

# NOUVELLES MOTORISATIONS POUR LES VOITURES AUTONOMES

**Étudiants :**

**Chloé DARNAL      Nassim MEZIANE**  
**Julianne DAVID    Shivashu JAISWAL**  
**Louise GAUTHIER   Oriane SCAGLIA**

**Enseignant-responsable du projet :****Abdelaziz Bensrhair**

Date de remise du rapport : **15/06/2020**

Référence du projet : **STPI/P6/2020 – 34**

Intitulé du projet : Nouvelles motorisations pour les voitures autonomes

Type de projet : recherche bibliographique

Objectifs du projet : L'objectif de ce projet était de fournir un rapport qui présente les principales alternatives au moteur thermique classique et les utilisations de ces nouveaux moteurs dans les voitures du futur, les voitures autonomes. Le rapport devait rassembler les informations majeures sur le fonctionnement de ces moteurs tout en indiquant leurs avantages mais aussi leurs inconvénients. Ainsi ce projet avait pour but principal d'élargir nos connaissances sur les différentes motorisations possibles et de nous amener à considérer d'autres types de véhicules pour l'avenir de l'automobile.

Mots-clefs du projet : électrique, hybride, hydrogène et moteur

## TABLE DES MATIÈRES

Introduction	4
Méthodologie / Organisation du travail	5
1.1 La motorisation électrique	6
1.2 Motorisation hybride	9
1.2.1. Un exemple de moteur hybride: le moteur à hydrogène	11
1.2.2 Un autre exemple de moteur hybride : le moteur thermique pneumatique	13
2. Comparaisons thermiques et écologiques	15
Conclusions et perspectives	19
Bibliographie	20
Annexes	21

## INTRODUCTION

Mus par leur besoin de parcourir de grandes distances le plus vite possible, les hommes ont commencé à se pencher sur le concept « d'automobile » dès la fin du 18ème siècle. Le tout premier véhicule fonctionnel mais encombrant, est le fardier de Cugnot, une machine à vapeur montée sur 3 roues.

Dans les années 1860 les premiers moteurs à explosion apparaissent basés sur le cycle à quatre temps de Beau de Rochas. Mais c'est à la fin du 19ème siècle que les premières voitures à combustion interne arrivent et révolutionnent ainsi l'automobile. Depuis l'invention du moteur à combustion interne, l'évolution des véhicules automobiles est toujours couplée à des recherches sur la motorisation. À mesure que les années passent, les enjeux liés à l'industrie automobile changent. Aujourd'hui, les défis auxquels l'industrie automobile doit faire face relèvent d'un soucis commercial et environnemental. En effet, les voitures sont des véhicules fonctionnant avec des énergies fossiles. La problématique à résoudre pour notre génération est donc : Comment créer et commercialiser en grand nombre une voiture « verte », dont la création et l'utilisation auraient un impact minimal sur l'environnement ? De nombreux chercheurs se sont penchés sur le sujet en étudiant divers types de motorisations, dans un esprit d'utilisation d'énergies renouvelables, notamment en travaillant sur les voitures électriques et hybrides.

Dès le 19ème siècle, des inventeurs tels que Robert Anderson, Gaston Plant et William Morrison ont permis aux premières voitures électriques d'exister. En effet, au début du 20ème siècle, plus d'un tiers des voitures en circulation étaient électriques. Mais les voitures électriques finiront par être remplacées par les voitures utilisant le pétrole, car pas assez puissante, pas assez autonomes et trop chères. C'est en 1966 que le congrès américain recommanda la construction de voitures électriques afin de limiter la pollution de l'air. S'en suivit une série de succession de modèles de voitures, en allant de la première voiture hybride en 1972, passant par la Toyota Prius en 1997, pour arriver aujourd'hui à plusieurs millions de voitures électriques en circulation aujourd'hui.

D'autres nombreuses sources d'énergie renouvelable ont attiré l'œil les chercheurs ces dernières années comme l'énergie issue de l'hydrogène. Cet élément chimique étant le principal composant de notre planète, cela consisterait une source inépuisable de carburant. Cependant l'hydrogène est un élément difficile à exploiter. C'est en 1994 que l'on commence à exploiter l'hydrogène, voyant en ce gaz un carburant d'avenir, mais il est encore difficile à maîtriser (difficile à transporter et à conserver) . C'est dans les années 2010 que les moteurs à hydrogène se sont largement développés sur des volumes plus petits (voitures, bus ou encore scooter). Sur l'eau aussi, ce gaz commence à être exploité comme carburant. Cette motorisation est aujourd'hui considérée comme une énergie d'avenir, seulement il reste encore le soucis de la fabrication et du stockage de l'hydrogène, et enfin du développement et de la commercialisation.

Concernant les véhicules autonomes, leur technologie repose sur les capacités GPS ainsi que sur des systèmes de détection avancés capables de détecter les limites de voie, les signaux et les obstacles. Bien que la technologie ne soit pas encore parfaite, elle devrait se généraliser à mesure qu'elle s'améliore, certains prédisant que jusqu'à la moitié des automobiles sortant des chaînes de montage dans le monde seront autonomes ou au moins semi-autonomes d'ici 2025. Des dizaines d'États ont déjà une législation en vigueur

concernant l'utilisation de véhicules autonomes en prévision de la généralisation de cette technologie.

Dans ce rapport, nous allons tout d'abord présenter les principaux nouveaux moyens de motorisations en développement dans le monde. Nous avons choisi de ne pas nous arrêter aux véhicules autonomes pour avoir une vision plus globale des motorisations. Nous vous présenterons le principe de chaque motorisation, son fonctionnement et l'énergie sur laquelle elle s'appuie. Dans une deuxième partie, nous analyserons les caractéristiques techniques de chaque motorisation et leurs performances. Nous nous attarderons de même sur leur impact écologique. Enfin, nous concluons par les perspectives pour le futur et les changements que ces véhicules vont occasionner dans l'industrie automobile.

## MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Une organisation claire et méthodique est nécessaire pour que chaque projet soit mené à bien. C'est pour cela que nous avons directement travaillé en amont du rapport pour se séparer convenablement les tâches. Lors de notre rencontre à la première séance nous avons décidé que chacun fasse des recherches personnelles pour s'approprier le thème. Ainsi lors de la deuxième séance nous les avons mis en commun et nous avons ainsi sélectionné des axes majeurs pour notre projet. Cela nous a ensuite permis de rédiger un premier plan et de se séparer les différents axes à traiter comme indiqué sur l'organigramme. Nous avons ensuite effectué chacun des recherches sur notre partie tout en mettant régulièrement en commun notre travail pour voir si nous avançons ensemble dans la même direction. A chaque séance nous suivions et mettions en commun notre travail pour avancer au mieux sur ce projet. Ainsi lorsque nous sommes arrivé à la fin de la rédaction de notre projet, nous avons mis en commun tous nos travaux et ainsi commencé la mise en page. Malgré la crise sanitaire, nous avons continué le travail et nous organisons des rendez-vous hebdomadaire pour garder la ligne directrice de notre projet. Durant cette période nous avons notamment travaillé sur la mise en page ainsi que sur la conclusion tout en vérifiant chacun nos parties pour que le rapport soit le plus compréhensible possible et suive une ligne directrice commune.

Pour conclure, on peut dire même si notre organisation a dû être modifiée nous nous sommes adaptés ensemble pour faire de ce projet un travail commun.

