

ETUDE DES DIFFERENTS TYPES DE VEHICULES PROPRES



Etudiants :

Michael DEVEDEUX

Ophélie LACOU

Camille LEROY

Yoan LEVESQUEAU

Mathilde MANUECO

David TAN

Enseignant-responsable du projet :

Abdelaziz BENSRAIR

Date de remise du rapport : 18/06/2010

Référence du projet : STPI/P6-3/2010 – 44

Intitulé du projet : *Etude des différents types de véhicules propres.*

Type de projet : *veille technologique, étude bibliographique.*

Objectifs du projet :

Notre principal objectif a été d'étudier et de comprendre le fonctionnement des différents types de véhicules propres. Tout au long de ce dossier, nous nous attachons à présenter les avantages ainsi que désavantages de chaque prototype automobile afin de déterminer la meilleure alternative favorable à la sauvegarde de l'environnement.

De plus, ce projet nous permet d'évoluer dans un monde semblable à celui du monde professionnel puisque nous devons nous confronter aux idées et aux opinions de nos camarades, ce qui n'est pas forcément évident.

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et résultats.....	8
3.1. Le véhicule solaire : l'effet photovoltaïque	8
3.1.1. L'énergie solaire photovoltaïque	8
3.1.2. Techniques du photovoltaïque et distribution de l'énergie	9
3.1.3. Diversité des panneaux solaires	10
3.1.4. Le prix, un frein majeur	12
3.1.5. Le stockage, le « BIG » problème.....	14
3.1.6. Avenir du photovoltaïque	15
3.2. Le véhicule électrique.....	16
3.2.1. Présentation	16
3.2.2. Les difficultés rencontrées liées à la production/utilisation de la voiture électrique.....	17
3.2.3. L'avenir du véhicule électrique.....	20
3.2.4. Conclusion.....	22
3.3. Les véhicules hybrides	22
3.3.1. Définition.....	22
3.3.2. Les modes de fonctionnement.....	23
3.3.3. Les différentes architectures	24
3.3.4. Avantages.....	29
3.3.5. Inconvénients	29
3.3.6. Avenir.....	30
3.4. Les biocarburants	31
3.4.1. Généralités	32
3.4.2. Les techniques de formation des biocarburants.....	32
3.4.3. Le bilan économique et environnemental	34
3.4.4. Les algues : un haut rendement sans concurrence pour la terre.....	35
3.5. Le moteur à hydrogène	38
3.5.1. Généralités sur les piles à combustibles	38
3.5.2. Les différents types de piles à combustibles	41

3.5.3. Application à l'automobile	47
3.6. Le moteur à eau.....	52
3.6.1. Définitions.....	53
3.6.2. Exemples de moteur à eau	53
3.6.3. Le moteur de Pantone.....	54
3.6.4. Avenir et conclusion	57
3.7. Le moteur à air comprimé	57
3.7.1. Actualité	58
3.7.2. Fonctionnement.....	59
3.7.3. Pollution, recharge et prix	61
3.7.4. Avenir et conclusion	61
4. Conclusions et perspectives.....	63
4.1. Conclusions sur le travail réalisé.....	63
4.2. Conclusions sur l'apport personnel de cette U.V. projet.....	63
4.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet.....	65
5. Bibliographie	67
6. Annexes	70



1. INTRODUCTION

« La pollution automobile ? Oui, il faut faire quelque chose...et vite ! »

Rappelons qu'un véhicule propre est un véhicule produisant peu ou pas d'émission polluante lorsque le véhicule est stationnaire ou en mouvement.

Ces véhicules, qualifiés de « propres » ont de beaux jours devant eux. En effet, à raison d'un aller-retour par jour et par personne en moyenne, l'environnement a du souci à se faire. Par exemple aux heures de pointe, ce sont 21 000 véhicules qui font du quasi sur-place sur les 35 kms du périphérique parisien, ce qui représente un capital immobilisé d'environ 210 millions d'euros. De plus, protéger l'environnement tout en faisant des économies peut paraître impossible !

Pourtant, il existe des techniques qui nous permettraient de réduire considérablement nos déjections de CO₂, principal responsable de l'effet de serre qui n'a pas de toxicité directe mais qui est responsable du réchauffement climatique à l'échelle planétaire, ce qui laisse craindre une catastrophe écologique de très grande ampleur à moyen terme. Imaginez le désastre : la Terre EXPLOSEE en mille morceaux !!! C'est à partir de ce constat que nous avons choisi ce projet. De plus, 3 élèves ont choisi ce sujet en accord avec leur choix de département de spécialité : Mesures des Risques Industriels et Environnementaux. Que demander de plus qu'étudier un secteur qui va nous concerner directement dans un avenir proche ?

Mov'eo, Venturi, Toyota (Modèle Prius), Mercedes E 200 NGT et de nombreux constructeurs automobiles concentrent leurs recherches sur l'impact de la pollution automobile sur l'environnement. Leurs départements R&D travaillent d'arrache pied et ne cessent de progresser dans la réalisation concrète de véhicules propres. Pourtant, un problème majeur vient freiner considérablement cette avancée technologique : les batteries. De plus, n'oublions pas que la fabrication des véhicules eux-mêmes emploie des ressources. Par exemple, le fer de la carrosserie et du moteur nécessite des industries de sidérurgie lourde qui sont les plus grands pollueurs (due aux émissions de CO₂). De ce fait, le terme de « véhicule décarbonné » paraît être plus approprié.

Vous l'aurez compris, l'objectif de ce dossier est d'étudier et de comprendre les différentes technologies automobiles appelées « véhicules propres ». Pour se faire, nous avons concentré nos recherches sur 7 technologies différentes : les biocarburants, le véhicule électrique, hybride, solaire, le moteur à air comprimé, à hydrogène et à eau.

Bon à savoir : l'achat d'une voiture électrique ouvre droit à une aide financière qui a été fixée à 2 286 €. Alors qu'attendons-nous pour sauver l'environnement ? Let's go !!!

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Dès la première séance, nous avons découvert que nous allions travailler main dans la main avec un autre groupe de 6 personnes travaillant sur les véhicules intelligents. La démarche utilisée tout au long de ce projet est similaire pour les 2 groupes : nous avons étudié les différents modèles de véhicules propres et eux, les différents capteurs embarqués sur véhicules intelligents. Durant cette séance, les laboratoires LITIS nous ont été présentés, laboratoires spécialisés dans la stéréovision, sujet abordé par l'autre groupe.



Mr Bensrhair nous a alors cité quelques modèles de véhicules propres qui pourraient faire l'objet d'un dossier. Par la suite, nous avons délimité nos recherches à 6 formes de véhicules propres tout en faisant des recherches sur les biocarburants :

- Le véhicule solaire, appelé aussi véhicule photovoltaïque
- Le véhicule électrique
- Le véhicule hybride
- Le moteur à hydrogène
- Le moteur à eau
- Le moteur à air comprimé

Avouons-le, cette organisation nous a largement facilité la tâche concernant la répartition du travail puisque chaque personne avait, plus ou moins, la même quantité de recherche et de travail à fournir.

Les premières semaines de recherche ont été très fructueuses, voire trop. En effet, nous avons rencontré quelques difficultés à sélectionner les informations essentielles. Cependant, Mr Bensrhair nous a orienté sur les notions « vitales » pour bien comprendre notre sujet et celles qui auraient été superflues.

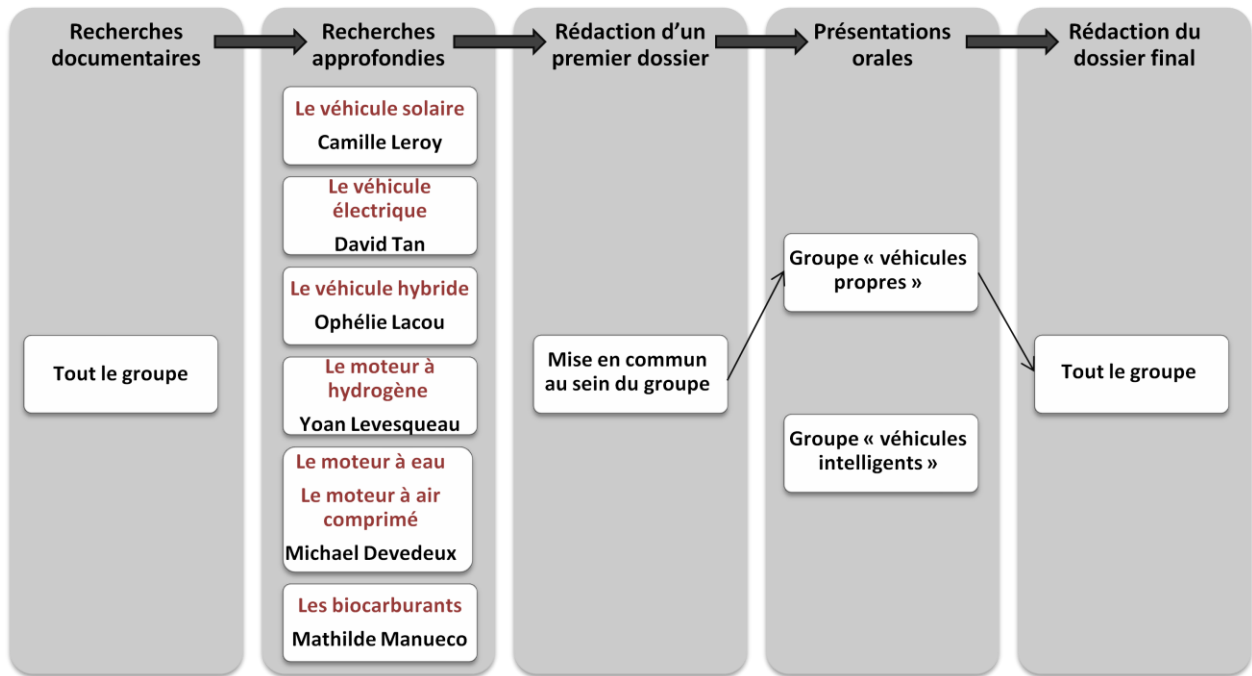
Au bout de ces quelques semaines, nos recherches ont pris la forme d'un power point qui a fait l'objet d'une présentation orale. Cette soutenance d'entraînement nous a permis de synthétiser nos découvertes et de nous confronter aux questions du groupe « Véhicules Intelligents ». Nous avons, par la même occasion, assisté à la présentation de l'autre groupe. Cette présentation nous a été vraiment bénéfique car nous nous sommes rendu compte que nous ne maîtrisons pas notre sujet dans sa totalité, comme nous le pensions. De ce fait, nous nous sommes renseignés davantage sur certains points flous dans nos esprits et avons complété nos parties respectives à l'aide des remarques émises par Mr Bensrhair.

De plus, cette soutenance nous a permis d'apprécier l'aboutissement provisoire de nos travaux et, bien évidemment, de voir en détails, les recherches de nos camarades. Enfin, cet entraînement nous a aidé à mieux appréhender la soutenance finale du vendredi 25 Juin 2010.

Lors de la finalisation de notre projet, le projet PUMAS (Plateforme Urbaine de Mobilité Avancée et Soutenable) nous a été présenté par des élèves ingénieurs en ASI4. Nous avons pu découvrir que l'objet du projet PUMAS est de créer une plateforme de renseignement de temps de parcours pour les villes et les agglomérations afin de leur permettre d'améliorer les conditions de mobilité. Pour se faire, les élèves ingénieurs en ASI4 et MRIE4 travaillent en collaboration avec Mov'eo. Les étudiants en ASI s'occupent de l'aspect technologique de ce projet R&D tandis que les élèves en MRIE traitent l'aspect écologique dans le cadre des Projets INSA Certifiés. Nous avons ainsi pu nous familiariser avec les PIC en discutant avec les élèves ingénieurs qui nous ont fait part de leurs impressions. Le Laboratoire de Production Microtechnique de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne nous a également été présenté.

Pour clôturer ce projet, nous avons rédigé, en tenant compte des remarques de Mr Bensrhair, la partie correspondant à nos recherches et nous les avons rassemblées pour faire un dossier clair et attrayant.





Organigramme des tâches réalisées

3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS



3.1. Le véhicule solaire : l'effet photovoltaïque

La première partie de ce dossier porte sur l'étude de l'énergie solaire photovoltaïque dont l'objectif est de vous donner un petit aperçu de ce que peut nous offrir notre beau Soleil.

3.1.1. L'énergie solaire photovoltaïque

Tout d'abord, il paraît essentiel de rappeler que le système solaire nous procure 2 types d'énergies : thermique et photovoltaïque. Nous nous intéresserons uniquement à l'énergie photovoltaïque que nous allons nous empresser de définir dès maintenant. C'est une énergie qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité.

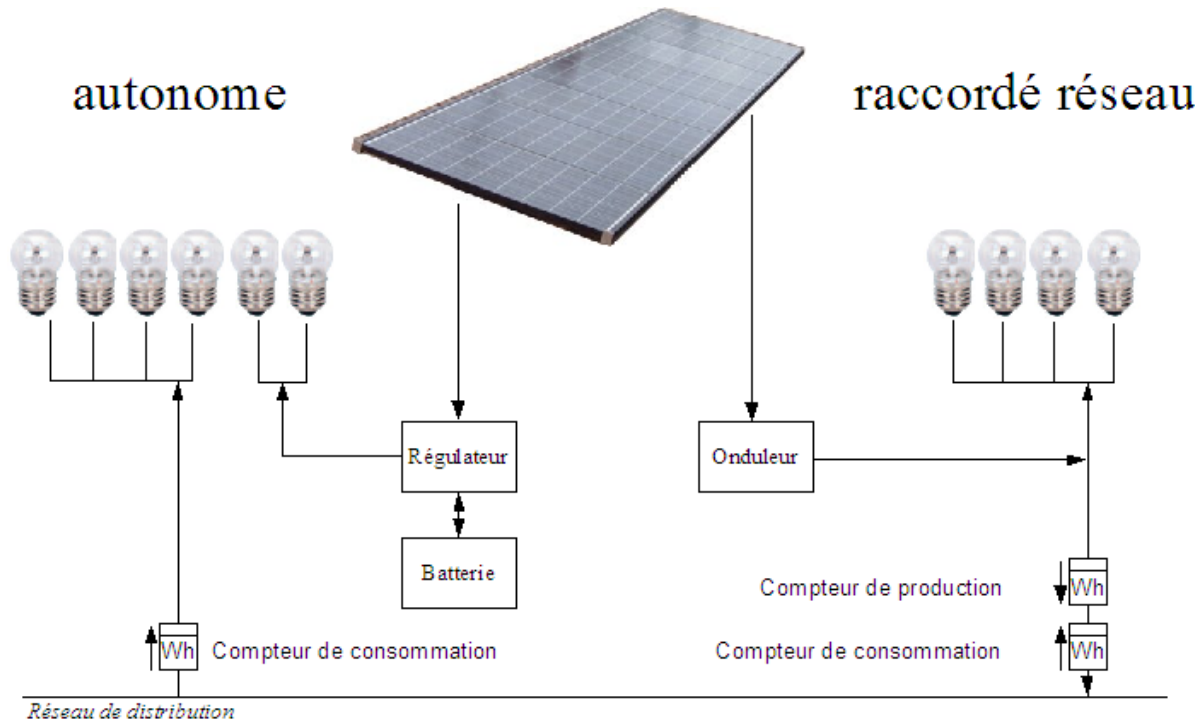
Cette énergie, ou plutôt l'effet photovoltaïque, a été découvert par Antoine Becquerel en 1859.

L'énergie solaire étant une énergie renouvelable (ou presque puisque l'extinction du Soleil est prévue dans 7,5 Milliards d'années...), il est légitime de penser que l'énergie solaire photovoltaïque le soit aussi. Pourtant, ce n'est pas le cas ! Pourquoi ? Tout simplement à cause de la durée de vie limitée des cellules photovoltaïques. Certes, elles durent tout de même 35 ans mais on ne peut cependant pas parler d'énergie renouvelable.



3.1.2. Techniques du photovoltaïque et distribution de l'énergie

Ce sont sur des cellules photovoltaïques que les rayons de notre Soleil arrivent. Ces cellules sont des composants électroniques qui sont reliées sur un module solaire photovoltaïque. « Module solaire photovoltaïque » est une expression bien compliquée qui correspond tout simplement à un panneau solaire. Plusieurs modules forment une installation solaire qui produit de l'énergie qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau extérieur.



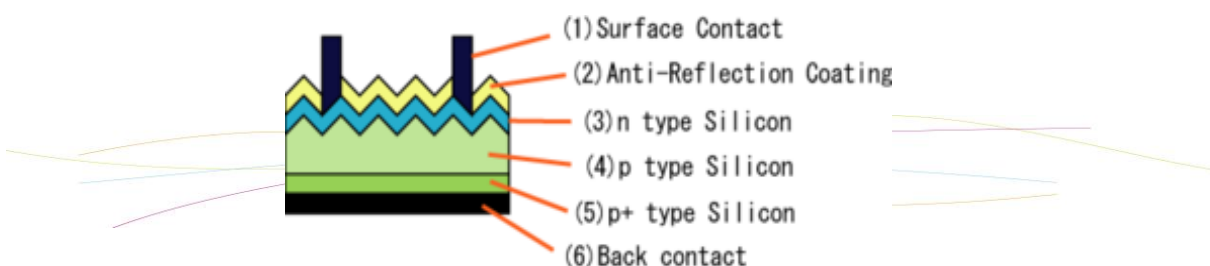
Être autonome et avoir la possibilité d'avoir un réseau en très basse tension peut paraître la meilleure option. Pourtant, elle comporte 3 désavantages majeurs :

- la non-consommation de l'excédent d'énergie
- le renouvellement de la batterie
- le prix et la rentabilité ne sont pas maximaux.

Parlons maintenant de l'injection dans le réseau. Il est clair que les seuls désavantages de cette option résident dans la dépendance vis à vis du réseau mais aussi toute la paperasse administrative. Est-ce que ces 2 inconvénients sont réellement handicapants? Personnellement, je pense qu'il est plus judicieux de choisir la 2ème option par unique souci de rentabilité...

Abordons maintenant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Ces cellules qui composent les modules génèrent une tension de l'ordre de 0.5 Volt. Il est important de souligner que le courant obtenu est un courant continu. Ces cellules sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (comme cité précédemment), de sulfure de cadmium ou de tellure de cadmium.

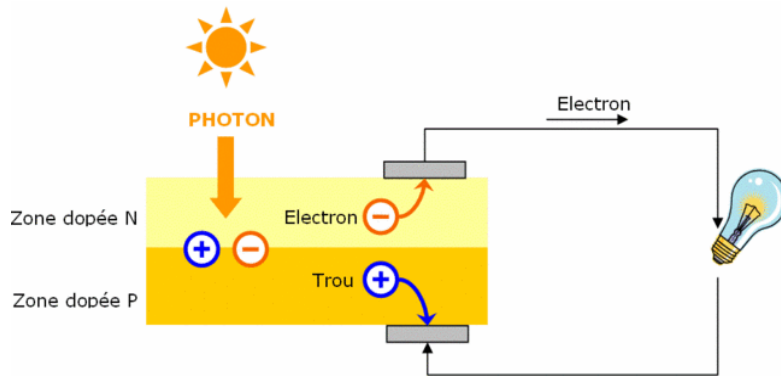
Pour vraiment bien comprendre le fonctionnement d'une telle cellule, il me paraît essentiel d'insérer une image comme suit :



Voici quelques explications : la couche supérieure de la cellule est composée de Si, dopé par un élément de valence supérieur dans la classification périodique (c'est à dire un élément qui possède plus d'électrons sur sa couche de valence que le Si). Il s'agit d'un semi-conducteur de type N. On applique le même raisonnement à la couche inférieure : cette couche est composée de Si également mais cette fois ci, elle est dotée par un élément de valence inférieur dans la classification périodique (c'est à dire un élément qui possède moins d'électrons sur sa couche de valence que le Si). Il s'agit d'un semi-conducteur de type P.

De plus, il y a 2 électrodes qui sont placées, l'une au niveau de la couche supérieure et l'autre au niveau de la couche inférieure : une différence de potentiel électrique a lieu et un courant électrique est créé.

En résumé, la technique du solaire photovoltaïque est simple à comprendre. Lorsque les grains de lumière (les photons) heurtent la surface des cellules de silicium, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière qui se mettent en mouvement et qui créent ainsi un courant électrique continu. Comme dit précédemment, ce courant est continu mais il est converti en courant alternatif par un onduleur pour pouvoir être utilisé dans nos appareils électroménagers par exemple.



3.1.3. Diversité des panneaux solaires

Après avoir explicité la technique du photovoltaïque, nous allons citer quelques exemples de modules et leurs différents modèles.

Rappelons qu'un module solaire est un panneau constitué d'un ensemble de cellules dont nous venons de parler. Il existe plusieurs types de modules :

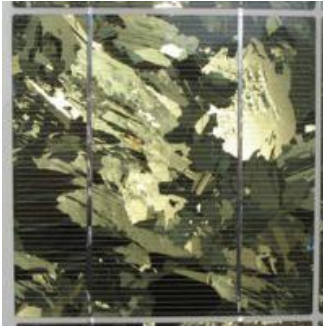
- les modules silicium monocristallins : ils permettent d'avoir un très bon rendement au m² malgré un coût d'installation élevé. De plus, ils sont utilisés dans des espaces restreints.



Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.



- les modules silicium polycristallins : ils présentent le meilleur rapport qualité/prix parmi tous les modules qui existent. Par conséquent, ils sont les plus utilisés. De plus, ils sont fabriqués à partir de déchets électroniques ce qui ne peut que nous ravir vis à vis du respect de l'environnement.



Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

- les modules silicium amorphes : ils ont un bon avenir car ils sont souples et ils détiennent le monopole de la production par faible lumière. Avouons que cette technologie nous serait bien utile chez nous, en Normandie !!! Cette sorte de module a tout pour plaire puisque le prix au m² est plus faible que pour les panneaux solaires composés de cellules.



Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

Vous pensez qu'il est impossible de créer de l'énergie solaire photovoltaïque sans module ? Pour ne pas vous induire en erreur plus longtemps, je vais vous prouver qu'il est possible d'éviter l'utilisation de ces modules coûteux grâce à cette image :



70 hectares, 624 miroirs d'une surface de 121 m² chacun, au pied d'une tour de 115m de haut...voilà le secret d'une centrale solaire thermoélectrique situées près de Séville en Espagne. Le principe est très simple : le haut de la tour abrite une chaudière sur laquelle se concentrent tous les rayons du soleil réfléchis par les nombreux miroirs. La température monte jusqu'à 1000°C. Pourquoi ? Pour chauffer un fluide et produire de la vapeur qui actionne un système de turbines, générant ainsi de l'électricité. Sa puissance installée est de 11 MW.

Aux oubliettes les modules, le silicium, les cellules photovoltaïques, cette centrale peut être implantée là où le soleil brille très souvent (Afrique principalement).

Malheureusement, cette technologie a besoin d'énormément de place ; c'est pour cette raison que nous nous rabattons sur la technique classique utilisant panneaux solaires, cellules et silicium.

3.1.4. Le prix, un frein majeur

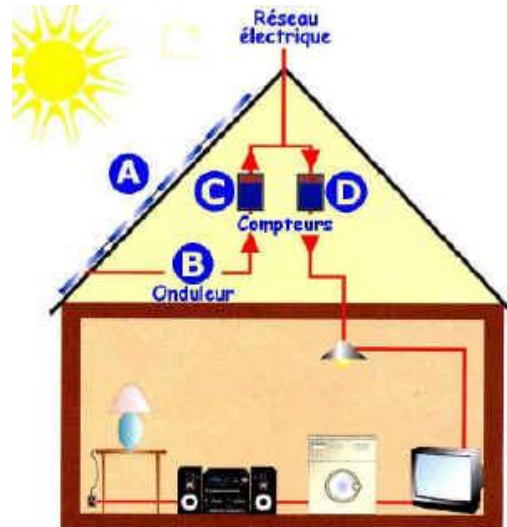
Dans cette 4^{ème} partie, nous allons « parler argent ». Comme vous le savez sans doute, l'investissement de départ est relativement conséquent. Prenons l'exemple d'une voiture à toit solaire. Tout d'abord, cette option est apparue sur des voitures de luxe telles que les Audi A8. Elle est aujourd'hui proposée sur des modèles plus abordables tels que les A4, A6 ou encore les Volkswagen Passat. Cela dit, le prix moyen d'un tel véhicule reste de 30 000 euros. Après avoir dépensé une somme pareille, nous sommes en droit d'espérer une diminution remarquable de la consommation d'essence. N'est-ce pas là, l'objectif premier d'un véhicule solaire ? (Mais aussi de préserver l'environnement !!!)

