

La Voiture Electrique,

Comme alternative réaliste à la voiture à essence



Travail de maturité de Roman Schmitz

Image : création personnelle

Table des Matières :

➤	1 Introduction.....	3
○	1.1 Démarche	
✓	Choix du sujet	
✓	Recherche	
✓	Problématique	
➤	2 Principe de fonctionnement.....	4
○	2.1 La voiture à essence	
✓	Le moteur à combustion	
✓	Stockage de l'énergie	
✓	Indice de performances	
○	2.2 La voiture électrique.....	7
✓	Le moteur électrique	
✓	Stockage de l'énergie	
✓	Indice de performances	
➤	3 Comparaison d'un point de vue écologique.....	11
○	3.1 Le stockage d'énergie	
✓	L'essence	
✓	La batterie rechargeable	
○	3.2 La production d'énergie.....	12
✓	Raffinerie, pétrole	
✓	Hydraulique, éolienne, solaire	
○	3.3 Les performances réelles.....	13
✓	Vitesse et accélération	
✓	Rendement, consommation et autonomie	
○	3.4 La durée de vie et le recyclage.....	14
✓	Durée de vie et entretien	
✓	Recyclage des composants	
○	3.5 Impact commercial.....	15
✓	Taxe sur l'essence / l'électricité	
✓	Fixation du prix, frais de production	
➤	4 Conclusion.....	16
➤	5 Bibliographie.....	17
➤	6 Annexes.....	18

➤ 1 Introduction

○ 1.1 Démarche

✓ Choix du sujet

Depuis ma plus tendre enfance, je suis passionné d'automobiles. J'étais fasciné à la fois par l'aspect technique de la chose, et par la beauté de l'objet. Cette passion n'a cessé de grandir et de s'enrichir, et ma curiosité a grandi parallèlement. L'avenir de la voiture est un thème qui m'intéresse beaucoup, c'est pourquoi je suis de près toute évolution ou innovation technique.

Malheureusement, les véhicules réellement révolutionnaires sont souvent ignorés du public, ou injustement critiqués. Ainsi, la voiture électrique ne connaît pas de réel succès sur nos routes.

C'est donc dans le but de mieux comprendre le principe de fonctionnement de ces véhicules révolutionnaires, et de les comparer aux voitures que nous connaissons, que j'ai choisi ce sujet.

✓ Problématique

Dès que l'on commence à s'intéresser à la voiture électrique, on n'en entend que du bien. On parle de son silence et de sa simplicité, avant de mettre en avant sa propreté et son respect de l'environnement. On nous explique à quel point la conception d'un véhicule entièrement électrique est simple et logique, et que nous possédons depuis longtemps les moyens technologiques nécessaires à sa réalisation. Sur le papier, il semble que la voiture électrique ait tout pour réussir. Pour m'en faire une opinion, je me suis posé les questions suivantes :

Quel est le principe de fonctionnement d'une voiture électrique ?

Qu'est-ce qui la différencie des voitures présentes sur nos routes ?

Est-ce qu'une voiture électrique consomme réellement moins d'énergie ?

Pourrait-on imaginer un jour que la voiture électrique remplace la voiture à essence ?

Ce travail est construit comme une comparaison des deux types de véhicules.

✓ Recherche

Aussi tentant soit-il de mener ses recherches sur le vaste océan de documents qu'est le web, c'est dans un souci de justesse et de rigueur des informations que je me suis imposé une recherche dans le monde du réel, plutôt que le virtuel.

Divers ouvrages très intéressants étaient disponibles à la bibliothèque centrale de l'EPFL. Je me suis assez rapidement concentré sur les batteries au Lithium-Ion, car cette technologie me paraissait être la plus prometteuse dans le domaine du stockage d'électricité pour un véhicule. La pile à combustible a également fait partie de mes recherches, mais elle me semblait moins adaptée et trop dangereuse. D'autres ouvrages sur les moteurs à combustion donnaient des informations précises sur le rendement, le dégagement de chaleur, et les caractéristiques techniques. Enfin, les autres ouvrages qui m'ont servi viennent d'amis et de connaissances.

Pour mes tableaux de comparaison, je me suis rendu chez les différents concessionnaires et leur ai demandé les chiffres officiels. J'ai ainsi obtenu des données exactes ainsi que des explications détaillées de Toyota, BMW, Porsche et Peugeot.

Lors du 77^{ème} salon de l'automobile de Genève, j'ai pu discuter avec plusieurs vendeurs et techniciens présents sur les stands, qui m'ont expliqué en détail le principe de fonctionnement de leur véhicule électrique, et leur objectif commercial.

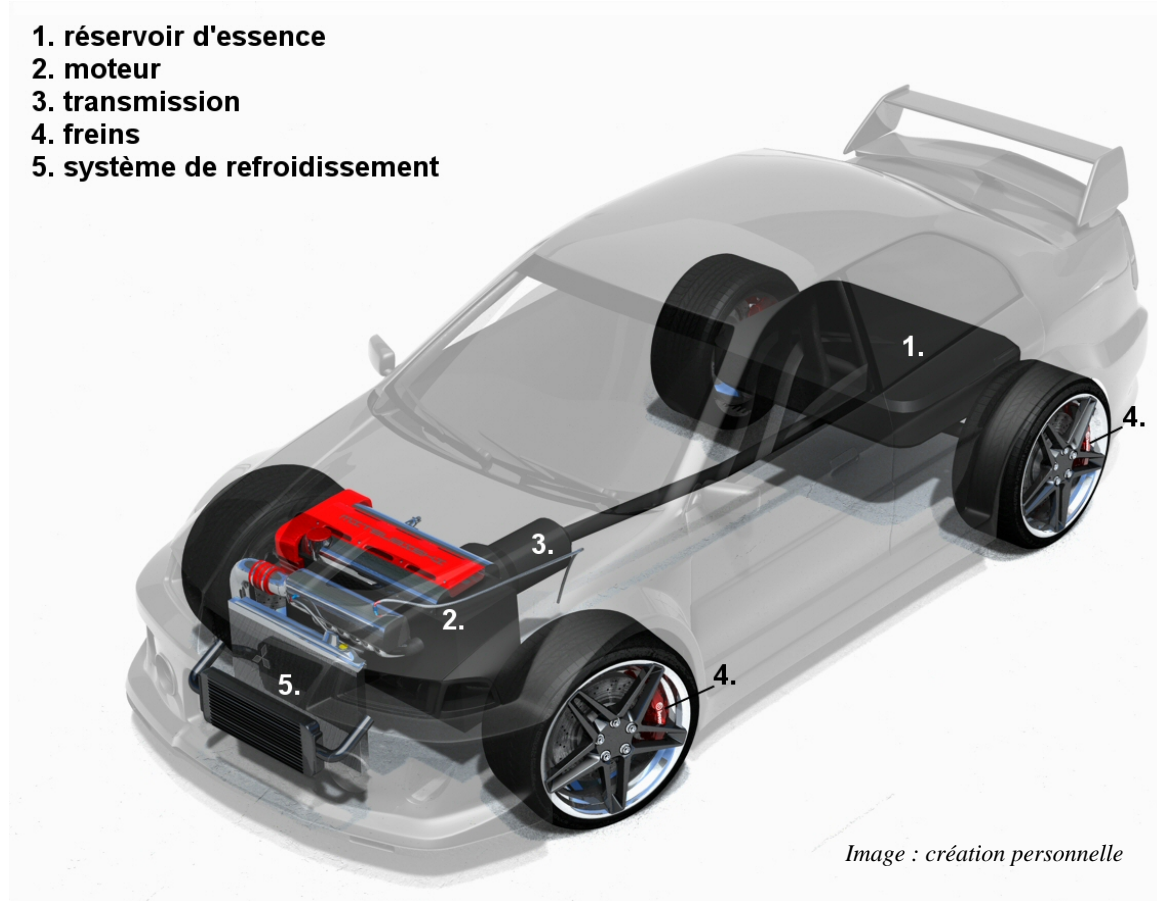
Aussi, dans le cadre de ce travail, j'ai essayé diverses voitures à essence à faible consommation (Peugeot 107, Toyota Aygo), ainsi que la dernière Toyota Prius. Pour comprendre le principe d'une voiture écologique, rien ne vaut l'expérience d'en conduire une soi-même.