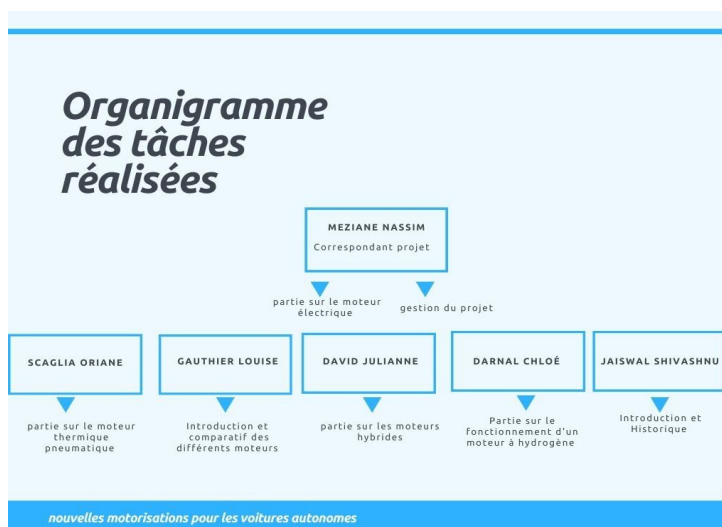


Figure 1: Organigramme des tâches réalisées

## 1.1. La motorisation électrique

### Conception générale :

Un groupe motopropulseur électrique est subdivisé en 3 sous-ensembles: le moteur électrique qui va convertir l'énergie électrique en énergie mécanique nécessaire à la mise en mouvement du véhicule, l'électronique de puissance qui transforme et transfère l'énergie stockée dans la batterie vers le moteur et la boîte de vitesses ou le réducteur, généralement constitué d'un seul rapport.

### Moteur électrique :

Les moteurs électriques se composent de deux parties :le stator, une pièce fixe et le rotor, partie mobile en rotation.

Le stator est constitué de bobines de fils en cuivre (entre 1 et 2 km de bobinage) alimentés par un courant alternatif triphasé ( voir annexe 1 motorisation). Il est organisé en paires de pôles (pôle Nord et pôle Sud), en référence à un aimant. Chaque paire est constituée de deux bobines opposées et alimentées par la même phase. Lorsqu'elles sont alimentées, l'une des bobines sera donc un pôle Nord tandis que la bobine opposée sera alors un pôle Sud et vice versa lorsque le sens du courant s'inverse. Les trois phases, décalées de 120 degrés l'une par rapport à l'autre, permettent de générer un champ magnétique tournant.

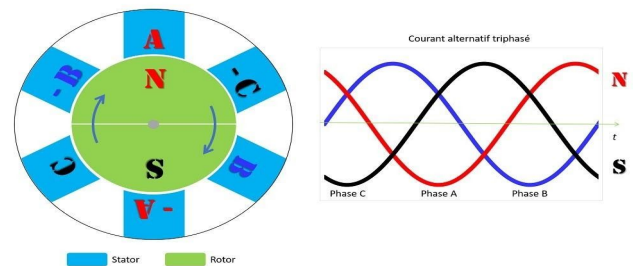


Figure 2: [fonctionnement du stator d'un moteur électrique \[13\]](#)

La vitesse de rotation du moteur dépend de la fréquence du courant alternatif alimentant le stator. Le couple moteur quand à lui dépend de l'intensité du champ magnétique (et logiquement de l'intensité du courant dans les bobines). Si on veut augmenter le rendement moteur, il est possible de rajouter des pôles au stator il est également possible de répartir les masses au sein du moteur de façon à réduire les vibrations du moteur.

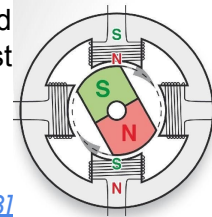
De ce fait, le rendement d'un moteur électrique est généralement supérieur à 90% jusqu'à avoisiner les 100% si les conditions sont optimales. En comparaison le moteur thermique n'a qu'un rendement maximal de 40% ( voir annexe 2 motorisation ).

On distingue trois catégories de moteurs électriques dans le secteur automobile : les moteurs à aimants permanents, les moteurs à induction et les moteurs à rotor bobiné [13].

### Moteur à aimants permanents :

Les moteurs à aimants permanents sont les moteurs les plus répandus dans l'industrie de l'automobile électrique. Les moteurs à aimants permanents sont de type NdFeB (alliage de néodyme, de fer et de bore). Ces aimants sont composés de deux autres terres rares en plus de la néodyme: le dysprosium et le praséodyme. Les terres rares sont des matières minérales aux propriétés exceptionnelles utilisées dans la fabrication de produits de haute technologie. Ainsi, au total un moteur contient une moyenne de 2 kg de terres rares. Les aimants se situent dans le rotor.

Ces derniers réagissent avec le champ magnétique tournant du stator. Le fonctionnement est le suivant: 2 pôles de même polarisation (ex: Sud Sud ou Nord Nord) se repoussent et 2 pôles opposés (Nord Sud) s'attirent. C'est ce principe qui va permettre la mise en mouvement du rotor.

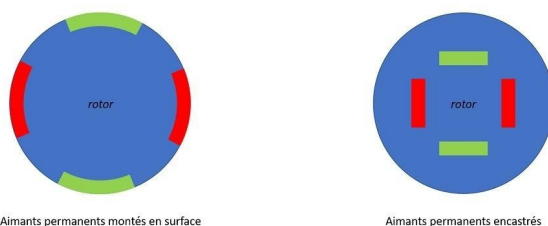


*Figure 3: fonctionnement du champ magnétique du stator [13]*

Il existe deux types d'avantages à ce type de moteur. En effet, il se caractérise par son fonctionnement simple et sa conception peu compliquée mais son rendement est **très bon** (ratio de l'énergie réellement utilisée par rapport à l'énergie fournie par la batterie). Cependant, il y a un inconvénient considérable : sa conception nécessite des matériaux spécifiques, les **terres rares** (néodyme, dysprosium et praséodyme).

En effet, le néodyme permet l'augmentation de la puissance de l'aimant, le dysprosium et le praséodyme quand à eux interviennent dans l'amélioration des propriétés magnétiques du rotor à haute température mais aussi le développement d'une résistance à la corrosion. Néanmoins la quasi-totalité des terres rares proviennent de Chine et on ne peut pas exclure que le pays freine les exportations de ces matériaux afin de favoriser le marché national. De plus, les méthodes d'extraction et de traitement des terres rares sont nocives pour l'environnement ce qui ajoute une dimension écologique au problème des terres rares.

En réaction, Nissan Leaf a réduit de 40% les besoins de ses moteurs en dysprosium en 2013 et cela grâce à l'optimisation de la structure de l'alliage entre l'aimant NdFeB et le dysprosium. En d'autres termes, le dysprosium est principalement disposé à la bordure de l'aimant au lieu d'être réparti à l'intérieur de la structure de l'aimant (image suivante). [13]



*Figure 4: différents types d'aimants permanents [13]*

Dans le cas de la **Chevrolet Volt** il y'a eu une réduction de plus de 80% de la masse de dysprosium entre la première (2011) et la seconde génération (2015). BMW a aussi réduit de 50% la masse totale de terres rares contenues dans son moteur en choisissant d'encastrer les aimants permanents dans le rotor au lieu de les monter en surface.