Parlons d'un modèle de voiture en particulier : la voiture SYSTAIC. Son toit ouvrant, solaire bien sûr, permet la ventilation du véhicule même à l'arrêt et diminue la consommation énergétique de la climatisation jusqu'à 0,5 L pour 100km. Concrètement, sur un trajet de vacances Nord Sud d'environ 1000 km, nous économiserions 5 L de carburant. Pour une moyenne d'1 Litre à 1,20 euros, nous économiserions 6 euros... Personnellement, ce n'est pas demain la veille qu'on me verra au volant d'une voiture solaire !!! Cependant, il est dit qu'un tel concept permettrait désormais de couvrir jusqu'à 12% des besoins en essence...



Restons optimistes ! Le prix des modules baissent d'un facteur 2 tous les 10 ans grâce à l'amélioration et à l'automatisation des fabrications. Concernant le silicium, la réduction de l'épaisseur des cellules permet petit à petit au prix de baisser.

A titre d'information, nous allons nous renseigner sur le prix des panneaux solaires installés sur des maisons, bâtiments, bureaux...



Prenons l'exemple d'une famille de 4 personnes dont le besoin de l'équipement doit être aux alentours de 2000 Watts. Tout d'abord, l'investissement initial (hors pose) revient à 15 000 euros TTC. Ensuite, nous pouvons soustraire 50% du crédit d'impôts sur le montant TTC. Et si nous avons de la chance, nous disposerons peut-être d'aides régionales ou locales ! Globalement, en rajoutant la main d'œuvre, nous aurons déboursé 10 500 euros en moyenne ! Je pense que ce prix reste correct si la rentabilité est bonne, voire excellente !

Parlons-en dès maintenant.

En fonction du lieu de l'habitation (Nord ou Sud), 7 à 11 ans sont nécessaires pour rentabiliser l'installation solaire ! En effet, dans le Sud, nous produisons entre 2200 kWh et 2600 kWh ; alors que dans le Nord, entre 1700 kWh et 1900 kWh. De plus, en fonction du type d'installation choisi, le prix auquel est vendu kWh varie.

Explications :

- 58 centimes d'euro par kWh en 2010 si les panneaux sont « intégrés au bâti » pour les bâtiments d'habitation, d'enseignement ou de santé.
- 50 centimes d'euro par kWh en 2010 si les panneaux sont « intégrés au bâti » pour tous les autres bâtiments (bureaux, agricoles, industriels...).
- 31,4 centimes d'euro par kWh en 2010 si les panneaux sont seulement posés.

Vous devez sans doute trépigner d'impatience à l'idée de connaître la réponse à la question suivante : *Mais pourquoi une telle différence de prix ?* Et bien, c'est très simple : une toiture équipée de panneaux solaires photovoltaïques intégrés permet d'avoir un aspect général beaucoup plus esthétique et plus moderne : plat et d'une grande longévité résistant aux différentes intempéries. Qui dit esthétique dit coût élevé ! Concernant les panneaux surimposés, les capteurs solaires ne remplacent pas la couverture de la toiture mais sont fixés au dessus du toit à l'aide d'éléments adaptés. Cela revient moins cher à la pose mais c'est aussi beaucoup moins rentable ! A vous de décider si vous voulez investir sur du long terme ou non car chacune des 2 possibilités présente des avantages (et aussi des inconvénients).



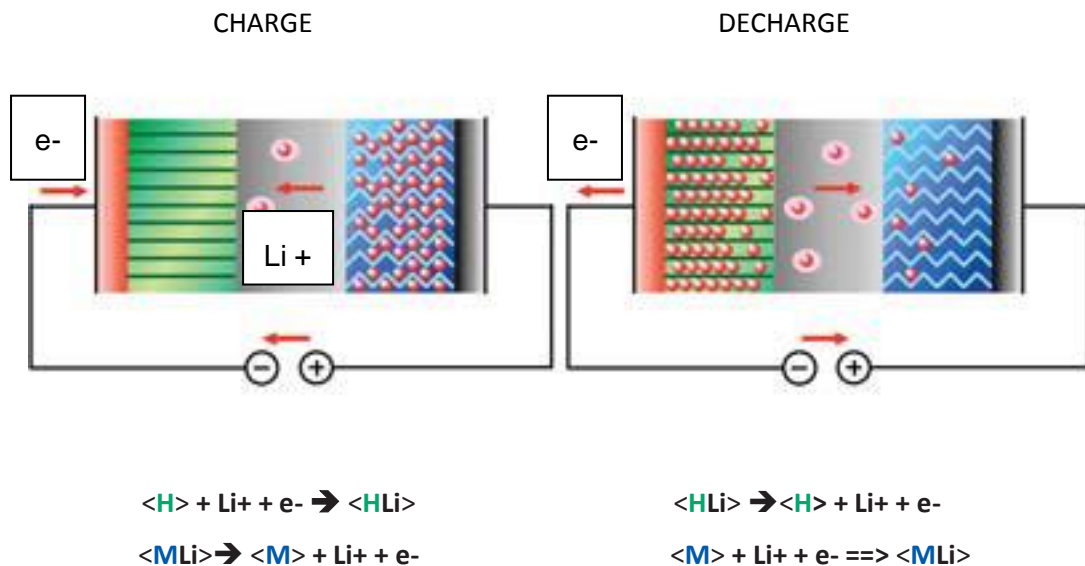
3.1.5. Le stockage, le « BIG » problème

Le stockage en photovoltaïque est, de loin, le maillon faible de toute la technique de l'énergie solaire photovoltaïque. Il est extrêmement coûteux sur le long terme pour un système photovoltaïque autonome. Concrètement, le prix du kWh stocké, le rendement, la facilité de gestion et de maintenance et la durée de vie sont les caractéristiques les plus importantes d'un stockage photovoltaïque.

A l'heure actuelle, la batterie au plomb satisfait plus ou moins ces différents critères. En effet, bien que connue depuis plus de cent ans, elle offre actuellement la meilleure réponse en termes de prix et de durée de vie. La capacité par kg de la batterie au plomb (30 à 40 Wh/kg) est plus faible que les autres techniques (CdNi : 50 à 70 Wh/kg, Lithium ion : 150 Wh/kg), mais ce n'est pas un inconvénient pour les applications stationnaires. En revanche, le prix d'achat des batteries au plomb est 2 à 4 fois moins cher par kWh stocké que le CdNi et 10 à 20 fois moins cher que le NiMh ou lithium. Technologie intéressante sur le plan financier, n'est-ce pas ? Suivant la technologie et l'utilisation des batteries, leur durée de vie peut varier entre deux et douze ans.

Parlons d'avenir... la technologie lithium ion semble prometteuse grâce à sa durée de vie élevée (entre 20 et 25 ans !!!), son fort rendement, sa fiabilité et son absence de maintenance.

Il nous paraît essentiel d'expliquer sommairement le fonctionnement d'une batterie Lithium ion à l'aide d'un schéma suivi de quelques explications.



Principe de fonctionnement :

Le lithium relâché par l'électrode négative (matériau vert avec des barres vertes $\langle H \rangle$) sous forme ionique $Li+$ migre à travers l'électrolyte conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (composé, bleu avec des billes rouges, d'insertion du lithium de type oxyde métallique $\langle M Li \rangle$).

Le passage de chaque ion $Li+$ dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un électron dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique.



Les conditions typiques d'utilisation d'une batterie sont très différentes de celles d'une batterie de démarrage de voiture. En fait, les batteries solaires oscillent lentement entre les niveaux de charge et de décharge contrairement à celles des voitures qui travaillent constamment à pleine charge !

Aujourd'hui, l'axe d'étude est simple : étudier les mécanismes de vieillissement et de corrosion afin d'améliorer sans cesse la durée de vie des batteries.

3.1.6. Avenir du photovoltaïque

Dans ce dernier paragraphe, nous allons dresser un bilan global des points forts du photovoltaïque. Par la suite, nous ferons de même avec ses points faibles. Ceci nous permettra de tirer une conclusion générale sur l'avenir de cette énergie.

Certains avantages apparaissent comme indiscutables :

- Le photovoltaïque a un potentiel illimité. Par exemple, 5% de la surface des déserts suffirait à alimenter toute la planète ! Impressionnant !
- Le photovoltaïque peut s'intégrer partout très facilement pour fournir une puissance de 1 à 5000 Watts. Sans bruit et relativement esthétique, un panneau solaire est considéré tout simplement comme un élément de bâtiment en verre.
- Les panneaux solaires correspondent à des générateurs simples et très fiables. Garantis 25 ans, ils ont une durée de vie bien supérieure car les pièces ne sont pas en mouvement.
- Le photovoltaïque gagne 30% du marché chaque année depuis 1999 grâce à une marge de progrès et d'innovation en constante augmentation.

Cependant, deux inconvénients viennent noircir le tableau...

- Le stockage constitue le gros problème du photovoltaïque.
- Le développement d'équipements adaptés à une très faible alimentation est à peine amorcé de nos jours. La R&D se concentre tellement sur les modules qu'elle en a oublié les équipements alimentés.

Nous voyons par ce bilan que le photovoltaïque a de beaux jours devant lui car ses inconvénients peuvent être éliminés à moyen terme.

Voici quelques chiffres prévisionnels qui nous ont surpris et que nous avons trouvés intéressants d'ajouter à ce dossier afin de conclure objectivement sur le photovoltaïque :

En 2020 :

- 20,7 Gigawatts d'installations photovoltaïques fonctionneront
- le photovoltaïque alimentera un milliard d'habitants dont 30 % des habitants africains.
- 2,3 millions d'emplois seront créés par cette industrie.
- l'investissement sera de 75 milliards d'euros par an.
- 82 millions d'habitants des pays développés dont 35 millions en Europe auront des installations photovoltaïques connectés au réseau

Même si ces chiffres paraissent vraiment très optimistes, nous ne pouvons douter de leur véracité puisque ces prévisions ont été réalisées par un organisme spécialisé dans le domaine : l'EPIA 3 (Association Européenne des Industriels du Photovoltaïque).

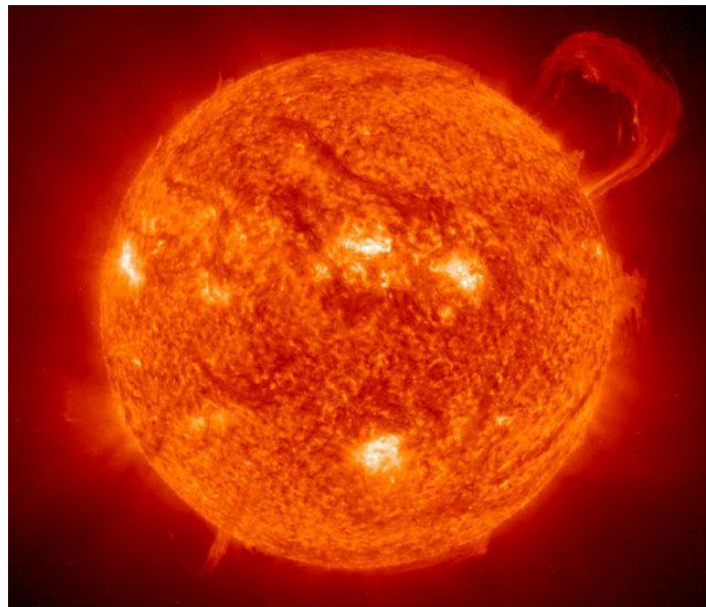


En conclusion, le marché est en expansion, le contexte énergétique, politique et environnemental est très favorable, les applications et les innovations se multiplient, la ressource est quasi illimitée. Alors... remercions notre Soleil de nous fournir une si précieuse opportunité !

« A terme, le solaire va s'imposer. Non par choix idéologique ou souci de l'environnement, mais parce qu'il sera économiquement le plus rentable »

Philippe Malbranche

Spécialiste des technologies solaires au Commissariat à l'énergie atomique (CEA).



3.2. Le véhicule électrique

3.2.1. Présentation

L'évolution des normes anti-pollution ainsi que les problèmes des réserves d'énergie fossile et, en conséquence des prix du pétrole envisagés dans un futur plus ou moins proche, permettent l'avènement de la voiture hybride et la voiture 100% électrique. Malgré ces difficultés, les modèles hybrides connaissent un grand succès depuis le lancement de la Toyota Prius en 1995 tandis que la voiture électrique revient sur le devant de la scène. Et ce, dans un contexte de hausse à long terme de la production automobile, notamment en Asie. En conséquence, les besoins en batteries vont s'accroître fortement et les éléments qui les composent vont devenir stratégiques.

Plusieurs technologies ont vu le jour basées sur du lithium dont la plus connue est la Li-Ion (lithium-Ion). Il existe d'autres variantes : Lithium-Phosphate, Lithium-Polymère. Ces batteries sont plus légères, concentrent plus d'énergie mais coûtent encore assez cher. Elles pourraient le rester si le cours du lithium poursuit son envolée au-delà des 3000 dollars la tonne.



Définition

Une voiture électrique est une automobile mue par la force électromotrice de moteurs électriques, alimentée par une batterie d'accumulateur.

En l'état actuel de la technologie les batteries permettent difficilement d'assurer une autonomie suffisante, et nécessitent des temps de recharges longs (plusieurs heures). Certains véhicules électriques sont donc munis de générateurs électriques internes : moteur thermique classique assurant selon la situation une partie de la traction ou une fonction de groupe électrogène (véhicule "hybride"), pile à combustible ou autre groupe électrogène, éventuellement des panneaux solaires intégrés à la carrosserie pour des véhicules spécialement économes.

La généralisation de ce type de véhicules impliquerait le développement d'équipements collectifs connexes pour la recharge hors de chez soi : stations de recharge (ou d'échange de batteries vides contre des pleines), centrales électriques supplémentaires pour fournir l'énergie électrique se substituant aux carburants actuels, développement massif de l'industrie des batteries, etc. L'industrie automobile (et industries connexes) devrait se modifier profondément.

L'état actuel en France

Aujourd'hui la majorité des voitures électriques est possédée par des entreprises ou par des collectivités territoriales : le principal possesseur de voitures électriques en France est La Poste qui a décidé de tester de nouveaux véhicules électriques : des Cleanova II, basées sur le Renault Kangoo22. La distribution du courrier est particulièrement exigeante pour les véhicules : ces derniers subissent une utilisation urbaine intensive et alternent en permanence départs et arrêts. Leur consommation de carburant est ainsi couramment le double de celle d'un véhicule utilisé « normalement ».

La Poste exploite aujourd'hui un parc automobile de près de 50 000 véhicules légers et utilitaires et pourrait à terme utiliser uniquement des véhicules électriques. Leur silence et l'absence de vibrations sont notamment très appréciés des facteurs. La loi française sur l'air impose à certains acteurs (collectivités territoriales, EPIC et entreprises publiques) un taux de renouvellement de 20 % en véhicules propres, qu'ils fonctionnent à l'électricité ou bien au GNV ou au GPL. La notion de véhicule « propre » est néanmoins contestée par les écologistes qui rappellent qu'un véhicule est toujours polluant, que ce soit du fait de l'utilisation de combustible ou de celui des matériaux utilisés pour construire le véhicule.

Selon Frédéric Marillier, chargé de campagne Énergie pour l'ONG Greenpeace France, « sur plus de 2 000 000 de véhicules particuliers neufs immatriculés en 2006 en France, seuls 14 sont électriques. »

3.2.2. Les difficultés rencontrées liées à la production/utilisation de la voiture électrique

Problèmes liés à la recharge et à la distribution

Les véhicules électriques demandent une refonte très importante du système de distribution d'énergie pour devenir une alternative viable aux véhicules à moteur à combustion interne, pour offrir un nombre de prises et sites de recharge suffisant, et pour permettre une recharge rapide.





Capacité du réseau électrique :

Sauf à voir le prix du photovoltaïque très fortement diminué, l'électricité n'est rentablement disponible en suffisance que la nuit, entre 22 h et 6 h du matin, et plutôt en été.

Capacité de recharge des accumulateurs :

Des prises électriques privées (garage) ou publiques (voirie) peuvent permettre le rechargement, mais le temps de rechargement reste important (toute une nuit, pour une rentabilité optimale). Plus on veut recharger vite, plus la consommation électrique augmente et plus la batterie chauffe. Une solution imaginée à ce problème est l'utilisation de batteries interchangeable, préalablement rechargée la nuit (Système courant sur les chariots élévateurs utilisés jour et nuit). Un changement de batterie est aussi rapide qu'un plein de carburant, et des essais sont en cours au Japon pour un changement automatique de batteries.

Pour le cas des voitures électriques, c'est les accumulateurs au lithium qui sont le plus souvent utilisés car ceux-là sont les plus efficaces :

Un accumulateur lithium est un accumulateur électrochimique dont la réaction est basée sur le lithium.

Il existe deux sortes d'accumulateur lithium : l'accumulateur lithium métal, où l'électrode négative est composée de lithium métallique (matériau qui pose des problèmes de sécurité), et l'accumulateur lithium ion, où le lithium reste à l'état ionique grâce à l'utilisation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative (généralement en graphite) qu'à l'électrode positive (dioxyde de cobalt, manganèse, phosphate de fer). Les accumulateurs lithium polylère sont une alternative aux accumulateurs lithium-ion, ils délivrent un peu moins d'énergie, mais sont beaucoup plus sûrs.

Contrairement aux autres accumulateurs, les accumulateurs lithium ion ne sont pas liés à un couple électrochimique. Tout matériau pouvant accueillir en son sein des ions lithium peut être à la base d'un accumulateur lithium ion. Ceci explique la profusion de variantes existantes, face à la constance observée avec les autres couples. Il est donc délicat de tirer des règles générales à propos de cet accumulateur. Les marchés de fort volume (électronique nomade) et de fortes énergies (automobile, aéronautique) n'ayant pas les mêmes besoins en termes de durée de vie, de coût ou de puissance.

En ce début de XXI^e siècle, cet accumulateur est celui qui offre la plus forte énergie spécifique (énergie/masse) et la plus grande densité d'énergie (énergie/volume).



Mais plusieurs difficultés apparaissent, car ce système imposerait :

- une refonte de la structure des voitures (ergonomie, sécurité lors du changement de batterie),
- une refonte des stations-essence et garages, actuellement non conçus pour rendre ce service.
- de nouvelles normes pour les batteries et le contrôle de leur qualité.
- un doublement (au minimum) du nombre de batteries mises sur le marché pour ces véhicules, et donc une augmentation des prix et des consommations de métaux rares et polluants.

Capacités de recharge de piles à combustibles :

Il nécessite aussi de repenser tout le système de distribution de carburant pour inclure l'hydrogène à la station service.

Selon leur viabilité, qui reste à démontrer, ces systèmes semblent pouvoir être disponible en station-service pour tous, ou seulement pour des flottes captives importantes (services, poste, taxis, zones d'activité, écoquartier, flottes de véhicules partagés) ayant leur propre point de service. Dans tous les cas, il faudra une quantité considérable d'énergie pour remplacer les actuels carburants, avec ce que ça implique comme développement de la production. En France par exemple, 54 millions de tonnes d'équivalent pétrole sont utilisés pour les transports, leur remplacement par de l'électricité supposerait la livraison aux consommateurs d'environ 100 TWh d'électricité soit environ 20% de la production actuelle. Cette énergie allant pour moitié au parc automobile, l'autre moitié allant au transport par camion.

Fin de vie et recyclage

En fin de vie, la dépollution et le recyclage pour les deux systèmes pile à combustible et accumulateurs, n'est écologiquement pas neutre. Les composantes fonctionnelles doivent être recyclées, ce qui comporte un coût autant en énergie qu'en recyclage de matières potentiellement polluantes. Recyclage indispensable dans tous les cas dû aux matériaux utilisés pour la construction des deux systèmes : dans le cas des accumulateurs: plomb, nickel et autres métaux lourds, métaux et produits chimiques pour les piles à combustible. Les batteries s'usent assez vite, cinq années de durée de vie en moyenne, (tout type de batterie confondu).

Mais une grande société appelée Récupyl a mis au point un procédé révolutionnaire capable de récupérer jusqu'à 98% des métaux contenus dans les batteries Lithium-ion qui équipent les téléphones et les ordinateurs portables mais aussi les voitures électriques: *«Les batteries sont broyées mécaniquement avant de passer à travers un aimant qui opère un premier tri. Papiers et matières plastiques empruntent le circuit des filières de valorisation classique tandis que l'acier est directement écoulé sur le marché des matières premières. Les métaux non ferreux, quant à eux, sont séparés par traitement chimique (précipitation sélective en phase aqueuse). **Le rendement est étonnant : Recupyl obtient 130 kg de cobalt, 290 kg d'acier inox, 85 kg de lithium, 80 kg de cuivre et 240 kg de résidus (papier, plastiques) à partir d'une tonne de batteries.** Ce qui permet de remplacer l'extraction et le transport de plusieurs tonnes de minerais. Le procédé s'adapte également très bien aux nouvelles batteries lithium-phosphate de fer actuellement en plein essor. Outre l'aspect récupération de matières premières amenées à devenir de plus en plus rares et chères, le procédé*



Recupyl évite que les métaux polluants contenus dans les batteries usagées, comme le cobalt ou le lithium, ne souillent les milieux naturels » d'après un article du Figaro.

3.2.3. L'avenir du véhicule électrique

Les perspectives du véhicule électrique

Des véhicules électriques tels que les voitures et les bus sans batteries (OLEV (OnLine electric vehicle) ont été testés en Corée en 2009. Leur moteur est alimenté par induction à partir d'une « voie magnétique » alimentée par un réseau de câbles enfouis à quelques cms sous la surface de la route. Et en juillet 2009, le prototype de bus fonctionnait à 60 % de la puissance initiale avec un écart à la ligne de 12 cm. Selon les auteurs de ce projet, il faudrait quand même l'équivalent de deux centrales nucléaires pour ainsi faire rouler 50 % de toutes les voitures de Corée (6 millions de véhicules), ce qui permettrait 35 millions de barils, et 3 milliards d'US dollars économisés par an (au prix de 80 dollars le baril). Les routes et surface des bâtiments proches pourraient un jour produire de l'électricité photovoltaïque pour alimenter de tels systèmes.

Selon l'ONG Transport & Environment les ventes de véhicules électriques ne devraient commencer à être notables que vers 2030 pour atteindre environ 25% des véhicules neufs en 2050. Le problème principal reste le coût et les capacités des batteries qui grèvent la rentabilité des véhicules électriques par rapport aux technologies traditionnelles. L'association pointe aussi le problème de l'alimentation en électricité: en Europe un remplacement complet du parc par des véhicules électriques entraînerait un accroissement des besoins de 15%. Faute d'investissement dans les énergies renouvelables, ce surplus risque de provenir principalement du charbon et du nucléaire.

Le premier véhicule électrique destiné au grand public

Renault a pour ambition d'être le premier constructeur généraliste à proposer des véhicules zéro émission accessibles au plus grand nombre, en d'autres termes de toucher le grand public, et ce le plus tôt possible c'est à dire dès 2011. Le véhicule électrique que Renault propose ne génère aucune émission de CO2 lors de son utilisation. L'alliance Renault-Nissan développe une gamme complète de groupes motopropulseurs 100 % électriques dont la puissance oscillera entre 50 kW et 100 kW (70 ch et 140 ch). En effet pour Renault, le véhicule électrique constitue à terme la vraie réponse aux problématiques actuelles liées à l'environnement et aux nuisances sonores. Les innovations techniques permettent désormais de rendre possible une offre électrique de masse à des coûts raisonnables. En outre, l'évolution des usages fait du véhicule électrique le véhicule idéal pour la majorité des trajets. Il est important de savoir qu'à l'heure d'aujourd'hui, il y a 80 % des européens qui parcourent moins de 60 km par jour.

Renault mise gros sur la voiture électrique. En effet, lors du salon de l'automobile de Francfort, le constructeur français expose pas moins de 4 modèles de voitures électriques qui couvrent tous les segments majeurs. Les voitures électriques de Renault sont : la Fluence (version électrique), la Twizy (une petite voiture urbaine), la Zoé (une berline compacte) et enfin une Kangoo électrique au design neuf.

Parmi toutes ces nouvelles voitures électriques présentées, Renault vient d'annoncer que celui-ci portera une attention particulière à la Zoé. Alors pour ceux qui auraient déjà oublié, la Zoé est une voiture électrique compacte de quatre places, un équivalent électrique de la fameuse Clio. En ce qui concerne les spécifications de cette voiture, Renault n'a dévoilé que très peu d'informations.



Ainsi, on sait juste que la voiture pourra faire du 140Km/h et aura une autonomie qui devrait tourner autour de 160 km. Pour ce qui est du design de la Zoé, là encore on est dans le flou. En effet, la version présentée lors du salon de Francfort n'est qu'un concept et de toute évidence Renault va encore travailler sur l'aspect esthétique de la voiture avant de la commercialiser.

