



INSTITUT
NATIONAL
des SCIENCES
APPLIQUÉES



Projet de Physique P6-3
STPI/P6-3/2008 – 9/10



GROUPE 1

Yori FOURNIER
Laurianne HENRY
Benjamin JARRY
Laurent LE MENTEC
Tawnza ZAHER

GROUPE 2

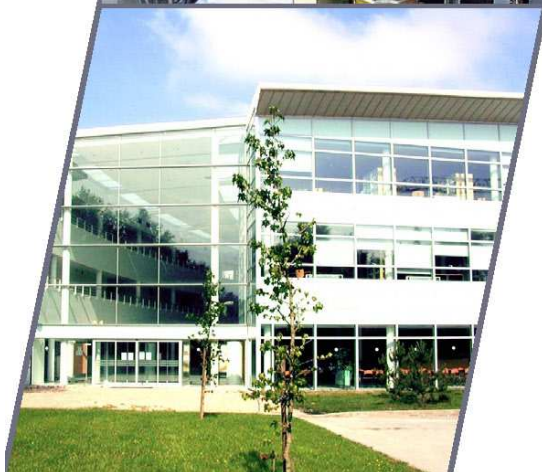
Matthieu BASSET
Martial BUISSON
Nathalie DUMAS
Aurélien GASS
Paul GAY

Enseignant responsable du projet :

Jean-Noël LE TOULOUZAN



VOITURE A HYDROGENE :
Caractérisation, bilan et étude
comparative



À TAILLE
HUMAINE
À L'ECHELLE
DU MONDE

Date de remise du rapport : **20/06/08**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2008 – 9/10**

Intitulé du projet : **VOITURE A HYDROGENE : Caractérisation, bilan et étude comparative**

Type de projet : **Diagnositics, essais et veille technologique**

Objectifs du projet :

- **Diagnositics d'essais voitures conventionnelles**
- **Diagnositics modèle réduit de voiture à hydrogène**
- **Veille technologique énergie et propulsion**

N° cahier de laboratoire associé : **A30234**

TABLE DES MATIERES

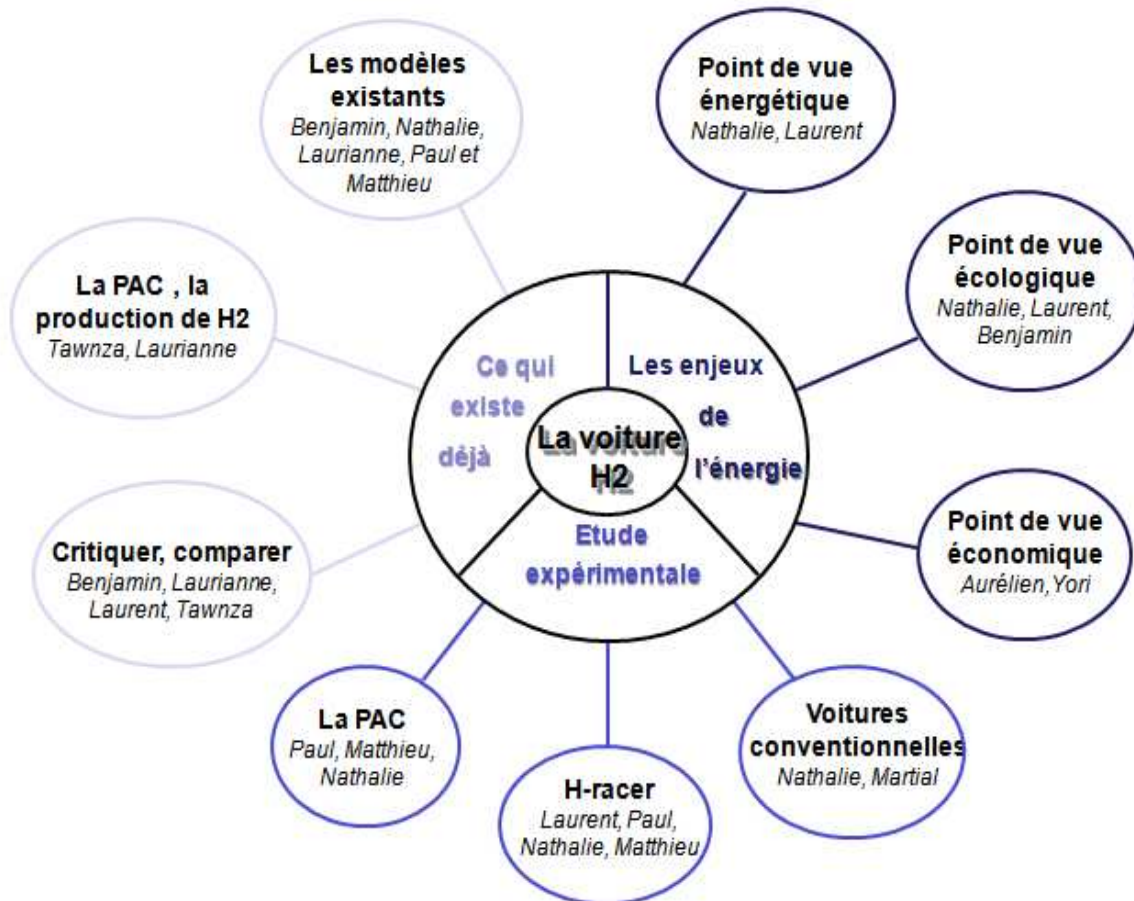
1. INTRODUCTION	5
2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL	6
3. LA VOITURE A HYDROGENE	7
3.1. ETUDE DE CE QUI EXISTE	7
3.1.1. Connaître : travail journalistique.....	7
3.1.2. Comprendre : ingénierie inverse.....	9
3.1.3. Critiquer : comparaisons, performances, limites	14
3.2. ETUDE EXPERIMENTALE.....	18
3.2.1. Etude de l'électrolyseur	19
3.2.2. Etude de la PAC fournie	19
3.2.3. Etude de la H-RACER.....	25
3.2.4. Etude d'une voiture conventionnelle : Citroën Saxo (essence).....	28
3.3. ENJEUX VIS-A-VIS DE L'ENERGIE	34
3.3.1. Point de vue énergétique.....	34
3.3.2. Point de vue écologique	36
3.3.3. Point de vue économique	40
3.4. DIFFERENTES VISIONS.....	44
3.4.1. Interview de M. Bruno FOUCRAS.....	44
3.4.2. Avis des membres du groupe	45
4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	47
5. ANNEXES	48
ANNEXE 1 : Tableau comparatif de différents moyens de locomotion	48
ANNEXE 2 : Tableau comparatif des différents prototypes.....	50
6. BIBLIOGRAPHIE	53