Enfin, Chevrolet Volt fait l'exploit de se passer des terres rares au profit d'un aimant permanent en ferrite dans le moteur auxiliaire de sa seconde génération. Les propriétés magnétiques du ferrite sont plus faibles que les aimants NdFeB, mais c'est malgré tout suffisant dans le cas de la Volt: le moteur secondaire ne sert qu'à générer du courant lorsque le moteur thermique est à marche ou apporter un support au moteur électrique principal.

## Moteur à induction :

A l'heure actuelle, seules les Tesla Model S et X utilisent ce type de moteur (la Tesla Model 3 ayant recours à des aimants permanents). Les moteurs à induction sont des moteurs asynchrones reposant sur un rotor à cage. Le rotor à cage est composé de plusieurs barres conductrices de courant (faites en cuivre dans le cas de Tesla) reliées chacune à leurs extrémités par des anneaux conducteurs.

Un courant dans le rotor à cage est induit par le champ magnétique tournant généré par le courant alternatif triphasé. Une force motrice entraînant la rotation du rotor est par la suite créée. La vitesse de rotation du rotor est légèrement inférieure à la fréquence de rotation du champ magnétique (asynchronisme), cette différence de vitesse est responsable de l'apparition du couple moteur.



*Figure 5 :fonctionnement d'un moteur à induction [13]*

La conception du moteur à induction est simple et de ce fait ce dernier est plus robuste. Grâce à l'absence de terres rares, son coût est relativement maîtrisé. Par contre, le rendement de ce moteur est plus faible que celui du moteur à aimants permanents. **(voir annexe 3 motorisation )**

Tesla a pu compenser ce défaut d'une part en ayant un moteur de taille importante et d'autre part en possédant un système de refroidissement spécifique du moteur. Dans son système, le liquide de refroidissement se déplace au centre du rotor (normalement, seul le stator est refroidi) selon un système breveté par le constructeur, de ce fait il est possible de garder un contrôle sur la température. [13]

## Moteur à rotor bobiné :

De même que pour les moteurs à induction, les moteurs à rotor bobinés ne contiennent pas de terres rares. Ici, le rotor est composé de plusieurs bobines (à l'image du stator). Le bobinage requiert environ 500 mètres de fil de cuivre. Le moteur à rotor bobiné fonctionne de la manière suivante : un courant continu alimente les bobines du rotor ce qui crée une polarisation qui va par la suite entraîner le fonctionnement du moteur, à l'image du fonctionnement des moteurs à aimants permanents. L'alimentation du rotor se fait à l'aide de balais (autrement appelés charbons).

Malgré le fait que ce type de moteur n'utilise pas de terre rares, il n'en reste pas moins vrai que les moteurs à rotor bobinés sont généralement plus lourds et plus encombrants que les autres types de moteurs.

De plus le moteur électrique est composé de deux autres organes, l'électronique de puissance et le réducteur, eux aussi essentiels à son fonctionnement.

## Électronique de puissance:

L'électronique de puissance permet de transformer le courant continu à haute tension de la batterie en courant alternatif nécessaire à l'alimentation à l'aide d'un onduleur.



Il fait varier la fréquence du courant alternatif ainsi que sa tension afin de régler la vitesse de rotation du moteur et le couple qu'il va délivrer en fonction des différents paramètres mis à disposition (niveau de charge de la batterie, position de la pédale d'accélérateur, position de la pédale de frein, température du moteur,...).

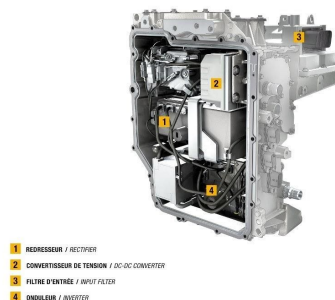


Figure 6: Différentes parties de l'électronique de puissance [13]

Lorsque le conducteur relève le pied de la pédale d'accélérateur, l'onduleur se change en redresseur de courant: il transforme le courant alternatif qui vient du moteur en courant continu afin de recharger les batteries. Ensuite, quand le conducteur appuie sur la pédale de frein, un calculateur va adapter le niveau de freinage régénératif ou actionner les freins hydrauliques traditionnels si nécessaire.

Enfin, plusieurs composants électriques requièrent une alimentation en basse tension (12V) comme les systèmes multimédias et l'éclairage. C'est pour cela que l'électronique de puissance nécessite un hacheur (convertisseur) de tension pour alimenter la batterie basse tension. L'onduleur / redresseur et le hacheur sont composés d'interrupteurs électroniques sous la forme de semi-conducteurs. Ils vont permettre la transformation d'une source de courant avec un rendement très élevé (avoisinant les 100%) et cela en fonction de leur état (ouverts ou fermés).[13]

### Réducteur:

Comme le couple est disponible dès les plus bas régimes moteur et sur une large plage de régimes de rotation du moteur électrique, les véhicules électriques n'ont généralement pas besoin de boîte de vitesses. **(voir annexe 4 motorisation )**

Par conséquent on utilise un réducteur avec les moteurs électriques.

## 1.2. Motorisation hybride

La motorisation hybride est un type de motorisation qui repose sur le fonctionnement complémentaire de deux types de moteurs. A l'heure actuelle, la majorité des motorisations dites hybrides sont constituées d'un moteur thermique et d'un moteur électrique. Pour ce qui est du moteur thermique, dans la plupart des cas il s'agit d'un moteur fonctionnant à l'essence. La motorisation dite hybride regroupe en réalité plusieurs modes de fonctionnement et donc d'applications. Les deux moteurs peuvent fonctionner en même temps ou alors par alternance. Les modes de rechargement du moteur électrique peuvent aussi différer. On peut donc, au vu des différences techniques, classer les motorisations hybrides en plusieurs catégories. C'est la puissance du moteur électrique qui est généralement prise en compte pour classer les différentes motorisations. Il en ressort quatre types d'hybridation : le micro-hybrid, le mild-hybrid, le full-hybrid et l'hybride rechargeable. [6]

Micro-hybrid:

Les motorisations hybrides qualifiées de micro-hybride sont les véhicules de plus faible niveau d'hybridation. Celle-ci est plus connue sous le nom de système « stop and start ». Ce système permet de couper et redémarrer le moteur dès que l'on immobilise le véhicule, comme à un feu rouge par exemple. Sur des véhicules avec une motorisation majoritairement thermique, l'alternateur et le démarreur (éléments d'une voiture classique) sont remplacés par un alerno-démarreur ou par juste un démarreur renforcé. Ce dernier requiert une batterie plus puissante. Classer ce système comme un type de moteur hybride à part entière est un peu exagéré. En effet, il ne sert pas à déplacer le véhicule, mais initie juste le mouvement pour ensuite passer le relais à un moteur thermique. Cependant, le système permet une optimisation du fonctionnement du groupe propulseur et de réaliser des économies d'énergies. Ce système se retrouve sur un bon nombre de véhicules aujourd'hui, notamment sur les voitures citadines.

#### Mild-hybrid:

Nous allons maintenant nous intéresser au niveau d'hybridation appelé « mild-hybrid ». Pour ce niveau d'hybridation le moteur thermique tourne en continu. Le moteur électrique ne fonctionne qu'à certains moments clés, intéressants d'un point de vue pollution ou consommation car ils réduisent ponctuellement l'apport du moteur thermique à la propulsion du véhicule. Pour ce type d'hybridation le freinage est régénératif. Ainsi l'énergie dégagée par le freinage est stockée dans des batteries. Cela est dû au couple résistant créé par le moteur électrique. L'énergie récupérée grâce à ce processus permet de fournir un appoint de puissance au moment des démarrages et des reprises. Dans le cadre d'une hybridation type « mild-hybrid », la puissance électrique est comprise entre 8 kW et 15 kW.