En parlant de commercialisation, Renault a de grands projets pour cette petite berline compacte. Patrick Pélata, un des hommes forts de Renault, a annoncé jeudi dernier que le groupe Renault s'est fixé l'objectif de 100 000 Zoés par an à partir de mi-2012, date à laquelle la voiture devrait être mise en vente. Pour Renault, la Zoé sera une voiture centrale, car avec ses spécifications et son design (compacte 4 places) la Zoé est la voiture qui parlera le plus aux automobilistes. Pour ce qui est du prix de la voiture, Renault annonce que celui-ci devrait être dans les moyens de tout le monde. L'objectif de Renault est de vendre la voiture au même prix qu'une Clio Diesel. On notera que pour atteindre cet objectif de prix aussi bas, Renault compte sur l'aide gouvernementale de 5 000 euros à l'achat des voitures électriques. Toujours sur la commercialisation de la Zoé, Renault annonce que même si la voiture sera vendue, la batterie elle sera louée. Ainsi, pour la somme que comprend le forfait de location, Renault offrira des échanges de batteries et aussi des recharges.



ZOE est la voiture « Zéro Emission » présentée par Renault au salon de Francfort qui sera vendue au grand public.

Les avantages du véhicule électrique

Lors de son utilisation, une voiture électrique ne produit pas directement de gaz polluants ni gaz à effet de serre, de plus elle est peu bruyante à basse vitesse, elle ne consomme pas d'autre énergie à l'arrêt que celle des autres équipements tels que le chauffage, climatisation, sonorisation, phares, équipements de sécurité etc.

Cependant cela reste un objet technique source potentielle de pollutions dans le cadre de sa fabrication, et c'est évidemment un véhicule routier avec ce que cela implique comme impact environnemental (nécessité d'un réseau de routes, parkings et autres infrastructures, coûteux, consommateur d'espace et facteur de fragmentation écologique, roadkill, pollution lumineuse, par les voies éclairées plus que par l'éclairage embarqué).

Spécifiquement, le véhicule électrique pose la question écologique à propos des accumulateurs (production, recyclage, et élimination), et, selon le cas, de la pile à combustible et du carburant de celle-ci, ou de la production d'électricité supplémentaire.

La nature et l'ampleur de ces pollutions dépendent principalement du type d'énergie primaire utilisé pour produire l'électricité (ou le carburant pour la pile à combustible) destiné au véhicule. Le bilan écologique est très différent selon la propreté de l'énergie primaire utilisée, sachant que tout le spectre est possible (charbon, éolien, gaz, hydraulique, nucléaire, pétrole,



solaire...), et que cela peut dépendre tant de la saison que du mode de recharge (rapide de jour ou lente de nuit, en hiver ou en été, la production électrique sollicitée n'est pas la même).

3.2.4. Conclusion

L'évolution des normes anti-pollution ainsi que les problèmes des réserves d'énergie a pour conséquence une augmentation des prix du pétrole dans un futur plus ou moins proche ce qui permet l'avènement de la voiture hybride et la voiture 100% électrique. Il reste néanmoins des problèmes à régler comme l'adaptation du réseau électrique, une augmentation du coût de production plus élevé que les modèles standards de voiture ainsi que le mode de production des centrales électriques en amont (pour faire avancer des voitures électriques si on construit des centrales au gaz, le bilan s'avère moins écologique qu'espéré).

Néanmoins, malgré ces difficultés, les modèles hybrides connaissent un grand succès depuis le lancement de la Toyota Prius en 1995 tandis que la voiture électrique revient sur le devant de la scène. Et ce, dans un contexte de hausse à long terme de la production automobile, notamment en Asie. En conséquence, les besoins en batteries vont s'accroître fortement et les éléments qui les composent vont devenir stratégiques.

Or la technologie a beaucoup évolué ces 15 dernières années. La batterie NiCd (nickel-cadmium) a été délaissée : trop lourde et trop polluante. Elle a été remplacée par la NiMH (nickel-metal hydride) qui permet de stocker 30% d'électricité en plus à masse volumique égale. Les premières batteries NiMH ont été commercialisées en 1990 et le procédé industriel est désormais maîtrisé.

Plusieurs technologies ont vu le jour basées sur du lithium dont la plus connue est la Li-Ion (lithium-ion) qui servent aussi pour d'autres types de batteries comme pour les batteries d'ordinateurs portables ou des caméscopes numériques. Il existe d'autres variantes : Lithium-Phosphate, Lithium-Polymère qui sont peu utilisées pour le moment. Mais ces batteries sont plus légères, concentrent plus d'énergie mais coûtent encore assez cher. Elles pourraient le rester si le cours du lithium poursuit son envolée au-delà des 3000 dollars la tonne.

La voiture électrique reste donc une des solutions contre la pollution et une alternative pour faire face à la future pénurie du pétrole dans un futur assez proche. Il reste néanmoins de nombreux points faibles à améliorer pour que la voiture électrique devienne plus performante et plus accessible au grand public : il faut par exemple qu'il y ait toutes les installations prévues pour accueillir et prendre en charge les besoins éventuels du véhicule (changement de batterie, points de recharges, augmentation de la production de l'électricité par EDF...).

3.3. Les véhicules hybrides

3.3.1. Définition

Un véhicule hybride est un véhicule dans lequel deux sources d'énergie différentes sont intégrées, typiquement on trouve un moteur thermique (moteur des voitures classiques) et un moteur électrique.



Les voitures hybrides peuvent être classées en trois grandes familles d'architecture :

- Les hybrides parallèles, pour lesquels le moteur thermique fournit directement un couple (effort en rotation appliqué à un axe) aux roues,
- Les hybrides séries, pour lesquels le moteur thermique n'est pas directement lié aux roues,
- Les hybrides combinés, dont l'architecture reprend les caractéristiques des hybrides série et parallèles.

On décrira aussi plus loin l'architecture micro-hybride qui est une version allégée de l'hybride parallèle.

Ces différents types d'architectures permettent au véhicule hybride d'exploiter plusieurs fonctionnalités qui peuvent participer à la réduction de la consommation de carburant, ou à la récupération d'énergie électrique.

3.3.2. Les modes de fonctionnement

Le Stop-and-Start nommé aussi Stop-and-Go ou Stop-Start selon les constructeurs:

Cet équipement s'est fait connaître grâce à la Citroën C3 Stop and Start en 2004, mais ce système a maintenant été adopté par d'autres constructeurs. Le principe du Stop and start est simple : lorsque la voiture s'arrête, le moteur s'éteint automatiquement. Ceci permet donc de supprimer la pollution inutile au feu rouge ou dans les embouteillages; en effet le moteur ne pollue que lorsque la voiture roule. On constate donc que ce système permet la disparition de la consommation au ralenti, lorsque le moteur thermique n'est pas utilisé pendant plusieurs secondes. En contrepartie, à chaque démarrage pour ramener le moteur à son régime de ralenti, on utilise une faible quantité d'énergie.

Dans la pratique, si la voiture roule en dessous d'une certaine vitesse (généralement 6 ou 7km/h) et que le conducteur appuie sur la pédale de frein, le moteur essence est coupé. Mais si la climatisation ou le dégivrage est enclenché, le moteur continuera de tourner pour fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement de ces équipements.

Les gains de consommation et d'émissions de CO2 sont en moyenne de 20% en ville et de 5% en cycle normalisé.

Techniquement, le Stop-and-Start se compose d'un alternateur réversible (un alternodémarrreur) qui recharge une batterie spécifique et fait office de moteur électrique (plus puissant qu'un démarreur) pour relancer en silence le moteur essence après chaque arrêt.

Mazda a, de son côté, développé un système Stop and Start (SISS) reposant sur un autre principe. Le moteur est coupé lors de chaque arrêt de la voiture et il redémarre grâce à un démarreur classique. Cette opération est facilitée par une injection d'essence forcée et par la position optimale des pistons. Lors de chaque arrêt, le système les positionne en effet de façon à maximiser et équilibrer le volume d'air dans chaque cylindre, pour un redémarrage plus rapide. Ce dispositif a l'avantage d'être moins coûteux.

Le mode régénération:

Dans ce mode, le moteur électrique fournit un couple négatif, le moteur thermique fournissant alors un couple supérieur au couple demandé par le conducteur. L'énergie provenant du moteur électrique est ensuite stockée dans les batteries, afin d'être réutilisée ultérieurement.



Le mode freinage récupératif:

Le moteur électrique se comporte comme un générateur de forte puissance, en récupérant l'énergie cinétique sous forme électrique. L'énergie électrique ainsi récupérée est stockée dans la batterie du véhicule.

Le mode boost:

Le mode boost correspond à une assistance du moteur thermique par le moteur électrique, celui-ci développant un couple positif conjointement au moteur thermique. Ce mode peut être utilisé lors d'une importante demande de couple, lorsque le moteur thermique développe un couple insuffisant par rapport au couple de consigne. En pratique, ce mode est utilisé lorsque le conducteur demande une forte accélération du véhicule, en effet dans ce cas, le moteur thermique n'est pas suffisant.

Le mode alternateur:

Le mode alternateur correspond au fonctionnement classique d'un alternateur que l'on trouve sur chaque véhicule. Ce système permet de recharger la batterie. Au lieu d'imposer un couple au moteur électrique, on impose une consigne de tension aux bornes de la batterie (ou aux bornes de la supercapacité), le moteur électrique se chargeant ensuite de réguler cette tension.

Le mode thermique pur:

Il s'agit du mode classique durant lequel le moteur électrique n'est pas utilisé. Ce mode peut être utilisé pour des raisons de rendement (par exemple, lors d'un trajet sur autoroute, pour lequel le moteur thermique est utilisé à un bon rendement), ou bien parce que la batterie est déchargée.

Le mode électrique pur:

Il s'agit du mode pour lequel le moteur thermique est arrêté. Dans ce mode, les conséquences directes sont l'absence de bruit, l'absence de rejet de polluants ("zéro émission"), et une consommation de carburant nulle. La durée durant laquelle ce mode pourra être actif dépend de la capacité de la batterie. Si celle-ci est faible, ce mode pourra être activé durant quelques minutes tout au plus, le moteur thermique devant alors être rallumé pour ramener la batterie à un état de charge correct.

3.3.3. Les différentes architectures

Architecture parallèle :

Dans la configuration parallèle, les moteurs thermique et électrique sont tous deux directement connectés à la transmission, donc aux roues. Les deux moteurs peuvent participer d'une façon parallèle au déplacement du véhicule, en transmettant chacun une puissance mécanique aux roues.

Cette architecture est composée d'un moteur thermique, d'un moteur électrique, d'une batterie, d'un inverseur, et d'une transmission (boîte de vitesse et embrayage).



L'emplacement du moteur électrique peut être différent : celui-ci peut être situé au niveau des roues avant, ou bien en liaison avec le train arrière, pour obtenir alors un véhicule à quatre roues motrices.

Une architecture hybride parallèle est complexe à contrôler, puisque sur l'architecture hybride parallèle les deux sources de couple (moteur thermique et moteur électrique) sont directement reliées au train moteur, la consigne de couple devant donc être répartie à chaque instant entre les deux sources de couple.

Néanmoins, des gains non négligeables peuvent être obtenus, même en utilisant des composants électriques de faible puissance et de faible capacité. Ces gains permettent aussi de compenser le surcoût de cette architecture et le sur-poids lié aux batteries et au moteur électrique.

Sur cette figure est représenté le schéma de principe de l'architecture parallèle, ainsi que les transferts d'énergie possibles entre les différents organes.

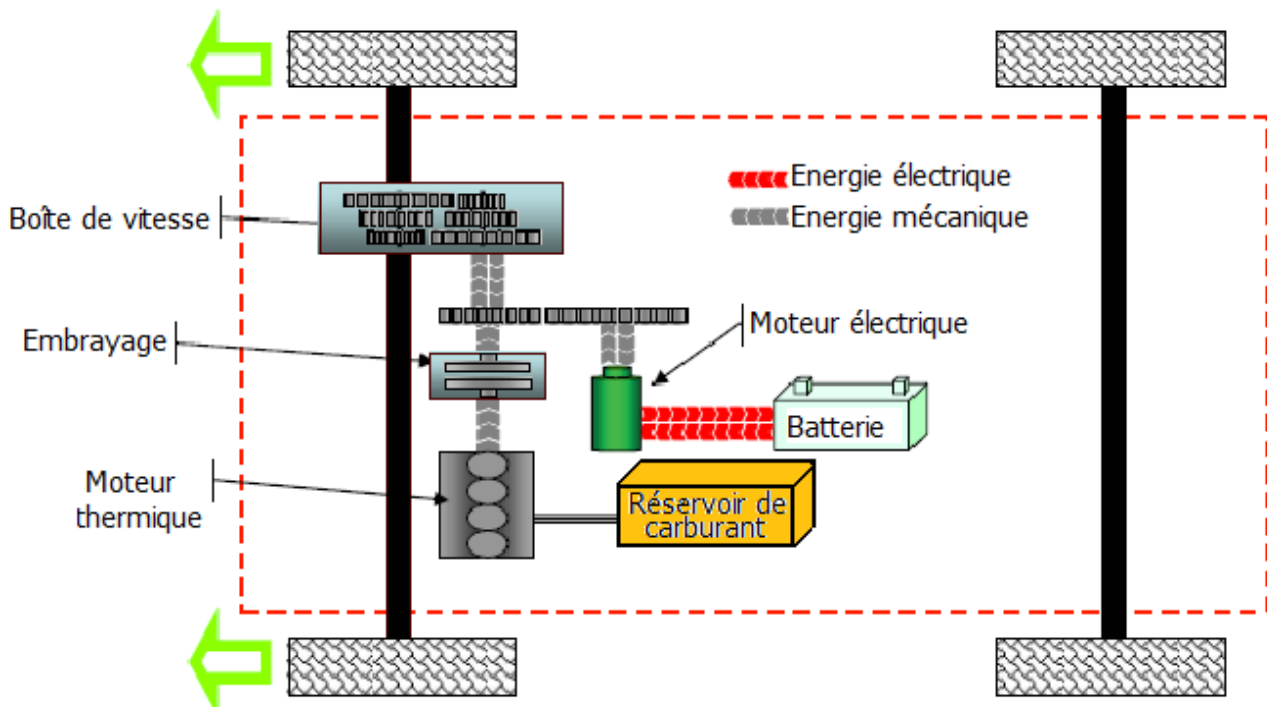


Schéma de principe de l'architecture hybride parallèle.

Architecture micro-hybride

L'architecture micro-hybride correspond à une version allégée de l'hybride parallèle, pour laquelle le moteur électrique reste constamment mécaniquement lié au moteur thermique. La liaison pourra s'effectuer de diverses manières : par engrenage, ou bien par courroie.

C'

'est en fait la forme la plus simple des différentes architectures hybrides, puisque les véhicules micro-hybrides sont essentiellement des véhicules conventionnels équipés d'un alterno-démarrreur, permettant notamment de profiter du Stop-and-Start et éventuellement du freinage récupératif.

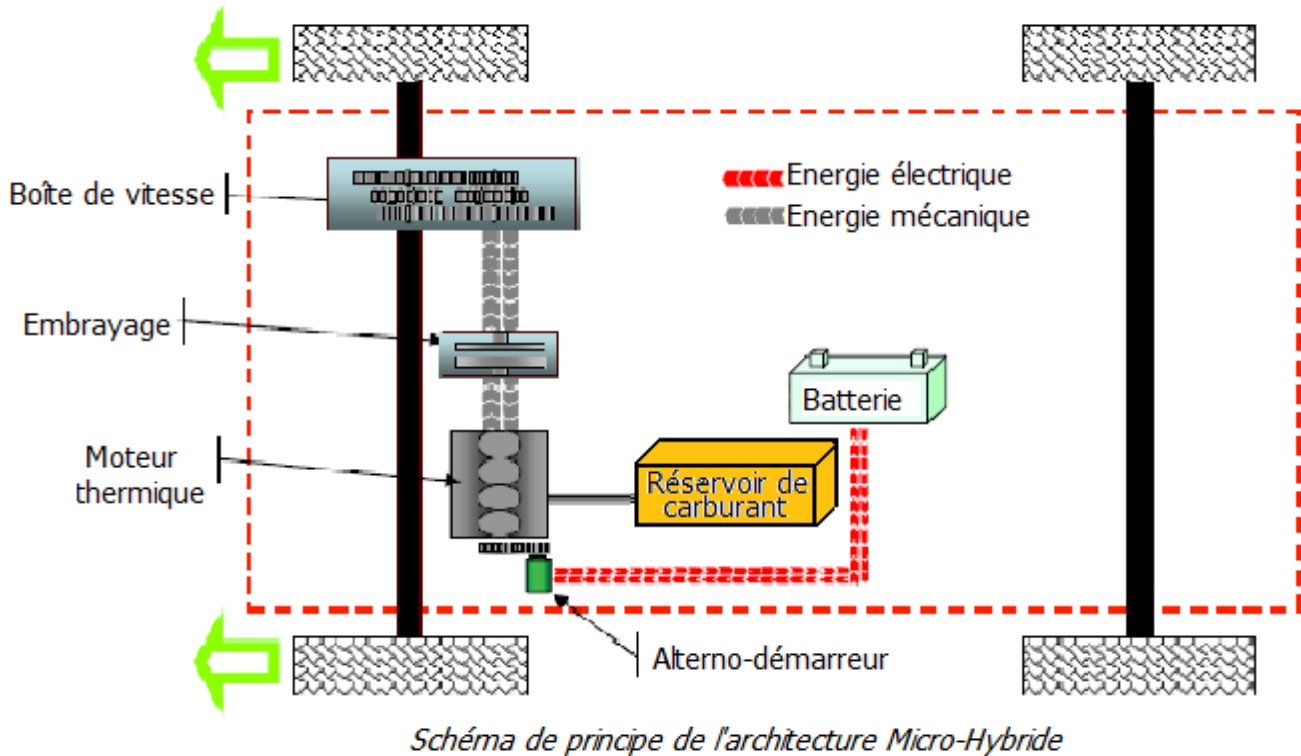
Les inconvénients majeurs de cette architecture résident dans le fait qu'il n'est pas possible d'utiliser le moteur électrique seul pour la propulsion du véhicule, notamment à faible charge lorsque l'efficacité du moteur thermique est faible.

De plus, l'énergie qui peut être obtenue lors d'un freinage récupératif sera amputée par le couple de frottement du moteur thermique (pertes par pompage et frottements moteur), puisque le moteur



thermique ne peut être désaccouplé du moteur électrique, ce qui réduit la quantité d'énergie récupérable.

Cette figure représente l'architecture micro-hybride, composée d'un moteur thermique et d'un moteur électrique en liaison directe avec le moteur thermique.



Architecture série

Dans l'architecture série, seul le moteur électrique est connecté directement aux roues et leur transmet un couple. Le moteur électrique assure donc seul la traction du véhicule, selon la demande de couple du conducteur.

Le moteur électrique est alimenté soit par des batteries, soit par une génératrice entraînée par le moteur thermique, soit par un mélange des deux. Cette configuration permet à la batterie d'être rechargée soit :

- par le moteur thermique, grâce à la génératrice. Dans ce cas, le moteur thermique est contrôlé de manière à fonctionner à son rendement optimum.
- par le moteur électrique, qui sera alors utilisé en mode générateur, lors d'un freinage récupératif.

L'intérêt de cette architecture est de pouvoir faire fonctionner le moteur thermique au point de fonctionnement souhaité, quelles que soient les conditions extérieures telles que la vitesse du véhicule ou la demande de couple, puisque le moteur thermique est complètement déconnecté du train moteur.

En revanche, l'énergie mécanique produite par le moteur thermique est ensuite transformée en énergie électrique grâce à la génératrice, puis à nouveau transformée en énergie mécanique par le moteur électrique. Ainsi, la cascade de rendement du train moteur est assez défavorable à la



réduction de l'énergie consommée, c'est pour cette raison que les véhicules hybrides série dépassent rarement le stade du prototype.

Cette figure schématise le fonctionnement d'un véhicule hybride série.

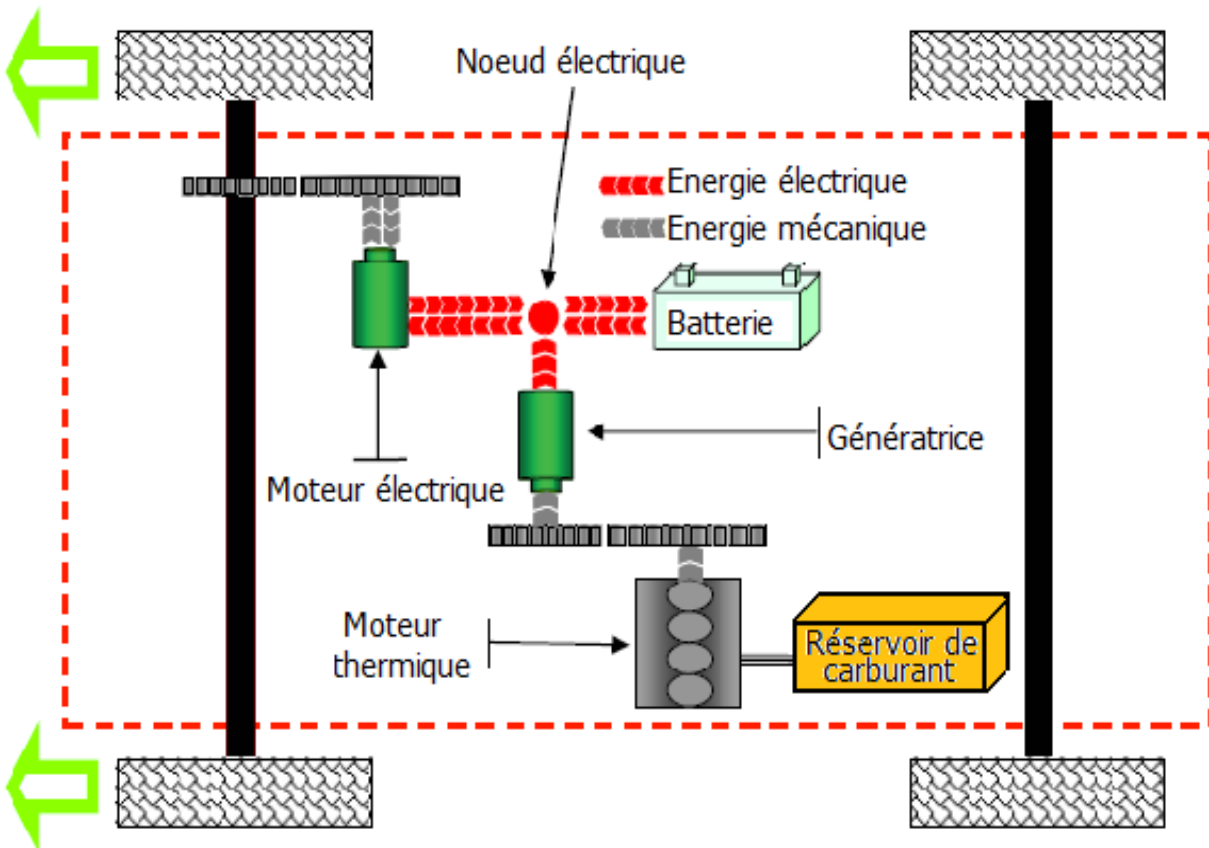


Schéma de principe de l'architecture hybride série

Architecture combinée

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle, dont la Toyota Prius fait partie. Appelée aussi hybride parallèle à dérivation de puissance, cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un coté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler le régime du moteur thermique, et de partager son couple entre les demandes du véhicule, et la recharge de la batterie.



Cette figure schématise le fonctionnement d'un hybride combiné.

