, ce projet a été l'opportunité pour nous de promouvoir des sources fiables et ainsi de combattre la désinformation à ce sujet.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Lien internet : <https://beqtechnology.com/>
- [2] Lien internet : <https://www.fiches-auto.fr/>
- [3] Lien internet :
<https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/voiture-electrique/s-2409-les-differents-types-de-moteurs-electriques-.php>
- [4] Rapport de stage SAFT Paul Gendreau
- [5] Lien internet : <https://www.renaultgroup.com/>
- [6] Lien internet : <https://www.ave-re-france.org/>
- [7] Lien internet : <https://www.reseau-astuce.fr/>
- [8] Lien internet : <https://www.uber.com/fr/fr/> et <https://www.g7.fr/>
- [9] lien internet : <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/executive-summary>
(valide à la date du 04/05/2023)
- [10] lien internet :
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-01-12/electric-vehicles-look-poised-for-slower-sales-growth-this-year> (valide à la date du 04/04/2023)
- [11] lien internet : <https://www.mister-auto.com/batterie-voiture/> (valide à la date du 04/04/2023)
- [12] lien internet : https://fr.wikipedia.org/wiki/Voiture_%C3%A9lectrique#cite_note-15
(valide à la date du 04/04/2023)
- [13] <https://www.hellocarbo.com/> et
<https://www.sami.eco/blog/bilan-carbone-voiture-electrique>
- [14] lien internet : https://www.tesla.com/fr_fr/model3 (valide à la date du 04/04/2023)
- [15] lien internet : <https://www.h2-mobile.fr/stations-hydrogene/> (valide à la date du 27/03/2023).
- [16] lien internet : [Air Liquide and TotalEnergies join forces to create a European network of hydrogen stations | Hydrogen Council](#) (valide à la date du 05/04/2023)
- [17] lien internet :
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets> (valide à la date du 05/04/2023)
- [18] lien internet :
https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/hydrogen-facts.pdf?sfvrsn=3930c280_2 (valide à la date du 05/04/2023)
- [19] lien internet :
<https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/4/2021/04/Fiche-9.2-Les-bus-H2-rev.-avril-2021-ThA.pdf> (valide à la date du 05/03/2023)
- [20] lien internet : <https://www.h2-mobile.fr/actus/rapport-giec-place-hydrogene-mobilite/>
(valide à la date du 04/04/2023)
- [21] lien internet :
<http://www.universalis-edu.com.ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedie/automobile-economie-et-strategies-de-mondialisation/>(valide à la date du 03/03/2023)
- [22] lien internet :
<https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/GlobalHydrogenReview2022.pdf> (valide à la date du 010/03/2023)