#### Full-hybrid:

Ensuite, nous allons parler du système présentant le plus haut niveau d'hybridation : le « full-hybrid ». Pour ce système le véhicule présente deux moteurs, l'un thermique et un second électrique. Pour ce type d'hybridation, les deux moteurs peuvent fonctionner conjointement ou séparément. On parle alors de fonctionnement en parallèle ou en série. Le pourcentage d'utilisation du moteur électrique dépend de la capacité de la batterie. La recharge de cette dernière a lieu lorsque la voiture roule grâce à l'énergie fournie par le moteur thermique. Elle s'effectue aussi, comme pour les autres types d'hybridation, lors des freinages en récupérant l'énergie cinétique. Pour ce système la puissance électrique doit être supérieure à 20 kW.

#### Plug-in hybrid / hybride rechargeable:

Enfin le dernier type de motorisation hybride est l'hybride rechargeable, plug-in hybrid. Pour cette motorisation, la recharge des batteries nécessaires au moteur électrique du véhicule s'effectue en branchant le véhicule sur le réseau électrique. Le moteur thermique n'intervient pas pour la recharge des batteries, il prend simplement le relais lorsque les batteries sont déchargées. Ce système permet de rouler en tout-électrique. L'autonomie actuelle est d'environ 60 kilomètres.

Type de fonctionnement du moteur hybride: Pour les motorisations hybrides dites « mild-hybrid », « full hybrid » et « plug-in hybrid », le fonctionnement des deux moteurs peut se faire de deux manières différentes : en série ou en parallèle.

Fonctionnement en série: [7] Lorsque le fonctionnement du véhicule est en série, on peut assimiler le système à une voiture électrique avec un groupe électrogène. En effet, le moteur thermique sert à alimenter un générateur électrique. Pour ce système, les batteries servent à récupérer l'énergie lors des freinages.

Fonctionnement en parallèle: Passons maintenant au fonctionnement en parallèle. C'est le système d'hybridation le plus utilisé et le plus connu pour les véhicules à motorisation hybride. Les deux moteurs fonctionnent en même temps. Pour les synchroniser d'un point de vue mécanique, on utilise un train épicycloïdal. De plus avec ce type de système pour l'hybridation, le véhicule peut fonctionner en électrique exclusivement même si généralement l'autonomie est assez limitée, car dépendante des choix relatifs à la capacité de la batterie.



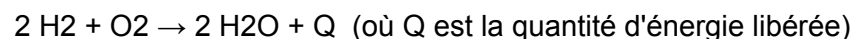
*Figure 7: train épicycloïdal*

Ainsi la motorisation hybride permet de concilier grande autonomie et réduction des émissions nocives pour l'environnement. Ce type de motorisation s'inscrit dans l'évolution des motorisations automobiles. Dans le cadre des voitures autonomes actuellement en développement, ce type de motorisation est parfois choisi car il présente des avantages et peu de contraintes.

### **1.2.1. Un exemple de moteur hybride: le moteur à hydrogène**

#### La motorisation Hydrogène :

Le moteur à hydrogène utilise le principe de la combustion du dihydrogène et du dioxygène pour laisser comme produits de l'eau et de l'énergie. Cependant il existe deux façons bien distinctes d'utiliser ce gaz carburant : d'une part le dihydrogène peut être exploité directement dans *un moteur thermique adapté*. D'autre part, il peut servir à *la génération d'électricité via une pile à combustible alimentée en hydrogène et en oxygène*. [3] Dans les deux cas, la réaction chimique est la suivante :



#### Le moteur hydrogène à combustion interne:

Le moteur à hydrogène à combustion interne convertit l'énergie chimique de la réaction explosive entre le dihydrogène et le dioxygène en énergie mécanique. Il permet que

seulement de l'eau soit rejetée. Au niveau du fonctionnement, on retrouve celui de notre moteur classique à 4 temps mais utilisant du dihydrogène comme carburant. Nous vous proposons donc un bref rappel des phases de ce cycle :

**L'admission** : Le piston descend, une soupape d'admission s'ouvre ce qui permet de faire entrer dans le cylindre le mélange air- carburant.

**La compression** : Le piston remonte et comprime donc le mélange gazeux.

**L'inflammation/détente** : La bougie d'allumage produit une étincelle, le mélange gazeux explose et pousse le piston vers le bas.

**L'échappement** : le piston remonte vers la tête du cylindre, la soupape d'échappement s'ouvre et expulse les gaz brûlés.

Néanmoins, quelques modifications sont apportées pour tenir compte des spécificités de l'hydrogène. En effet la faible densité du mélange hydrogène-air nécessite des conduits d'admission et des soupapes de grand diamètre. De la même façon, pour éviter des problèmes de pression dans la course sinusoïdale du piston, le moteur de Wankel est une alternative (c'est un moteur à piston rotatif ). De plus, on constate un renfort pour les soupapes en raison de la chaleur dégagée par la combustion. Pour cette raison les pistons sont munis de canaux de refroidissement internes arrosés par des jets d'huile froide venus de gicleurs disposés au bas des chemises. Aussi, en mode hydrogène, le calculateur calcule à nouveau le débit de carburant afin d'assurer un mélange stœchiométrique pour un bon fonctionnement du moteur. [4]

### Moteur à hydrogène électrique avec pile à combustible

Dans ce cas le moteur à hydrogène est un assemblage d'un moteur électrique et d'une pile à combustible . Ayant déjà abordé le fonctionnement du moteur électrique précédemment, nous expliquerons ici uniquement le fonctionnement de la pile à combustible.

#### **Le fonctionnement de la pile à combustible:**

Une pile à combustible est constituée comme une pile classique, de 2 électrodes : d'un côté l'anode et de l'autre la cathode. L'anode reçoit du dihydrogène et grâce à une réaction chimique ces molécules sont décomposées en deux : d'un côté les électrons, de l'autre les noyaux (aussi appelés ici des ions H<sup>+</sup>). En effet, les noyaux sont des atomes auxquels ils manquent un électron. Seuls ces ions H<sup>+</sup> franchissent la membrane, pas les électrons. Parallèlement la cathode elle, reçoit du dioxygène. A ce stade on se retrouve donc dans une configuration de pile classique : d'un côté une surcharge d'électrons, de l'autre un déficit. De ce fait, en plaçant un conducteur entre les 2 électrodes, les électrons passent de l'une à l'autre. Enfin, ces électrons qui circulent constituent le courant électrique. C'est celui-ci qui va faire fonctionner le moteur de la voiture.

De plus, on remarque qu'après avoir rejoint l'électrode les électrons se combinent avec les ions H<sup>+</sup> qui redeviennent des atomes d'Hydrogène, lesquelles vont se combiner

avec des atomes d'oxygène. A raison de 2 atomes d'Hydrogène pour 1 atome d'Oxygène on forme une molécule d'eau, autrement dit c'est bien de l'eau que rejette ce moteur.