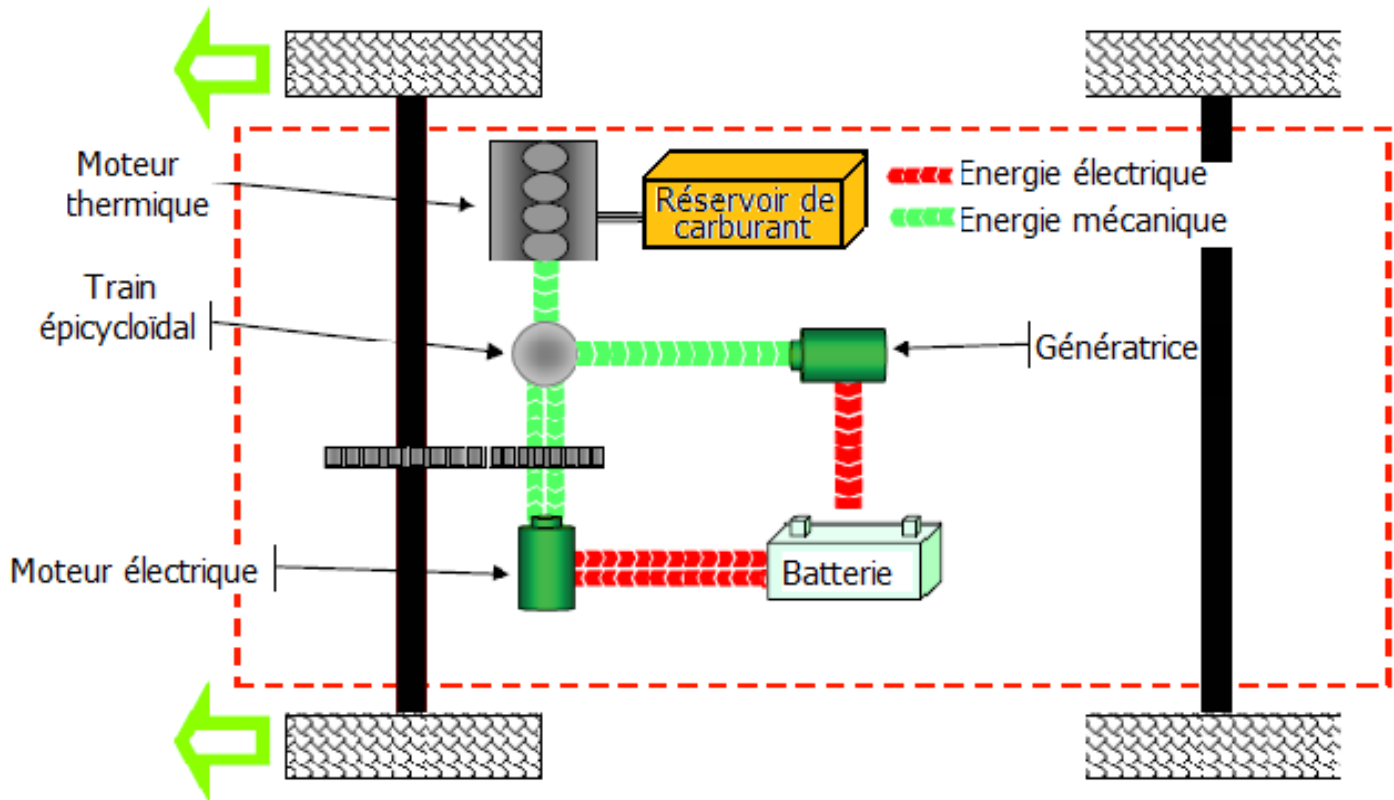


Schéma de principe de l'architecture de l'hybride combinée

Autres architectures

On trouve quelques autres architectures, qui restent souvent au stade de prototypes, mais dont le potentiel est assez intéressant.

- Architecture de type parallèle, avec moteurs dans les roues. Plusieurs constructeurs ont déjà présenté des prototypes de véhicules hybrides dont deux moteurs électriques, ou d'avantage, sont localisés dans les roues. D'un point de vue énergétique, cette solution est idéale, puisque les moteurs sont situés au plus près du point de transmission finale de la puissance, qui se trouve au niveau du point de contact entre le pneu et la route. Cet emplacement permet notamment d'éviter de subir les rendements des transmissions, qui réduisent sensiblement l'énergie récupérable. Parmi les autres intérêts de cette architecture, chaque roue peut être contrôlée indépendamment des autres, ce qui peut être intéressant pour l'utilisation de l'ESP (Electronic Stability Program, système de stabilisation du véhicule en courbe, agissant sur les systèmes de freinage pour corriger la trajectoire du véhicule).
- Les architectures hébergeant plusieurs trains épicycloïdaux, permettant une variation continue des rapports.



3.3.4. Avantages

Cette technologie récente, qui devrait de plus en plus se répandre sur le marché automobile européen, a de nombreux avantages.

D'abord, l'utilisateur consomme sérieusement moins avec la possibilité d'effectuer près de 1000 km avec un seul plein. Ainsi, les Toyota Prius et Honda Civic Hybride ont des consommations annoncées de moins de 5 litres/100 km.

Le conducteur sait en permanence quelle énergie est utilisée pour mouvoir son véhicule. Il peut régler sa consommation et devenir acteur de sa propre pollution. Les commandes sont gérées par un système électronique et peuvent être surveillées grâce à un affichage "spécial multifonctions".



Les moteurs hybrides offrent également de nouvelles sensations avec des accélérations linéaires, et puissantes. Le système hybride fait entrer la voiture dans «le monde du silence». La réduction du bruit engendré est réelle. Sans oublier la souplesse au démarrage grâce à l'utilisation du moteur électrique sollicité pour les faibles vitesses.

En plus, les voitures hybrides permettent d'utiliser les avantages d'un véhicule électrique tout en résolvant les problèmes d'autonomie. Une auto de type hybride "parallèle" offre deux sources de motorisation indépendantes : un moteur électrique et un moteur thermique. Tous deux entraînent les roues de façon indépendante.

Il faut savoir aussi qu'en France, un crédit d'impôt supplémentaire est accordé pour l'achat d'un véhicule hybride.

Enfin, le comportement des automobilistes devrait changer avec ce type de véhicule privilégiant la sécurité active. Ces nouvelles voitures assistent tellement le conducteur que ce dernier se focalise davantage sur son environnement. Il peut faire plus attention aux autres conducteurs.

3.3.5. Inconvénients

Bien sûr, il existe aussi des inconvénients, en effet, il est parfois difficile de trouver son compte dans ces nouvelles technologies.



L'effort financier supplémentaire demandé, lors de l'achat, par rapport à un modèle dit «classique» est légèrement compensé par les économies en consommation de carburant. Ainsi, la Toyota Prius (berline familiale) avoisine tout de même les 27.000 euros.

D'autre part, comparé à une transmission classique, la motorisation hybride fait appel à des pièces supplémentaires comme la batterie hybride, laquelle prend de la place et alourdit le véhicule.

Sur autoroute, l'avantage de l'hybride est moins frappant. Le moteur électrique est alors peu ou pas sollicité. Il en va de même lors de conditions météorologiques difficiles (le grand froid). Notons que la motorisation hybride reste, même dans ces situations, plus avantageuse malgré la diminution des performances.

De plus, les accumulateurs électrochimiques de ces véhicules n'auraient pas une durée de vie aussi longue que le véhicule lui-même, il faudrait donc changer ceux-ci une ou plusieurs fois avant le recyclage total du véhicule, ce qui entraînerait un surcoût de maintenance et une obligation importante de recyclage pour le fabricant. Cependant, des marques proposant les systèmes hybrides garantissent spécifiquement le système hybride dont la batterie (8 ans ou 160 000 km pour la Prius en France, 8 ans et kilométrage illimité (999 999 km) pour la Honda Civic IMA).

Il est important de savoir que ce qui peut paraître comme un sérieux plus peut aussi s'avérer dangereux. En effet, lorsque les voitures hybrides se déplacent en ville, elle ne marche quasiment qu'à l'électrique ce qui réduit fortement leur pollution sonore. Pour des piétons distraits, le danger est réel car ils ne vont pas entendre la voiture arriver.

Enfin, le haut voltage des batteries d'une voiture hybride est potentiellement dangereux lors d'un accident.

3.3.6. Avenir

La RATP fait des essais sur un bus prototype construit par MAN, ce bus est équipé du Stop-and-start et du freinage récupératif ce qui permettrait de réduire la consommation de 20 à 25%.

Les supercapacités qui permettent le stockage de l'énergie récupérée sont situées sur le toit, tandis que la chaîne de traction électrique se situe à l'arrière.

Dans la famille des autobus « verts », ce prototype paraît aujourd'hui nettement plus prometteur. Rien qu'aux États-Unis plus d'une cinquantaine de villes font aujourd'hui circuler des bus hybrides, dont New-York, San Francisco et Long Beach, où de grosses commandes ont été passées dès 2005. Les différents retours d'expérience et les progrès réalisés par les constructeurs devraient permettre à la RATP de franchir plus facilement le pas, si les essais en cours lui paraissent concluants.

Concernant les autos, beaucoup de constructeurs misent actuellement sur cette technologie, comme Renault avec la Hybrid4 présentée dernièrement au salon de l'auto de Paris. Cette voiture présenterait une consommation de 4,1L/100km soit 109g de CO₂/km rejetés.





Mais attention, si ce choix stratégique peut paraître pertinent à court terme, sa viabilité à moyen et long terme reste difficile à évaluer. Avec sa motorisation qui allie énergie fossile (essence ou diesel) et énergie renouvelable (électricité), l'hybride pourrait se voir rapidement concurrencée par la voiture 100% électrique.

En effet, si la "voiture électrique pour tous" est longtemps apparue comme une utopie, elle semble aujourd'hui de plus en plus envisageable. Le développement de batteries nouvelle génération, couplé à la volonté de repenser la bonne vieille station essence, met l'électrique sur de bons rails.

Aujourd'hui, des constructeurs comme Renault/Nissan, Mercedes ou encore GM, investissent dans des voitures utilisant les nouvelles batteries lithium-ion qui offrent des perspectives d'autonomie (160km) et de recharge (environ 20 minutes) particulièrement intéressantes. Évidemment, la technologie n'est pas tout, c'est pourquoi des travaux en termes d'infrastructures sont nécessaires. Le Portugal se prépare d'ores et déjà à construire 1300 stations de charges, d'ici à 2011. Mieux encore, plusieurs sociétés rivalisent d'inventivité pour répondre aux insuffisances de la technologie électrique actuelle. Better Place, par exemple, propose des stations qui remplaceraient la batterie vide des voitures par une pleine. Une manipulation qui prend 1min13s avec des véhicules adaptés, au lieu des 20 minutes nécessaires à la recharge.

L'électrique est donc dans les starting blocks. Si ce dynamisme s'accompagne d'une volonté politique de soutenir un réel changement structurel, la durée de vie de l'hybride pourrait bien réduire considérablement. Une situation que n'accepteraient probablement pas ceux qui ont le plus misé sur l'hybride. Passer à l'électrique avant d'avoir pu exploiter correctement le filon de l'hybride serait un échec économique. On en finirait presque par se demander si la voiture hybride ne va pas devenir un frein à l'émergence de la voiture verte.

3.4. Les biocarburants

Les biocarburants sont au cœur du débat sur les énergies renouvelables. En effet, ils représentent une source supplémentaire de carburant, favorable à l'indépendance énergétique et, éventuellement, substitut au pétrole qui se raréfie. C'est également un débouché agricole et une activité agro-industrielle nouvelle, séduisante en période de crise économique.



3.4.1. Généralités

Un biocarburant ou agrocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse. L'expression « biocarburant » indique ainsi que ce carburant est obtenu à partir de matière organique, par opposition aux carburants issus de ressources fossiles. L'expression « agrocarburant » indique, elle, que le carburant est obtenu à partir de produits issus de l'agriculture. « Agrocarburant » est donc le plus souvent utilisé pour marquer la provenance agricole de ces produits, et la différence avec les produits issus de l'agriculture bio.

Il existe actuellement deux filières principales :

- filière huile et dérivés (biodiesel) ;
- filière alcool, à partir d'amidon, de cellulose ou de lignines hydrolysées.

Pour utiliser ces carburants dans les moteurs, deux approches sont possibles :

- Soit on cherche à adapter l'agrocarburant (par transformation chimique pour obtenir du biodiesel par exemple) aux moteurs actuels, conçus pour fonctionner avec des dérivés du pétrole ; c'est la stratégie actuellement dominante mais elle n'a pas le meilleur bilan énergétique ni environnemental.
- Soit on cherche à adapter le moteur au biocarburant naturel, non transformé chimiquement. Plusieurs sociétés se sont spécialisées dans ces adaptations. La substitution peut être totale ou partielle. Le moteur Elsbett fonctionne par exemple entièrement à l'huile végétale pure. Cette stratégie permet une production locale et plus décentralisée des carburants, mais nécessite la construction d'une filière entièrement nouvelle.

3.4.2. Les techniques de formation des biocarburants

La filière huile

De nombreuses espèces végétales sont oléifères comme le palmier à huile, le tournesol, le colza, le jatropha ou le ricin. Les rendements à l'hectare varient d'une espèce à l'autre. L'huile est extraite par pressage (écrasement) à froid, à chaud, voire (pour un coût plus élevé) avec un solvant organique.

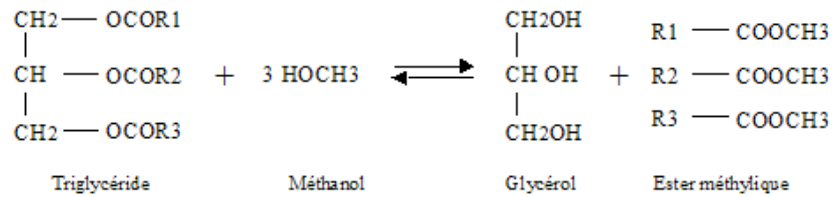
Deux grandes voies d'utilisation sont ouvertes :

- L'huile végétale brute (HVB, ou HVP) peut être utilisée directement, dans les moteurs diesels, pure ou en mélange, mais, notamment à cause de sa viscosité relativement élevée, l'utilisation d'une fraction d'huile importante nécessite l'usage d'un moteur adapté.
- Le biodiesel qui est obtenu par transestérification.

Il s'agit de la réaction d'un ester sur un alcool pour donner un autre ester. Dans l'industrie, on peut transestérifier l'huile de colza ou l'huile de tournesol pour obtenir des biocarburants. La transestérification des triglycérides (constituants majeurs des lipides contenus dans les huiles) avec du méthanol ou de l'éthanol produit des Esters d'Huile Végétale, respectivement méthyliques (EMHV) et éthyliques (EEHV), dont les molécules plus petites peuvent alors être utilisées comme carburant dans les moteurs Diesel, sans modification de ce moteur.



La transestérification :



C'est une réaction renversible, catalysée par un acide ou une base. Pour rendre la réaction complète, on met un gros excès de l'alcool R2-OH qui sert souvent de solvant (Mécanisme de la réaction de transestérification en annexe).

Le biodiesel ne contenant ni soufre, ni métaux lourds, il n'est pas toxique et hautement biodégradable. Le raffinage du biodiesel et du glycérol permet d'obtenir un composé second, le méthanol ; il n'a pas d'utilité comme carburant mais peut être récupérable dans la réaction de transestérification.

Le Diester® (pour DIEsel esTER) est une marque déposée concernant les esters méthyliques d'huiles de colza et tournesol à usage de carburant ou de combustible. Il est Incorporé à plus de 2% dans les gazoles et il améliore le pouvoir lubrifiant de ceux-ci vis-à-vis des organes d'injection des moteurs diesel.

La filière alcool

Cette filière correspond à la fermentation de sucres. De nombreuses espèces végétales sont cultivées pour leur sucre : c'est le cas par exemple de la canne à sucre, de la betterave sucrière, du maïs, ou encore du blé.

Le bioéthanol est obtenu par fermentation de sucres par des levures du genre Saccharomyces.

Le glucose qui constitue les sucres est transformé en pyruvate par une voie métabolique appelée glycolyse qui a lieu dans les cellules de tous les organismes vivants. Les voies de transformation chimique dans les cellules vivantes se font par réactions chimiques toutes catalysées par des enzymes (schéma de la glycolyse en annexe).

En présence d'oxygène, ce pyruvate est ensuite dégradé en CO₂ et H₂O. Mais certaines cellules sont capables de transformer le pyruvate, et fournir de l'énergie à la cellule, en absence d'oxygène : c'est ce qu'on appelle la fermentation. Suivant les cellules, les réactions de fermentation sont différentes. Chez certains microorganismes, comme la levure, cette voie est appelée fermentation alcoolique

La fermentation alcoolique :

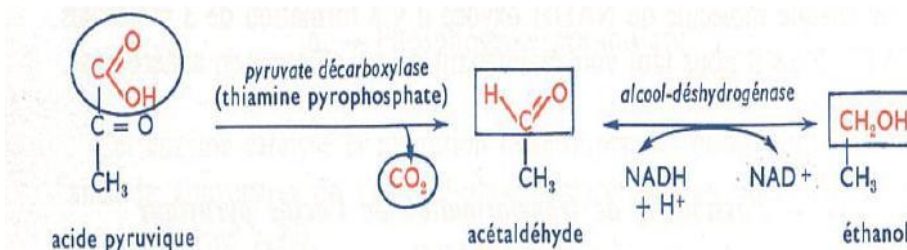


FIG. 4-31. — Transformation de l'acide pyruvique en éthanol.



L'éthanol peut remplacer partiellement ou totalement l'essence. Une petite proportion d'éthanol peut aussi être ajoutée dans du gazole, donnant alors du gazole oxygéné, mais cette pratique est peu fréquente.

L'éthyl-tertio-butyl-éther (ETBE) est un dérivé de l'éthanol. Il est obtenu par réaction entre l'éthanol et l'isobutène et est utilisé comme additif à hauteur de 15 % à l'essence en remplacement du plomb. L'isobutène est obtenu lors du raffinage du pétrole. Le biobutanol (ou alcool butylique) est obtenu grâce à la bactérie *Clostridium acetobutylicum* qui possède un équipement enzymatique lui permettant de transformer les sucres en butanol-1 par une voie métabolique appelée la fermentation acétonobutylique (schéma en annexe).

On peut constater que du dihydrogène et d'autres molécules sont également produites et peuvent être récupérées : acide acétique, acide propionique, acétone, isopropanol et éthanol. Les entreprises BP et DuPont commercialisent actuellement le biobutanol ; il présente de nombreux avantages par rapport à l'éthanol et est de plus en plus souvent évoqué comme biocarburant de substitution à l'heure du pétrole cher. De plus, les unités de production du bioéthanol peuvent être adaptées pour produire le biobutanol.

3.4.3. Le bilan économique et environnemental

Les chiffres de l'année 2008

En 2008, les biocarburants mélangés aux produits pétroliers classiques ont représenté 5,71% de l'ensemble des carburants vendus en France. Ceci correspond pratiquement à l'objectif français visé pour 2008, soit 5,75% d'incorporation.

Le biodiesel et le bioéthanol ont représenté 3,3% du contenu énergétique des carburants consommés en Europe pour les transports routiers.

Le bilan environnemental

Le bilan environnemental des biocarburants comporte trois aspects principaux :

- l'économie d'énergie fossile et la réduction des gaz à effet de serre (GES).
- l'effet environnemental des cultures (eau, sol, déforestation, biodiversité ...).
- l'effet sur la pollution.

En fait il semblerait que la seule production écologique et économique d'éthanol soit celle du Brésil, à partir de canne à sucre. En effet les réductions des rejets de CO₂ atteignent 90 % à 95 % par rapport à l'essence. L'éthanol américain, lui, produit à partir de maïs réduirait les rejets de seulement 13 % en moyenne. Le gain serait d'environ 50 % à partir de betteraves. En ce qui concerne le biodiesel, il serait de 40 à 60 % à partir de colza en Europe. Le bilan environnemental reste donc mitigé.

Le bilan socio-économique

La production d'agrocaburant augmente la demande de produits agricoles, avec deux effets principaux :

- déplacement éventuel de la production, de l'alimentation vers l'industrie, dont certains estiment que cela pourrait provoquer une hausse des prix alimentaires voire une pénurie



- alimentaire, avec des conséquences sociales ;
- augmentation de la demande de terres cultivées qui entraînerait une hausse des prix.

On comprend ainsi que la production de biocarburant comporte des risques écologiques et sociaux !

Pour surmonter ces problèmes, certaines start-ups se sont tournées vers les biocarburants de troisième génération. Ce sont des cultures conçues dans un seul but de production de carburant, comme les herbages vivaces, les arbres à croissance rapide et les algues. Ces plantes ne sont normalement pas cultivées pour un usage agroalimentaire, et contiennent un pourcentage particulièrement élevé de biomasse.

3.4.4. Les algues : un haut rendement sans concurrence pour la terre

Les biocarburants sont depuis quelques années portés en avant, mais leur production via les oléagineuses ne pourrait couvrir à elle seule nos besoins énergétiques.

La principale critique avancée concerne la surface cultivée nécessaire. En effet, pour répondre aux 49,35 millions de tonnes équivalent de pétrole consommés par le transport par an en France, il faudrait cultiver 118 % de la surface totale du pays en tournesol ! Même constat avec la production de biocarburants par alcools végétaux (bioéthanol), nécessitant 120% de la surface totale du pays. De plus, l'utilisation de produits phytosanitaires et les risques annoncés de conflits agroéconomiques avec les cultures alimentaires rappellent que les biocarburants ne peuvent que représenter une solution de transition, et non remplacer totalement les combustibles fossiles.

Dès la fin des années 70, les Etats-Unis se sont penchés sur la production de nouveaux carburants, afin de prévoir le déclin du pétrole. Leurs études, menées sur les micro-algues, ont jeté les bases d'une source de biodiesel prolifique. Aujourd'hui, différentes entreprises et laboratoires de recherche poursuivent ce travail, en cherchant à optimiser la bioproduction et les techniques d'extraction, de la micro-algue à la pompe.

Production de biocarburant par les micro-algues

Le choix des micro-algues part d'un premier constat : de nombreuses espèces naturelles sont riches en triglycérides. En produisant suffisamment de biomasse, il suffirait de récolter ces micro-algues et d'en extraire ces huiles. Il serait alors possible de cultiver massivement, dans de grands bassins en plein air ou dans des bioréacteurs, ces bio-usines cellulaires à carburant.

Les premières recherches sur les algues riches en huiles débutent en 1978, aux Etats-Unis, alors que le pays traverse la crise du peak-oil. Le Department of Energy's Office of Fuel Development fonde un programme de recherche, l'Aquatic Species Program (ASP), afin d'évaluer la faisabilité d'une production de biodiesel à partir de micro-algues. Ces micro-organismes peuvent se montrer particulièrement prolifiques : certains d'entre eux sont capables d'accumuler 50 à 80 % de leur poids sec en lipides. L'ensemble de ces travaux sont désormais publiés librement sur le site Internet du National Renewable Energy Laboratory (NREL, 1998), et constituent un document de référence.

Les micro-algues utilisent la photosynthèse pour biosynthétiser des sucres (saccharose, cellulose, ...) ou des lipides (voie de synthèse des triglycérides). Les recherches menées partent du constat qu'en cas de carence en macro-nutriments, la croissance est ralentie et la voie de biosynthèse des triglycérides est favorisée. Les algues croissent alors peu et accumulent en proportion beaucoup de lipides (NREL, 1998). Les triglycérides obtenus sont extraits des algues



(rendement de 70% par première pression) puis subissent une transestérification pour donner du biodiésel algal.

Les avantages

Les micro-algues présentent de nombreux avantages : leur biomasse double généralement en 24h, mais les plus forts temps de génération en phase de croissance exponentielle approchent les 3,5h. Il est donc possible d’effectuer de régulières récoltes en fonction de la croissance en bioréacteur, contrairement aux végétaux supérieurs.

La production à grande échelle de biomasse micro-algale s’effectue généralement par culture continue, en utilisant l’énergie solaire. Il s’agit de cultures en conditions autotrophes, nécessitant un apport en milieu de culture à taux constant. Les ressources nécessaires (le dioxyde de carbone, sels inorganiques et de l’eau) sont peu onéreuses.

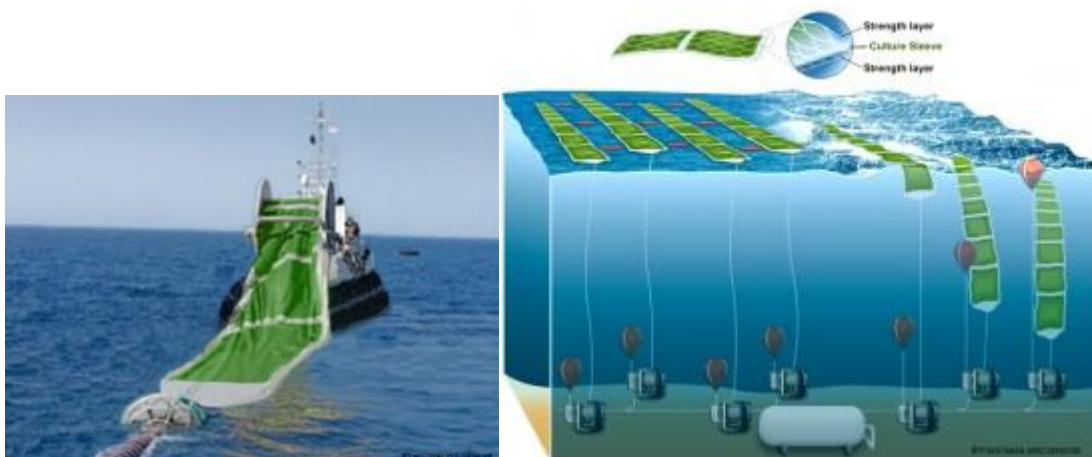
La Nasa adapte une technologie spatiale à la culture d’algues

La Nasa met une technologie spatiale au service d’un projet Cleantech particulièrement innovant de culture de microalgues à même d’optimiser la production de biocarburants.

L’idée consiste à cultiver des microalgues dans des sacs plastiques contenant des eaux usées et flottant en pleine mer. De quoi faire d’une pierre trois coups : assurer la croissance des algues donc, mais aussi traiter les eaux usées municipales, et enfin séquestrer au passage du dioxyde de carbone.