1. INTRODUCTION

Nous sommes confrontés tous les jours aux problèmes d'énergie, que ce soit dans l'actualité, ou dans la vie quotidienne. En effet, dans un contexte économique de hausse des prix du carburant, et un contexte de crise écologique, la baisse de la consommation de pétrole est devenue une préoccupation omniprésente. En plus de la question économique, l'utilisation d'hydrocarbures est responsable d'émissions massives de gaz à effet de serre, tels que le CO₂, qui contribuent au réchauffement climatique, nocif pour notre planète. C'est pourquoi de nouvelles technologies permettant de pallier à ces problèmes, ont été développées. Un certain nombre de ces technologies font intervenir l'hydrogène comme vecteur d'énergie. En effet, cet élément chimique est abondant, et n'est ni toxique ni polluant. Des études ont donc été effectuées afin d'envisager une utilisation plus courante de l'hydrogène, surtout dans le domaine des transports. Dans ce dossier, nous nous concentrerons plus particulièrement à une de ces applications, la voiture à hydrogène.

Dans le cadre de ce projet, nous avons d'abord étudié les différentes technologies utilisant l'hydrogène et leur fonctionnement en détail. Cette étude nous a permis de mieux appréhender ce nouveau phénomène. Il nous a paru également intéressant d'effectuer des mesures expérimentales sur un modèle réduit de voiture à hydrogène d'une part, et d'autre part, sur une voiture hybride en la comparant avec une voiture conventionnelle. Enfin, nous avons étudié les enjeux énergétiques, écologiques et économiques, inhérents à cette nouvelle technologie.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL



*PAC = Pile à combustible

*H-RACER = modèle réduit de voiture à hydrogène

3. LA VOITURE A HYDROGENE

3.1. ETUDE DE CE QUI EXISTE

3.1.1. Connaître : travail journalistique¹

3.1.1.1 Les différents principes technologiques

La pile à combustible (PAC) :

La pile à combustible fonctionnant à l'Hydrogène, réalise d'un côté l'oxydation de H_2 et de l'autre la réduction de O_2 . Les électrons libérés par H_2 créent une intensité dans le circuit, ce qui réduit O_2 , qui fourni tout simplement par l'air. La réaction globale de la pile est $H_2 + \frac{1}{2} O_2 > H_2O$.

On produit alors deux moles d'électrons pour une mole de H_2 et une demi-mole de O_2 consommées. Ce moyen est utilisé depuis longtemps pour produire de l'électricité mais les modèles automobiles à PAC n'ont jusqu'à présent été que des prototypes.

Le moteur à explosion à Hydrogène :

C'est un moteur classique à explosion dans lequel le carburant conventionnel est remplacé par du dihydrogène liquide ou gazeux, sous pression ou non. Le dihydrogène réagit par combustion avec le oxygène de l'air selon la réaction suivante : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 > H_2O$. Aucun modèle de voiture de série utilisant cette méthode n'a encore été vendu.