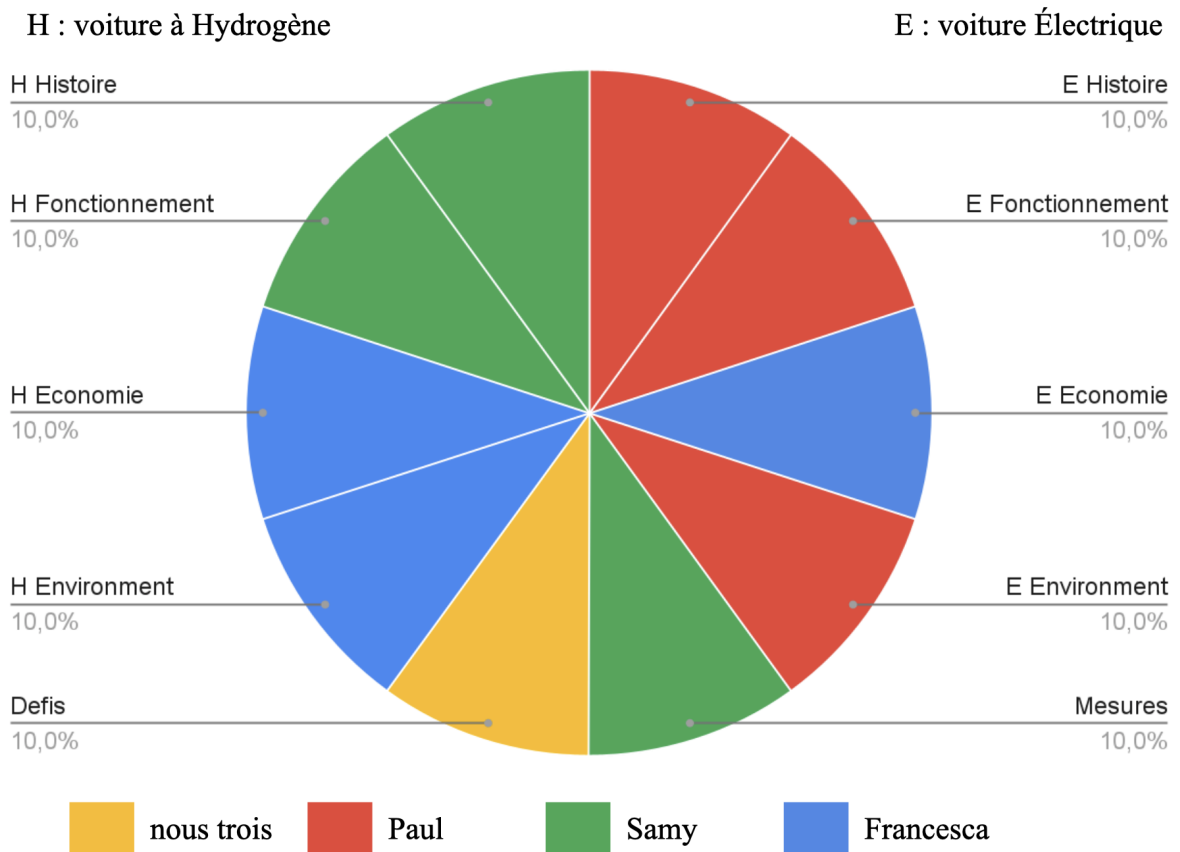
- [23] lien internet : <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fuel-cell-electric-vehicles-stock-by-region-and-by-mode-2020> (valide à la date du 04/04/2023)
- [24] lien internet : <https://voitures-inge.com/> (valide à la date du 04/04/2023)
- [25] lien internet : <https://www.youtube.com/watch?v=2N6GwxEDmEQ> (valide à la date du 04/04/2023)
- [26] lien internet : <https://docs.google.com/document/d/13P-Y5MXU7nY6bSzsllaHXODRUeJZsEDb/edit#> (valide à la date du 05/06/2023)
- [27] lien internet : https://www.senat.fr/fileadmin/Fichiers/Images/opecest/quatre_pages/OPECST_2021_0032_note_hydrogene.pdf (valide à la date du 04/04/2023)
- [28] lien internet : <https://www.iea.org/topics/climate-change> (valide à la date du 04/04/2023)
- [29] lien internet : <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/OpportunitiesforHydrogenProductionwithCCUSinChina.pdf> (valide à la date du 04/04/2023)
- [30] lien internet : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf (valide à la date du 04/04/2023)
- [31] lien internet : https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf (valide à la date du 05/06/2023)
- [32] lien internet : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620351301> (valide à la date du 04/04/2023)
- [33] lien internet : <https://www.lereveilleur.com> (valide à la date du 04/04/2023)
- [34] lien internet : <https://climobil.connecting-project.lu/?batteryLifetime=240000&batteryCapacity=37.9&greenhouseGas=65&electricCarRange=235&carbonElectricityMix=300&greenhouseBattery=30&greenhouseWTT=25&greenhouseTTW=186&batteryPenalty=0.9&annualMileage=20000&ICECurb=1750&ECurb=1345&NEDCpenalty=0.39&decarbonization=0> (valide à la date du 04/04/2023)
- [35] lien internet : https://www.senat.fr/fileadmin/Fichiers/Images/opecest/quatre_pages/OPECST_2021_0032_note_hydrogene.pdf (valide à la date du 04/04/2023)
- [36] lien internet : <https://voitures-inge.com/> (valide à la date du 04/04/2023)
- [37] lien internet : <https://www.apc-paris.com/gaz-serre> (valide à la date du 04/04/2023)
- [38] lien internet : <https://reporterre.net/Les-fuites-d-hydrogene-rechauffent-le-climat#:~:text=L%27hydrog%C3%A8ne%20perturbe%20les%20gaz,pas%20neutre%20pour%20le%20climat.> (valide à la date du 04/04/2023)
- [39] lien internet : <https://acp.copernicus.org/articles/22/9349/2022/> (valide à la date du 04/04/2023)
- [40] lien internet : <https://voitures-inge.com/> (valide à la date du 04/04/2023)

- [41] lien internet : <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2020/03/battery-or-fuel-cell--that-is-the-question.html#> (valide à la date du 04/04/2023)
- [42] <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5358250#:~:text=Insee%20Premi%C3%A8re%20%C2%B7%20Avril%202021%C2%B7%20n,revenu%20disponible%20%C3%A0%20la%20voiture&text=En%202017%2C%20les%20m%C3%A9nages%20consacrent%20en%20moyenne%204%20700%20euros,14%20%25%20de%20leur%20revenu%20disponible.>
- [43] lien internet : https://www.francetvinfo.fr/economie/transports/conversion-des-voitures-thermiques-en-electriques-le-retrofit-une-reponse-complementaire-pour-rouler-tous-les-jours-sans-polluer-l-air-des-villes_5055151.html (valide à la date du 04/04/2023)
- [44] lien internet : https://fr.wikipedia.org/wiki/Voiture_%C3%A9lectrique (valide à la date du 04/04/2023)
- [45] lien internet : <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets> (valide à la date du 04/04/2023)
- [46] lien internet : <https://www.lereveilleur.com> (valide à la date du 04/04/2023)
- [47] lien internet : <https://www.h2-mobile.fr/actus/rapport-giec-place-hydrogene-mobilite/> (valide à la date du 04/04/2023)