(Notez que la pile à combustible fonctionne aussi au méthanol, mais ce type de générateur rejette du dioxyde de carbone, voire du monoxyde de carbone.) [5]

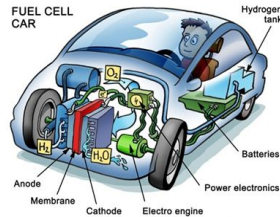


Figure 8 : dessin d'une voiture équipée d'un moteur à hydrogène

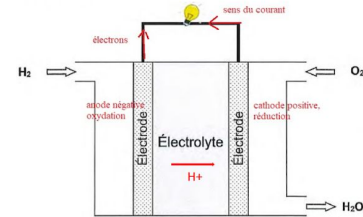


Figure 9 : schéma du fonctionnement d'une pile à combustible

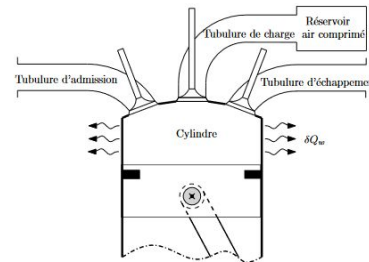
### 1.2.2 Un autre exemple de moteur hybride : le moteur thermique pneumatique

Nous allons ici étudier un moteur d'un nouveau genre : le moteur hybride pneumatique. Comme son nom l'indique, ce type de moteur est hybride c'est à dire qu'il combine de deux types de moteurs : un moteur thermique comme ceux qui sont actuellement équipent les voitures à essence et un second moteur qui va utiliser une source d'énergie différente, pneumatique dans notre cas. Ce type de moteur de nos jours est largement étudié car il représente une alternative aux moteurs thermiques actuels. En effet, ce type de moteur permet une réduction des consommations d'énergies fossiles comme le pétrole et des libérations de CO<sub>2</sub> dans l'air.

L'avantage du couplage des ces deux moteurs est d'une part un gain de consommation et d'autre part la possibilité d'avoir un downsizing important. Le gain de consommation est due au fait que l'on dépense moins de carburant fossile grâce aux couplages des deux moteurs. Maintenant, concentrons-nous sur l'effet du downsizing. Ce principe se base sur une réduction de la cylindrée du moteur tout en maintenant sa performance en terme de puissance et de couple. Cela est réalisé grâce une forte augmentation de la pression qui elle entraîne une amélioration du ratio puissance/litre. Ainsi le rendement sera meilleur pour ce type de moteur, la quantité de carburant sera réduite et les émissions toxiques seront elles aussi diminuées. De plus, le second moteur ici pneumatique peut être inversée en générateur et donc utiliser une partie de l'énergie cinétique pour recharger le moteur. On dit de ce type de moteur qu'il est inversable. Cette réutilisation de l'énergie permet aussi la limitation des émissions de CO<sub>2</sub> car elles ne nécessitent aucun procédé de combustion supplémentaire pour être fabriquée [1].

Le moteur hybride pneumatique est un concept récent, proposé pour la première fois en 1999. Ce type de moteur est composé d'un moteur à combustion interne conventionnel et

d'une soupape additionnelle appelé soupape de charge. Cette dernière permet d'assurer le mouvement d'un fluide ici de l'air comprimé. Cette soupape additionnelle est caractéristique d'un moteur pneumatique. Ainsi on observe alors comme indiqué sur la figure, un couplage entre le moteur à combustion interne et le moteur pneumatique. En effet cette nouvelle partie du moteur permet de relier le réservoir d'air comprimé au cylindre, élément central du moteur où se déplace le piston, grâce à la tubulure de charge qui assure la connexion entre ses deux organes. En effet, une tubulure est un corps creux d'un moteur à explosion qui amène un mélange gazeux vers le cylindre.



*Figure 10: schéma d'un moteur hybride pneumatique [2]*

Maintenant étudions plus précisément le fonctionnement de ce type de moteur. Le cycle moteur en 4 temps va être privilégié par les constructeurs car il est plus avantageux que le cycle en 2 temps. En effet, il a une meilleure rentabilité : sa faisabilité est meilleure et sa fabrication moins coûteuse. Un cycle moteur classique à 4 temps se déroule suivant la succession des 4 phases suivantes: une phase d'admission puis une phase de compression suivi d'une phase d'explosion et de détente pour finir par une phase d'échappement comme rappelée dans la partie moteur à hydrogène.

Pour le moteur thermique pneumatique 3 modes opératoires principaux sont possibles et ces concepts différents mettent en avant les avantages clés du moteur thermique pneumatique. Dans un premier temps, regardons les variations de ce cycle quand le moteur fonctionne en mode pompe pneumatique. Avant la troisième phase, la soupape supplémentaire de charge va s'ouvrir. Ainsi la pression va être identique dans le cylindre et dans le réservoir. Les gaz vont donc occuper plus d'espace et la pression quand le piston sera au plus point le plus haut sera plus faible. La diminution de  $P_{max}$  aura un avantage considérable : en effet, cette pression sera plus proche d'échappement et donc on aura moins de dépense énergétique pour revenir à la pression d'équilibre. Lors de l'explosion l'énergie libérée sera aussi transférée au réservoir qui pourra la stocker et ainsi fonctionner en mode générateur. L'étape 4 aura quant à elle lieu de façon conventionnelle [1].

Le mode moteur thermique pneumatique possède également plusieurs avantages. Le cycle commence par une admission conventionnelle. A la phase 3, on ouvre alors la soupape de charge quand la pression du cylindre est identique à celle dans le réservoir. En effet le réservoir d'air comprimé est bien rempli d'air qui est à une certaine pression  $P$ . Pendant le reste de la course de compression, on refoule de l'air dans le réservoir. La soupape de charge est maintenue ouverte au début de la détente. L'ouverture de cette soupape va entraîner une fuite des gaz du réservoir vers le cylindre. La pression globale va donc rester constante grâce au processus explicité précédemment. On ferme la soupape de charge. Maintenant que cette soupape est fermée, on observe une diminution de la pression. Cette détente se poursuit jusqu'à que le piston soit retourné à son point le plus bas. A cause de la masse d'air additionnelle présente dans le cylindre transférée du réservoir, la pression

à la fin de la détente est donc supérieure à la pression initiale. La soupape d'échappement s'ouvre et la pression du cylindre chute instantanément pour rejoindre la pression d'échappement (pression identique à la pression initiale).[1]

Un dernier mode est possible : c'est le mode suralimentation pneumatique. Ce dernier consiste en un cycle très proche du 4 temps traditionnel. En effet les phases 1 et 2 sont les mêmes. La soupape de charge s'ouvre avant l'étape 3 et l'air contenu dans le réservoir va aller dans le cylindre. Quand on a la quantité d'air souhaitée dans le cylindre, on ferme la soupape. Ensuite le mécanisme se poursuit jusqu'à la fin de façon conventionnelle.

Ces trois modes sont complémentaires et sont utilisés dans différents cas. Le mode pompe pneumatique a pour premier intérêt de transformer l'énergie mécanique en une énergie pneumatique réutilisable. Ce mode est actif lors du freinage où l'énergie cinétique est récupérée. En effet, une partie de l'énergie produite, normalement perdue, sera utilisée pour recharger les réservoirs d'air comprimé.