Les véhicules hybrides :

Par définition, ce sont des véhicules qui sont le fruit d'un mélange ; en l'occurrence entre deux modes de propulsions. Dans le cas qui nous intéresse, il s'agit de coupler un moteur essence avec un autre type de moteur (électrique ou autre) pour économiser l'essence et éventuellement gagner en rendement. Plusieurs modèles de série ont déjà été produits et vendus comme par exemple la Toyota Prius.

A propos du moteur Pantone :

C'est un « *moteur à explosion utilisant un mélange 75% de H_2 et 25% de combustible traditionnel. Il créerait H_2 en dissociant H_2O sous forme de plasma : scientifiquement très controversé car mathématiquement et thermodynamiquement pas rentable, et très dur à mettre en place techniquement* ». (http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Pantone)

Selon M. Bruno FOUCRAS cette technologie est une vaste blague.

3.1.1.2. Les différents prototypes pour chaque technologie

Nous avons réalisé deux tableaux comparatifs. Le premier regroupe différents moyens de locomotion, avec une petite évaluation de la puissance en fonction du poids (cf. **Annexe 1**) ; tandis que le second regroupe différents prototypes de voitures hybrides (cf. **Annexe 2**).

Tableau comparatif des différents moyens de locomotion :

Dans ce tableau comparatif, il est possible de retrouver : un vélo, une locomotive, un train, un

bateau, 5 voitures classiques, 4 prototypes fonctionnant avec une pile à combustible, et une voiture hybride essence- électricité.

Ici, nous ne cherchions pas à comparer plusieurs prototypes dans la même catégorie. Au contraire, le but était d'élargir la recherche à d'autres moyens de transport que la voiture, afin d'obtenir pour chacun des données communes qu'il nous serait possible de comparer. Les données précises n'étant pas évidente à obtenir nous nous sommes concentrés sur trois critères : le poids, la puissance et le rejet de CO₂. Nous avons ainsi établi un tableau qui regroupe, selon ces critères, plusieurs moyens de transport comme le bateau et le train et la voiture. Nous avons aussi tenté de mettre en valeur une partie d'histoire avec des moyens de transport plus ou moins récents pour finir par les prototypes. Il faut préciser que certaines valeurs du rejet de CO₂ (en rouge) ont été obtenues à l'aide d'un calcul en utilisant une formule qui liait la consommation de carburant au rejet de CO₂. Ces données sont donc indicatives seulement. A partir du tableau et pour l'illustrer, voici deux graphes :

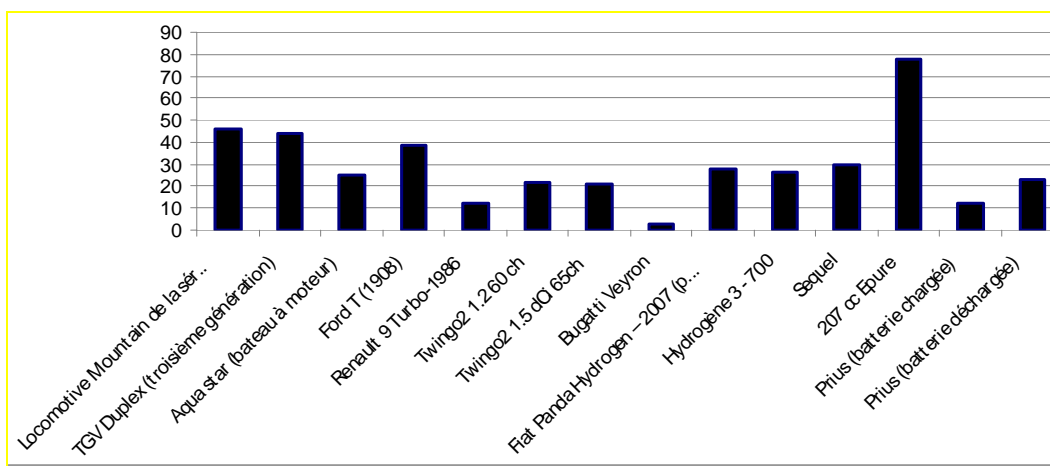


Fig. 1 : Rapport poids/puissance de différents moyens de locomotion

Le rapport poids puissance représente en quelque sorte les performances brutes ici pour plusieurs moyens de transport. Pour une voiture, il peut être comparé à l'accélération de 0 à 160km/h. Sur le graphique poids puissance, on peut remarquer que trois voitures se démarquent à savoir la Bugatti Veyron, la Renault 9 Turbo et la Toyota Prius (batterie chargée). La Bugatti Veyron est une voiture qui a spécialement été conçu pour obtenir un rapport poids puissance très faible, car une puissance très élevée, donc il est normal qu'elle possède le plus petit rapport. Pour la Renault 9 Turbo, par définition c'est une voiture qui possède un turbo donc qui est plus puissante qu'une voiture classique, mais on peut tout de même penser que pour l'époque cette voiture possède un meilleur rapport poids puissance que certaines voitures d'aujourd'hui. Enfin la Toyota Prius apparaît en bonne position pour une voiture hybride. Le vélo n'apparaît pas sur le graphique car il possède un rapport poids puissance trop élevé. On peut aussi noter que la 207 cc Epure (prototype) se distingue par un rapport fort élevé ce qui est dû à un poids important pour une puissance moindre. On peut alors considérer qu'elle n'est pas très performante.