Les algues sont placées dans des sacs plastiques remplis d’eaux usées. Ces sacs répondent au nom d’Omega pour « Offshore membrane enclosures for growing algae ». Les sacs Omega sont constituées de membranes semi-perméables ayant été développées par le passé pour recycler les eaux usées des astronautes lors de voyages de longue durée dans l’espace.

Les membranes laissent l’eau douce traitée s’échapper dans l’océan, mais empêchent l’eau salée de pénétrer dans le sac.



Les microalgues dans les sacs se nourrissent des nutriments contenus dans les eaux grises. Les « plantes marines » nettoient l’eau et produisent dans le même temps des lipides qui engendreront en bout de processus du carburant. Comme une culture de microalgues sur terre, les sacs Omega utilisent l’eau, l’énergie solaire et le CO₂, lequel est absorbé à travers la membrane plastique, pour produire du sucre que les algues assimilent par réaction métabolique pour générer des corps gras.



L'oxygène et l'eau traitée à l'issue du processus traversent la membrane pour rejoindre les eaux de l'océan. Si les membranes venaient à lâcher, l'eau salée des mers se chargerait de tuer les algues malencontreusement dispersées.

Un pilote est prévu pour être déployé à Tampa Bay en Floride. Les sacs ont une durée de vie de trois ans, après quoi ils peuvent être recyclés en paillis pour l'agriculture. Le premier démonstrateur Omega est prévu pour voir le jour avant la fin du premier semestre 2010.

SHAMASH : un programme français de production de biocarburant issu de micro-algues

Le projet SHAMASH, soumis à l'ANR (dans le cadre du Programme National de Recherche sur les Biotechnologies), vise à produire un biocarburant sous forme de monoester méthylique à partir de micro-algues autotrophes. Un thème de recherche entièrement inédit en France, combinant les compétences de différents laboratoires et instituts de recherche. Comparées aux plantes oléagineuses, les micro-algues représentent plusieurs arguments forts :

- Les rendements de croissance et de production à l'hectare seraient supérieurs d'un facteur 30.
- Le rendement photosynthétique est beaucoup plus élevé.
- La plasticité métabolique des micro-algues facilite l'orientation de la bioproduction cellulaire vers certains acides gras d'intérêt.
- Aucun apport phytosanitaire n'est nécessaire, et les éléments nutritifs (azote, phosphore ...) peuvent être recyclés pour en maîtriser l'apport.
- Cette production peut générer de nombreux sous-produits valorisables. La technologie est exploitable par les pays en voie de développement.

Le programme, doté d'un budget de 2,8 millions d'euros pour 3 ans (2007-2010). Les objectifs retenus n'envisagent pas d'améliorer génétiquement les micro-algues productrices. A l'inverse, les objectifs visent la sélection par la génomique et l'écophysiologie des souches à forte productivité en acides gras, la synchronisation des cultures par le cycle lumineux solaire et l'optimisation de photobioréacteurs clos dédiés à ce type de culture. Enfin, la mise en place de techniques de séparation et d'extraction adaptées aux huiles de micro-algues (mais respectueuses de l'environnement) permettrait au final d'augmenter les rendements tout en diminuant le coût des installations nécessaires. Le biodiésel produit doit être compétitif par rapport aux filières oléagineuses terrestres afin de remporter également le défi économique.

Bilan économique et limites

Le coût de production d'un baril de biodiésel algal est estimé à 100 \$ (NREL, 1998). Mais tout dépend de sa méthode de production, ainsi que des améliorations apportées à l'avenir.

Le biodiésel algal est donc un candidat sérieux dans la recherche de sources énergétiques renouvelables et de biocarburants. Reste cependant à améliorer ses systèmes de production, pour que ces premières initiatives se transforment en véritable production de masse !



3.5. Le moteur à hydrogène

3.5.1. Généralités sur les piles à combustibles

Qu'est-ce qu'une pile à combustible ?

Les piles à combustibles sont des dispositifs dans lesquels se réalise par voie électrochimique une réaction de combustion. Le combustible le plus couramment utilisé est le dihydrogène, mais on peut également utiliser des hydrocarbures.

Prenons l'exemple de la combustion du dihydrogène. Lorsque l'on brûle ce dihydrogène, selon l'équation $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$, on ne peut récupérer que de la chaleur. Il faut donc utiliser une autre méthode pour produire de l'énergie électrique.

Pour cela, il faut réaliser les deux demi-réactions de la combustion du dihydrogène, celles-ci s'effectuant dans deux demi-piles, séparées par un électrolyte. La 1^{ère} demi-réaction est la réaction d'oxydation d'un combustible réducteur sur une électrode (l'anode). La 2^{ème} correspond à la réduction d'un oxydant sur l'autre électrode (la cathode).

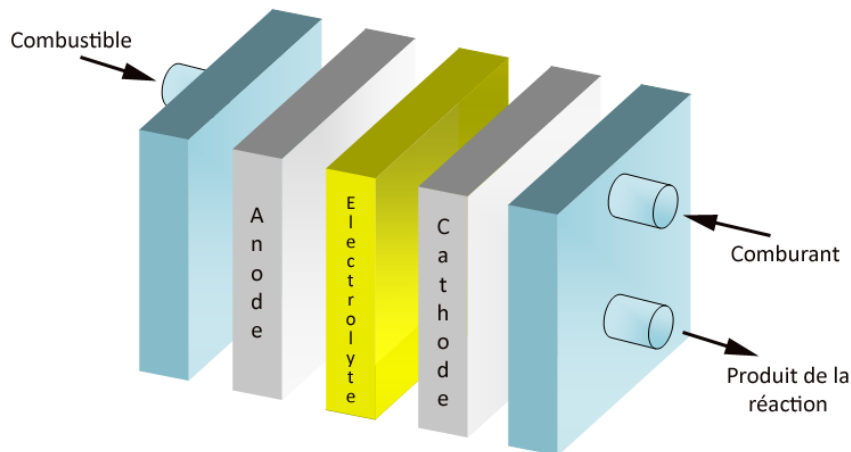


Schéma d'une pile à combustible

Une pile à combustible peut fonctionner de façon continue en l'alimentant en combustible et comburant au niveau des deux électrodes, et en retirant le produit formé au fur et à mesure (par exemple l'eau dans le cas d'une pile à hydrogène).

La pile à combustible fonctionne donc comme un véritable transformateur : conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. La puissance fournie par une pile à combustible est généralement de l'ordre du kilowatt, mais cela varie en fonction du type de pile.

Structure des piles

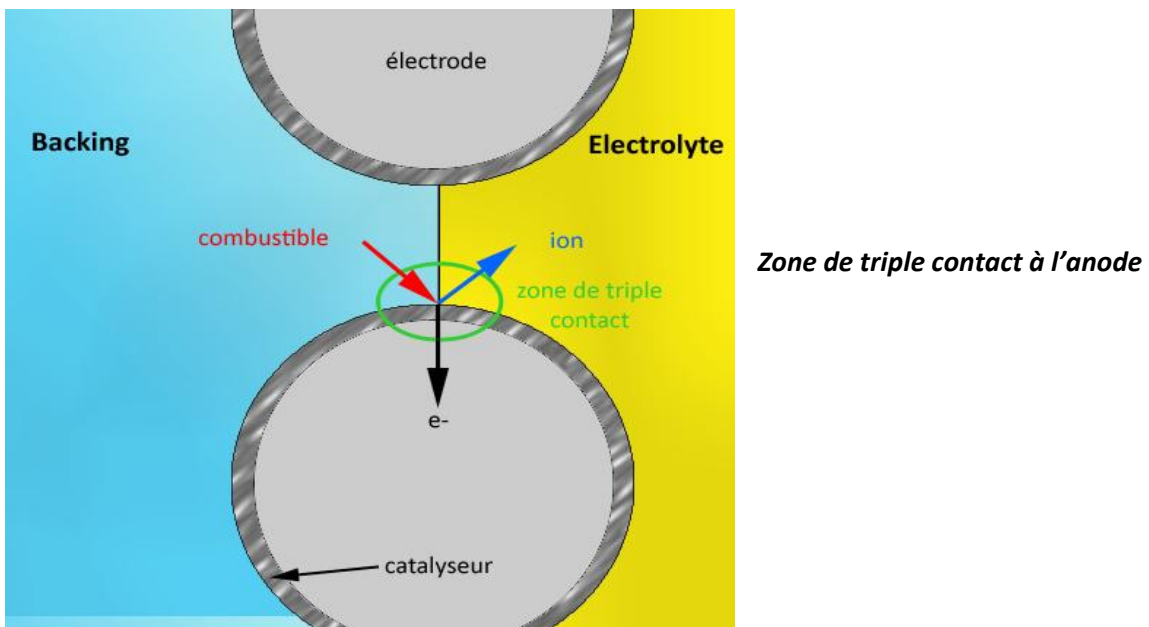
Tous les types de piles à combustibles possèdent une structure géométrique propre. En effet les composants de ces différentes piles ont un agencement spécifique suivant le type de pile mais



aussi une composition différente. Cependant on peut généraliser la structure d'une pile à combustible. Celle-ci se compose toujours des éléments suivant :

- des électrodes
- de l'électrolyte
- des backings
- des plaques bipolaires

La principale zone de la pile, qui est le siège des deux réactions d'oxydo-réduction, se nomme la zone de triple contact. Cette zone est le point de rencontre de l'électrolyte (qui permet le passage des espèces ioniques), des électrodes (ainsi que du catalyseur qui facilite les échanges d'électrons) et de l'arrivée des réactifs.



Les électrodes

Une pile est composée de deux électrodes : l'une est reliée à la borne négative de la pile, c'est l'anode. Elle est le siège de la réaction d'oxydation. L'autre, c'est-à-dire la cathode, est reliée à la borne positive de la pile. Elle est le siège d'une réaction de réduction. Cependant, comme ces deux réactions électrochimiques ont une cinétique très lente, on doit utiliser des catalyseurs sur les électrodes afin d'accélérer le processus d'échange d'électrons (ceci correspond à l'étape lente de la réaction). De plus la vitesse de ces réactions dépend aussi de l'état de la surface des électrodes ainsi que de la facilité des réactions à se faire. Théoriquement on pourrait aussi faciliter les échanges d'électrons en augmentant la température, mais cela ajouterait de nouvelles contraintes sur les matériaux.

Les électrodes sont le plus souvent faites à partir d'un composé carboné, le charbon actif. Cependant, le charbon actif tend à être remplacé, dans un futur plus ou moins proche, par des nanotubes de carbone. En effet, ces nanotubes ont l'avantage de permettre une meilleure absorption de l'hydrogène ainsi que d'augmenter la conductivité électrique de l'électrode. De plus, il possède une meilleure tolérance au monoxyde de carbone (dans le cas des PEMFC, les électrodes sont rapidement « empoisonnées » par le CO).



Comme nous l'avons vu précédemment, il faut ajouter un catalyseur sur les électrodes afin de faciliter la réaction. Celui-ci dépend du type d'électrode de la pile, mais aussi du combustible ainsi que de la température et de divers autres facteurs.

A l'anode, les catalyseurs les plus souvent utilisés pour les piles de basse et moyenne température (entre 80 et 200°C) sont des métaux précieux comme le platine (catalyseur le plus utilisé), le palladium, le rhodium ou bien un alliage constitué de nickel et d'aluminium appelé Nickel de Raney. Afin de diminuer les coûts, des recherches sont effectuées afin de remplacer le platine, ou d'en diminuer la quantité utilisée (notamment avec des alliages de platine). Pour les piles de haute température (c'est-à-dire à des températures supérieures à 600°C), des métaux moins chers, comme le fer ou le nickel, peuvent être utilisés.

Au niveau de la cathode, on utilise le plus souvent pour des piles de basse et moyenne température, soit des métaux précieux (comme à l'anode), soit des métaux de transition (comme le chrome) ou encore du charbon actif avec de l'or. Pour les piles de haute température, le nickel fritté (une poudre de nickel dont les grains sont soudés entre eux, mais sans fusion) est généralement utilisé.

L'électrolyte

Un électrolyte est une substance conductrice (soit liquide, soit solide) qui rend possible la migration d'ions spécifiques, d'une électrode à l'autre. Les électrolytes liquides sont des électrolytes aqueux dans lesquels les ions proviennent de sels qui ne sont constitués que d'ions (ex : l'hydroxyde de potassium, KOH, se décompose en 2 ions : K^+ et HO^-). Les électrolytes solides sont, quant à eux, des cristaux dans lesquels certains ions sont mobiles ou bien des polymères (ex : membrane échangeuses d'ions).

Le type d'électrolyte choisi détermine la température de fonctionnement de la pile. Par exemple, une pile avec un électrolyte à membrane polymère fonctionne à une température de 80°C, une pile à acide phosphorique fonctionne à des températures avoisinantes les 200°C, et une pile à électrolyte solide (par exemple une céramique solide) doit fonctionner à très haute température (environ 1000°C).

Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires sont généralement fabriquées en graphite ou avec des métaux. Mais ces matériaux possèdent quelques inconvénients : le graphite est friable et poreux ; les métaux sont oxydables. La fabrication de ces plaques, réalisée par usinage, coûte très cher. C'est pour cette raison que des recherches sont effectuées afin de trouver un nouveau matériau capable de résister à l'acidité, la température ainsi qu'à la pression qui règne au cœur des piles. Une des solutions envisagée consiste à concevoir les plaques bipolaires avec un matériau composite. Ce nouveau matériau prend la forme d'une poudre à base de thermoplastique (pour le liant) et de carbone (pour la conductivité électrique). Ce nouveau matériau est très prometteur car il possède une très bonne conductivité électrique ainsi qu'une résistance mécanique et à la température assez élevée. De plus la technologie utilisée, c'est-à-dire la thermocompression, pour la fabrication de ces plaques possède les avantages, par rapport à l'usinage, d'obtenir un design des canaux parfait, ainsi qu'un temps de fabrication divisé par deux et dont le coût est dix fois moins élevé.

Les plaques bipolaires ont plusieurs fonctions. Elles doivent tout d'abord permettre le transport du courant électrique généré par la pile, mais aussi assurer les connexions électriques entre les différentes cellules individuelles. Elles ont aussi un rôle d'étanchéité entre l'anode et la cathode, car il ne doit pas y avoir de contact entre le combustible et le comburant. Elles facilitent la distribution du gaz et favorisent un apport homogène des ces gaz au niveau des électrodes. Comme il



Y a fabrication d'un produit à la cathode (généralement de l'eau), les plaques bipolaires doivent en assurer son évacuation afin d'éviter la formation de bouchon.



Plaques bipolaires moulées en matériau composite

Les backings ou couche de diffusion

Les couches de diffusion sont constituées de tissus, feutres ou papiers de carbone. Elles sont aussi recouvertes sur une face, dites couche active, de carbone platiné et de polytétrafluoroéthylène (PTFE), plus connu sous le nom de *Téflon*. Ce polymère est un polymère thermoplastique qui possède des propriétés de résistance thermique et chimique assez remarquable.

Les couches de diffusion ont un triple rôle. Elles doivent diffuser le gaz sur les électrodes, permettre le transfert des électrons (pour collecter le courant produit) et assurer la gestion de l'eau, c'est à dire son évacuation ainsi que l'humidification de la membrane.

3.5.2. Les différents types de piles à combustibles

Principe et fonctionnement d'une PEMFC

Description de la pile :

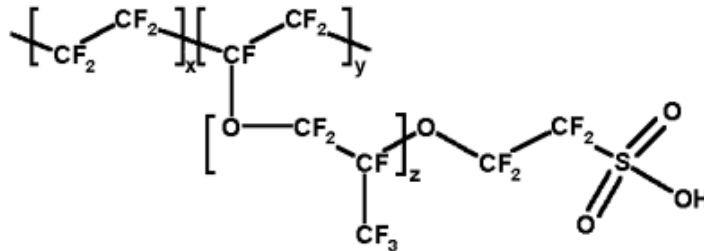
Une pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC) est une pile fonctionnant à basse pression (entre 1 et 5 bars) et à basse température (entre 80 et 100°C). Cette pile est constituée d'une membrane polymère ionique (électrolyte), des électrodes, des couches de diffusion et des plaques bipolaires.

Les électrodes sont recouvertes de platine. Ce métal a été choisi pour plusieurs raisons. Premièrement la PEMFC fonctionne à basse température. Par conséquent les électrodes doivent catalyser les réactions d'oxydation du combustible et de réduction du comburant, et de ce fait le platine s'impose car c'est un excellent catalyseur. Deuxièmement, comme on veut que les électrodes soient stables dans le temps, c'est-à-dire qu'elles ne se détériorent pas, et que la membrane est très acide, on doit utiliser un catalyseur qui ne subit pas la corrosion. Donc le platine est finalement la seule solution à ces problèmes. Malheureusement, le platine est un métal noble et rare, ce qui en



fait un matériau très coûteux. D'autant plus qu'il faut utiliser plusieurs grammes de ce métal par pile (il faut entre 0.1mg et 1mg de platine par cm^2 d'électrode).

L'électrolyte utilisé dans les PEMFC est une membrane échangeuse de protons, c'est-à-dire une membrane organique. Cette membrane est aujourd'hui fabriquée avec du Nafion™. C'est un polymère carboné perfluoré (c'est-à-dire dans lequel tous les atomes d'hydrogène ont été remplacés par des atomes de fluor) sur lequel a été greffé des groupements sulfonates (SO_3^{2-}). Cette membrane a une épaisseur d'environ 200 μm .



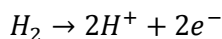
Molécule de Nafion™

Des recherches sont effectuées pour essayer de trouver une solution de substitution qui répondrait mieux aux exigences d'une PEMFC que le Nafion™. Le but est de réduire substantiellement le prix (le Nafion™ coûte actuellement près de 700€/m²), mais également d'améliorer la résistance mécanique (pour mieux résister à des pressions supérieures à 1bar), la conductivité ionique (facilité à faire passer les protons), une meilleure résistance aux arrêts et redémarrages de la pile (pour augmenter sensiblement sa durée de vie).

Au final, la structure d'une PEMFC sera composée d'une cellule élémentaire solide de quelques centaines de micromètres d'épaisseur. Une cellule élémentaire est l'assemblage d'une anode, d'un électrolyte, et d'une cathode. A cette cellule élémentaire, il faut aussi ajouter les couches de diffusion et les plaques bipolaires.

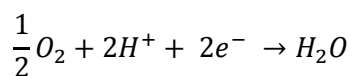
Les réactions :

Dans le cas de notre PEMFC, qui comporte un électrolyte acide, on a oxydation de l'hydrogène à l'anode, selon l'équation suivante :

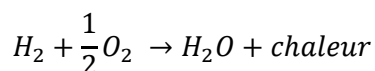


Pour ce faire, cette réaction a besoin d'un catalyseur : le platine. L'atome d'hydrogène s'oxyde en libérant deux électrons, qui vont circuler dans le circuit électrique entre l'anode et la cathode et ainsi créer un courant électrique.

A la cathode, il se produit la réaction de réduction de l'oxygène, selon l'équation :



L'équation globale de la réaction donne donc :



Nous allons maintenant calculer l'enthalpie libre (ΔG) de la réaction, ce qui nous permettra ensuite de calculer la tension délivrée par la pile.



L'enthalpie libre est égale à :

$$\Delta G = \sum_i v_i \mu_i$$

μ_i : potentiel chimique (en kJ/mol)

v_i : coefficient stœchiométrique

Par convention, le potentiel chimique du dioxygène et du dihydrogène est nul. Le potentiel chimique de l'eau dépend de son état :

$$\mu(H_2O_{(l)}) = -237 \text{ kJ/mol} \text{ et } \mu(H_2O_{(g)}) = -229 \text{ kJ/mol}$$

On obtient alors une enthalpie libre de la réaction égale à -237 kJ/mol pour de l'eau sous forme liquide et -229 kJ/mol pour de l'eau sous forme gazeuse.

Tension :

Si l'ensemble de l'enthalpie libérée pouvait être retrouvée sous la forme d'une différence de potentiel, la tension théorique délivrée par la pile serait :

$$E_{th} = -\frac{\Delta H}{n\mathcal{F}}$$

n : le nombre d'électrons

\mathcal{F} : constante de Faraday égale à 96 485 C/mol

Or l'enthalpie de l'eau liquide est égale à -285 kJ/mol et celle de l'eau gazeuse est de -242 kJ/mol .

On arrive donc à des tensions théoriques de 1.48V et 1.25V, pour, respectivement, l'eau liquide et l'eau gazeuse.

En fait, d'après le second principe de la thermodynamique, la part correspondant à l'entropie ne peut pas être transformée en travail électrique. Or ce travail est égal à la variation d'enthalpie libre au cours de la réaction chimique, soit :

$$W = -\Delta G \quad (1)$$

Or le travail maximal récupérable (W) correspond au déplacement des électrons dans le circuit extérieur (donc de l'anode vers la cathode). Il est égal à :

$$W = n\mathcal{F}(E_a - E_c) \quad (2)$$

E_a : potentiel à l'anode

E_c : potentiel à la cathode

On en conclut, en remplaçant dans (1) et (2), que la tension maximale récupérable est :

$$E_{rec} = -\frac{\Delta G}{n\mathcal{F}}$$

Soit une tension théorique de 1.23V si l'eau a été formée sous forme liquide, ou 1.18V si l'eau a été formée sous forme gazeuse.

Rendement :

Le rendement total de la pile est le produit du rendement thermodynamiquement idéal de la pile, du rendement faradique, du rendement électrique, du rendement matière et du rendement système.



Le rendement idéal de la pile est égal à :

$$\eta_{id} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

On a vu précédemment qu'à 25°C, on a :

$$\Delta G(H_2O_{(l)}) = -237kJ/mol$$

$$\Delta G(H_2O_{(g)}) = -229kJ/mol$$

$$\Delta H(H_2O_{(l)}) = -285kJ/mol$$

$$\Delta H(H_2O_{(g)}) = -242kJ/mol$$

A 25°C, on a donc un rendement de 83% si l'eau est liquide et de 94,6% si l'eau est sous forme gazeuse.

Le rendement électrique correspond à l'existence de surtensions aux électrodes et de résistance dans l'électrolyte. Ce rendement est égal à :

$$\eta_{elec} = \frac{U}{E_{réc}} \text{ avec } U: \text{ tension de la pile}$$

Le rendement faradique tient compte du nombre d'électrons effectivement obtenus par mole de combustible présent. Avec de l'hydrogène, on a un rendement de 1, car on a bien les deux électrons attendus (pas de réaction parasite).

Le rendement matière concerne l'utilisation des réactifs au niveau des électrodes. Pour avoir un rendement parfait, il faudrait que chaque cellule élémentaire (ensemble membrane-électrode) reçoive la même quantité de combustible et de comburant à la même vitesse, car comme ces cellules sont montées en série, s'il y a un défaut sur une des cellules, cela se répercutera automatiquement sur toutes les autres et donc, par conséquent, affectera le rendement.

Le rendement système correspond à la consommation de tous les appareils périphériques à la pile (compresseur, système de contrôle, ...).

Prenons l'exemple d'une PEMFC fonctionnant à 80°C avec de l'hydrogène et avec une tension de 0.7V. Le rendement idéal de la pile sera de 0.94 (avec de l'eau sous forme liquide), le rendement électrique sera de 0.57 ($\eta_{elec} = \frac{0,7}{1,23} = 57\%$), le rendement faradique sera, comme nous l'avons vu précédemment, de 1. On peut prendre un rendement supérieur à 0,9 pour le rendement matière, et enfin le rendement système sera pris à 0,8.

Au total, le rendement général de la pile sera égal à :

$$\eta_{pile} = \eta_{id} * \eta_{elec} * \eta_{far} * \eta_{mat} * \eta_{sys}$$

Le rendement général de la pile est donc de 39%. Ceci est une moyenne assez basse du rendement de la PEMFC (le rendement peut-être supérieur à 50%). Il faut tout de même dire que le rendement



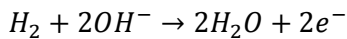
d'une PEMFC est beaucoup plus élevé que celui d'un moteur thermique (qui varie à son maximum entre 25 et 30%).

Les autres types de piles

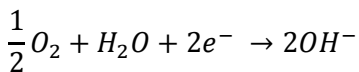
Les piles à combustibles alcalines (AFC) :

Les AFC sont l'une des techniques de piles à combustible les plus utilisées dans le monde. Ceci est notamment dû au fait qu'elles ont commencé à être développées dans les années 1950 (elles ont été utilisées dans des véhicules militaires).

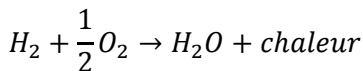
La réaction d'oxydo-réduction se fait entre l'hydrogène et l'oxygène, comme pour les PEMFC, à la seule différence que l'électrolyte utilisé est basique. A l'anode l'hydrogène est oxydé, selon la réaction :



Cette réaction produit de l'eau et lâche deux électrons qui circulent jusqu'à la cathode. A ce niveau, il y a réduction de l'oxygène suivant la réaction :



La réaction globale est donc :



La pile AFC possède un électrolyte liquide de type alcalin, qui est généralement une solution d'hydroxyde de potassium (KOH). Un des avantages de cette pile réside dans le fait qu'elle permet l'utilisation de métaux non précieux comme catalyseur, tel que le nickel de Raney pour l'anode, et uniquement du charbon actif pour la cathode.