De son côté le mode moteur pneumatique permet de réutiliser l'énergie stockée dans les réservoirs quand le moteur est en mode pompe pneumatique pour la transformer en énergie mécanique. Ainsi, le mode de combustion traditionnel sera substitué par le mode pneumatique. Comme ce mode utilise l'énergie stockée, la production d'un couple moteur pourra se réaliser même si le moteur n'a pas de vitesse de rotation. Ainsi en cas d'arrêt du véhicule, le mode combustion est arrêté. Le redémarrage du moteur se fait alors avec usage du mode moteur pneumatique.

Le mode suralimentation quant à lui comme intérêt d'autoriser un downsizing important. En effet, le cylindre du moteur pourra être réduit car contrairement au mode combustion classique, ce mode n'a pas besoin d'une grande cylindrée pour avoir un rendement important. Ici, la masse d'air apporté par le réservoir va permettre d'apporter la quantité d'air nécessaire pour la production du couple moteur désiré.

Pour conclure, on a donc vu que le moteur hybride thermique pneumatique constitue une alternative aux moteurs à combustion classique car il propose des solutions pour diminuer la consommation d'essence et le rejet de gaz dans l'atmosphère. Cependant ce type de motorisations est toujours au stade d'étude et n'est pas encore installé sur des voitures mises sur le marché .

## 2. Comparaisons thermiques et écologiques

### A) Performances

*Se référer au tableau fourni en **annexe 5** [12]*

Pour ce tableau, nous avons pris des voitures « citadines » (lorsque ce type de modèle existe), pour effectuer les trajets de tous les jours. Le prix annoncé est le prix pour une voiture neuve. L'autonomie est calculée pour des déplacements dits NEDC (nouveau cycle européen de conduite). Le temps de recharge est calculé sur une prise 11kWh. Nous avons établi ce tableau afin de se rendre compte des différences de performance, mais aussi

de coût, concernant les différents types de motorisations que nous avons développés dans ce rapport.

Analysons les différents coûts de chaque véhicule. Il est évident que le moins cher à l'achat reste la voiture « classique » à essence. En effet, c'est la plus facile à fabriquer, et ne possédant pas de batteries utilisant des terres rares, elle sera donc moins chère. Néanmoins, il faut prendre en considération le coût du carburant, qui ne cesse de croître. Pour les voitures hybrides, il faut prendre en compte la consommation du carburant qui est moindre, du à l'aide de la batterie. Si l'on veut passer au tout l'électrique, il faut y mettre le coût. En effet, on voit sur ce tableau que les prix du neuf ne descendent pas en dessous des 30 000 euros, et ceci pour les moteurs à aimants permanents et à rotor bobiné, la Tesla restant un modèle à part: c'est la seule voiture sur le marché possédant un moteur à induction. Les voitures hybrides restent un peu plus accessibles, avec des coûts descendant aux alentours de 15 000 euros. Cette différence de prix est due en grande partie à la taille de la batterie qui est relativement petite sur une voiture hybride, celle-ci servant à donner un « coup de pouce » au moteur diesel. En effet, leur autonomie en électrique pur n'est que de quelques kilomètres. On remarque que plus la taille de la batterie augmente, plus les prix montent (par exemple le prix double entre une micro-hybride et une hybride rechargeable).

Enfin, même si les voitures à hydrogène restent encore très peu commercialisées, certains modèles ont vu le jour sur le marché. Celles-ci restent très peu rentables pour le consommateur car elles sont très chères à l'achat (ici 72 000 euros), en sachant qu'il faut aussi compter le prix de l'hydrogène, qui n'est pas donné. En plus, les bornes de recharge en libre service sont quasiment inexistantes. Les nouveaux moyens de motorisations sont donc plutôt destinés à un public aisé, voir très aisé pour les modèles les plus performants.

Comparons ensuite leurs performances. On voit que les voitures classiques, mais aussi hybrides restent de loin celles qui procurent la meilleure autonomie, elle avoisine le double d'une voiture électrique ou hydrogène. Cela est dû au carburant utilisé. Vient ensuite les voitures électriques dont la meilleure autonomie est détenue par le moteur à induction. Cette technologie, maîtrisée pour l'instant uniquement par Tesla, permet d'améliorer l'autonomie grâce à la combinaison d'un moteur permanent et d'un moteur à induction. On peut noter au vu de ses résultats que les véhicules électriques sont plus adaptés à des trajets courts, en ville ou les bornes de recharge sont de plus en plus présentes. Enfin, notons que la voiture à hydrogène possède une autonomie plus que correcte, et on peut s'imaginer qu'elle s'améliorera avec les innovations à venir.

Enfin, on voit que chaque modèle de voiture est assez inégal au niveau du temps de recharge. Si les voitures possédant un moteur thermique ou hydrogène se rechargent à une station en quelques minutes, il faudra un temps bien plus conséquent pour recharger une batterie. Il ne faut donc pas oublier de recharger son véhicule pour ne pas se retrouver coincés !

Finalement, on peut conclure en remarquant que les voitures hybrides sont les plus accessibles si l'on veut changer de la voiture classique. En effet, elles proposent pour un prix relativement proche d'une voiture classique, une très bonne autonomie pour une



consommation moindre. Si l'on veut arrêter complètement l'essence, il faudra investir dans un modèle plus cher, et avec une autonomie réduite. Les voitures thermiques pneumatiques et à hydrogène n'étant pas encore suffisamment développées pour avoir une importante commercialisation des modèles, on peut imaginer que dans le futur, elles surpasseront les voitures avec des moteurs électriques.

## B) Contributions écologiques:

La voiture électrique ou hybride fait de plus en plus parler d'elle. En effet, les constructeurs vendent ces voitures comme des voitures non polluantes pour les modèles tout électriques, donc ne rejetant pas directement de particules polluantes dans l'atmosphère. Nous avons souhaité nous pencher plus sur le sujet afin de savoir si l'électrique était vraiment une alternative « verte » à la voiture classique. En effet, les nouvelles motorisations sont conçues généralement dans le but d'être moins polluantes, car la protection de notre planète est un des enjeux de notre génération. Alors, le sont-ils vraiment?

Premièrement, comme c'est le cas dans l'utilisation des voitures équipées de nouvelles motorisations, elles rejettent moins de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère lors de l'utilisation. La question se pose plus sur la fabrication de l'électricité servant à faire rouler la voiture, mais aussi sur la fabrication de la batterie.

Si l'électricité est fabriquée à partir d'énergies renouvelables, telles que l'éolienne ou encore l'énergie solaire, l'électricité utilisée peut être considérée comme « verte ». Vient après la production par centrale nucléaire, la plus répandue en France, mais responsable de la production de déchets nucléaires dangereux. Enfin, au niveau mondial, l'électricité est aussi fabriquée à l'aide de la combustion du charbon. Cette méthode est polluante et émet des gaz à effet de serre. Donc si la voiture ne pollue pas en consommant son électricité, la fabrication de son énergie pollue. Enfin, le principal problème de la voiture électrique reste sa batterie. Son procédé de fabrication nécessite des métaux rares (lithium...) extraits dans des pays qui ne prennent pas trop en considération leur impact écologique. Enfin, le recyclage des batteries reste un point à améliorer, car les métaux qu'elles contiennent sont polluants[10]. Voir en **annexe 5** un comparatif entre les deux modèles.

Le deuxième type de motorisation qui n'en est qu'à ses débuts, mais commence à apparaître sur le marché, est la voiture à hydrogène. La voiture à hydrogène semble être la voiture écologique du futur. Mais est-elle vraiment si écologique ? Peut-elle rivaliser avec l'électrique ?