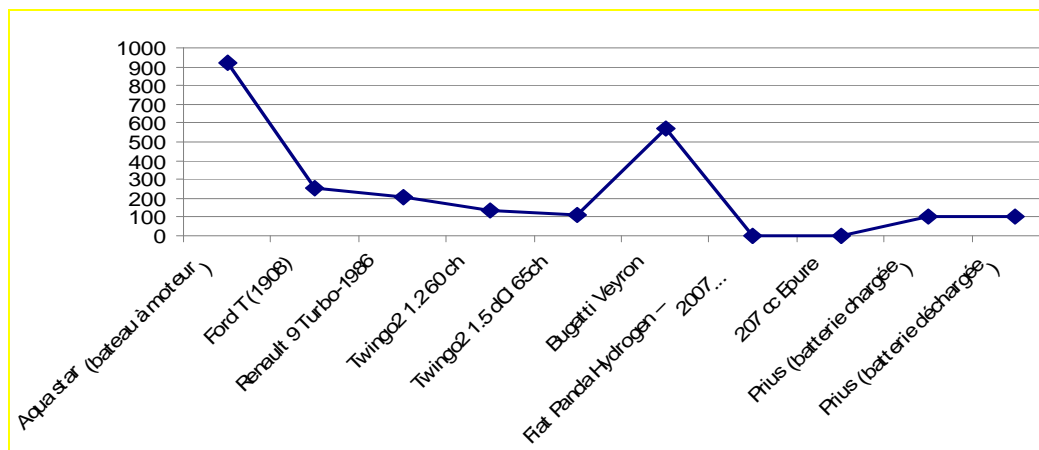


Fig. 2 : Quantité de CO₂ rejetée par certains véhicules

Après avoir comparé les performances brutes, il nous a paru intéressant de comparer ce rapport poids puissance au rejet de CO₂. Aussi, nous pouvons pu constater que malgré son excellent rapport poids puissance, la Bugatti Veyron rejette une quantité de CO₂ comparable à celle d'un bateau bi-moteur. Pour un rejet de CO₂ optimal, il faut regarder du côté des voitures légères et de puissance moyenne comme la Twingo2 65ch ou même du côté des voitures hybrides comme la Toyota Prius. Enfin pour un rejet de CO₂ nul, bien évidemment, les prototypes des voitures à Pile A Combustible sont excellents puisqu'ils ne rejettent absolument pas de CO₂.

3.1.2. Comprendre : ingénierie inverse²

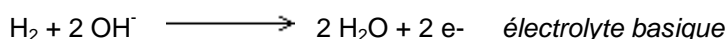
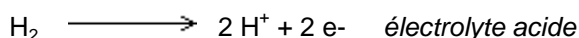
3.1.2.1. Le principe Pile à Combustible

La Pile à Combustible est l'un des principaux convertisseurs de l'hydrogène en énergie utilisable. Elle a été découverte en 1839, et n'est autre qu'une pile où la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation de l'hydrogène couplée à la réduction de l'oxygène de l'air. Elle convertit donc de l'énergie chimique en énergie électrique.

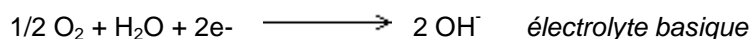
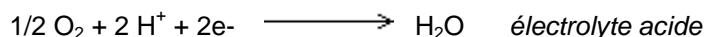
Principe de fonctionnement :

La pile est constituée de deux électrodes séparées par l'électrolyte. L'anode est alimentée en combustible (l'hydrogène), et la cathode est alimentée par l'air (source d'oxygène). Les réactions qui ont lieu au niveau des électrodes diffèrent selon l'acidité du milieu. Elles sont accélérées par un catalyseur, notamment le platine.