➤ 2 Principe de fonctionnement

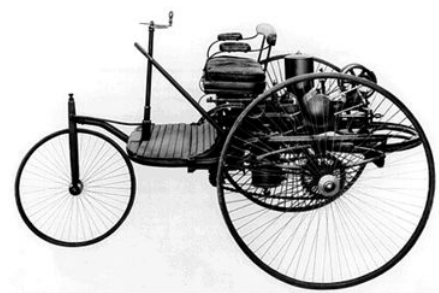
Avant de comparer les deux types de véhicules - à essence, et électrique -, intéressons nous à leur histoire et résumons de manière simplifiée leur principe de fonctionnement.

○ 2.1 La voiture à essence

1. réservoir d'essence
2. moteur
3. transmission
4. freins
5. système de refroidissement



La voiture à essence date de la fin du 19^{ème} siècle, de 1886 pour être exact, avec la « Daimler Benz Patentwagen » (Image 2.1.1). Depuis, elle connaît une évolution constante. Ainsi, tandis que les premiers modèles nécessitaient un démarrage manuel à l'aide d'une manivelle, la première évolution majeure fut l'invention en 1911 du démarreur électrique¹. Cette invention est considérée par beaucoup d'experts comme étant à l'origine de l'"explosion" du marché automobile. Au fil des années, la voiture à essence a gagné en puissance, en autonomie, en sécurité, et en confort.



2.1.1

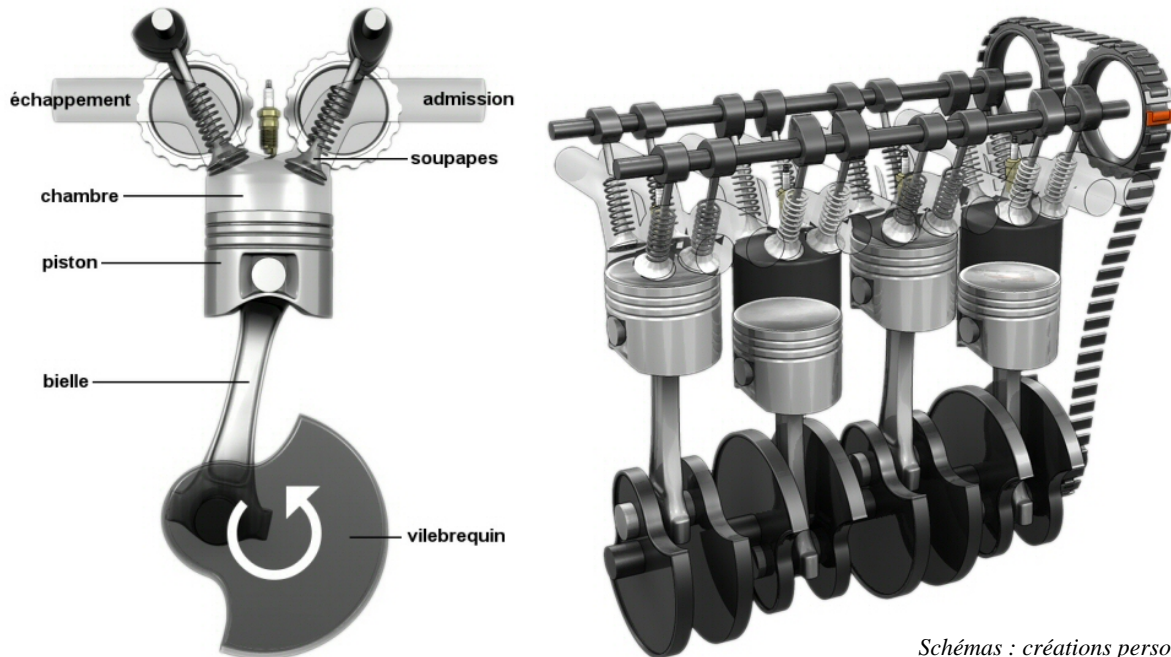
Aujourd'hui, la diversité des automobiles est immense et on peut trouver des véhicules adaptés à toute utilisation, à tous besoins. Bien que très différents, leur principe de fonctionnement est pourtant globalement le même. Elles consomment toutes de l'essence ou du gas-oil, et la nette majorité est équipée d'un moteur « Otto² » à pistons conventionnel. Avant de nous intéresser aux autres composants techniques, penchons-nous donc sur le fonctionnement de celui-ci.

¹ Source : *Batteries for Electric Vehicles* (voir Bibliographie)

² Du nom de son inventeur

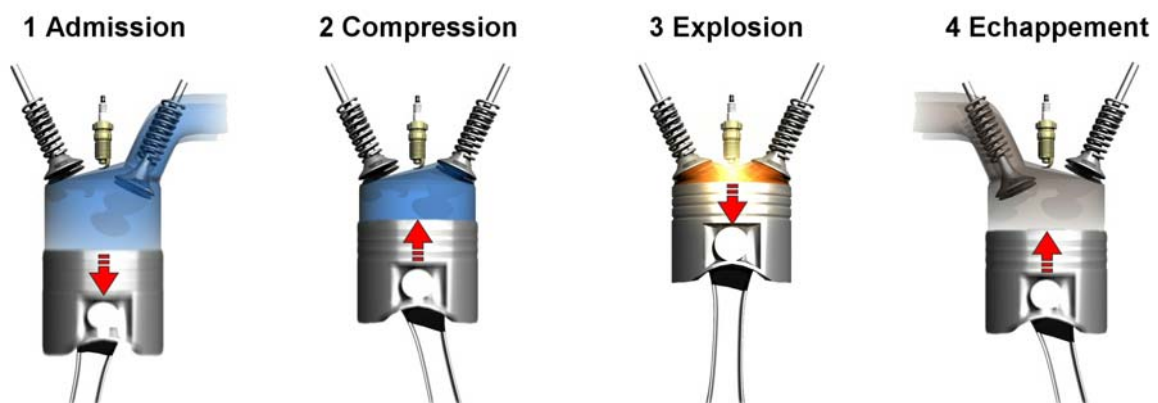
✓ Le moteur à combustion

Ces moteurs sont aussi appelés « moteurs thermiques », car ils transforment une explosion dégageant énormément de chaleur en énergie mécanique. En effet, l'énergie dégagée par l'explosion d'un mélange de carburant et d'air dans la chambre met en mouvement les pistons du moteur, qui transmettent cette énergie à leur bielle. Celle-ci actionne le vilebrequin, et transforme le mouvement linéaire alternatif en un mouvement circulaire continu. Les résidus de l'explosion du mélange sont ensuite évacués par les tuyaux d'échappement.