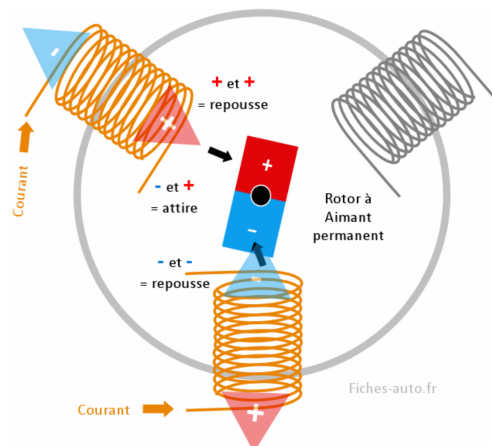
6. ANNEXES

6.1. Illustrations

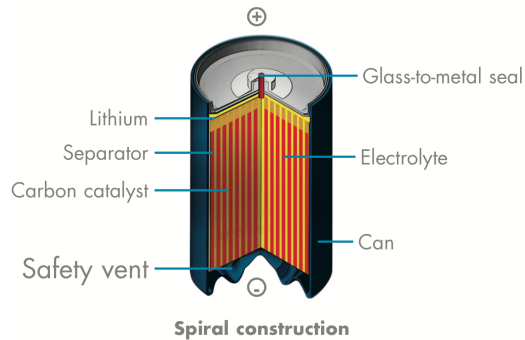
Annexe 1 : Diagramme de la répartition des tâches



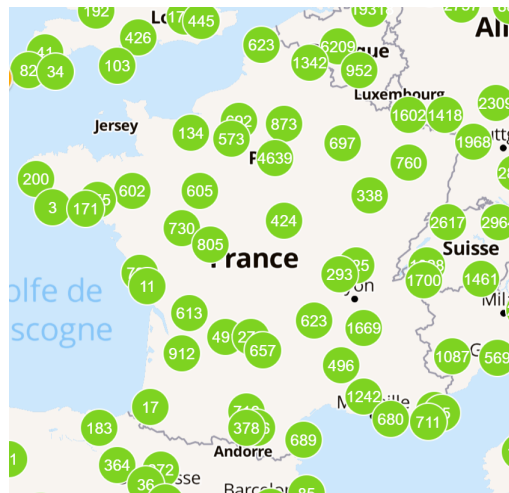
Annexe 2 : Schéma d'un moteur à aimant permanent



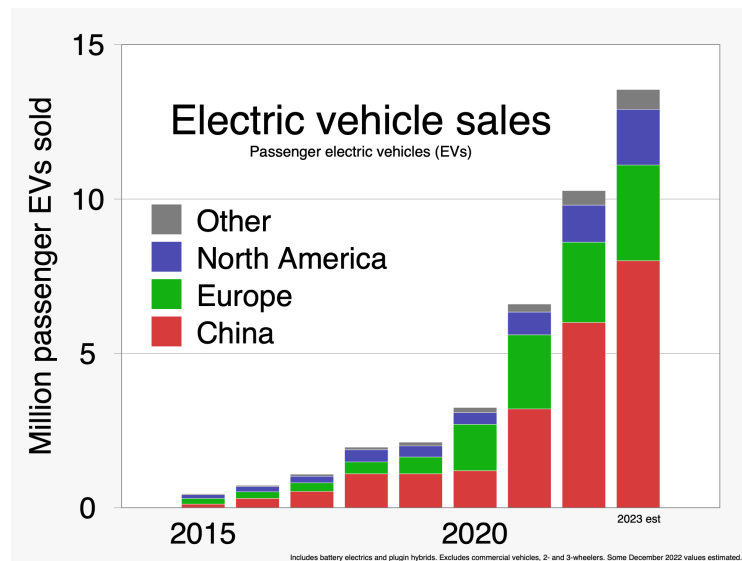
Annexe 3 : Composants d'une batterie de voiture électrique



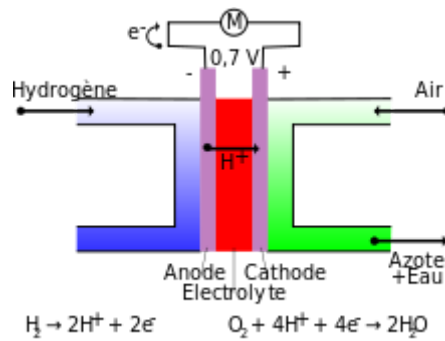
Annexe 4 : Carte des stations pour voitures électriques en France



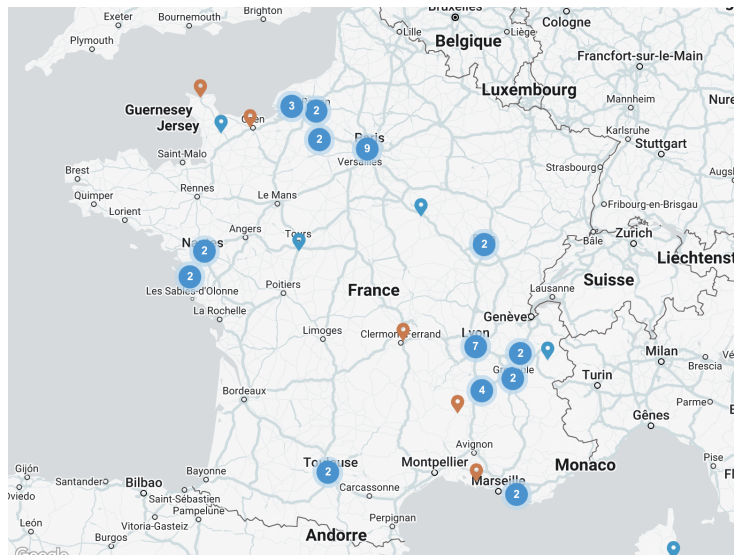
Annexe 5 : Nombre de véhicules électriques de particuliers vendus chaque année, pour la Chine, l'Europe et les États-Unis, tel que rapporté par Bloomberg NEF