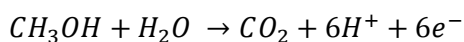
Son inconvénient majeur est qu'elle est très sensible au dioxyde de carbone. Il faut, par conséquent, utiliser de l'oxygène et de l'hydrogène pur (élimination totale du CO₂) afin de ne pas « empoisonner » la pile.

Sa température de fonctionnement est d'environ de 80 à 90°C (comme pour la PEMFC), mais celle-ci peut-être plus élevée (environ 200°C) dans le cas d'un fonctionnement sous-pression ou avec un électrolyte très concentré.

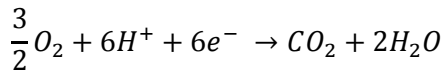
Les piles à combustibles à méthanol direct (DMFC) :

Les DMFC sont un type de pile à combustible relativement nouveau qui, à la différence des autres piles où l'hydrogène est oxydé à l'anode, sont alimentées directement en méthanol. C'est en effet un des rares réactifs, avec l'hydrogène, qui possède des caractéristiques d'oxydation suffisante pour fonctionner dans des piles basse et moyenne température.

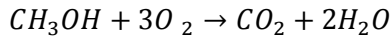
Au niveau de l'anode, le méthanol est oxydé et forme du dioxyde de carbone, selon la réaction suivante :



Les électrons circulent dans un circuit externe jusqu'à la cathode, ce qui permet de produire de l'électricité. Les ions H^+ sont transportés au travers de l'électrolyte jusqu'à la cathode, afin de réagir avec l'oxygène, selon la réaction :



L'équation bilan de ces deux demi-réactions donne donc :



La pile DMFC possède un électrolyte acide, qui peut-être, soit une membrane polymère comme avec une PEMFC (ce qui est le plus courant), soit un électrolyte acide. Elle a une température de fonctionnement assez basse (entre 90 et 120°C).

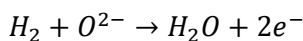
L'un des avantages majeurs de la DMFC par rapport aux PEMFC est le fait qu'elle fonctionne au méthanol, ce qui signifie qu'il n'y a pas besoin de construire de nouvelles infrastructures pour distribuer ce carburant (les installations existantes pour l'essence sont suffisantes).

Cependant cet avantage reste à nuancer à cause du faible rendement de ce type de pile (de l'ordre de 20%) ainsi que de sa faible puissance. En contrepartie, elle possède une grande capacité de stockage.

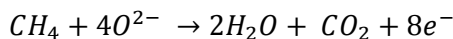
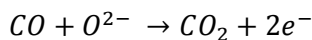
Les piles à combustible à oxyde solide (SOFC) :

Les piles SOFC sont le type de pile qui semble avoir le meilleur potentiel, que ce soit au niveau technique ou au niveau des applications. Au niveau des applications, outre une utilisation stationnaire, elles peuvent être intégrées dans une voiture en tant que générateur d'électricité pour les appareils de bord (climatisation,...), mais pas encore en tant que système de propulsion. Elles fonctionnent à des températures élevées, allant de 700°C à plus de 1000°C.

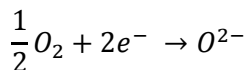
La réaction d'oxydation qui se produit à l'anode est la suivante :



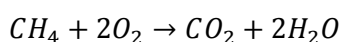
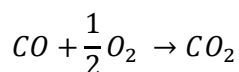
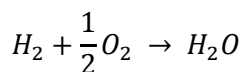
Il peut également se produire une autre réaction d'oxydation, si le réactif utilisé n'est pas du dihydrogène. En effet, on peut utiliser un autre combustible comme le méthanol, le gaz naturel, ou autre, qui forme après reformage un gaz contenant principalement du dihydrogène et du monoxyde de carbone.



Ensuite, la réduction qui se produit à la cathode est :



Les différentes équations bilan donnent :



Une pile de type SOFC utilise un électrolyte solide qui est généralement de la zircone stabilisé à l'yttrium ($ZrO_2 + Y_2O_3$). Ce type de céramique, une fois chauffé à haute température, présente une bonne conductivité ionique.

Les électrodes ont une composition assez complexe. L'anode est une céramique métallique à base de nickel et de zircone. La cathode est un mélange de terre rare (lanthanide) et de métaux de transition (manganèse). Le plus couramment utilisé est le manganite de lanthane et strontium.

Les piles de type SOFC possèdent d'indéniables avantages, comme l'insensibilité à la présence de monoxyde de carbone dans le dihydrogène, un rendement très élevé (qui peut atteindre 80%, mais généralement de l'ordre de 55-60%), mais aussi le fait de pouvoir utiliser divers carburants. Des recherches sont actuellement menées dans ce sens, notamment sur les biogaz (méthanol, éthanol) et divers autres carburants (gaz naturel, ...). D'autres recherches sont effectuées afin de diminuer la température de fonctionnement, et donc de diminuer les contraintes thermiques, ce qui pourrait permettre l'utilisation de matériaux moins coûteux.

3.5.3. Application à l'automobile

Les avantages des piles à combustibles

Aujourd'hui, les piles à combustibles sont considérées comme la solution du futur dans les domaines de l'énergétique et de l'automobile. Ceci est justifié par les nombreux avantages qu'elles présentent :

- Elles ont de très bons rendements énergétiques.
- Elles ne sont presque pas polluantes.
- Elles sont très silencieuses.
- Elles peuvent fonctionner à de basses températures
- Elles sont modulables
- Elles n'ont presque pas besoin d'entretien.

Un bon rendement énergétique :

Actuellement, le rendement énergétique d'une pile à combustible varie entre 30 et 80%, suivant le type de pile utilisé. Cependant cette valeur doit être revue à la baisse car il faut tenir compte de la consommation des appareils périphériques (pompes, reformeur, ...). On doit aussi souligner le fait que le rendement énergétique d'une pile à combustible est indépendant de sa taille.

La comparaison du rendement énergétique entre un moteur thermique et une pile à combustible est assez délicate, car il y a peu de données disponibles à cause du faible nombre de véhicules équipés avec une pile à combustible en circulation. Une première comparaison peut-être faite à partir des rendements maximaux. En effet, un moteur thermique a un rendement qui se situe entre 25 et 30%, alors qu'une PEMFC à un rendement compris entre 35 et 50%.

Cependant, pour effectuer une comparaison plus convenable, il faut tenir compte de toute la chaîne énergétique. On doit donc comparer les rendements de ces différents moyens de propulsion en tenant compte du carburant (extraction, transformation, distribution) et du système lui-même. Comme il n'y a pas vraiment de chiffre précis connus, les spécialistes admettent des ordres de



grandeurs sur ces rendements. Au niveau du moteur thermique, les spécialistes s'accordent sur le fait que le rendement se situe entre 21 et 24% (pour l'essence ou le diesel). Ce rendement pourrait même être susceptible de s'améliorer dans le futur pour atteindre une fourchette comprise entre 23 et 27%. Au niveau d'une PEMFC, le rendement total se situerait entre 22 et 33% selon le carburant utilisé (soit de l'hydrogène par reformage du méthanol, soit de l'hydrogène pur).

Une faible émission de polluants :

Les émissions produites par les piles à combustibles dépendent du carburant utilisé ainsi que de son origine. Les émissions auxquelles il faut tenir compte sont les émissions des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, ...), le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, les particules carbonées, sans oublier les poussières.

Les véhicules utilisant de l'hydrogène sont des véhicules ne dégageant aucune émission. Cependant, il faut rappeler que l'émission de polluants concerne aussi la fabrication du combustible. Or suivant son mode de production, l'hydrogène peut finalement se révéler très polluant. Par exemple, si l'hydrogène est fabriqué par l'électrolyse de l'eau (procédé très consommateur d'énergie), son impact environnemental dépendra surtout du type de centrale électrique fournissant l'énergie nécessaire à sa fabrication.

Les véhicules utilisant de l'hydrogène par reformage du méthanol ou de l'éthanol émettent un peu de gaz à effet de serre et de monoxyde de carbone. Cependant, la pollution émise par l'utilisation de méthanol (de la production jusqu'à la consommation) est 97% moins importante que celle émise par l'utilisation d'un véhicule à essence.

Au final, les gains environnementaux acquis par l'utilisation d'une pile à combustible (sur tout le cycle énergétique, de la production jusqu'à la consommation) apparaissent considérable au niveau du monoxyde de carbone, des oxydes d'azotes ainsi que des particules et des poussières.

Une faible pollution sonore

Lors de son fonctionnement, le cœur d'une pile n'émet aucun bruit, puisqu'il n'y a pas de mouvement mécanique. Ce qui n'est pas le cas avec un moteur à combustion classique. Les seuls bruits éventuellement audibles dans une voiture fonctionnant avec une pile à combustible concernent les éléments périphériques à la pile (ventilateur, compresseurs, pompes).

Un fonctionnement à basse température

Le fonctionnement à basse température des PEMFC, possède deux avantages. Le premier avantage est que le rendement électrique est meilleur à basse température. Le second avantage est qu'une faible température est plus adaptée aux applications mobiles, car il n'y a pas besoin d'avoir de la chaleur produite. La température au cœur d'une PEMFC atteint au plus 80°C (contre plus de 1000°C pour un moteur diesel), et celle de ces gaz d'échappement est de 110°C (contre 800°C pour un moteur classique).

Une bonne modularité

Les piles à combustibles possèdent une très bonne modularité, puisqu'il est assez facile d'obtenir la puissance voulue. En effet, les piles sont composées de cellules élémentaires, qu'il suffit



de mettre en dérivation ou en série pour obtenir la puissance souhaitée (celle-ci pouvant aller de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts).

Un faible entretien

Comme il n'y a aucun mouvement mécanique dans le cœur de la pile (aucune rotation), il n'y a pas non plus d'usure. Par conséquent elle ne nécessite pas d'entretien. Cependant, il faut tout de même rappeler que compte tenu de la courte existence de la pile, ces données ne sont que théoriques. De plus, il faut aussi prendre en compte les phénomènes de corrosion qui pourraient se produire, tout comme les empoisonnements de certaines électrodes par le monoxyde de carbone.

Les problèmes à résoudre

Même si les piles à combustibles paraissent être une solution idéale, il reste de nombreux problèmes à résoudre :

- Son coût de fabrication.
- Sa durée de vie.
- La fabrication et la distribution du carburant.
- La sûreté de la pile.

Le coût d'une PEMFC :

Le plus gros frein à la commercialisation rencontré actuellement avec les PEMFC, pour une utilisation dans le domaine du transport, concerne son coût. En effet celui-ci est entre 40 et 200 fois supérieurs (selon le type de transport, collectif ou individuel) comparé au coût lui assurant la rentabilité.

Le coût actuel d'une pile complète (c'est-à-dire le module et les périphériques extérieurs) se situe aux alentours de 6000 à 9000€ par kilowatt (soit de 4300 à 6400€ par chevaux). Le coût du module, qui représente le tiers du coût d'une pile, est très élevé à cause du prix des électrodes et des plaques bipolaires. Ces deux éléments utilisent des matériaux rares et chers (platine, Nafion™, ...). Pour atteindre un niveau de rentabilité suffisant permettant leur commercialisation, le prix des piles devra avoisiner, au maximum, les 1000€ par kilowatt pour le système complet. Actuellement, il est techniquement possible d'atteindre ce prix, notamment grâce à la production en grande série. Il faut préciser qu'une pile à 1000€ le kilowatt ne serait rentable que dans le cas d'une utilisation comme système de propulsion pour les transports en commun. Pour une utilisation sur les véhicules légers, le coût total de la pile devrait être inférieur à 50€ par kilowatt. C'est à cette condition que la pile à combustible pourrait rivaliser avec le moteur thermique. Cependant, il est actuellement impossible de produire des piles à un coût si bas, même en produisant à très grande échelle. En effet il est nécessaire d'avoir un saut technologique dans la conception de certains composants, notamment la membrane et les électrodes.

Une durée de vie encore limitée :

Comme la majeure partie des piles à combustibles en sont encore au stade de prototype, il est assez difficile d'estimer aujourd'hui la durée de vie de telle pile. Cependant, pour des applications dans le domaine automobile, la durée de vie des piles devra être supérieure à 3000 heures. Ensuite, il



faudra résoudre d'autre problème, comme le fait de remplacer la totalité de la pile ou seulement une partie de ses composants, quand la pile sera devenue usagée.

Le choix du combustible :

Le choix du carburant est un élément déterminant pour le futur de la pile à combustible. En effet, en fonction du choix de ce dernier, il faudra penser à mettre en place un nouveau réseau de distribution, à construire des industries capables de produire ce nouveau carburant, et aussi prévoir de nouveau moyen de stockage afin de pouvoir transporter ce nouveau carburant.

Le choix peut être plus compliqué que l'on pourrait le croire. A terme l'hydrogène deviendra sûrement le nouveau carburant. Mais avant cela il reste beaucoup de contrainte à résoudre. Il faut déterminer le meilleur moyen de production ainsi que construire les infrastructures nécessaires. Il se pose aussi le problème de son stockage. On peut soit le stocker sous pression sous forme gazeuse, soit le stocker sous forme liquéfiée à très basses températures.

En attendant que les contraintes de production, de distribution et de stockage de l'hydrogène soient résolues, d'autres carburants peuvent être utilisés. C'est le cas par exemple du méthanol. Son mode de distribution ne poserait pas trop de problème, car il peut être distribué dans une station service normale, en remplaçant seulement un carburant existant. De la même façon on peut aussi utiliser de l'essence, mais ce n'est qu'une solution d'appoint car le but de la pile à combustible est quand même de trouver une alternative à l'utilisation d'hydrocarbure. De plus, l'utilisation de ces deux carburants imposerait l'utilisation d'un reformeur ce qui engendrerait de nouvelles contraintes (au niveau du poids, de la place, du temps de démarrage, ...).

La sûreté :

La sûreté de la pile est un autre problème à résoudre. En effet le dihydrogène est un gaz très inflammable mais aussi très léger. Ce qui signifie qu'à la moindre fuite, le dihydrogène s'échappera, et qu'au contact d'une source d'énergie (chaleur, ...) il s'enflammera. Cependant le risque d'explosion du dihydrogène n'est pas plus élevé qu'avec un autre carburant.

Les différents prototypes

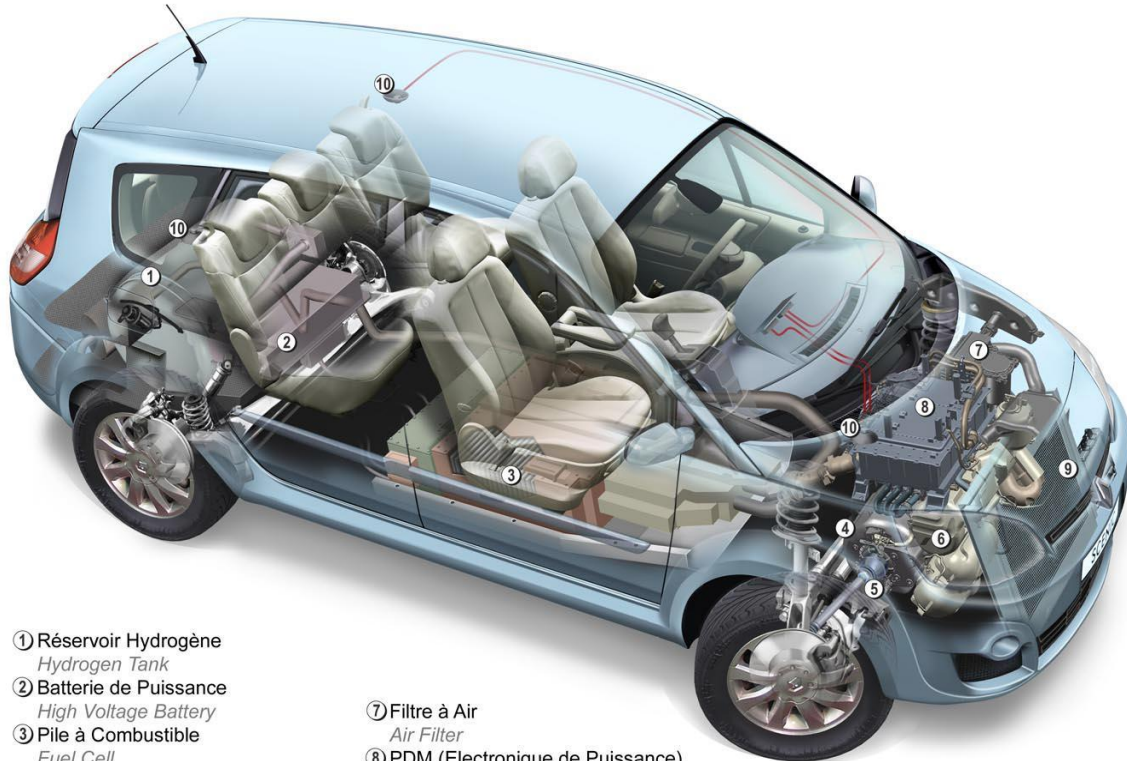
Au cours de ces dernières années, de nombreux prototypes de véhicules fonctionnant avec une pile à combustible ont été développés par les constructeurs automobiles. Les plus avancés d'entre eux sont Daimler, avec ses prototypes NECAR et F-Cell, mais aussi Honda et Toyota. Cependant les autres constructeurs, comme General Motors, Ford ou l'alliance Renault-Nissan, ne sont pas en reste.

La commercialisation de ces véhicules n'est pas prévue avant quelques dizaines d'années. Malgré tout, Honda est le premier constructeur à produire ce type de véhicule en série limitée, et ceci depuis juillet 2008 en Californie (Etats-Unis), cet état étant le seul à disposer d'un réseau de 25 stations. La Honda FCX Clarity est proposée aux consommateurs américains, en location seulement, à un tarif de 600\$ par mois.



Scenic ZEV H2 de Renault-Nissan :

Ce prototype, réalisé par l’alliance Renault-Nissan, a été développé sur la base du Renault Grand Scenic. Le projet a été élaboré en seulement 15 mois, ce qui a permis un premier montage du véhicule durant l’été 2007. Par la suite, les ingénieurs français et japonais se sont retrouvés afin de procéder à des vérifications pour s’assurer que les composants pouvaient être intégrés



- ① Réservoir Hydrogène
Hydrogen Tank
- ② Batterie de Puissance
High Voltage Battery
- ③ Pile à Combustible
Fuel Cell
- ④ Moteur Electrique et Boîte
Traction Motor and Gear box
- ⑤ Transmission
Drive Shaft
- ⑥ Compresseur d’Air
Air Compressor
- ⑦ Filtre à Air
Air Filter
- ⑧ PDM (Electronique de Puissance)
Power Delivery Module (High Voltage Electronics)
- ⑨ Radiateur de Refroidissement
Cooling Radiator
- ⑩ Capteurs d’Hydrogène
H2 Sensors

Véhicule Pile à Combustible Hydrogène
Hydrogen Fuel Cell Vehicle

physiquement à la voiture. En effet les pièces ont été fabriquées soit par Nissan soit par Renault. Nissan s’est occupé de la conception de la pile à combustible, du réservoir à hydrogène haute pression (350 bars soit 350 fois la pression atmosphérique) et de la batterie Lithium-ion. Le constructeur français s’est, quant à lui, occupé de la modification du design du Grand Scenic, afin d’accueillir les nouveaux et nombreux composants, et de l’adaptation de quelques autres composants afin d’être compatible avec le nouveau mode de propulsion. Après cette phase de vérification, l’assemblage final a eu lieu au Japon. Le projet s’est terminé en avril 2008, soit quelques mois après la livraison du premier prototype roulant.

Le Scenic ZEV H2 possède une motorisation électrique d’une puissance de 90kW (soit 123ch), une batterie au Lithium-ion d’une puissance de 25kW, fonctionnant avec une tension de 400V. Cette batterie se recharge grâce à un système de récupération de l’énergie cinétique qui lui permet d’emmagasiner de l’énergie à chaque freinage. La pile à combustible est alimentée en hydrogène gazeux sous pression à 350 bars.

Malgré des caractéristiques intéressantes (moteur de 90kW), elle souffre de son poids (1850kg contre 1500kg pour une Scenic avec un moteur thermique), ce qui lui offre des performances assez faibles. Elle a une vitesse de pointe de 160km/h, réalise le 0 à 100km/h en plus de 15 secondes, et



possède une autonomie d'un peu plus de 350km. Cependant, ce n'est pas la performance qui est importante avec cette voiture.

Mercedes Classe B F-Cell :

C'est en 1994 que Daimler a présenté sa première voiture à pile à combustible : la NECAR 1. En 2009, soit 15 ans après, Mercedes lance la production en petite série d'une voiture alimentée par



l'hydrogène : la Mercedes Classe B F-Cell. Cette voiture, fabriquée à 200 exemplaires, sera disponible en Europe (Allemagne et Norvège) et aux Etats-Unis (Californie), puisqu'il y a déjà un réseau de distribution d'hydrogène. Elle bénéficiera de l'expérience de Daimler (propriétaire de Mercedes) dans cette technologie, qui a déjà fait rouler plus de 100 voitures sur une distance supérieure à 4,5 millions de kilomètres.

Mercedes Classe B F-Cell

Cette Mercedes est équipée d'un moteur électrique de 100kW (soit 137ch). Elle dispose aussi de batterie en Lithium-ion d'une capacité de 35kW, qui comme pour le Scenic ZEV H2, se recharge par récupération de l'énergie cinétique. L'hydrogène est stocké sous forme gazeuse sous une pression de 700 bars dans un réservoir de 416 litres. Cette Mercedes Classe B est un peu plus performante que le Scenic de Renault-Nissan, puisqu'elle est capable de rouler jusqu'à 170km/h et dispose d'une autonomie de presque 400km.

3.6. Le moteur à eau

Au sein du vaste champ des moteurs propres, il ne fait aucun doute que le moteur à eau retient l'attention, en ce qu'il se distingue particulièrement des autres. Rouler à l'eau fait rêver. En effet, l'eau est une ressource inépuisable, entièrement naturelle et bien évidemment non-polluante.



L'idée d'utiliser de l'eau pour faire fonctionner un moteur séduit les consommateurs non seulement de par ses avantages écologiques, mais aussi du fait de son prix économiquement imbattable.

Mais d'emblée, certains paradoxes apparaissent : l'eau n'est pas un carburant, donc un moteur fonctionnant uniquement à l'eau n'est qu'un rêve inaccessible. Cependant, de nombreuses personnes, scientifiques, chercheurs ou simples mécaniciens n'ont pas renoncé pour autant. Ainsi, de nombreux brevets ont été déposés pour des moteurs utilisant de l'eau pour fonctionner.

Alors, comment s'organisent ces moteurs à eau, qui se trouvent aussi bien présentés chez des particuliers, que dans des laboratoires ou sur internet ?

3.6.1. Définitions

Le moteur à eau est un terme qui renvoie à différents types de moteurs, qu'ils soient fantaisistes ou fonctionnels.

Ainsi, le terme « moteur à eau » recouvre:

- le rêve irréaliste de faire un moteur ne consommant que de l'eau. Impossible, puisque l'eau n'est pas un carburant.
- Des moteurs où l'eau est un additif dans le carburant.
- Le moteur à hydrogène (présenté auparavant) par abus de langage. En effet, grâce à l'électrolyse de l'eau, on peut obtenir de l'hydrogène.
- Des moteurs dans lesquels l'eau est utilisée comme auxiliaire récupérateur d'énergie. (ex: le moteur Pantone que je présenterai plus tard).
- Des systèmes dans lesquels l'eau est un élément mécanique comme les turbines ou encore les dispositifs utilisant l'énergie des vagues.

Il faut donc bien différencier tous ces moteurs qui sont d'efficacité et de viabilité bien aléatoires.

3.6.2. Exemples de moteur à eau

Pour revenir au moteur à eau simple, il en existe de multiples types, souvent inventés par un illustre inconnu qui déclare avoir inventé un moteur idéal (pas de pollution, excellent rendement, très facile à construire, etc.) mais doit se battre contre des puissances plus ou moins occultes, dont généralement les *Majors* pétrolières, pour le porter à la connaissance du monde.

La plupart de ces moteurs fonctionnent en dissociant d'abord l'eau en oxygène plus hydrogène ($2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$), puis en réassociant ce mélange dans une chambre de combustion où se produit la réaction chimique inverse, qui dégage beaucoup d'énergie (chaleur et variation de volume des gaz). De tels moteurs peuvent effectivement fonctionner, mais avec un apport d'énergie extérieur puisque, selon le principe de Lavoisier, "rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme" : l'énergie restituée dans la chambre de combustion est... au mieux égale, compte tenu des pertes, à celle nécessaire pour effectuer la dissociation de l'eau en amont.