Schémas : créations personnelles

Les voitures à essence actuelles utilisent un moteur à combustion à **4 temps**. Ces 4 « temps » représentent en fait 4 étapes dans le cycle de rotation du moteur. Ce cycle est ensuite répété à une fréquence et une intensité plus ou moins élevées, afin d'obtenir la puissance et le régime désirés. Les 4 étapes sont l'**admission** - où l'air et l'essence entrent dans la chambre -, la **compression** - où le mélange est comprimé par le piston qui remonte avec élan -, l'**explosion** - où le mélange est allumé par la bougie, et le piston repoussé vers le bas -, et l'**échappement** - où les restes du mélange détonné sont évacués par la sortie d'échappement - .



Schémas : créations personnelles

Il existe beaucoup de types de moteurs à explosion, les principales variables étant la cylindrée (volume total des chambres), le nombre de pistons, le nombre de soupapes et l'agencement et les proportions des pièces (en V, en ligne, à plat, etc...). Suivant ces caractéristiques, le caractère, la force, et la puissance du moteur varient. Cela permet d'obtenir une variété très importante de motorisations.

Comme vous avez pu le constater sur le schéma de la page précédente, le moteur ne travaille que pendant un seul temps (l'explosion), les 3 autres temps ne servant qu'à l'admission et à l'évacuation du mélange d'air et de carburant. Il requiert par conséquent une fréquence de rotation élevée pour délivrer de la puissance de manière constante et sans à-coups. Actuellement, les moteurs à essence ont un rendement (rapport d'efficacité entre l'énergie fournie et l'énergie utile) de l'ordre de 20 à 30%. Autrement dit, les deux tiers de l'énergie consommée sont gaspillés (transformés en chaleur principalement). En effet, le moteur à essence est grand consommateur d'énergie. Heureusement, cette énergie peut être stockée en grandes quantités.

✓ Stockage de l'énergie

Les voitures actuelles sont équipées d'un réservoir d'essence d'une capacité d'environ 45 litres (entre 40 et 65 l généralement). Cela correspond à un volume de $4,5 \times 10^{-2} \text{ [m}^3\text{]}$ et à une masse d'environ 32.625^1 [kg] (masse du réservoir non comprise). L'**énergie spécifique** [Wh/kg] de l'essence - c'est-à-dire l'énergie que peut dégager un kg d'essence enflammé – dépend de la qualité de raffinement, mais vaut généralement environ $9'438^2 \text{ [Wh/kg]}$. Cela signifie concrètement que l'énergie dégagée par la combustion d'un kg d'essence, suffit par exemple à alimenter 157 ampoules de 60W ou une vingtaine d'ordinateurs de bureau pendant une heure. Ces chiffres nous montrent bien que l'essence a un potentiel énergétique important. Un réservoir de 45 litres rempli d'essence peut potentiellement produire $\sim 407'000 \text{ Wh}$ (ou 407 kWh).

✓ Indice de performances

Afin de pouvoir ensuite comparer les performances des voitures électriques à celles des voitures à essence actuellement sur le marché, je vous propose de considérer les données techniques de quelques modèles à essence de différentes catégories. Voici les chiffres que j'ai obtenus auprès de concessionnaires des marques respectives (je me suis efforcé de sélectionner des voitures qui illustrent bien leur catégorie).

	Peugeot 107	BMW 320i	Porsche 997 Turbo
Catégorie	Petite Citadine	Berline moyenne	Sportive
Nombre de places	2 voire 4	4 voire 5	2 voire 4
Poids à vide [kg]	865	1435	1585
Cylindrée en [cm ³]	998	1995	3600
Puissance max. en [kW] ([ch])	50(67)	110(150)	353(480)
Couple max. en [Nm]	93	200	620 - 680
Conso. moyenne en [Wh/km] ³	315	506	876
Conso. moyenne en [L/100km]	4.6	7.4	12.8
Emission de CO₂ en [g/km]	109	178	307
Capacité du Réservoir en [L]	35	63	67
Autonomie théorique en [km]	760	851	523
Accélération de 0 à 100 en [s]	13.7	9.0	3.7
Vitesse maximale en [km/h]	157	220	310
Prix de base en [SFR]	13'930.-	43'300.-	200'500.-

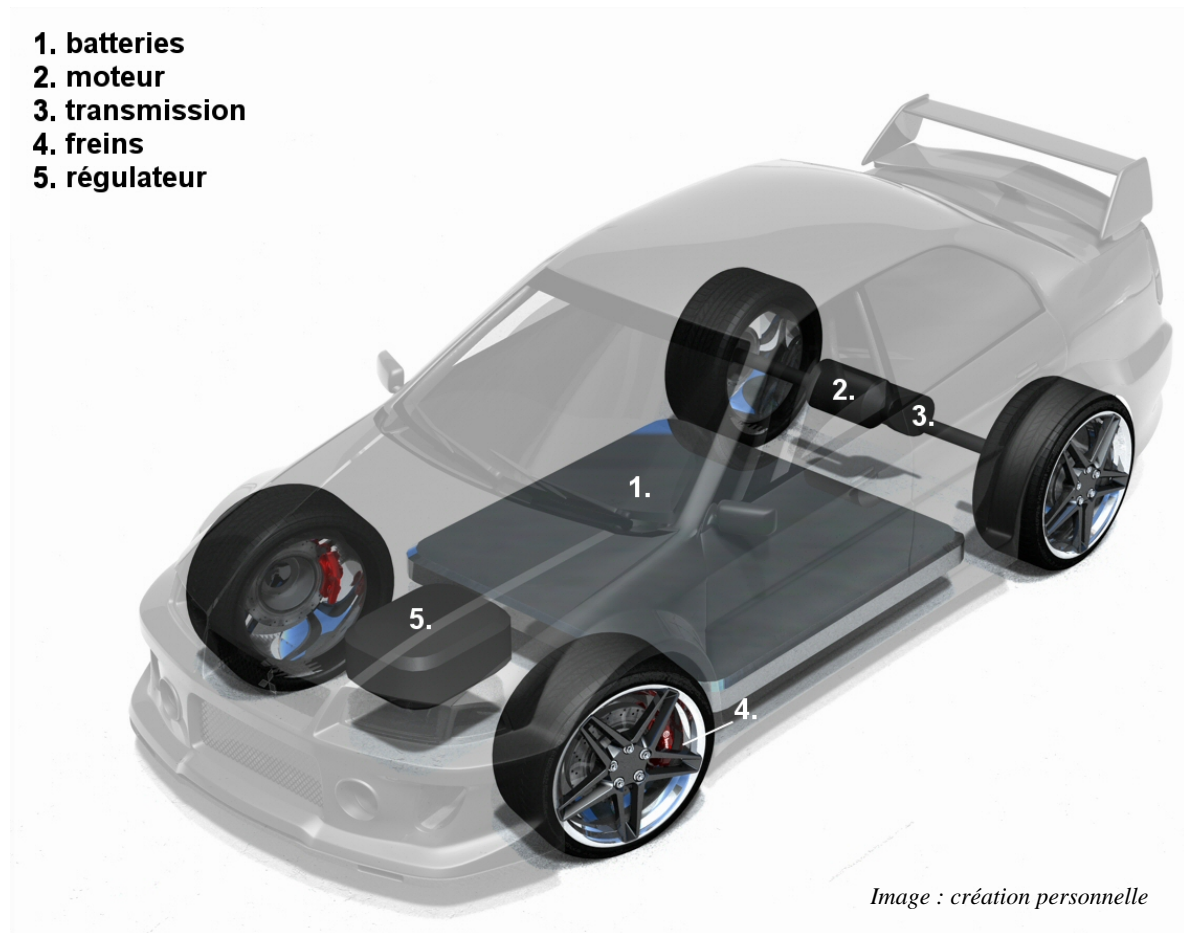
Sources : chiffres officiels Peugeot / BMW / Porsche

¹ Masse volumique de l'essence : $725 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ page 162 de l'ouvrage *Formulaires et tables* (voir bibliographie).