A l'anode on a :



A la cathode on a :



Le bilan donne donc : $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{chaleur}$

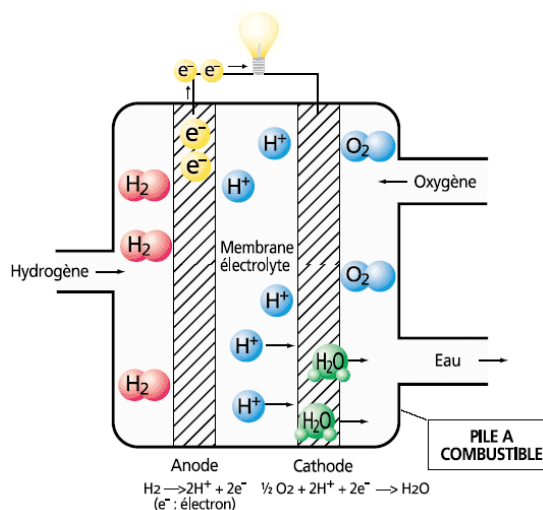


Fig. 3 : Principe élémentaire d'une pile

La circulation des électrons libérés, entre l'anode et la cathode, fait que de l'électricité est produite. Le principe de la Pile à Combustible est donc exactement l'inverse de celui de l'électrolyse de l'eau.

Pour une PAC à 25°C, le rendement théorique est compris entre 83% et 95%. L'utilisation de la PAC est plus intéressante que celle d'un moteur à combustion, dans la mesure où la température utilisée est moins élevée.

Il existe également des PAC dont le combustible est le méthanol, mais leur rendement reste inférieur à celui de la pile à hydrogène, et elles nécessitent des températures très élevées.

3.1.2.2. Les autres principes

Le moteur thermique à hydrogène :

C'est un moteur classique à explosion dans lequel le carburant conventionnel est remplacé par du dihydrogène liquide ou gazeux, sous pression ou non. Le dihydrogène réagit par combustion avec l'oxygène de l'air.

Les prototypes actuels de véhicules utilisant un moteur thermique à hydrogène peuvent être considérés comme hybrides car ils sont créés pour pouvoir également fonctionner à l'essence. Cependant il est important de noter qu'ils sont capables de fonctionner uniquement avec de l' H_2 .

Les véhicules hybrides :

Ils utilisent une combinaison entre plusieurs types de propulsion. Les véhicules hybrides utilisent généralement un moteur thermique conventionnel à essence, couplé avec un ou plusieurs moteurs électriques. Ces derniers sont alimentés par des batteries qui sont rechargées par le moteur thermique lorsqu'il est utilisé, ainsi éventuellement par l'énergie récupérée du freinage ou même par branchement sur le secteur. Le modèle le plus célèbre est la Prius de Toyota sur laquelle le passage d'un mode de propulsion à l'autre se fait automatiquement selon les conditions de roulages.

3.1.2.3. La production d'hydrogène

Pour certains l'hydrogène est la solution pour tous les problèmes énergétiques et environnementaux. En effet, l'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant ; il n'est ni polluant ni toxique, et est très énergétique (1 kg de H_2 libère trois fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence). L'hydrogène est présent partout, dans l'eau, dans les hydrocarbures, dans la biomasse, mais on ne le trouve pas à l'état pur. C'est pourquoi sa production reste parfois problématique, puisqu'elle est coûteuse et peut nécessiter

beaucoup d'énergie, ainsi que des technologies capables de le produire. Au jour d'aujourd'hui, il en existe plusieurs, existantes et en cours de recherche.

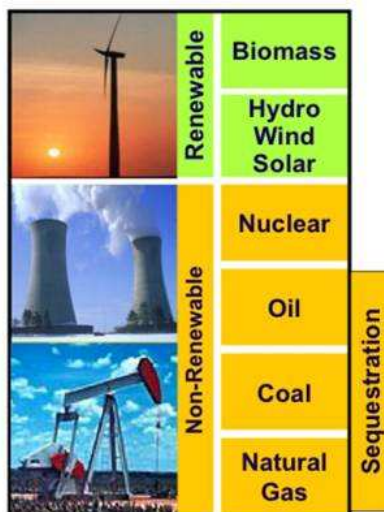


Fig. 4 : Toutes les ressources d'énergies sont envisagées pour la production d'hydrogène

Les méthodes les plus courantes

Reformage du méthanol :

La réaction de reformage est la suivante : $CH_3OH + NH_2O = CO, CO_2, H_2O, H_2$

C'est un procédé très toxique et polluant puisqu'il rejette du CO et du CO₂.

Reformage des combustibles fossiles - Vaporeformage du gaz naturel :

Ces deux techniques doivent être précédées par une désulfuration. Elles mettent en jeu une réaction qui casse les molécules d'hydrocarbures sous l'action de la chaleur afin de libérer l'hydrogène.

Pour le vaporeformage, le gaz naturel est exposé à la vapeur d'eau très chaude. Il y a alors réaction entre le méthane et l'eau qui produit du CO et de l'hydrogène. Cette première réaction se fait à une température comprise entre 800° et 900°C. Il faut ensuite réaliser une seconde réaction afin d'éliminer le CO toxique. On obtient alors du CO₂, du H₂ et du H₂O. Le gaz obtenu est alors purifier afin d'obtenir le maximum d'hydrogène.