Ainsi, dans les années 1970, deux français, Jean Chambrin et Jack Jojon, fabriquent un moteur fonctionnant avec 60% d'eau et 40% d'alcool. Le principe est apparemment simple: Il y a deux parties dans ce moteur. L'une est mécanique, l'autre électronique. La partie mécanique c'est une chambre de



cracking. La partie électronique, la deuxième, est celle dans laquelle on envoie une très haute tension, plusieurs kilovolts sous quelques pico-ampères et sous haute fréquence. Le principe est celui-ci : l'eau se « crack », se transforme en oxygène et hydrogène pour des températures très élevées. De plus, sachant qu'il est facile d'obtenir une température de 700-800 degrés, ils utilisent l'alcool (très miscible dans l'eau) pour entretenir cette température pour ensuite cracker l'eau. Le mélange pénètre donc dans la pipe d'admission à 750°, qui rencontre ensuite une barrière de potentiels, moment à partir duquel se produit le phénomène de séparation qui fait tourner le moteur.

Ce moteur était fonctionnel puisqu'ils ont roulé une centaine de kilomètres devant témoins, mais il ne s'est jamais développé industriellement à cause des mathématiciens qui le remettent en cause du fait que ce procédé ne suit pas la loi de Carnot (NDLR : Carnot avait démontré la loi d'équivalence entre la chaleur et le travail et donné une valeur assez exacte de l'équivalent mécanique de la calorie). Aujourd'hui, ce procédé a été abandonné, puisque d'autres prototypes promettent des performances plus prometteuses (ex: moteur de Pantone).

Conclusion :

Difficile de différencier les escroqueries des véritables avancées, et d'évaluer les bouleversements qui pourraient véritablement toucher le monde entier. En effet, certains partisans de la théorie du complot pensent que certains de ces moteurs sont tout à fait fonctionnels mais que le lobby pétrolier chercherait à étouffer leur existence. Leurs opposants, quant à eux, estiment que de tels moteurs sont scientifiquement irréalisables. Difficile donc de distinguer le vrai du faux. Toujours est-il qu'un moteur est sorti du lot: le moteur Pantone.

3.6.3. Le moteur de Pantone

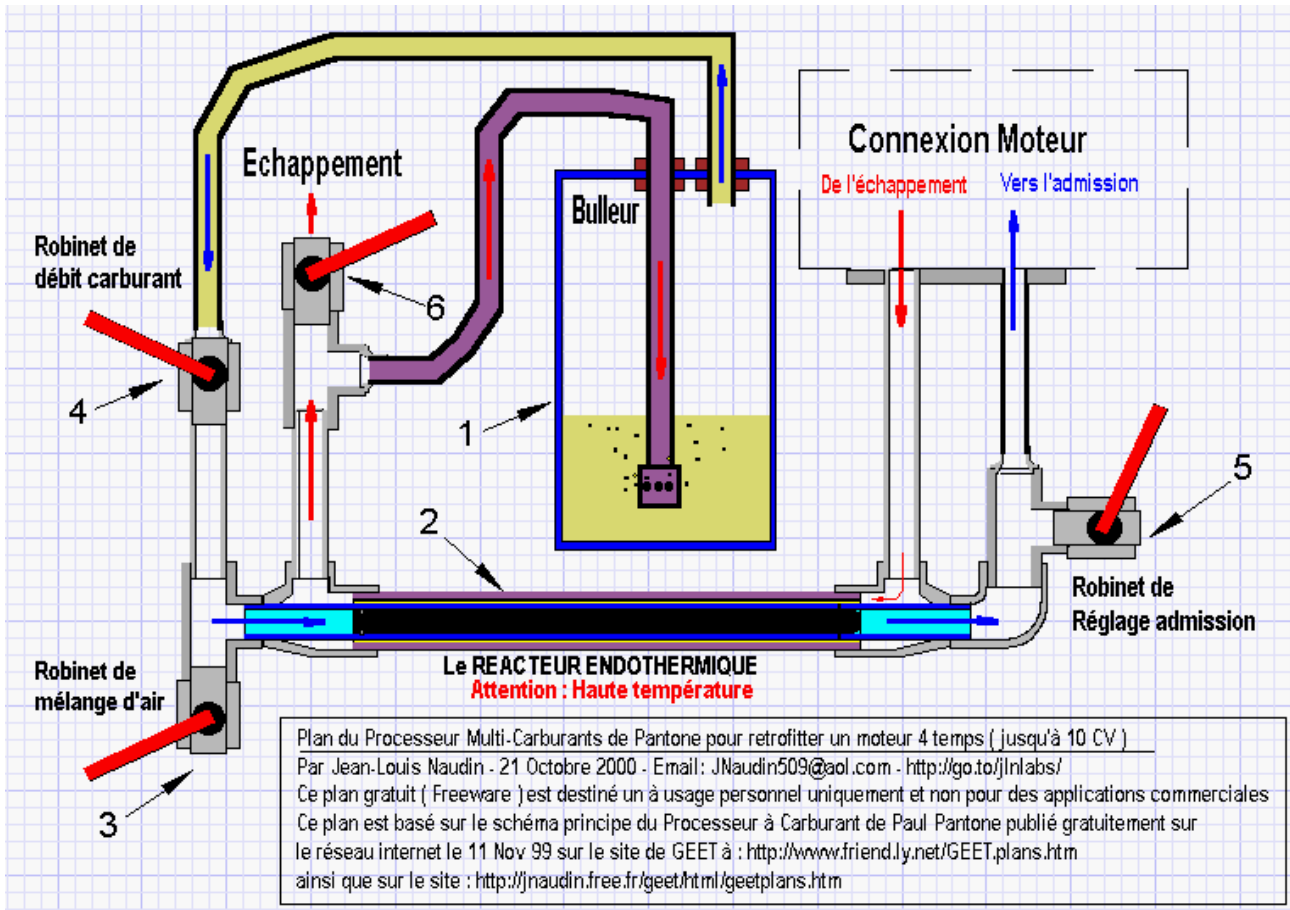
Le moteur Pantone est parfois improprement cité comme moteur à eau. En fait, il s'agit d'un moteur à combustion interne classique (de préférence un moteur diesel) alimenté par un carburateur particulier inventé par M. Paul Pantone, un autodidacte américain, et qui peut fonctionner avec un mélange d'eau et d'hydrocarbures. Le principe de ce moteur consiste à transformer le carburant (essence ou gazole) et un peu d'eau par une réaction chimique appelée craquage, pour obtenir des molécules hydrocarbonées plus petites ; ces hydrocarbures légers sont ensuite brûlés par le moteur à combustion interne.

Pour un bricoleur, il est assez facile d'adapter un carburateur Pantone à un moteur classique ; On peut trouver de nombreuses expériences individuelles sur Internet.

Voici, un schéma de ce moteur que je vais expliquer plus précisément par la suite:



Schéma du système pantone:



Le Processeur Multi-Carburants de GEET est une nouvelle technologie brevetée internationalement dont l'inventeur est Paul Pantone. Ce système révolutionnaire permet à la plupart des moteurs 4 temps conventionnels de fonctionner avec un mélange eau/hydrocarbures. Il est capable d'utiliser tous types de carburants (essence, diesel, kérosène, huiles usagées et autres dérivés d'hydrocarbures,...) grâce à son réacteur à plasma à réaction endothermique. Le Processeur Multi-Carburants permet aussi une réduction importante de la pollution par les gaz émis par l'échappement de près de 85% par rapport à un moteur conventionnel. Des essais menés par de nombreux industriels et expérimentateurs ont déjà montré qu'il est même possible de faire fonctionner un moteur équipé de ce dispositif avec un mélange d'hydrocarbures (25%) et d'eau (75%)...

Le dispositif est composé de trois parties principales :

- La connexion Admission/Echappement,
- Le Réacteur à plasma à réaction endothermique (contenant le barreau magnétique et la chambre à pyrolyse),
- Le Bulleur.

Le carburateur conventionnel et le pot d'échappement (et son système catalytique) ne sont plus nécessaires après installation du dispositif.

Le cœur du processeur Multi-Carburants de GEET est un générateur à plasma à auto-induction ou réacteur à plasma à réaction endothermique.



Le réacteur endothermique est composé de deux cylindres coaxiaux en acier :

- Le cylindre intérieur (fileté à chaque extrémité), appelé la chambre à pyrolyse (contient une tige en acier. Un côté de cette tige d'acier est arrondi afin de permettre d'identifier son sens lors d'un éventuel démontage. La tige est maintenue au centre de la chambre à pyrolyse grâce à 3 petits tétons soudés à chacune de ses extrémités.
- Le cylindre extérieur (fileté à chaque extrémité) est un tube en acier moins long que celui à l'intérieur mais évidemment plus large (diamètre environ 10 cm plus grand).

Les deux cylindres sont placés coaxialement grâce à deux réducteurs en T (représentés sur le plan ci-dessus) mis à chaque extrémité.

Le bulleur est un réservoir contenant un mélange d'eau et d'hydrocarbures (essence, diesel, kérosène, huiles usagées et autres dérivés d'hydrocarbures,...).

Le flux de gaz chauds provenant de l'échappement du moteur circule par la partie extérieure du réacteur avec une forte énergie cinétique, cela contribue à porter à très haute température la tige d'acier (servant d'accumulateur de chaleur) contenue dans la chambre à pyrolyse. Les gaz traversent le réacteur et pénètrent ensuite dans le bulleur contenant le mélange eau/carburant. Les vapeurs du mélange sont aspirées fortement par le vide créé par l'admission et poussées par la pression provenant de l'échappement. L'énergie cinétique des vapeurs est augmentée considérablement (dans la partie bleu clair) par la réduction du diamètre dans la chambre à pyrolyse (effet de Venturi). L'effet combiné de la haute température et de cette énergie cinétique accrue provoque la décomposition thermo-chimique du mélange eau/carburant.

Gains pour l'environnement et la consommation :

La dépollution vient du fait que la chaleur habituellement perdue des gaz d'échappement vient "prétraiter" les gaz d'admission afin de casser les molécules d'hydrocarbures en molécules plus petites. On aboutit donc à une meilleure combustion dans le moteur donc à une dépollution très importante. En effet, plus le carburant est léger plus facile est sa combustion donc meilleure est sa dépollution. Jusqu'à plus de 90% sur les particules imbrulées par exemple.

Certains agriculteurs ont monté ce principe sur leur(s) tracteur(s) et auraient constaté des baisses de consommation allant jusqu'à 60%. Une moyenne entre 30 et 40% est communément admise.

Malheureusement aucune expérience scientifique n'a été faite pour mesurer précisément les gains de ce moteur, car tous les scientifiques montrent du doigt le fait que Mr Pantone laisse planer des doutes sur la création d'un plasma au sein du moteur.

Cependant, des tests ont été effectués par un particulier sur une même voiture avec et sans le système gillier-pantone (petite variation du système pantone).

Voici les chiffres:

- sans le système gillier-pantone: CO = 6.4 % CO2 = 3.6%, ppm HC = 3850, O2 = 11.4%
- avec le système gillier-pantone: CO = 0.01 % CO2 = 6.2%, ppm HC = 000, O2 = 12.1%.

D'après de nombreux témoignages, ce procédé permettrait aussi de gagner entre 10 et 20% de carburant.



Prix :

Étant donné que l'on garde le moteur de base, le prix ne revient qu'au système pantone que l'on greffe dessus. D'après des sites spécialisés, le prix de l'ensemble des pièces est de l'ordre de quelques centaines d'euros à peine. Puis, au fur à mesure de l'utilisation du système, les économies sur le carburant remboursent rapidement ce système.

Le procédé est donc bénéfique tant au niveau financier qu'au niveau écologique.

3.6.4. Avenir et conclusion

Le moteur Pantone, et plus particulièrement le système Gillier-Pantone, commence aujourd'hui à bien faire parler de lui. Et je parie que cela risque de s'amplifier dans un futur assez proche. En effet, c'est un système facile et rapide à monter. De plus, il permet de ne pas changer le système d'origine (mise à part l'entrée d'air) et surtout le carburant d'origine, ce qui peut être un avantage vis-à-vis de la législation.

De plus, après les rendez-vous ratés de Kyoto et de Copenhague, c'est un système qui serait rapide à mettre en place pour dépolluer à court terme la Terre.

Cependant, d'après de nombreuses sources, ce système ne serait vraiment efficace que sur de vieux moteurs où l'électronique n'aurait pas une place trop importante.

Pour ma part, je pense que malgré le fait que ce système soit sujet à de nombreuses controverses sur sa base scientifique, le système a fait ses preuves et il serait plus que temps que les constructeurs automobiles se penchent sur ce système qui permettrait de dépolluer considérablement notre planète. Il faut lancer des groupes de recherche sur le système et s'il est prouvé que ce système marche vraiment, on pourrait équiper rapidement un très grand nombre de voitures.

Mais, je ne pense pas que c'est un système qui sera utilisé sur un très long terme, car il utilise quand même beaucoup d'essence comme un moteur classique. Or il existe des recherches sur des systèmes n'utilisant pas de ressources fossiles et ne polluant pas du tout.

3.7. Le moteur à air comprimé

Le moteur à air comprimé est en quelque sorte le pionnier des moteurs propres. En effet, des engins utilisant de l'air comprimé dans leur fonctionnement existent depuis très longtemps (on se souvient que des tramways au 19ème siècle utilisaient l'air comprimé) et continuent d'être utilisés aujourd'hui (ex: jouets pour enfants, ascenseurs, visseuses, etc.). Mais ce n'est que depuis peu que l'on s'y intéresse pour en faire des moteurs à air comprimé pour des véhicules de particuliers (voitures, taxis et autres).

Aujourd'hui, deux entreprises s'attaquent à la commercialisation de tels engins: l'une coréenne, Energin, et l'autre française MDI, dirigée par le motoriste Guy Nègre. Un nouveau venu, Régis Munoz, vient d'inventer un moteur rotatif qui fonctionne également avec de l'air comprimé. Ce moteur rotatif peut fonctionner en moteur roue comme un moteur électrique.



Je vais donc vous présenter ce qu'il est possible de faire avec de l'air comprimé aujourd'hui et l'avenir qu'un tel moteur a. J'axerai mon état de l'art sur le travail de MDI avec Guy Nègre.

3.7.1. Actualité

Les ingénieurs de la société coréenne ont pu réaliser, à partir d'une Daewoo Matiz, un prototype hybride moteur électrique/moteur à air comprimé (PHEV, Pneumatic Hybrid Electric Vehicle). Le moteur à air comprimé sert en fait à entraîner un alternateur qui fournit l'électricité prolongeant l'autonomie du véhicule. L'automobile est fonctionnelle, de nombreux journalistes ont pu l'essayer pour en témoigner. L'aspect négatif restant est l'autonomie restreinte par les capacités de stockage des batteries électriques actuelles.

Quant à la seconde entreprise, française, sa technologie diffère. Le moteur à air comprimé est le moteur principal, secondé en cas de besoin de puissance supplémentaire par un moto-alternateur. La mise au point de l'ensemble continue. Les applications possibles sont nombreuses (automobiles, marines, industrielles...).

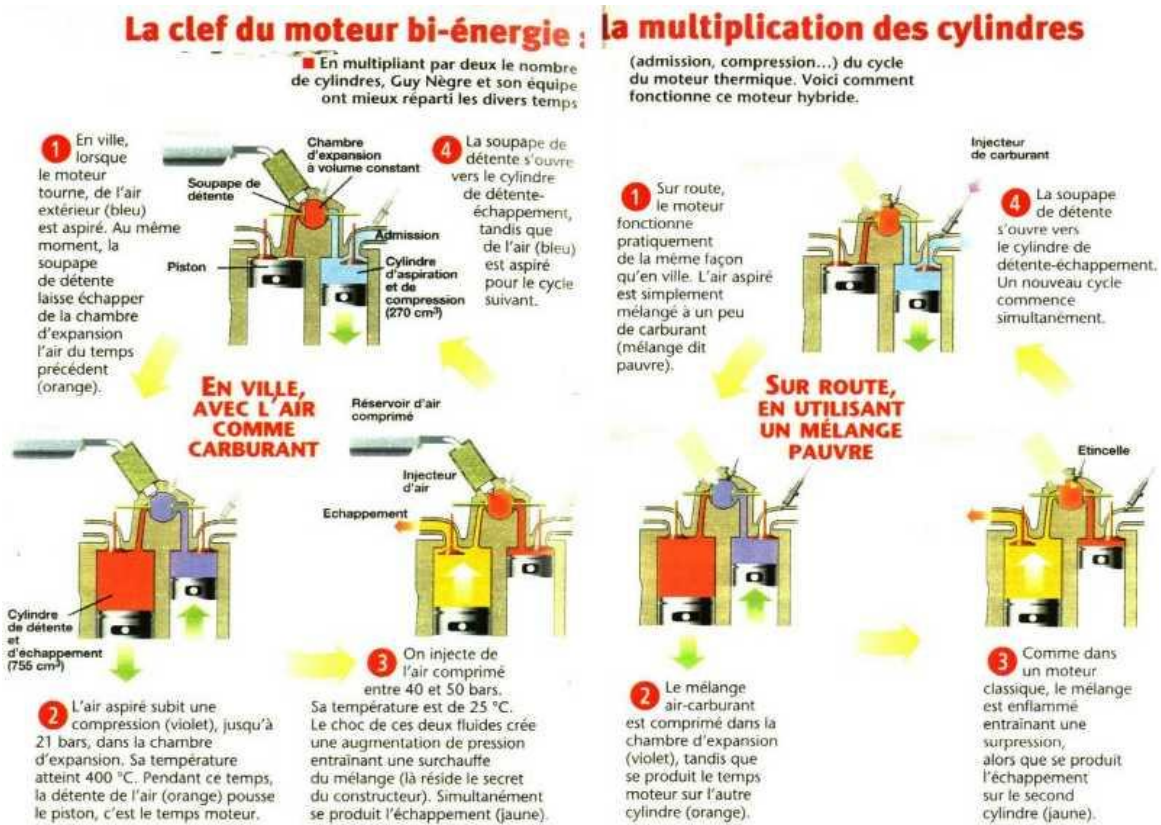
Pour financer ses recherches et la fabrication de ses produits, l'entreprise a eu recours à de nombreux investissements d'autres entreprises emballés par ce projet. Par exemple, le géant de l'automobile indien TATA a signé un contrat de 20 millions d'euros afin de purifier les villes indiennes, l'état d'Andorre construit une entreprise pour la fabrication de nouveaux modèles, le Mexique s'est lancé dans un projet de remplacer ses 87000 taxis par les engins de Guy Nègre pour dépolluer Mexico, etc. Cependant, à cause de différents problèmes sur l'autonomie des engins et de nouvelles avancées et améliorations, les promesses de commercialisation des véhicules sont repoussées sans cesse.

D'après Guy Nègre, les premières commercialisations devraient finalement commencées en 2011 avec notamment le Luxembourg.



3.7.2. Fonctionnement

Schémas explicatifs des deux types de moteurs :



Au départ, l'idée de Guy NEGRE fut d'exploiter cette pratique que connaissent bien les mécanos de voitures de sports qui consiste, pour démarrer les moteurs récalcitrants, à injecter de l'air comprimé dans les cylindres ; l'idée part de là, mais au lieu d'en injecter durant quelques secondes, on injecte l'air comprimé en permanence, et ça marche, ça roule même, et de façon économique et propre.

Le moteur fonctionne selon un cycle thermodynamique différent des moteurs actuels 4 et 2 temps. Le moteur à Air Comprimé est un moteur à 5 temps et à 3 chambres séparées : 2 chambres cylindriques d'aspiration et d'expansion et 1 chambre sphérique de compression reliée par un injecteur d'air électronique à deux réserves d'air comprimé de 300 litres à 300 bars. Avec ces 3 chambres on a donc les différentes étapes : Aspiration, compression, injection d'air comprimé additionnel, expansion, détente, échappement.

Ainsi, par le jeu du piston, le 1er cylindre va aspirer l'air extérieur à travers un filtre et l'envoyer dans la chambre de compression où, au même moment un jet d'air comprimé est introduit dans cette chambre aussitôt relâché dans le cylindre d'expansion, l'air pousse le 2ème piston qui va actionner la roue du moteur, et c'est parti...

Remarquons que l'on n'utilise pas exclusivement l'air comprimé pour faire rouler le véhicule mais également l'air ambiant que l'on filtre et que l'on rejette plus propre qu'avant. Et c'est justement parce que le moteur aspire cet air extérieur que la réserve d'air comprimé donne au véhicule une autonomie de 10 heures en cycle urbain.



Il existe 2 types de moteurs chez MDI, le moteur à air comprimé seul, n'utilisant que de l'air comprimé, et le moteur bi-énergie, utilisant de l'air comprimé et un adjuvant énergétique (essence, fuel, etc.). Ce dernier ayant une autonomie bien supérieure. D'après MDI voici le fonctionnement de ces moteurs :

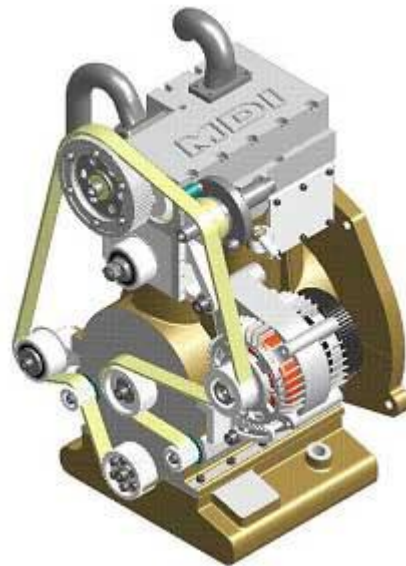
Moteurs mono énergie : air comprimé seul

L'air ambiant est comprimé dans les réserves du véhicule (cf Remplissage des réservoirs HP). L'air provenant du réservoir haute pression traverse un détendeur (breveté par MDI et dont le fonctionnement permet une transformation quasi isotherme). Il est ensuite utilisé dans un système de détente avec travail composé d'une chambre active et d'un cylindre de détente. Ce nouveau cycle thermodynamique est composé :

- d'une alimentation à pression constante du cylindre de charge (ou chambre active). Cette phase est réalisée à pression et température constante et produit un travail important sur le vilebrequin. Elle permet de doubler le rendement d'une détente de charge classique.
- d'une détente du volume d'air créé par la chambre active dans un cylindre de détente.
- d'un échappement.

Les moteurs à air comprimé mono énergie sont totalement propres du réservoir à la roue.

Moteur à air comprimé seul de l'entreprise MDI:



Moteurs bi énergie : air comprimé + adjuvant énergétique

Le moteur est identique au moteur précédent. L'addition d'une chambre de combustion externe (à pression constante et volume variable), permet l'utilisation d'un adjuvant énergétique pour réchauffer l'air avant de l'introduire dans le système de détente avec travail. La combustion est continue et non liée au cycle du moteur, ce qui permet un meilleur contrôle des émissions.

Il y a quatre modes de fonctionnement:

Mode 1, mono énergie air comprimé : en dessous de 50km/h, on utilise uniquement l'air du réservoir.



Mode 2, bi énergie simple : prolongateur d'autonomie en utilisant l'air du réservoir que l'on réchauffe à l'aide d'un adjuvant énergétique dans la chambre de combustion externe avant de l'introduire dans le moteur.

Mode 3, bi énergie autonome : au dessus de 50 km/h l'air comprimé stocké dans les réserves n'est plus utilisé.

Un compresseur d'air associé produit de l'air comprimé à pression de travail qui est ensuite réchauffé dans la chambre de combustion externe avant d'être transféré dans la chambre active et détendu dans le cylindre de travail. Ce mode de fonctionnement est également utilisé en dessous de 50 Km /h lorsque le réservoir est vide

Mode 4, bi énergie avec re-compression des réserves: partage d'énergie en utilisant une partie de l'air comprimé produit (par le compresseur d'air associé) pour assurer le fonctionnement du véhicule (comme dans le mode 3) alors que l'autre partie est dirigée vers un surpresseur qui assure le remplissage des réservoirs.

3.7.3. Pollution, recharge et prix

La voiture à Air Comprimé est donc un véhicule économique à l'entretien simple et peu coûteux, grâce notamment à la température modérée de fonctionnement du moteur : une vidange tous les 50.000 km avec de l'huile alimentaire (ce qui évite de recycler les huiles). Un véhicule sûr, sécurisé (pas de carburant inflammable, pas de risque d'explosion) et un véhicule 100% écolo qui n'utilise, pour circuler, que l'air que nous respirons. Mieux encore, cet air qu'il absorbe est déjà pollué, mais il "filtre" l'air qu'il respire et le rejette plus propre qu'il n'est entré. Le véhicule donc ne pollue pas, mais dépollue. Ce serait donc le moteur le plus propre jamais vu.