² Pouvoir énergétique de l'essence : $\sim 9,438 \text{ [kWh/kg]}$ page 2 de l'ouvrage *ENERGY AND THE ENVIRONMENT* (voir bibliographie).

³ Données théoriques calculées à partir de la masse volumique de l'essence et de son pouvoir énergétique.

o 2.2 La voiture électrique



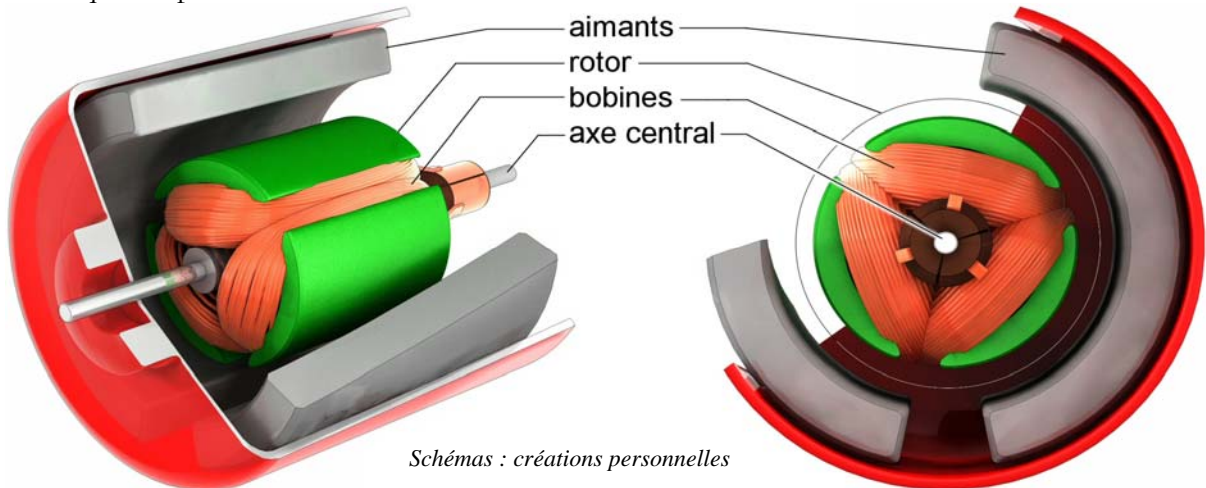
La voiture électrique est apparue très tôt dans l'histoire de l'automobile, les premières datent des années 1830 (la date exacte est inconnue). Jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle, la plupart des automobiles étaient électriques. En plus d'être écologiques, elles étaient plus performantes et plus silencieuses que leurs rivales. Ce n'est qu'au début du 20^{ème} siècle que la voiture à essence connaît un succès plus important. Les voitures électriques de cette époque avaient une faible autonomie, et les batteries ne permettaient pas au moteur de délivrer autant de puissance qu'un moteur thermique.

Du début à la fin du 20^{ème} siècle, l'évolution de la voiture électrique a été très lente. Seules les quinze ou vingt dernières années ont apporté des progrès réels. Ils concernent principalement le stockage de l'énergie, avec l'apparition sur le commerce des premières batteries au Lithium-Ion. On compte quelques autres évolutions minimales, mais pas de révolution technologique. Concentrons-nous donc plutôt sur le fonctionnement des modèles actuels.

Comme vous pouvez le voir sur le schéma ci-dessus, la constitution d'une voiture électrique moderne est nettement plus simple que celle d'une voiture à essence. La transmission et le moteur sont nettement plus petits et les batteries peuvent être placées de façon à obtenir une répartition idéale des masses. Elles peuvent même être intégrées au châssis, abaissant ainsi le centre de gravité du véhicule et améliorant sa tenue de route. La taille réduite et la simplicité des composants permettent d'imaginer des véhicules extrêmement petits et légers, ce qui est un avantage non négligeable lorsque l'on souhaite économiser de l'énergie. De plus, les moteurs électriques sont particulièrement « coupleux », ce qui veut dire qu'ils délivrent une puissance importante à une fréquence de rotation moindre. Cela permet d'accélérer rapidement lorsque l'on part depuis l'arrêt. Voyons comment ces moteurs transforment une énergie électrique en mouvement.

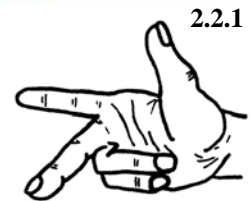
✓ Le moteur électrique

Un moteur électrique est composé principalement d'un stator (fixe), et d'un rotor (qui tourne). Le stator entoure le rotor, et génère un champ magnétique qui le traverse. Ce champ peut être généré par induction, ou par des aimants permanents (comme sur les illustrations de cette page). Le rotor est constitué de bobines dont le fil est recouvert d'une couche isolante, et de connecteurs. Il est solidaire de l'axe central du moteur. Voici une vue en coupe d'un moteur électrique simple :



Schémas : créations personnelles

D'après Laplace, un conducteur placé dans un champ magnétique \vec{B} et parcouru par un courant \vec{I} , est soumis à une force \vec{F} , perpendiculaire au plan formé par \vec{I} et \vec{B} . La direction et le sens de ces trois vecteurs sont déterminés par la règle des trois doigts de la main droite (voir schéma ci-contre). Le **pouce** indique le sens du courant, l'**index** indique le sens du champ magnétique, et le **majeur** indique le sens de la force.



2.2.1

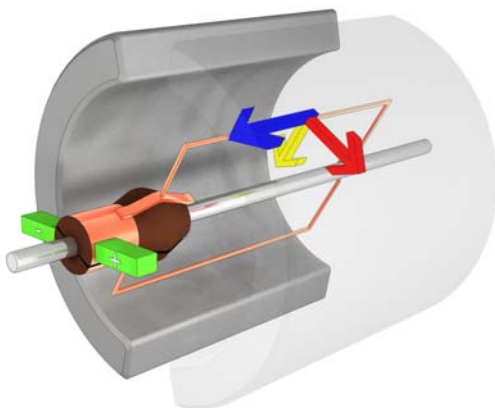
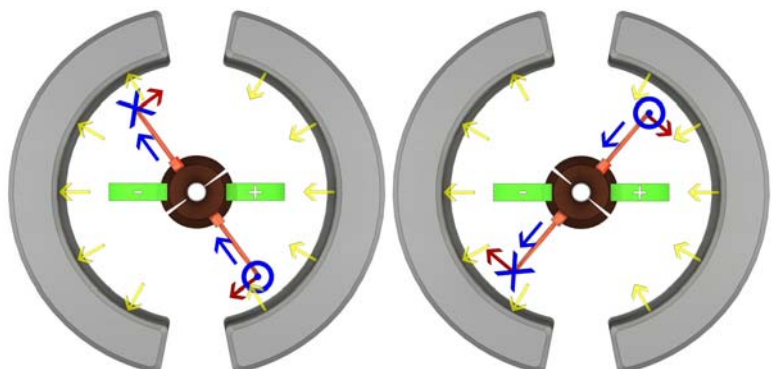


Schéma : création personnelle

C'est ainsi que le courant et le champ magnétique présents dans un moteur électrique permettent de faire tourner le rotor, et donc l'axe du moteur. Observez le schéma ci-contre représentant de manière simplifiée un moteur électrique.