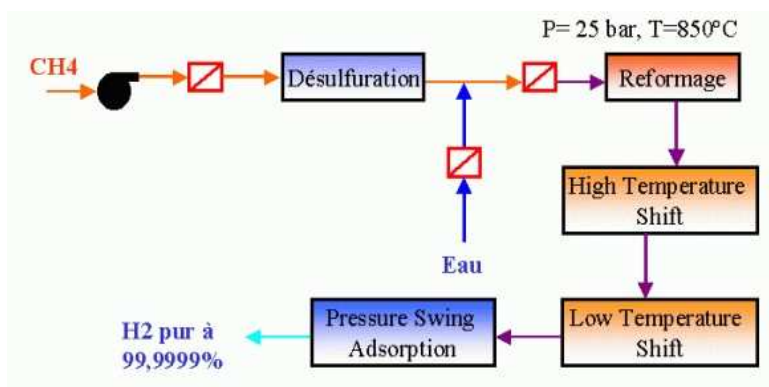


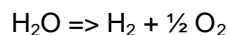
Fig. 5 : Principe de reformage du méthane

Ce procédé est aujourd'hui assez bien maîtrisé puisqu'il existe déjà des unités qui produisent de 20 à 100 000 m³/h.

Le coût de ce genre d'installation dépend du prix du gaz naturel et des coûts d'investissement. D'un point de vue écologique, cette méthode rejette du CO₂ dans l'atmosphère, il faudrait donc pouvoir l'emprisonner.

Electrolyse :

Il s'agit de la décomposition chimique de l'eau en hydrogène et oxygène, sous l'action d'un courant électrique. La cellule électrolytique est formée de deux électrodes, un électrolyte, et un générateur de courant. L'électrolyte est généralement une membrane polymère échangeuse de protons. A l'anode il y a oxydation de l'eau en oxygène, et à la cathode il y a réduction de l'eau en hydrogène. D'où la réaction d'électrolyse :



Aujourd'hui, l'électrolyse fournit un petit pourcentage de l'hydrogène du monde. Elle est donc utilisée pour les applications qui exigent de petits volumes d'hydrogène de grandes puretés. De plus, son rendement n'atteint que 65%.

Cette méthode reste cependant très coûteuse : elle est 3 à 4 fois plus chère que le reformage des combustibles fossiles ; et ce, en raison du prix élevé de l'électricité. Elle est également très gourmande en énergie. En effet, si l'on devait étendre la production d'hydrogène pour une consommation à l'échelle nationale, il faudrait tripler notre capital nucléaire, ce qui pose le problème des déchets radioactifs.

D'autres méthodes

La gazéification du charbon :

Cette technique était la principale source de production d'hydrogène avant le reformage, mais elle n'est plus utilisée de nos jours, sauf en Afrique du Sud et en Chine. C'est une technique intéressante lorsque les prix du pétrole et du gaz sont élevés. Le principe est assez simple : le charbon est mélangé avec de l'eau et de l'air à une température avoisinant les 1000°C et sous haute pression. Cela permet d'obtenir du gaz contenant du CO et de l'hydrogène. Il y a ensuite élimination du CO, qui se transforme en CO₂. Tout comme le reformage, il est nécessaire d'emprisonner ce CO₂.

Gazéification de la biomasse :

La biomasse est l'ensemble des végétaux qui se renouvellent à la surface de la Terre. La gazéification se fait par leur dégradation naturelle. On obtient alors un gaz de synthèse qui est ensuite purifié pour obtenir de l'hydrogène. L'écobilan est nul car la quantité de CO₂ émise est équivalente à celle qu'absorbent les plantes pendant leur croissance.

Cependant, si l'on s'intéresse à un point de vue économique, la gazéification de la biomasse est une méthode lente et peu productrice. Il est donc impossible d'envisager une production à grande échelle uniquement à partir de la biomasse.

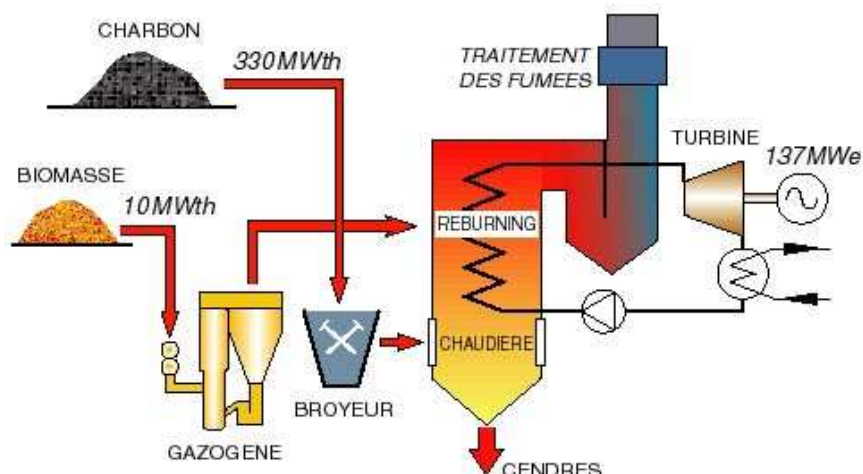


Fig. 6 : Gazéification du charbon et de la biomasse

Des solutions du futur

A partir du nucléaire :