Pour recharger le moteur, il y a deux solutions:

- soit par une recharge des réservoirs en air (3 min) à partir d'une station fixe équipée pour distribuer de l'air haute pression.
- soit par un compresseur électrique branché sur une simple prise de courant 220V durant 4 heures.

De plus, chaque plein coûterait environ un euro, ce qui rend la voiture très attrayante économiquement parlant.

Enfin pour finir, le prix de ces voitures s'alignerait parfaitement sur celui des petites voitures commercialisées aujourd'hui. En effet, Guy Nègre a annoncé que son nouveau modèle, la OneFlowAIR, serait mise sur le marché au prix de 3500 euros.

3.7.4. Avenir et conclusion

Le choix du moteur à air comprimé pour l'automobile repose sur le souhait de disposer d'une énergie non polluante, stockable facilement et peu onéreuse.

De plus, on peut dire que l'air comprimé a réussi là où l'électrique a échoué: fabriquer un véhicule totalement non-polluant pour un prix raisonnable.



Cependant, le moteur à air comprimé, et donc MDI l'entreprise de Guy Nègre, ont deux objectifs qu'ils doivent remplir pour donner vie à l'ère de l'air. Tout d'abord, ils doivent absolument améliorer l'autonomie de leurs voitures, car si l'on en croit le seul physicien qui a fait de réelles recherches et tests sur leur moteur, ce dernier aurait une autonomie d'environ 40 kms en ville (avec freinage, accélération brusque, etc.). Il y a peu de temps, Guy Nègre et son fils ont dit travailler sur un concept thermodynamique révolutionnaire qui arrangerait ce problème. Si c'est bien le cas, nul doute que leurs voitures vont se vendre à vitesse grand V. Le deuxième point à améliorer est de satisfaire les investisseurs en leur proposant des véhicules qui marchent, car le problème de Mr Nègre est qu'il veut toujours améliorer le moteur de ses voitures avant d'en finir un totalement. Il faut qu'il arrive à trouver des investisseurs pour financer ses recherches.

On peut donc dire avec plaisir que l'air comprimé est en pleine expansion. Pour ma part, je pense que ce type de moteur va se développer, pour les taxis ou les véhicules municipaux, car une voiture qui purifie l'air, ça fait rêver.

Cependant, la voiture à air comprimé prendra réellement son envol quand ces problèmes d'autonomie seront réglés. Alors, cette voiture deviendra un énorme succès je pense.

J'imagine même que dans une vingtaine d'années, ces voitures (comme représentées ci-dessous) pulluleront dans les villes. Cela voudrait dire que le problème de la pollution automobile serait vraiment réglé.

Photo représentant la AirPod au look révolutionnaire qui se contrôle à l'aide d'un joystick :



4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4.1. Conclusions sur le travail réalisé

Nous sommes globalement satisfaits par l'aboutissement de ce projet. Les résultats de nos recherches ont été fleurissants et la multitude d'informations nous a appris à sélectionner l'essentiel pour l'insérer dans ce dossier. L'unique point négatif réside dans le fait que nous devons faire une manipulation en rapport avec notre sujet mais le matériel n'étant toujours pas arrivé dans les laboratoires LITIS, nous avons été restreints à ne faire que de la théorie. De plus, nous avons découvert qu'il était important qu'une personne se positionne en tant que leader pour, en quelques sortes, diriger les opérations. Sans elle, nous aurions manqué d'organisation et de temps pour rendre ce dossier ! Avant ce projet, nous ne nous connaissions pas du tout, un travail de communication a donc été obligatoire. De plus, cette expérience nous a permis de mieux appréhender le métier d'ingénieur puisque nous serons inévitablement confrontés à travailler en équipe.

4.2. Conclusions sur l'apport personnel de cette U.V. projet

Camille

Personnellement, je pense que ce projet a été une réussite dans son ensemble et ceci pour tout le monde. L'atmosphère de travail a toujours été très détendue, tant lors des heures consacrées au projet en compagnie de Mr Bensrhair que lorsque nous mettions nos recherches en commun. Cela dit, il n'a pas toujours été facile de trouver un créneau horaire qui convenait à tout le monde parce qu'au 4^{ème} semestre, personne n'a choisi les mêmes thématiques et par conséquent, personne n'a le même emploi du temps. Pourtant, nous nous sommes organisés, tardivement avouons-le, mais chacun y a trouvé son compte. Concernant le sujet en lui-même, je m'oriente vers le département MRIE donc je m'intéresse particulièrement à l'environnement et aux méthodes qui pourraient le protéger et lui épargner quelques souffrances comme la pollution automobile. Les déchets jetés dans la nature suffisent amplement à détériorer notre belle planète alors n'en rajoutons pas !

Mathilde

Pour conclure ce projet, je dirais qu'il fût très intéressant à plusieurs niveaux. Tout d'abord sur le plan social, il nous a montré ce qu'était un travail de groupe, et que cela n'est pas si aisé, particulièrement quand tous les membres du groupe ne se connaissent pas et ont des emplois du temps différents. Il a fallu répartir les tâches mais progresser ensemble. Cependant, la bonne ambiance et l'entraide ont permis à tous de travailler dans des conditions idéales. Par ailleurs, sur le plan scientifique et technique, j'ai particulièrement apprécié le fait de travailler sur un sujet qui se rapproche des thématiques environnementales, abordées dans le département MRIE vers lequel je m'oriente. Dans tous les cas, je ne compte pas m'arrêter à ce premier projet scientifique et j'aimerais, dans un projet futur, mettre en parallèle théorie et pratique.



David

Notre groupe avait pour projet de faire des recherches sur le véhicule propre. Pour cela nous nous sommes divisés le travail à effectuer en 6 parties plus ou moins indépendantes. Pour ma part il s'agissait de faire une recherche documentaire sur le véhicule électrique. Pour réaliser ce projet nous avions qu'un seul créneau horaire par semaine où nous mettions en commun nos recherches et nous profitions aussi de ce moment pour faire part des problèmes que nous avons éventuellement rencontré.

Ce projet m'a ainsi permis notamment de travailler en groupe mais surtout de prendre en compte l'avancée des recherches de mes camarades : la mise au point chaque semaine nous permettait de savoir si nous étions en avance ou en retard par rapport au groupe mais elle permettait surtout de remettre à jour les recherches de chacun et par la même occasion d'aider un autre membre du groupe si il rencontrait des difficultés. Ce travail m'a appris des choses qui pour moi sont essentielles au métier d'ingénieur. Par exemple j'ai appris à faire des recherches documentaires en groupe et à mieux connaître les personnes avec qui je travaillais. En effet, je me suis rendu compte que le travail en groupe ce n'était pas uniquement avancer dans son travail et mettre tout en commun à la fin sinon de mieux s'entendre avec les personnes avec qui on travaille. Ceci afin de travailler dans une meilleure ambiance et d'être aussi plus compréhensif les uns envers les autres et de toujours prendre en compte le travail des autres, le tout augmentant la productivité et l'efficacité dans les recherches.

Enfin, ce projet ne m'a pas seulement appris de nombreuses choses sur le véhicule propre mais il m'a appris qu'il fallait toujours faire le compte rendu de son travail aux autres membres du groupe et qu'il fallait aussi bien connaître ses camarades pour simplifier les échanges.

Ophélie

J'ai trouvé ce projet relativement constructif et intéressant. En effet, ce projet m'a permis de me rendre compte de ce qu'était réellement un travail en groupe, c'est-à-dire un travail qui demande une bonne organisation des tâches et une bonne communication au sein du groupe. Au début, nous avons eu un peu de difficulté pour trouver des créneaux en commun du fait que nos emplois du temps n'étaient pas les mêmes, mais au final nous avons tout de même trouvé un moyen de mettre nos recherches en commun. D'autre part ce sujet m'intéressait particulièrement puisque je souhaite m'orienter dans le département MRIE. J'ai apprécié aussi les différentes présentations qui nous ont été faites (Projet PUMAS, présentation de la recherche et du labo LITIS...). Je ne regrette qu'une seule chose c'est de ne pas avoir pu mettre en pratique nos recherches ou tout du moins d'avoir eu une vision réelle des différents types de véhicule propre. J'espère reproduire ce genre de projet de groupe dans un futur proche.



Michaël

Grâce à ce dossier, j'ai appris que contrairement aux idées reçues, la voiture à essence n'était pas une nécessité. En effet, les avancées technologiques permettent aujourd'hui de faire rouler des voitures sans polluer, et surtout sans utiliser de ressources fossiles. Ainsi, à la suite de ce dossier je vais m'intéresser de façon plus approfondie à ces méthodes et je vais en parler dans mon entourage afin de faire évoluer nos pensées.

De plus, à travers mes différentes recherches sur le sujet, j'ai appris à cibler mes recherches sur le net ou dans les manuels. Cela me sera, je le pense, très utile dans un avenir très proche. Enfin, je me suis rendu compte que moi, en tant que futur ingénieur, je pouvais aider à ces recherches scientifiques, et que, grâce à mes connaissances technologiques, je pouvais m'investir dans un domaine qui me plaît.

Yoan

Ce dossier m'a permis de mieux comprendre comment était réalisé un état de l'art. Le plus dur était d'adopter une bonne organisation vu que chaque individu du groupe suit une thématique différente, ce qui implique des contraintes au niveau emploi du temps.

Sur le plan personnel, ce sujet m'a permis de découvrir le futur du moteur. J'ai pu découvrir les différents types de moteur utilisant une pile à combustible. De plus ce sujet m'a particulièrement intéressé car il correspondait à mon choix d'orientation pour l'avenir.

4.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet

Nous sommes satisfaits du sujet sur lequel nous avons travaillé. En effet, il correspondait à notre premier choix (ou au deuxième pour l'un d'entre nous). Cependant, nous avons travaillé seulement 4 mois sur ce projet, il est donc évident que nous aurions pu approfondir davantage si nous avions eu plus de temps. Cela dit, nous estimons que nous avons énoncé et expliqué le plus clairement possibles les points essentiels concernant les véhicules propres. Par ailleurs, nous savons qu'il existe d'autres technologies « propres » mais nous avons sélectionné uniquement celles qui pourraient, peut-être, un jour, envahir le marché de l'automobile.

Nous pensons donc que notre projet n'a pas besoin d'une suite ou alors, il faudrait reformuler le sujet en ajoutant des précisions. Par exemple, il pourrait être intéressant de proposer le sujet suivant : « La pollution aérienne et la pollution marine : quelles sont les alternatives pour réduire ces pollutions ? » Car soyons honnête, les automobilistes ne sont pas les seuls responsables de la pollution ; les bateaux et les avions causent aussi du souci à notre environnement. Pourquoi donc ne pas étudier les différentes technologies existantes ou en cours d'étude ? A méditer...





5. BIBLIOGRAPHIE

Livres et Articles :

Lodish, Baltimore, Berk, Zipursky, Matsudaira, Darnell, « Biologie moléculaire de la cellule », De Boeck Université, 1997, page 741

Thomas Brock, Michael Madigan, "Biology of microorganisms, fifth edition", Prentice-Hall International Editions, 1988

Olivier Appert et Philippe Pinchon de l'Institut Français du Pétrole (IFP), « L'automobile du futur plus propre et multi-énergies », Conférence de presse du 6 mai 2004, 3 pages.

Stéphane His de l'IFP, « L'hydrogène, vecteur énergétique du futur ? », Panorama 2004, 4 décembre 2003, 6 pages.

Bernard Bensaïd et Jean-François Gruson de l'IFP, « Moteurs/Carburants : quelles évolutions sur le long terme », Panorama 2004, 15 décembre 2003, 7 pages.

Laurent Antoni du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), « Les piles à combustibles », 23 mars 2006, 55 pages.

Julien Amadou de Nanocyl, « Nanotubes de carbone et piles à combustibles », mars 2009, 2 pages.

Thierry Halleau de l'Association Française de l'Hydrogène, « Hydrogène : il va vous transporter ! », 6 janvier 2009, 48 pages.

Liens internet :

<http://www.cleantechrepublic.com/?s=shamash>(valide à la date du 17/05/10).

<http://www.spectrosciences.com/spip.php?article26>(valide à la date du 17/05/10).

http://acces.inrp.fr/eedd/climat/dossiers/energie_demain/biomasse/transesterification(valide à la date du 17/05/10).

<http://bpe.epfl.ch/page40003.html>(valide à la date du 17/05/10).

<http://www.anso.freesurf.fr/plan.html> (valide à la date du 08/06/10).

<http://www.techno-science.net/?onglet=articles&article=4> (valide à la date du 08/06/10).

<http://perso.ensem.inpl-nancy.fr/Olivier.Lottin/PEMFC.html> (valide à la date du 08/06/10)

<http://www2.ulg.ac.be/cior-fsa/active/pac/pile.htm> (valide à la date du 08/06/10).

<http://www.cea-technologies.com/articles/article/627/fr> (valide à la date du 08/06/10).

<http://www.abricocotier.fr/209-reault-nissan-scenic-zev-h2-la-voiture-electrique-de-demain> (valide à la date du 08/06/10).

http://www.moteurnature.com/voiture_pile-a-combustible.php (valide à la date du 08/06/10).

<http://www.afh2.org/uploads/memento/fiche%205.2.2%20PEMFC.pdf> (valide à la date du 08/06/10).

<http://www.afh2.org/uploads/memento/Fiche%205.2.1%20PAC%20rev.%20avril%202008.pdf> (valide à la date du 08/06/10).

<http://www.google.fr/search?q=moteur+%C3%A0+air+comprim%C3%A9&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:fr:official&client=firefox-a>(valide à la date du 06/06/10).

http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_air_comprim%C3%A9(valide à la date du 06/06/10).



http://www.aci-multimedia.net/bio/voiture_air_comprime.htm(valide à la date du 06/06/10).

http://www.oleocene.org/wiki/index.php/Les_moteurs#Moteur_Stirling(valide à la date du 06/06/10).

<http://www.mdi.lu/>(valide à la date du 06/06/10).

<http://les-energies-renouvelables.iffrance.com/la%20voiture%20air%20comprim%E9/voiture%20air%20comprim%E9.htm>(valide à la date du 06/06/10).

<http://www.lebardessciences.com/2010/01/leternel-retour-du-moteur-a-air-comprime/>(valide à la date du 06/06/10).

<http://www.mdi.lu/oneflowair.php>(valide à la date du 06/06/10).

http://hourdequin.iffrance.com/actualite/moteur_air_comprime/moteu%20air%20comprime.html(valide à la date du 06/06/10).

<http://essenceciel.tk.free.fr/>(valide à la date du 06/06/10).

<http://www.freepatentsonline.com/5794601.html>(valide à la date du 06/06/10).

<http://www.econologie.com/>(valide à la date du 06/06/10).

<http://www.econologie.com/c-est-quoi-le-moteur-pantone-articles-1313.html>(valide à la date du 06/06/10).

<http://quanthomme.free.fr/pantone/realisations/StGeorgesF.htm>(valide à la date du 06/06/10).

<http://www.econologie.com/projet-echo-moteur-par-les-mines-de-douai-rapport-final-telechargement-3516.html>(valide à la date du 06/06/10).

<http://www.co-voiturage.fr/le-systeme-pantone.html> (valide à la date du 06/06/10).

http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque(valide à la date du 15/05/10).

<http://www.bpsolar.fr/solaire/photovoltaique/Effet%20Photovoltaique.pdf>(valide à la date du 15/05/10).

<http://tpesp.free.fr/effetphotovoltaique/effetphotovoltaique.html>(valide à la date du 15/05/10).

<http://lycees.ac-rouen.fr/maupassant/site2/IMG/ppt/EffetPhotovoltaique.ppt>(valide à la date du 15/05/10).

<http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/MCC/MC/SemiCond/SCvoltaique.pdf>(valide à la date du 15/05/10).

<http://www.ef4.be/fr/photovoltaique/aspects-techniques/>(valide à la date du 15/05/10).

http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire(valide à la date du 15/05/10).

<http://www.poweo.com/infos/les-energies/energie-photovoltaique-solaire.html>(valide à la date du 15/05/10).

<http://www.fnh.org/naturoscope/Energie/Solaire/Solaire1.htm>(valide à la date du 15/05/10).

<http://www.outilssolaires.com/>(valide à la date du 15/05/10).

<http://www.energiesolaire.org/>(valide à la date du 15/05/10).

<http://www.cipcsp.com/>(valide à la date du 15/05/10).

<http://www.panneauxphotovoltaiques.com/>(valide à la date du 15/05/10).



<http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/reseau/rub4.htm>(valide à la date du 15/05/10).

<http://www.panneauphotovoltaique.com/>(valide à la date du 15/05/10).

http://www.nord-nature.org/fiches/fiche_e2.htm(valide à la date du 15/05/10).

<http://www.voitureelectrique.net/>(valide à la date du 07/06/10).

http://www.notre-planete.info/actualites/actu_1431_BlueCar_voiture_electrique.php(valide à la date du 07/06/10).

<http://www.presse-citron.net/redacteur-invite-la-voiture-electrique-ce-qui-nous-attend-en-2010>(valide à la date du 07/06/10).

<http://www.voitureelectrique.net/renault-zoe-la-clio-electrique-888>(valide à la date du 07/06/10).

<http://www.usinenouvelle.com/article/vehicule-electrique-renault-planche-sur-les-moteurs-edf-sur-les-prises.N129909>(valide à la date du 07/06/10).

<http://voituredefutur.blogspot.com/2010/01/10-predictions-pour-le-vehicule.html>(valide à la date du 07/06/10).

http://fr.wikipedia.org/wiki/Batterie_lithium(valide à la date du 07/06/10).

<http://www2.cnrs.fr/presse/communique/1391.htm>(valide à la date du 07/06/10).

<http://automobile.suite101.fr/article.cfm/voiture-electriquebatterie-chargecest-parti>(valide à la date du 07/06/10).

<http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=7862>(valide à la date du 07/06/10).

<http://www.pile-au-methanol.com/>(valide à la date du 07/06/10).

<http://www.moneyweek.fr/20090713007/conseils/actions/voiture-electrique-batterie-lithium/>(valide à la date du 07/06/10).

<http://www.electron-economy.org/article-36222565.html>(valide à la date du 07/06/10).

https://lsiit-cnrs.unistra.fr/avr-fr/upload/6/68/Green_etude_hybride.pdf(valide à la date du 20/05/10).

<http://h2-tpe.ifrance.com/hybride.htm>(valide à la date du 20/05/10).

http://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_propre(valide à la date du 20/05/10).

http://fr.wikipedia.org/wiki/Automobile_hybride(valide à la date du 20/05/10).

<http://www.lavoiturehybride.com/>(valide à la date du 20/05/10).

http://www.psa-peugeot-citroen.com/document/presse_dossier/DP_Hybride_HDi_FR1138700885.pdf(valide à la date du 20/05/10).

<http://www.carttech.fr/news/stop-and-start-39386934.htm>(valide à la date du 20/05/10).

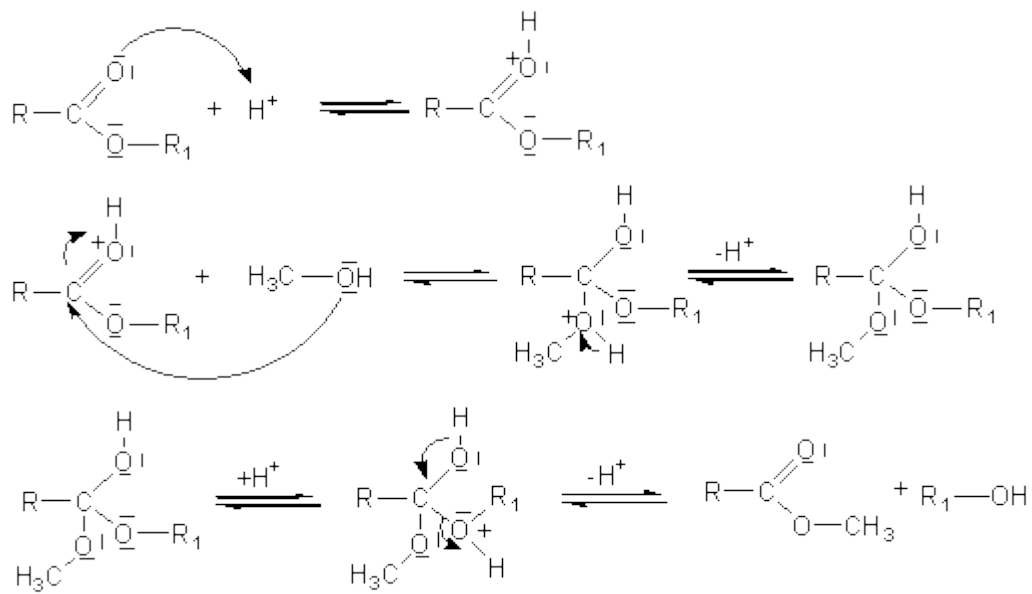
<http://www.asphalte.ch/LD/Prius/Prius-6.php>(valide à la date du 20/05/10).

<http://www.qctop.com/articles/voiture-hybride.htm>(valide à la date du 20/05/10).

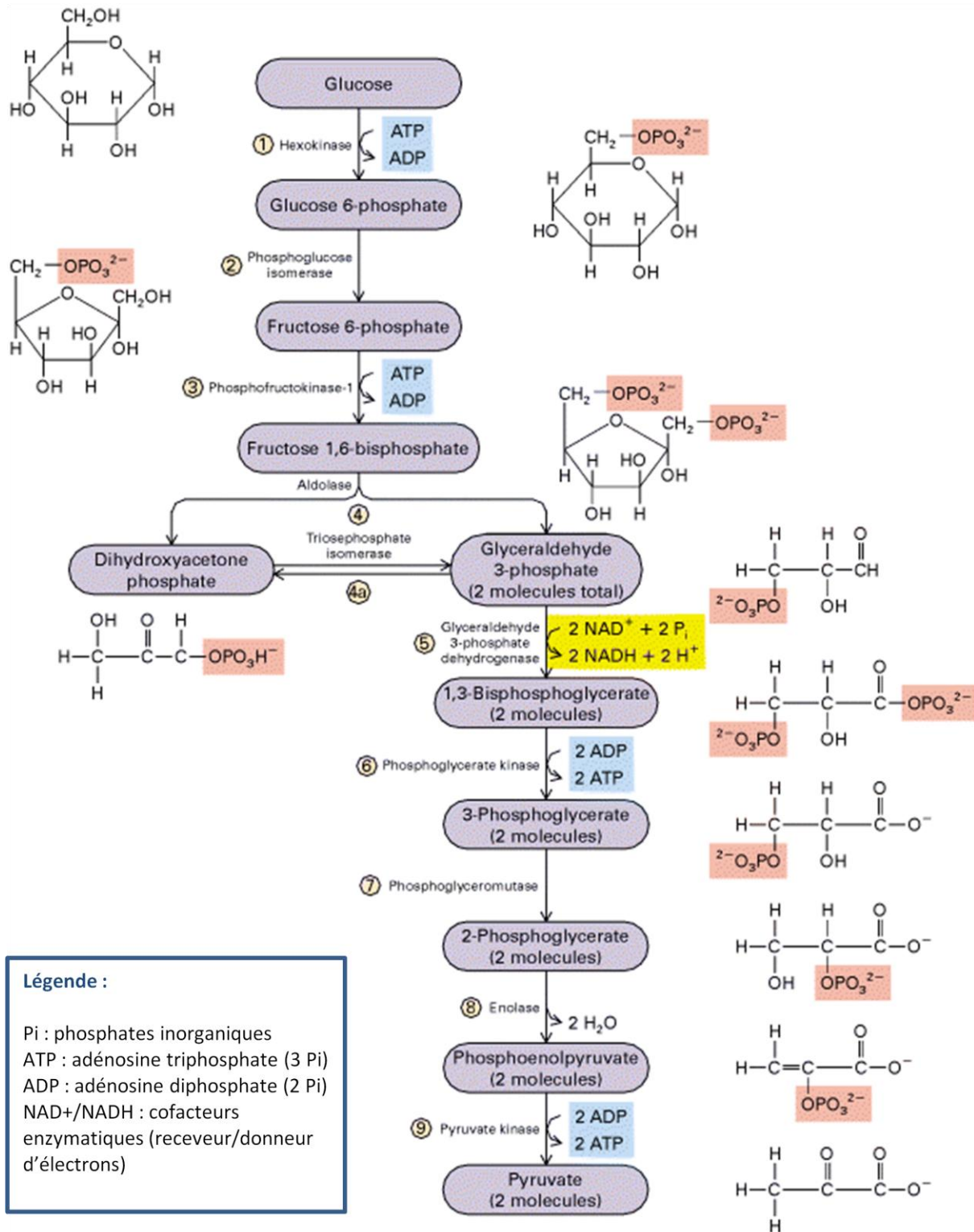
<http://www.greenzer.fr/voiture-hybride-avenir>(valide à la date du 20/05/10).



6. ANNEXES

Mécanisme de la réaction de transestérification


La glycolyse : voie de transformation du glucose en pyruvate



La fermentation acétonobutylique