Comme vous pouvez le voir, il y a deux pôles (en vert). Ces pôles transmettent le courant au connecteur central. Un fil relie les 2 pôles en formant un rectangle (ce fil représente une bobine de 1 spire). Sur ce fil s'exerce la force de Laplace, comme illustré par des flèches. La force de Laplace ne s'exerce bien sûr pas seulement en ce point, mais sur toute la longueur du fil, tant qu'il est perpendiculaire au champ magnétique.

Le moteur illustré sur ce schéma a deux phases, pour plus d'efficacité. Cela signifie qu'à chaque moitié de tour du rotor, le courant dans la bobine s'inverse, et que la force est toujours exercée dans le sens de rotation. Le moteur délivre ainsi une puissance élevée et continue, dès une fréquence de rotation basse.



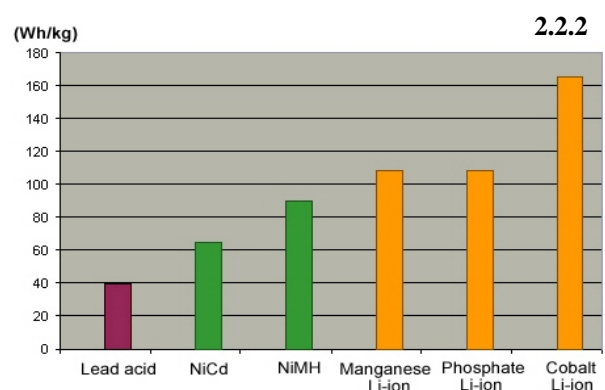
Schémas : créations personnelles

✓ Stockage de l'énergie

Pour comprendre le principe de fonctionnement d'une batterie, il suffit de connaître le principe chimique de l'oxydoréduction, selon lequel l'association d'un oxydant et d'un réducteur implique un échange d'électrons. Exemple : $Cu^{2+} + Zn \rightarrow Zn^{2+} + Cu$ (pile de Daniell).

Ainsi, une batterie est composée de deux métaux (ou cations) reliés par un pont électrolytique. Lorsque la batterie se décharge, une électrode libère des électrons par oxydation, tandis que l'autre électrode les absorbe, par réduction. Cette différence de potentiel constitue une tension électrique entre deux électrodes. Par conséquent, plus la différence de potentiel entre les deux électrodes est élevée, plus la tension de la batterie est importante. Il existe des batteries de différentes formes (structure), et de différentes compositions. Les plus communes sont celles au Plomb (PbHSO), au Nickel Cadmium (NiCd), au Nickel Metal Hydrure (NiMH), et au Lithium-Ion (Li-ion). Les voitures hybrides actuelles utilisent généralement des batteries de type NiMH (exemple : Toyota Prius¹).

Parmi les différents types de piles, le Lithium-Ion se démarque par sa densité énergétique, comme on peut le voir sur le graphique 2.2.2 ci-contre. La production de batteries au lithium est encore relativement chère et complexe, mais sa production en grande quantité réduira les coûts et accélèrera son développement. Aussi, il existe plusieurs types de batteries au lithium, et chacune a des caractéristiques légèrement différentes. On peut donc adapter le type de batterie au besoin.



Voici un tableau résumant les caractéristiques principales des différents types de batteries évoqués plus haut :

2	NiCd	NiMH	Plomb	Li-ion cobalt	Li-ion manganèse	Li-ion phosphate
Energie spécifique en [Wh/kg]	45→80	60→120	30→50	150→190	100→135	90→120
Temps de recharge en [h]	1	2→4	8→16	1.5→3	<1	<1
Température de fonctionnement en [°C]	-40→60	-20→60	-20→60	-20→60	-20→60	-20→60
Fréquence d' entretien en jours	30→60	60→90	90→180	-	-	-
Usage Commercial depuis	1950	1990	1970	1991	1996	2006
Niveau de toxicité	haut	Assez bas	moyen	bas	bas	bas

Remarque : les batteries au Lithium-Ion ne nécessitent pas d'entretien.

La pile à combustible est une autre alternative intéressante pour le stockage de l'énergie, mais l'hydrogène étant extrêmement volatile, il est encore difficile de le transporter de manière fiable et sans danger. Cette technologie est très prometteuse, mais semble encore inadaptée pour l'utilisation dans un véhicule.

¹ Source : Documents officiels Toyota : *Toyota Prius Système hybride synergique : Guide d'intervention*

² Source : www.batteryuniversity.com & "Batteries for Electric Vehicles" (voir bibliographie)

✓ Indice de performances

Comme pour la voiture à essence, voici les caractéristiques principales de quelques voitures 100% électriques. Ces chiffres sont ceux donnés par les constructeurs respectifs sur leur site internet, ils peuvent donc avoir changé depuis. J'ai sélectionné des véhicules commercialisés, même en tant que prototypes (ce qui explique les prix élevés), mais il y a beaucoup de concepts cars en cours de développement.

	GM EV1	AC Perf. Tzero	Tesla Roadster
Catégorie	citadine	sportive	cabriolet sportif
Nombre de places	2	2	2
Poids à vide [kg]	?	?	?
Temps de recharge en [h] à 220 [V]	6 à 8	?	4.5
Puissance max. en [kW] ([ch])	102 (136)	150 (200)	185 (246)
Couple max. en [Nm]	150	240	220
Conso. moyenne en [Wh/km]	138	?	173.9
Emission de CO₂ en [g/km]	0	0	0
Type de batteries	NiMH	Lithium-Ion	Lithium-Ion
Capacité des batteries en [kWh]	26.4	?	56
Autonomie théorique en [km]	190	480	322
Accélération de 0 à 100 en [s]	9	3.7	3.9
Vitesse maximale en [km/h]	128	225	210
Prix de base en [\$]	43'000.-	220'000.-	92'000.-

➤ 3 Comparaison d'un point de vue écologique

○ 3.1 Le stockage d'énergie

✓ L'essence

L'essence peut être trouvée de différentes qualités sur le marché. Ces types d'essence se différencient par leur indice d'octane (plus il est élevé, plus l'essence est de bonne qualité). On trouve de l'essence d'indice 91, 95, 98, et même 100 par endroit. Cette qualité varie suivant la manière dont le pétrole est raffiné (c.f. chapitre 3.2). De manière générale, l'essence a les qualités (+) et les défauts (-) suivants :

- + Potentiel énergétique énorme. ($\sim 9'438 \text{Wh/kg}$)
- Mélange toxique, hautement inflammable et explosif
- Produit des gaz toxiques lorsque enflammée
- Produit des vapeurs toxiques et inflammables, et invisibles à l'œil nu
- Energie fossile, ne peut être réutilisée.