Depuis quelques années, des chercheurs étudient des réacteurs nucléaires qui pourraient éventuellement produire de l'hydrogène, tout en fournissant de l'électricité et en réduisant la production de déchets. Au total, six nouvelles technologies de réacteur, dont la principale est un réacteur à gaz à très haute température (1100°C). La haute température permet alors la décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Cette technologie ne pourrait être commercialement disponible que vers 2030 ou 2040.

A partir des bactéries :

Certains chercheurs viennent de mettre au point un dispositif d'électrohydrogénèse utilisant des bactéries capables de dégrader la matière organique sous forme d'hydrogène. C'est un dispositif qui se rapproche donc de la méthode biomasse mais avec une grande amélioration puisqu'il s'agit ici de bactéries. En donnant un coup de pouce électrique aux bactéries, ces chercheurs ont réussi à en améliorer considérablement le rendement : lorsque qu'on fournit une molécule de glucose à ces bactéries, elles peuvent donner 3 fois plus de molécules d'hydrogène que la normale soit 12 molécules.

Malgré la consommation d'électricité nécessaire, le rendement de cette méthode reste favorable puisqu'elle produit 2,9 fois plus d'énergie sous forme d'hydrogène qu'elle en a consommé sous forme électrique.

Le pari d'Hydrosol :

Pourrait-on se passer totalement d'électricité pour produire de l'hydrogène ? C'est le pari que la recherche européenne essaie de relever depuis 2002 avec le projet Hydrosol. Les chercheurs développent un réacteur thermochimique qui exploite uniquement l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène.

Le concept théorique consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer l'eau jusqu'à 1100°C, puis, la vapeur produite traverse le réacteur où l'hydrogène et l'oxygène sont séparés à haute température par oxydoréduction. L'hydrogène est alors filtré et l'oxygène régénéré, ce qui forme un cycle. Cette technique présente un fort intérêt économique étant donné que les réactifs sont peu onéreux et que les régions ensoleillées pouvant accueillir les centrales solaires coïncident souvent avec les zones de dépression économique.

Ce dispositif a été testé à Konstandopoulos et a permis de produire de l'hydrogène en continu pendant 2 deux jours en 40 cycles.

Ce projet fructueux se poursuit depuis août 2007 avec l'inauguration d'une centrale de 100 kW sur le site Plate-forme solaire d'Almeria en Espagne. L'objectif est de réduire les coûts de production afin d'arriver à un prix de vente de 6 euro cents/ kWh.

Procédés photolytiques :

- procédé photobiologique (certains microbes peuvent synthétiser de l'hydrogène à partir d'énergie solaire)
- photoélectrolyse

3.1.3. Critiquer : comparaisons, performances, limites³

3.1.3.1. Comparaison économique

Coût de fabrication :

On sait que la fabrication de la PAC pose un problème de coût à cause de l'utilisation du platine, extrêmement cher, comme catalyseur. En effet, le prix moyen du platine pur à 99,9 % est d'environ 93 €/gramme. Or, la masse de platine nécessaire à la fabrication d'une PAC serait d'entre 50 et 100 g ce qui mettrait en moyenne le coût de la pile à 6975 € rien que pour le platine.

Certaines conjectures prétendent que le prix de vente d'un véhicule à hydrogène serait de 2000 à 10000 € plus cher qu'une voiture conventionnelle. Cependant, il semble impossible d'avoir des données plus précises sur le coût d'une voiture à PAC étant donné que tous les autres modèles ne sont que des prototypes.

Consommation - prix au kilomètre selon le mode de production d'H₂ :

Dans les stations services de Berlin, qui distribuent de l'hydrogène vraisemblablement fabriqué par reformage, on paye l'hydrogène 7,85 Euro/kg ce qui nous fait avec la Honda FCX 5,26 Euros/100km.

Pour comparer avec une autre grosse berline : la Peugeot 607 et ses 6,8L/100km revient à 10,12 Euros/100km (super sans plomb 95 à 1,49Euro/L).

Actuellement les coûts de production d'hydrogène par hydrolyse seraient plus élevés. En effet, même en bénéficiant du tarif EDF le plus intéressant pour l'électricité, sans prendre en compte les taxes, ce qui pose le prix d'un kWh à 0,0463 € (edf.fr), la production d'un kg d'hydrogène par hydrolyse haute température coûterait 10,4 euros rien qu'en électricité.