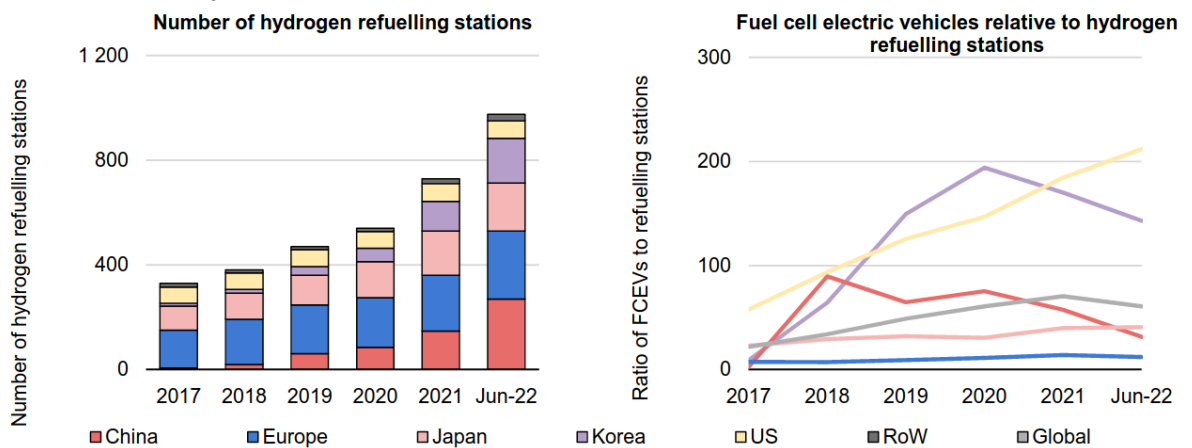
Annexe 6 : Schéma d'une pile à combustible



Annexe 7 : Carte des stations à hydrogène en France

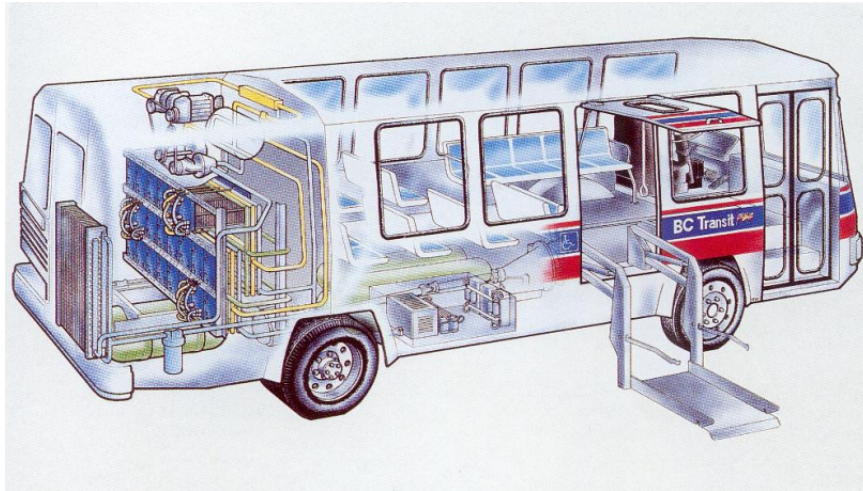


Annexe 8 : Nombre de stations de ravitaillement en hydrogène dans le monde et par voiture (2017 et juin 2022)

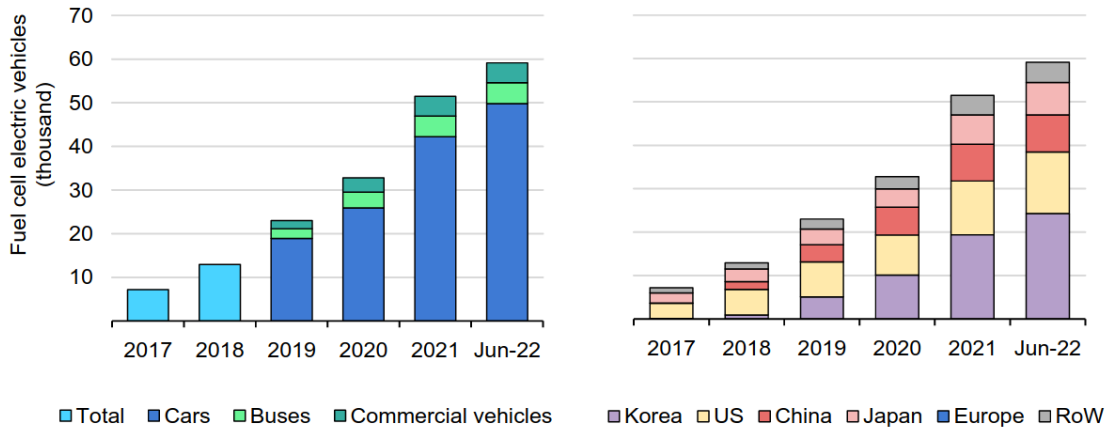


IEA. All rights reserved.