✓ La batterie rechargeable

Les batteries de type Lithium-Ion (Li-ion) ont de manière générale les caractéristiques suivantes :

- + Rechargeables en quelques heures
- + Compactes et nettement plus légères que les autres batteries, pour la même puissance
- + Recyclables
- Potentiel énergétique 50 à 100 fois inférieur à celui de l'essence (~ 90 à 190Wh/kg)
- Fonctionnement lors de températures très basses limité (en dessous de -20°C)
- Nécessitent un système de sécurité pour éviter une surchauffe du bloc batterie.

Donc, le potentiel énergétique de l'essence est son principal atout, aucune pile ne peut rivaliser avec cela aujourd'hui. Le temps de recharge est également bien plus court pour un réservoir d'essence qui peut être rempli en l'espace de quelques minutes, contre une heure ou plus pour une batterie. D'un autre côté, la batterie permet de « faire le plein » chez soi. Aussi, le stockage d'énergie dans une batterie comporte certains avantages, les batteries sont recyclables, et en cas d'accident les dégâts sont moins graves.

o 3.2 La production d'énergie

- ✓ L'obtention d'essence par le raffinement du pétrole

L'essence est une substance composée de pétrole raffiné et de divers additifs. Le pétrole chauffé à différentes températures permet d'obtenir différentes substances, comme le kérosène, les produits permettant la synthèse du plastique, des gaz (propane et butane) et de l'essence (après vapocraquage). Il faut chauffer l'« or noir » à environ 180°C¹ degrés pour en tirer le liquide fin et hautement explosif que nous connaissons tous. Le raffinement est un procédé extrêmement toxique et nuisible pour l'environnement.

- ✓ L'obtention d'électricité par les centrales hydrauliques, solaires, éoliennes

Il existe différentes manières de produire de l'électricité, qui peuvent être classées en deux catégories : « propres » et « non propres ». L'intérêt majeur de la voiture électrique étant de protéger l'environnement, concentrons-nous sur les sources d'énergie dites « propres ». Les principales sources d'énergies « propres » sont les centrales hydrauliques, solaires, et les éoliennes. Les centrales à gaz, à charbon ou nucléaires produisent du CO₂ ou des déchets radioactifs.

Les centrales hydrauliques consistent généralement en une retenue d'eau avec une échappatoire par laquelle l'eau s'écoule de manière contrôlée, en activant des turbines génératrices. Le rendement de telles installations est assez élevé, et elles sont presque toujours utilisables.

Les centrales solaires consistent le plus souvent de panneaux solaires composés essentiellement de silicium qui génèrent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés aux rayons du soleil. Certaines centrales concentrent les rayons du soleil en un point à l'aide de miroirs pour faire chauffer de l'eau à des températures élevées (de l'ordre de 800°), la vapeur d'eau entraîne ensuite une turbine génératrice. Ces centrales ont un rendement relativement peu élevé, et ne fonctionnent correctement que par beau temps, elles sont donc plus efficaces dans des régions fortement ensoleillées.

Les éoliennes sont des générateurs entraînés par une hélice, installés en hauteur dans des zones exposées au vent. Elles ne fonctionnent que lorsque la vitesse du vent est au-dessus des 18 km/h et ne dépasse pas les 90 km/h. Leur efficacité dépend directement de la fréquence et de l'intensité du vent. On en place de plus en plus en mer, où le vent souffle de manière quasi constante.

L'énergie hydraulique couvre aujourd'hui plus de 60% des besoins électriques en Suisse. L'énergie solaire est encore en pleine expansion au niveau mondial et promet des résultats importants lorsque les centrales sont installées là où l'ensoleillement est maximal. Les éoliennes sont au centre de la course vers l'énergie propre, mais ne représentent encore qu'une infime part de la production totale.

L'évolution des cellules photosensibles permettant de capturer l'énergie solaire pourrait contribuer grandement au succès de la voiture électrique, ces cellules étant actuellement encore très coûteuses, compliquées à produire, et peu efficaces (rendement de l'ordre de 10%).

¹ Source : *TECHNOLOGIE DES MOTEURS A COMBUSTION INTERNE* (voir bibliographie)

o 3.3 Les performances réelles

✓ Vitesse et accélération

Comme vous avez pu le constater dans les tableaux précédents, une voiture électrique accélère aussi vite, si ce n'est plus vite qu'une voiture à essence. Comme expliqué précédemment, cela vient du fait que le moteur d'une voiture électrique délivre de la puissance dès les premiers tours de roue. Le poids contenu de la voiture électrique joue également à son avantage.

La vitesse maximale d'une voiture électrique dépend principalement de la puissance de son moteur, et de son aérodynamisme. Les plus rapides dépassent allègrement les 220km/h.

✓ Rendement, consommation et autonomie

Ce tableau permet de comparer directement la consommation en énergie d'une voiture à essence, d'une voiture hybride, et d'une voiture électrique :

	Peugeot 107	Toyota Prius	GM EV1
Type	Essence	Hybride	Electrique
Nombre de places	4	5	2
Poids à vide [kg]	865	1400	?
Cylindrée en [cm ³]	998	1497	0
Puissance max. en [kW] ([ch])	50(67)	57+50 = 107 (145)	102 (136)
Couple max. en [Nm]	93	115 + 400 = 515	150
Conso. moyenne en [Wh/km] ¹	315	294	138
Conso. moyenne en [L/100km]	4.6	4.3	0
Emission de CO₂ en [g/km]	109	104	0
Stockage d' énergie en [kWh]	239.49	307.92	26.4
Autonomie théorique en [km]	760	1040	190
Accélération de 0 à 100 en [s]	13.7	10.9	9
Vitesse maximale en [km/h]	157	170	128
Prix de base en [SFR]	13'930.-	38'950.-	43'000.-

Il faut noter que la voiture électrique en question, la GM Electric Vehicle 1 date de 1996, et était équipée de batteries de type NiMH, et non au Li-ion. Néanmoins, on voit clairement que la voiture électrique consomme ici moins de la moitié de l'énergie consommée par ses concurrentes. Les performances sont assez bonnes, avec une accélération légèrement meilleure, et une vitesse maximale suffisante pour les routes suisses. Cette vitesse pourrait bien sûr être plus élevée avec un moteur de plus grande puissance, ou une boîte de vitesse progressive (La GM EV1 n'avait qu'un seul rapport). En revanche, on voit clairement que l'autonomie de 190km de l'EV1 paraît dérisoire, comparée aux 760km de la petite 107, et aux impressionnants 1040km de la Prius (bien que ces chiffres ne résultent que d'un calcul théorique, et soient donc à vérifier).

Une voiture électrique équipée d'un moteur un peu plus puissant, et d'une batterie au Lithium-Ion représentera donc une sérieuse concurrence à ces deux modèles à essence. D'autant plus si l'on considère que les 190 km d'autonomie sont largement suffisants pour une journée (voire même une semaine), et qu'il suffit de brancher la voiture sur le secteur, le soir en rentrant chez soi.

¹ Données théoriques calculées à partir de la masse volumique de l'essence et de son pouvoir énergétique.

o 3.4 La durée de vie et le recyclage

✓ Durée de vie et entretien

Le moteur **thermique** dégage - comme son nom le laisse deviner – beaucoup de chaleur. De quoi résultent des problèmes de (sur)chauffe qui imposent les complexes systèmes de refroidissement des voitures actuelles. Cette chaleur a aussi un effet néfaste sur l'usure des pièces, qui sont exposées à des variations de température importantes. La durée de vie d'un moteur thermique est de l'ordre des 200'000 km, avant de devoir changer des pièces importantes. Les frais d'entretien d'un véhicule équipé d'un tel moteur sont conséquents, il faut effectuer régulièrement un service de maintenance qui comprend le remplacement de diverses pièces d'usure (bougies, courroies, filtres à air, à huile et à essence, etc...), il faut régulièrement effectuer des tests anti-pollution, re-synchroniser divers éléments, etc....