L'hydrogène (H) est l'élément le plus abondant de l'univers et, sur terre, sa source principale est l'eau, constituée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène (H<sub>2</sub>O). L'hydrogène est souvent comparé à une "nouvelle source d'énergie", néanmoins cela n'est pas tout à fait vrai. L'hydrogène est ce qu'on appelle un vecteur d'énergie, il sert à la transporter d'une source primaire aux usagers. Aux premiers abords, c'est un vecteur d'énergie "propre", car contrairement aux énergies fossiles, comme le gasoil ou l'essence, le seul gaz qu'il rejette dans l'atmosphère est de l'eau. Mais si au niveau de l'utilisation cette énergie est propre, ce n'est peut être pas le cas dans son processus de fabrication. [8]

Pour déterminer si l'usage de l'hydrogène est propre (sans polluants ni gaz à effet de serre), il faut prendre en compte son cycle de sa production à son utilisation. L'hydrogène est

rarement présent sous sa forme pure. Pour l'obtenir, il faut le séparer des autres éléments auxquels il est rattaché (H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>...), et pour le séparer, il faut beaucoup d'énergie. Voici certains procédés de séparation de l'hydrogène :

- Le reformage : Plus couramment utilisé, c'est la conversion de molécules à l'aide de réactions chimiques du gaz naturel par de la vapeur d'eau surchauffée. On parle alors de vaporeformage. Les atomes de carbone du méthane sont séparés. En fin de réaction, on obtient d'un côté du dihydrogène et de l'autre du dioxyde de carbone. On fabrique donc notre vecteur d'énergie, mais aussi un gaz polluant.

- Électrolyse de l'eau: On décompose à l'aide d'un courant électrique l'eau en dioxygène et en dihydrogène. Au niveau écologique cette méthode de fabrication semble plus propre, mais au niveau économique elle est beaucoup moins rentable. Son coût de fabrication est 4 fois plus cher qu'à partir de gaz fossile, c'est pourquoi cette technique de fabrication ne représente que 1% de la fabrication totale d'hydrogène. Avec des procédés d'électrolyse industrielle, il faut aujourd'hui 1 l d'eau et 5 kWh d'électricité pour fabriquer 1 000 L d'hydrogène sous forme de gaz à la pression atmosphérique. Il faut comprimer ce gaz à 700 bars pour une utilisation automobile, puis convertir cet hydrogène en électricité grâce à la pile à combustible. Au final, il ne reste plus que 1,53 kWh sur les 5 kWh d'électricité initiale. Pour que cette fabrication soit totalement verte, il faudrait utiliser de l'électricité issue de sources renouvelables. Concernant le stockage, l'hydrogène est un gaz très peu dense, il doit être comprimé ou liquéfié, ce qui nécessite encore de l'énergie. [11]

En conclusion, même si en façade l'hydrogène semble une solution alternative « propre » aux énergies fossiles, son procédé de fabrication n'est pas des plus écologique, et coûte une certaine dose d'énergie. Penchons nous sur son mode de fabrication.

Premièrement, si l'on veut lancer la production de voitures à hydrogène dans le monde, il faudra en fabriquer énormément, le processus de fabrication d'une voiture étant polluant, cela participera à l'augmentation de la pollution mondiale. Ensuite, la synthèse de l'hydrogène est un processus coûteux en énergie. Comme dit précédemment, l'hydrogène n'existe pas naturellement dans la nature, il faut le synthétiser. Il faut savoir que la production de 1kg d'hydrogène correspond à l'émission de 10kg de CO<sub>2</sub>. Alors, si l'on ne pollue pas en roulant, on utilise un gaz qui a pollué de par sa fabrication. Il existerait une manière de fabriquer de l'hydrogène « vert », en d'autres mots, moins polluantes que la production de l'hydrogène à partir d'énergies fossiles. Cependant cet hydrogène « propre » produit par électrolyse coûte cher en énergie. Néanmoins, il faut noter que l'électrolyse a toutefois fait de gros progrès ces dernières années. En France le CEA-Liten (Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux) a mis au point un système à haute température (700 °C) dont le rendement est supérieur à 90 %. Donc si l'hydrogène n'est pas pour l'instant une énergie « verte », les progrès technologiques nous montrent que nous pourrions arriver prochainement à un hydrogène quasi vert et commercialisable. [9]

On peut donc conclure que les moteurs qui équipent les véhicules autonomes sont ceux étudiés précédemment car comme ces véhicules correspondent à l'avenir sur le marché automobile ils doivent utiliser les technologies les plus innovantes et ainsi ces nouveaux types de motorisations. Par exemple, sur le campus de Madrillet à St-etienne du Rouvray, les véhicules autonomes sont des renault Zoé équipés de moteur électrique.

## **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Pour conclure, ce projet de physique a été très enrichissant pour nous en s'écrivant dans la lignée de notre cursus à l'INSA. Ce dernier nous a permis d'agrandir nos connaissances concernant la motorisation et son application dans les voitures du futur comme les voitures autonomes. En effet, l'automobile est un secteur au centre des questions environnementales actuelles car les moteurs essence et diesel installés dans la majorité des véhicules entraînent de la pollution. Ainsi dans notre rapport nous avons exposé des alternatives à ces modèles, des nouvelles motorisations plus propre en terme écologique.

En premier nous avons étudié les moteurs électriques qui ont un meilleur rendement que les moteurs thermique. En effet, leur rendement est généralement entre 90% et 98%. Après nous avons travaillé sur les moteurs hybrides qui constituent un large domaine d'étude grâce aux multitudes performances qu'ils proposent. Dans notre étude nous nous sommes ainsi concentrés sur deux exemples de moteur hybride: le moteur à hydrogène et le moteur hybride pneumatique. Le moteur à hydrogène a une efficacité extraordinaire mais malheureusement la technologie et les infrastructures qui facilite son usage sont toujours beaucoup moins avancé que celle pour les moteurs électriques et sont souvent très polluantes. Les moteurs hybrides pneumatique sont eux jusqu'à lors qu'au stade d'étude mais peuvent être considérés comme une alternative intéressante aux moteurs actuels. Enfin, tout ces modèles se heurtent à des problématiques liées à la performance et à l'autonomie qui doivent être réglé pour que ces modèles équipent les futures voitures autonomes.

Pour ce travail, nous voudrions remercier toute notre équipe, et notre enseignant Monsieur Benshair. Ce projet nous a bien appris le travail du groupe et comment s'organiser et penser ensemble pour la résolution d'une problème. Encore, le fait d'avoir travaillé à plusieurs nous a permis de se confronter aux problèmes de la réalisation d'un projet complet à 6 avec comme principal enjeu de réaliser un travail cohérent en liant tous nos travaux. Aussi comme la rédaction de notre rapport ayant été faite à distance nous avons dû adapter notre travail et apprendre à gérer un projet alors que nous nous pouvions pas échanger directement. Pour finir, ce travail nous a apporté diverses connaissances sur les motorisations automobiles et nous as donné l'opportunité d'élargir nos compétences notamment dans la gestion d'un projet commun.