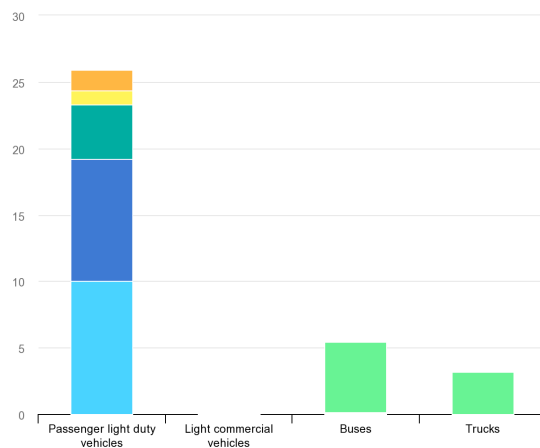
Annexe 9 : Schéma du premier bus Ballard (1992)



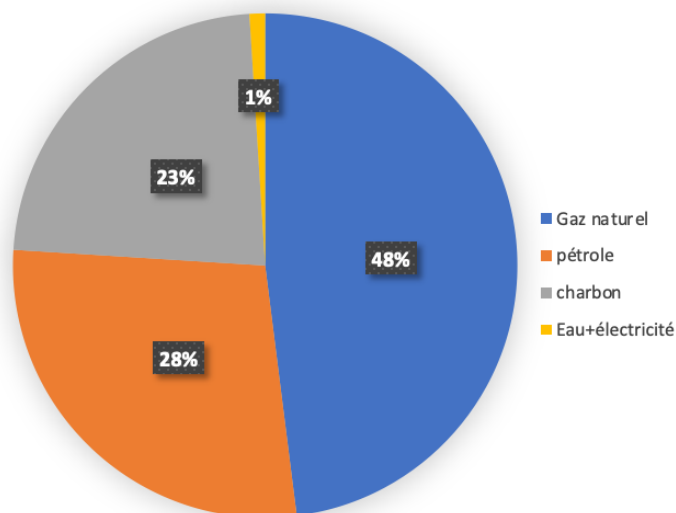
Annexe 10 : parc de véhicules électriques à pile à combustible par segment et région entre 2017 et juin 2022



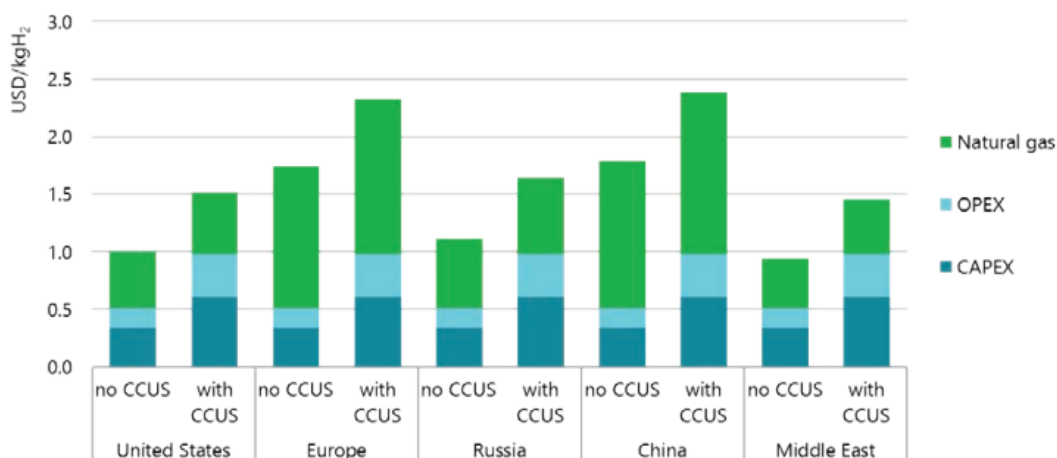
Annexe 11 : parc de véhicules électriques à pile à combustible par secteur automobile et région mis à jour le 26 octobre 2022



Annexe 12 : Part des matières premières utilisées pour produire l'hydrogène dans le monde



Annexe 13 : Coût de la production d'hydrogène à partir des gaz naturels selon les régions en 2018



Notes: kgH₂ = kilogram of hydrogen; OPEX = operational expenditure. CAPEX in 2018: SMR without CCUS = USD 500–900 per kilowatt hydrogen (kW_{H₂}), SMR with CCUS = USD 900–1 600/kW_{H₂}, with ranges due to regional differences. Gas price = USD 3–11 per million British thermal units (MBtu) depending on the region. More information on the underlying assumptions is available at www.iea.org/hydrogen2019.