Le moteur **électrique** ne connaît pas ces problèmes. Il chauffe nettement moins car quasiment toute l'énergie consommée est transformée en mouvement. La durée de vie d'un moteur électrique est nettement supérieure à celle d'un moteur thermique, les pièces d'usure étant relativement peu nombreuses. On peut donc imaginer parcourir des centaines de milliers de kilomètres avec un moteur bien entretenu. Les frais d'entretien d'un véhicule électrique sont minimes, le seul élément coûteux à remplacer étant les batteries.

✓ Recyclage des composants

La voiture moderne peut être presque entièrement recyclée. Audi nous montre l'exemple avec l'Audi « A2 » qui est dite recyclable à 98%. Les composants les plus difficiles à recycler sur une voiture étant principalement les pneus. Bien qu'une voiture à essence soit déjà théoriquement recyclable, la composition nettement plus simple d'une voiture électrique devrait la rendre plus simple à recycler. Par ailleurs, les batteries au Lithium-Ion sont peu toxiques et entièrement recyclables.



Photo : Roman Schmitz

o 3.5 Impact commercial

✓ Taxe sur l'essence / l'électricité

Le prix de l'essence est composé en grande partie de taxes (~50,4%¹). Elles contribuent au budget de l'Etat pour la maintenance des routes et des transports publics. Cela peut paraître élevé, mais le montant est dérisoire (~4 à 8 Frs pour 100Km parcourus) étant donné les coûts d'entretien des routes. La suppression de cette taxe, ou la baisse de la vente d'essence, engendrerait des problèmes importants pour l'entretien des voies de circulation.

Il est facile de taxer les automobilistes circulant avec une voiture à moteur thermique, mais qu'en est-il des voitures électriques ? On pourrait imaginer instaurer une taxe supplémentaire sur l'électricité, mais cela pénaliserait ceux qui ne possèdent pas de véhicule.

D'un autre côté, la voiture électrique est nettement plus respectueuse de l'environnement, ce qui peut - à long terme - représenter une économie majeure pour l'Etat. Elle est aussi moins chère pour l'utilisateur, car il a la possibilité de créer son propre courant. On pourrait par exemple imaginer que chacun équipe son toit de capteurs solaires, pour couvrir une partie de ses besoins en électricité et pour alimenter son véhicule.

✓ Fixation du prix

3.5.1

La mise en place de la production d'une voiture électrique représente un investissement colossal. Cependant, certaines voitures de sport actuelles coûtent des dizaines de millions en recherches et en mise au point. Ces voitures de sport extrêmes - comme la Koenigsegg CCX par exemple (image 3.5.1) - ont une carrosserie entièrement réalisée en fibre de carbone, des jantes en magnésium, des disques de freins en céramique, des composants moteur en titane, et même des isolations thermiques en or. Une voiture électrique ne nécessite aucune pièce particulièrement coûteuse, si ce n'est sa batterie. Le principal coût des voitures électriques ne se situe donc pas au niveau des matières premières mais des frais de production. Pour produire des voitures électriques en grandes quantités il faudrait en effet créer de nouvelles lignes de production, et cela est extrêmement cher. Seulement, cet investissement sera très rapidement amorti si la population montre un intérêt pour ces nouveaux véhicules. D'après le principe de l'offre et de la demande, dès le moment où l'offre correspond ou excède à la demande, le prix baisse.



Enfin, une voiture électrique demandant très peu d'entretien et les frais d'électricité étant nettement moins élevés que ceux d'essence, l'offre reste très intéressante même si le prix de base du véhicule est un peu plus élevé. Cela a déjà été démontré par les scooters électriques commercialisés par Peugeot. Il existe même des bornes électriques en ville (à Lausanne notamment) permettant de recharger ces scooters gratuitement. Les véhicules électriques intéressent également la poste, qui étudie actuellement la question.

¹ Composition du prix pour 1 litre de sans plomb 95. Paru dans le magazine TCS du 8 mai 2007 à la page 5

➤ 4 Conclusion

Je suis un fan de belles mécaniques, je suis passionné de voitures de sport et de moteurs suralimentés depuis des années. Pourtant, je trouve à la voiture électrique de demain un intérêt bien plus grand. Personne ne peut être insensible à une telle révolution, comme le serait le passage de la voiture à essence à la voiture électrique. Imaginez un véhicule rapide, silencieux, léger, et totalement propre. Mes recherches m'ont conduit à la conclusion que oui, la voiture électrique peut réellement devenir une alternative aux voitures actuelles. Bien sûr qu'il y a encore du chemin, la capacité et le temps de chargement des batteries jouera un rôle très important, et les aspects pratiques tels qu'un chauffage ou un dégivrage devront être correctement résolus. Néanmoins je reste confiant, et je pense que les autres solutions telles que le bio carburant, l'éthanol, ou encore les voitures hybrides ne sont que transitoires, et n'ont pas de réel intérêt.

D'un autre côté, je doute que la voiture électrique apporte une avancée importante dans la résolution des problèmes de pollution que connaît notre planète. A la suite de la lecture de divers livres, j'ai pris conscience de l'ampleur réelle de la pollution venant des véhicules. Les émissions provenant des véhicules n'occupent qu'une place dérisoire dans la pollution globale, et les réels problèmes se trouvent au niveau de la production d'électricité par des centrales polluantes. Les centrales solaires semblent une solution d'avenir très prometteuse, et je pense qu'une évolution vers une plus grande part de l'énergie solaire dans la production d'électricité pourrait apporter de réels changements.

J'ai eu beaucoup de plaisir à faire ce Travail de maturité, autant durant la phase de recherche - au cours de laquelle j'ai appris énormément de choses très intéressantes - que durant la rédaction du texte, et la création des schémas et illustrations pour les diverses explications.

➤ 5 Bibliographie

BACHER PIERRE : *L'ENERGIE EN 21 QUESTIONS*, Paris, Odile Jacob, avril 2007, 215p.

CLOS CHRISTIAN : *TECHNOLOGIE DES MOTEURS A COMBUSTION INTERNE*, Paris, E.T.A.I., 1993, 165p.

COLLET PIERRE : *MAGNETISME-ONDES*, Gymnase de Morges.

COMMISSION ROMANDE DE MATHEMATIQUES, DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE : *Formulaires et tables*, Genève, Editions du Tricorne, 2004, 278p.

DELANETTE M. : *La suralimentation des moteurs*, Paris, Editions Techniques pour l'Automobile et l'Industrie, 1991, 176p.

GERIGK, BRUHN, DANNER, ENDRUSCHAT, GÖBERT, GROSS, KOMOLL : *Kraftfahrzeugtechnik*, Braunschweig, Westermann Schulbuchverlag GmbH, 2001, 610p.

HECHT EUGENE : *PHYSIQUE*, Italie, De Boeck Université s.a. 1999, 1304p.

HUGHES AUSTIN: *Electric Motors and Drives*, Angleterre, Billings of Worcester Ltd, 1990, 304p.