## **BIBLIOGRAPHIE**

### Partie moteur thermique pneumatique:

[1] lien internet: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00831692/document> (valide à la date du 06/04/2020)

[2] lien internet: Crédit image "schéma d'un moteur hybride pneumatique" :  
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00831692/document>

### Partie moteur à hydrogène:

[3] lien internet: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_%C3%A0\\_hydrog%C3%A8ne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_hydrog%C3%A8ne) (valide à la date du 22/04/2020)

[4] lien internet:  
<http://moteur-hydro-tpe.e-monsite.com/pages/content/le-moteur-a-hydrogene/le-fonctionnement-du-moteur-a-hydrogene.html> (valide à la date du 22/04/2020)

[5] lien internet:  
<https://www.turbo.fr/emission-turbo/energie-et-si-lhydrogene-etait-la-solution-extrait-turbo-du-27/01/2019-146133>, émissions Turbo : "Énergie, et si l'hydrogène était la solution" (27 janvier 2019). (valide à la date du 22/04/2020)

### Partie moteur hybride:

[6] lien internet: [Voiture hybride : fonctionnement, avantages et inconvénients](#) (valide le 27/04/2020)

[7] lien internet:  
<https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/automobile-voiture-hybride-fonctionne-t-elle-18/> (valide le 27/04/2020)

### Partie écologie:

[8] lien internet  
<https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-hydrogene-elle-en-ergie-propre-906/> (valide le 04/05/20)

[9] lien internet  
<https://www.largus.fr/actualite-automobile/lhydrogene-a-t-il-un-avenir-comme-carburant-automobile-9280398.html> (valide le 04/05/20)

[10] lien internet  
<https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/environnement-voiture-electrique-elle-ecologique-10475/> (valide le 04/05/20)

[11] lien internet  
<https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/chimie-produit-on-hydrogene-6280/> (valide le 04/05/20)

### Partie comparaison des moteurs:

[12] lien internet  
<https://www.automobile-propre.com/> (valide le 04/05/20)

lien utilisé pour rechercher toutes les caractéristiques des voitures du tableau

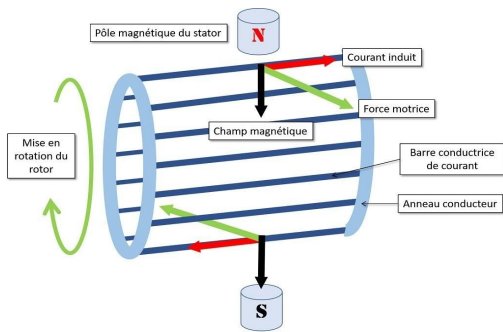
### Partie moteur électrique:

[13] [Technique: moteurs électriques](#) (valide le 08/05/2020)

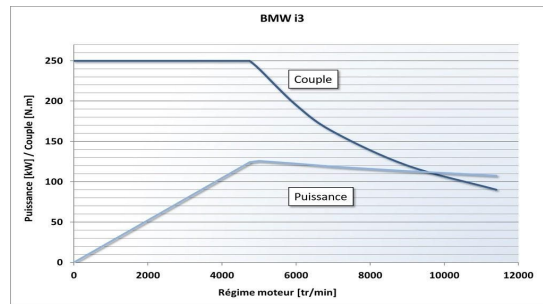
# ANNEXES

## Partie motorisations électriques :

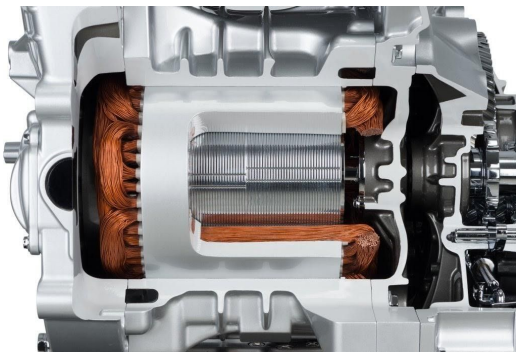
annexe 4



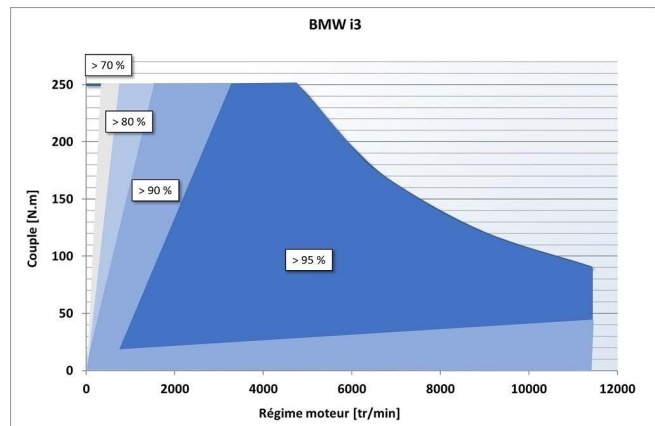
annexe 3



annexe 1



annexe 2



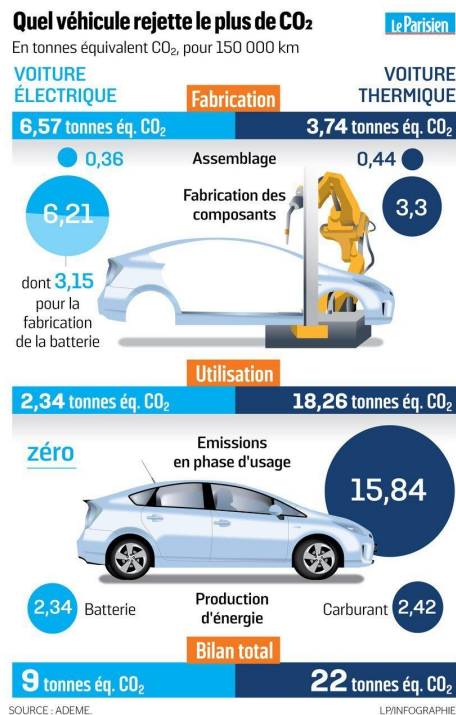
source pour les quatres images : [13]

## Partie comparaison technique:

Catégorie	Sous-catégorie	Modèle	Prix (euros)	Autonomie (km)	Recharge (prise 11 kWh)	Puissance (kWh)
ÉLECTRIQUE	Aimants permanents	Nissan Leaf	33 900	380	3h30	110=150chevaux
	Induction	Tesla X	100 000	600	5h15	250 =340 chevaux
	Rotor bobiné	Renault Zoé	32 000	390	3h50	80=108 chevaux
HYBRIDE	micro-hybride	Clio 5	12 000	Plein d'essence	Pas de recharge	65 à 130 chevaux
	mild-hybride	Suzuki Baleno	17 500	Plein d'essence	En roulant	90 chevaux
	full-hybride	Toyota Yaris	20 950	Environ 1000	En roulant	100 chevaux
	Hybride rechargeable	Toyota Prius	27 500	63 en mode électrique, 1200 au total	3h10	Thermique:98 chevaux Électrique: 72 chevaux
HYDROGÈNE	Moteur à combustion interne	Pas encore de modèles commercialisés du à des soucis techniques				
	Moteur avec PAC	Hyundai Nexo	72 000	600	0h05(prix H très haut)	120=163 chevaux
THERMIQUE PNEUMATIQUE	Pas encore de modèle commercialisé, seulement des prototypes					
CLASSIQUE	Diesel	Clio 4	13 200	1100	Pas de recharge	75 chevaux

## Partie comparaison écologique:

annexe 5



source:

<http://www.leparisien.fr/automobile/vraiment-ecolo-la-voiture-electrique-11-08-2019-8132127.php>