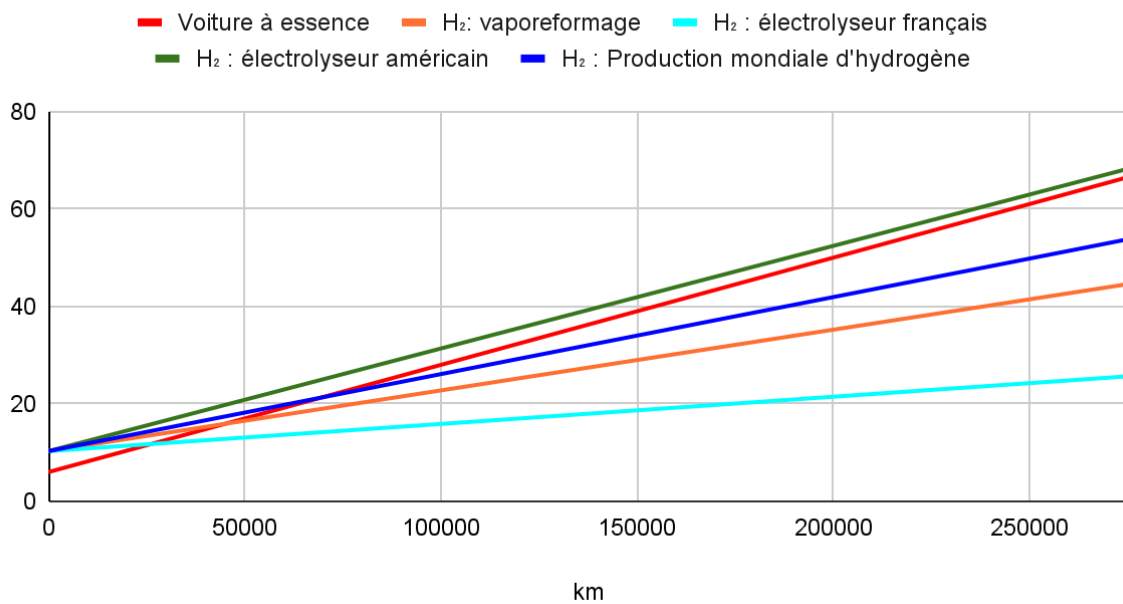
Source: IEA 2019. All rights reserved.

Annexe 14 : Tableau récapitulatif de l'impact environnemental selon le mode de production de l'hydrogène

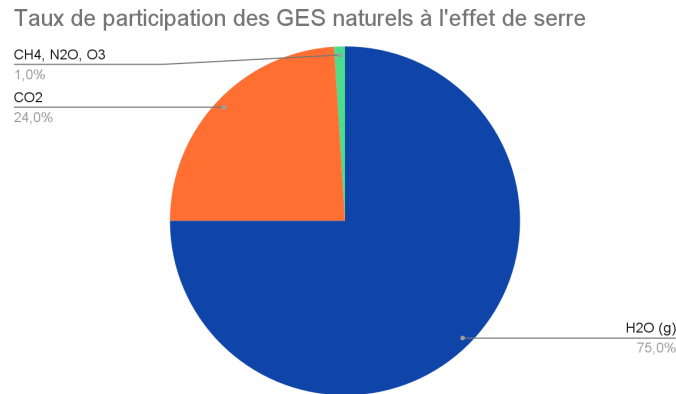
Hydrogène produit par	t(CO ₂ émis)/t(H ₂ produit)	kg(H ₂)/km	g(CO ₂ émis)/km	gCO ₂ émis au transport et compression	g(CO ₂ émis)/km	Bilan CO ₂ est inférieur au bout de ___km	Gain de t(CO ₂) sur 250 000km

Vaporeformage	11	0,0086	94,6	30	124,6	45073,37526	19,55
Pétroliers	15,5	0,0086	133,3	30	163,3	75837,7425	9,875
Gazéification	22	0,0086	189,2	30	219,2	5375000	-4,1
Electrolyse française	3	0,0086	25,8	30	55,8	26187,57613	36,75
Electrolyse américain	21	0,0086	180,6	30	210,6	457446,8085	-1,95
Production mondiale d'hydrogène					158,054	69415,29719	11,1865

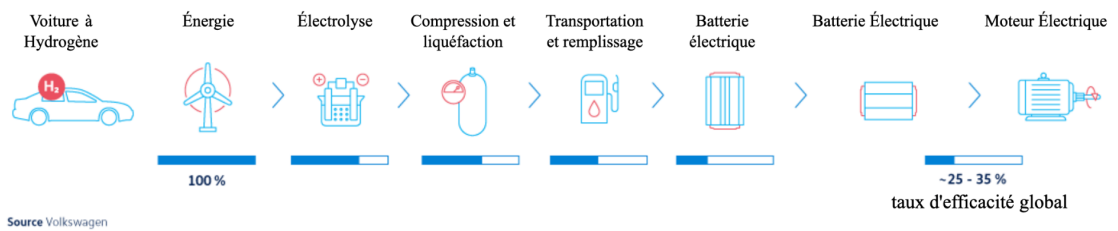
Annexe 15 : Émissions de CO_2 en tonnes par kilométrage



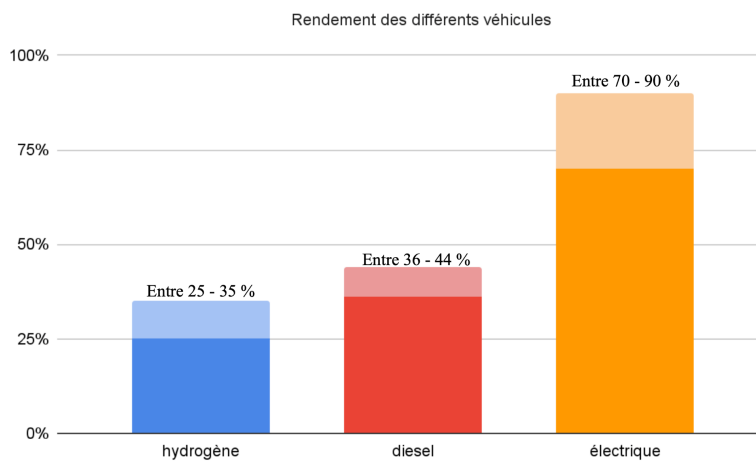
Annexe 16 : Taux de participation des GES naturels à l'effet de serre