KWON ROTH Nam Hee: *Mesoscopic Manganese Based Cathode Materials For High Voltage Lithium Ion Batteries*, Lausanne, EPFL, 2006, 146p.

LO BELLO PHILIPPE : *Cours de Chimie 2M*, Gymnase de Morges, 2003, 68p.

MICHAUD Gérard, CUENOT Jean : *Histoire Méthodologie*, Gymnase de Morges, août 1998, 62p.

RAND D.A.J., WOODS R., DELL R.M.: *Batteries for Electric Vehicles*, Taunton (GB), SRP Ltd., 1998, 577p.

RISTINEN ROBERT A, KRAUSHAAR JACK J.: *ENERGY AND THE ENVIRONMENT*, U.S.A., John Wiley & Sons Inc., 1999, 368p.

RUDOLF JOACHIM, DR. MANFRED EIGEN : *Knaurs Buch der modernen Chemie*, Allemagne, Droemersch Verlagsanstalt Th. Knaur Nachf. , 1971, 360 p.

VDI/VDE – GESELLSCHAFT : *Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren – Autoreg 2004*, Düsseldorf (DE), VDI Verlag GmbH, Mars 2004, 742p.

Sources des images:

N° de l'image	Source / Auteur
2.1.1	www.starbenz.com
2.2.1	<i>MAGNETISME-ONDES</i> (voir bibliographie)
2.2.2	www.batteryuniversity.com
3.5.1	www.koenigsegg.com
4.2.1	www.bmw.de

➤ 6 Annexes

Propositions personnelles

○ 6.1 Récupération d'énergie

De nos jours, l'énergie est gaspillée de toutes les manières possibles et imaginables. Que ce soit sous forme d'électricité, de chaleur, ou autre. Pourtant, si nous voulons réellement changer quelque chose à la détérioration de l'environnement, il ne suffira pas de changer de carburant, ou de technologie. Tôt ou tard, il nous faudra changer notre manière de consommer et surtout de recycler l'énergie.

Tout trajet commence et fini à une vitesse nulle. Tout trajet peut donc être considéré comme une succession d'accélération et de décélération. Il faut de l'énergie pour accélérer, mais faut-il de l'énergie pour ralentir ? Il serait tentant de dire que oui, car une voiture en mouvement a une inertie importante du fait de son poids conséquent, et demande beaucoup d'énergie pour être ralentie correctement. Aussi, les voitures actuelles utilisent des systèmes de freinages assistés, qui consomment de l'énergie, pour transformer l'énergie du mouvement du véhicule en chaleur. Pourtant, sur une voiture électrique (ou hybride), le moteur électrique peut servir de générateur, pour freiner le véhicule de manière très efficace, et récupérer une partie plus ou moins importante de l'énergie qui a été dépensée pour le mettre en mouvement.



Image : création personnelle

De plus, même les freins qui équipent les voitures les plus modernes, sont constitués de pièces d'usure, qui dégagent rien de moins que de la poussière de métal, qui a des effets néfastes sur la santé.

Je trouve préoccupant de voir à quel point les poussières métalliques provenant des disques de freins sont négligées, car elles représentent une pollution importante et dangereuse.

Il est primordial de récupérer le maximum de l'énergie fournie pour l'accélération, lors de la décélération. Des efforts ont déjà été faits dans ce sens (Toyota Prius), mais je pense que l'on pourrait aller encore bien plus loin en intégrant ce genre de système à tous les véhicules, ce qui aurait pour effet d'augmenter sensiblement leur autonomie, en baissant leur consommation.

o 6.2 Optimisation

✓ Du moteur et de la transmission

Le rendement du moteur électrique est excellent, et sa puissance est disponible sur une large plage d'utilisation. Cependant, tout moteur a un régime de fonctionnement idéal, un régime auquel sa force et son efficacité est maximale. Sur un moteur à essence, il est difficilement concevable de maintenir ce régime de manière continue principalement pour des raisons d'usure prématurée des pièces et de surchauffe. Un moteur électrique en revanche, peut garder un régime fixe pendant une durée indéterminée.

Idéalement, il faudrait donc coupler un moteur électrique à une transmission progressive gérée électroniquement, de manière à ce que le moteur reste à son régime idéal lors de fortes sollicitations. Ce mécanisme existe déjà sur des 2 roues de petites cylindrées tels que les scooters. Ces systèmes fonctionnent cependant avec une courroie qui s'use assez rapidement. Il serait extrêmement intéressant de développer une transmission plus robuste pour une voiture électrique. Bien que les moteurs électriques soient très souples et permettent une fréquence de rotation allant de 0 à jusqu'à 13'000 trs/m, une transmission de ce genre permettrait d'améliorer la vitesse maximale et l'accélération de ces véhicules, ainsi que de baisser leur consommation.

✓ Du châssis et des roues

Dans son comportement, une voiture est très différente d'une moto. Bien sûr, tous deux ont un moteur, une transmission, des freins, des suspensions, des amortisseurs, et des pneus. Cependant, leur comportement en virage est radicalement différent. Là où la moto se penche pour mieux épouser les changements de direction de la route, la voiture se penche dans le sens opposé, comme si elle ne voulait pas tourner. Cela vient du fait que la moto « tombe » dans le virage grâce à la force centripète, tandis que la voiture « subit » le virage, tentée de continuer tout droit selon son inertie (ou force « centrifuge »). Le fait que la voiture reste droite, rigide, entraîne une importante usure des pneus, qui doivent subir une poussée latérale importante. En effet, tandis que la surface totale de contact au sol pour une voiture avoisine les 800cm^2 ($20 \times 10 \times 4$), la surface totale de contact au sol pour une moto dépasse rarement les 40cm^2 ($5 \times 5 + 4 \times 4$). **4.2.1**

Il est cependant possible de faire une voiture au comportement proche de celui d'une moto. Mercedes a par exemple réalisé un prototype nommé « carver », dont les roues s'inclinent dans les virages. BMW travaille également sur un prototype à trois roues, qui se penche dans les virages.

Je pense que l'on devrait aller encore plus loin, car il n'y a pas de réel intérêt à faire pencher les roues si le reste du châssis reste fixe. Il est concevable de faire une voiture dont les 4 roues soient directrices et motrices, et dont le châssis s'adapte entièrement aux conditions de conduite.

Un tel châssis serait géré électroniquement en fonction de la vitesse, de la variation de vitesse, de l'accélération latérale, du type de revêtement, et des conditions météorologiques par exemple. La pression et la forme des pneus seraient modifiables en temps réel, permettant un maximum de grip en cas de freinage, une agilité exceptionnelle et un minimum de frottements de roulement sur autoroute. Il va s'en dire que ce genre de châssis entraînerait d'énormes économies d'énergie, et diminuerait l'usure des pneus.



Tableau des unités:

1'000 Litres = 1m^3

1 gallon U.S. = 3.885 Litres

1 [m^3] d'essence a une masse de 725 kg

1 [mkg] correspond à 9.81Nm

Nombre de mots du document (hors annexes et tables) : 4091 mots

Remerciements :

M. Philippe Lo Bello

M. Alann Gasser

M. Christophe Tacchini

M^{lle} Julia Laurency

M^{lle} Jaqueline Schmitz

M^{m^e} Marion Schmitz

M. Csaba Laurency

M. Jean-Claude Keller

A vous tous un grand MERCI!