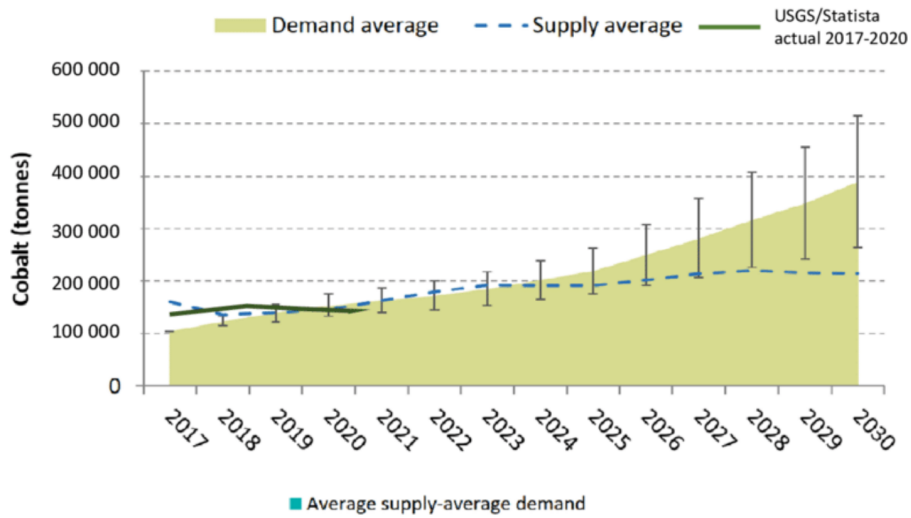
Annexe 17 : Rendement de la voiture à hydrogène schématisée par le constructeur automobile Volkswagen



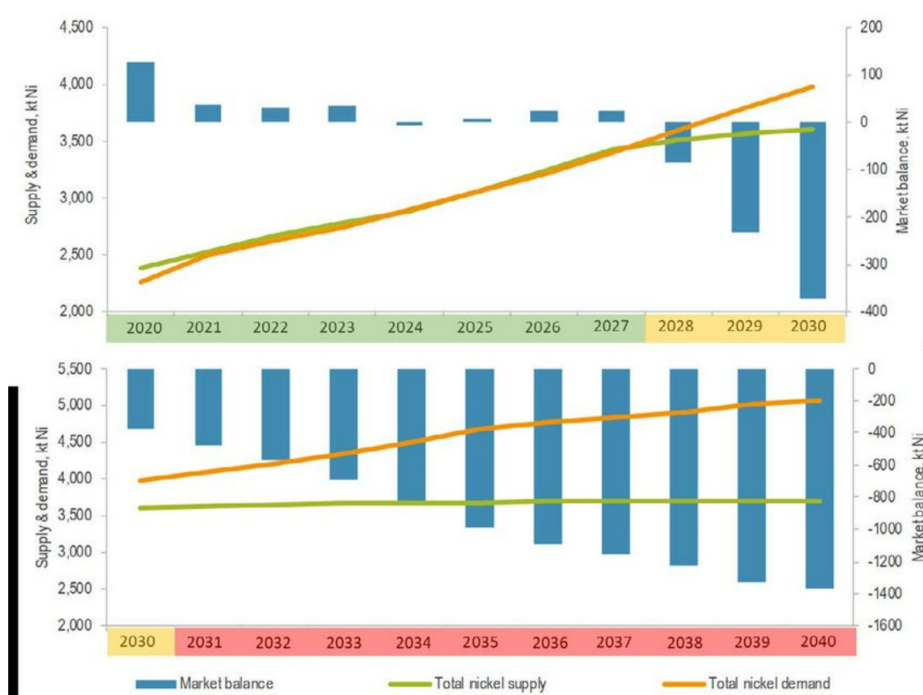
Annexe 18 : Comparaison des rendements des véhicules



Annexe 19 : Offre et demande du Cobalt dans le monde

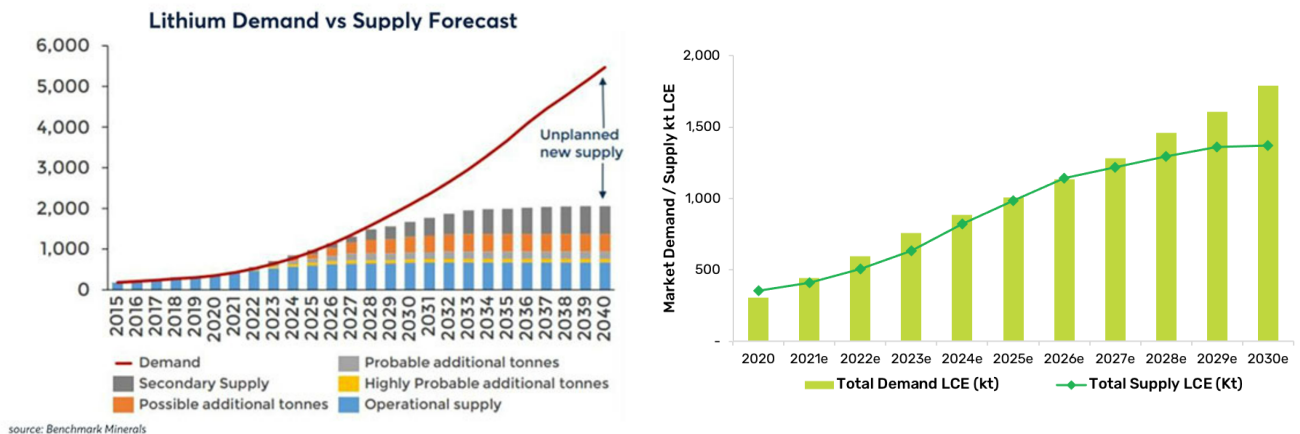


Annexe 20 : Offre et demande du Nickel en 2021



Predicted nickel supply-demand 2020-2040. Modified after Fraser et al. 2021.

Annexe 21 : Offre et demande du Lithium



6.2. Documentation sur la production du dihydrogène

Production à partir de gaz naturel : le Reformage

À partir de gaz naturel composé principalement de méthane, la technique de production la plus utilisée est le reformage. Elle se décompose en trois méthodes différentes. La première est le vaporeformage du méthane qui utilise l'eau comme oxydant et source d'hydrogène. L'oxydation partielle est une méthode alternative qui a recours au dioxygène de l'air pour oxyder l'hydrocarbure. Elle est essentiellement utilisée en pétrochimie avec des fractions plus lourdes d'hydrocarbures. Enfin, le reformage autothermique est une combinaison des deux procédés précédents.

Le vaporeformage du méthane est la méthode de production de dihydrogène la plus répandue malgré l'utilisation fréquente du reformage autothermique.

Cette réaction doit être réalisée à haute température, à 700°C. Environ 30% à 40% du méthane est utilisé pour être brûlé et atteindre cette température. Le gaz naturel est donc à la fois réactif et carburant dans la réaction de vaporeformage. Malgré la production de gaz à effet de serre, cette méthode est la plus répandue, car elle est la plus économique et celle qui dispose du plus grand nombre de sites de production dans le monde.

Le reformage autothermique du méthane est un procédé similaire dans lequel la chaleur nécessaire à la réaction est produite à l'intérieur du réacteur. Le dioxyde de carbone formé est donc concentré au sein de l'unité de reformage.

Environ 205 milliards de m³ de gaz naturel sont ainsi utilisés pour la production de dihydrogène par an, soit environ 6% de la consommation annuelle de gaz naturel.

Il existe, cependant, des méthodes pour réduire l'impact environnemental du vaporeformage du méthane, notamment, la capture et la séquestration du dioxyde de carbone.

Gazéification du charbon :

La deuxième méthode de production de dihydrogène la plus importante est la gazéification du charbon. Elle fournit approximativement 23% de la production mondiale de dihydrogène. Cette technique est surtout utilisée en Chine qui dispose de très grandes ressources en

charbon dans ses sols, mais de très peu de gaz naturel. 80% des 130 usines de gazéification du charbon sont situées en Chine

Comme pour le vaporeformage du méthane, la réaction doit être réalisée à haute température. Une partie du charbon introduit est donc brûlée pour atteindre cette température. Le charbon est oxydé par le dioxygène et la vapeur d'eau. On obtient alors du gaz de synthèse, mais avec une seule molécule de dihydrogène. On peut alors, de la même manière, convertir le monoxyde de carbone afin de former une molécule de dihydrogène supplémentaire.

Il existe, cependant, des méthodes pour réduire l'impact environnemental de la gazéification du charbon et du vaporeformage du méthane, notamment, la capture et la séquestration du dioxyde de carbone.

Capture et séquestration du dioxyde de carbone :

La séquestration du CO₂ est une technique employée pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique.

Cette méthode consiste à capturer le dioxyde de carbone émis par les installations industrielles et à le transporter vers un site de stockage souterrain naturel.

Le dioxyde de carbone est injecté profondément dans ces formations, où il est piégé et empêché de retourner dans l'atmosphère.

Ce procédé est coûteux et est utilisé pour 1% de la production totale d'hydrogène. Il est cependant efficace en capturant environ 60% du CO₂ au sein du réacteur et 90% CO₂ produit par combustion du méthane.

Électrolyse de l'eau :

Ancienne méthode majoritaire pour la production de dihydrogène entre 1920 et 1960 alors, l'électrolyse de l'eau représente aujourd'hui 0.1% de la production mondiale de dihydrogène, notamment pour des secteurs spécifiques nécessitant de l'hydrogène sans impureté comme l'électronique. Cette technique utilise de l'électricité pour former du dihydrogène à partir d'eau. L'eau est dissociée en ions hydroxyde et hydrogène. Ces derniers forment ensuite, par oxydo-réduction, une molécule de dihydrogène.

Cette méthode n'émet pas directement de CO₂, mais son impact carbone dépend de la méthode de production d'électricité. L'électricité peut être fournie par des sources d'énergie renouvelables, telles que les énergies solaires ou éolienne, ou à partir de sources d'énergie conventionnelles, telles que les centrales électriques.