L'hydrogène issu de l'énergie nucléaire serait alors pour l'instant encore beaucoup plus cher que l'essence.

Coût de la mise en place d'un réseau de distribution :

Le coût de mise en place d'une station service de distribution d'hydrogène s'élèverait à plusieurs millions de dollars pour être plus précis entre 1,2 et 3 millions de dollars.

Le coût des stations services installées en Californie n'est pas rendu publique, cependant les rumeurs voudraient que l'état les ait financées à hauteur d'un million de dollars chacune. La Californie prévoit d'ici 2010 d'en installer entre 50 et 100, et d'y investir 50 millions de dollars. En revanche, pour la même année, le Canada prévoit d'en installer 7 en investissant 9 millions de dollars de dépense publique. La Norvège avait prévue pour cette année (2008) d'en installer 7, dans lesquelles elle aurait prévu d'investir 3,5 millions de dollars d'argent publique.

3.1.3.2. Comparaison écologique

Consommation - Equivalents en produits rejetés selon le mode de production de H₂ :

L'hydrolyse :

La production d'un kilogramme d'hydrogène par une électrolyse à haute température (en incluant l'énergie utilisée pour induire la haute température) serait de 225.MJ. En supposant que cette énergie soit produite par le nucléaire (comme 86% de la production française d'électricité) on s'intéresse à la pollution engendrée par cette production :

Le fonctionnement d'une centrale électrique nucléaire produit des déchets de divers types (classés en fonction de leur durée de vie et de leur radioactivité) :

- les déchets de haute et moyenne activité à longue vie représentent 10% en quantité et 99,9% en radioactivité

- les déchets de moyenne et faible activité à courte vie représentent 90% en quantité et 0,1% en radioactivité

De plus, la quantité de produits purs de fission est de 67,628 tonnes par an, et les produits de fissions conditionnés pour le stockage représentent 440 tonnes par an.

Cela correspondrait donc à 10g de déchets produits pour la production d'un kilo d'hydrogène.

Le vaporeformage :

Le reformage d'hydrogène à partir de méthanol mélangé à de l'eau est une des techniques utilisées industriellement pour la production de dihydrogène. Le méthanol utilisé peut être produit à partir de gaz naturel. Le craquage du méthanol produirait une mole de CO₂ pour trois moles d'hydrogène produite donc la production d'1 kg de H₂, soit 500 moles, entraînerait la production de 167 moles de CO₂ soit 7,3 kg de CO₂. Cependant il faut également prendre en compte la quantité de CO₂ produite pour fabriquer le méthanol.

La Honda FCX, qui possède sa propre centrale à reformage d'hydrogène, le fait à partir de gaz naturel directement : $CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3 H_2$ puis $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$

Elle produit donc une mole de CO, qui devient une mole de CO₂ pour une production finale de 4 moles d'hydrogène. Ici, la production d'un kg de H₂ provoque la production de 5,5 kg de CO₂.

3.1.3.3. Les performances (les 3 prototypes de voitures à PAC les plus performants pour différents critères)

Masse :

- Peugeot 207 cc Epure = 1550 kg
- General Motor Hydrogène 3 = 1590 kg
- Honda FCX = 1680 kg.

Puissance :

- General Motor H3 = 209 ch
- Honda FCX = 130 ch
- Toyota FCHV-4 = 122 ch.

Vitesse de pointe :

- Mercedes F600 HY Genius

- Honda FCX et General Motor H3 = 160 km/h
- Toyota FCHV-4 = 155 km/h.

Consommation :

- Honda FCX = 0,67 kg/100 km
- Hyundai Tucson FCEV = 0,73 kg/100 km
- Peugeot 207 cc Epure = 0,86 kg/100 km

A noter que la Toyota Prius, qui est une voiture hybride à essence, ne consomme que 4,3 litres d'essence au 100 km.

Autonomie :

- Honda FCX = 560 km
- Général Motor Sequel = 480 km
- Mercedes F600 HY et General Motor H3 liquide = 400 km

La **Honda FCX** est dans le top 3 pour tous les critères. Cela signifie que, non seulement elle est l'une des voitures à PAC qui correspondent le mieux au sujet qui nous intéresse dans cette étude, c'est-à-dire l'écologie, mais elle est également l'une de celles qui possèdent les meilleures performances.

Pour terminer cette critique, comparons brièvement notre numéro 1 avec des voitures conventionnelles existantes :

- Tout d'abord, la Peugeot 607, beaucoup plus chère (34 400€), luxueuse, et faisant à peu près la même taille, est de masse proche. Cependant, sa supériorité en terme de puissance (170 ch.) la rend un peu plus rapide (224 km/h) et surtout plus autonome (>1000 km).
- La Ford Mondéo, plus accessible (25 000€) est un peu plus légère et un peu plus puissante (1500kg pour 150 ch en moyenne). Elle est donc un peu plus rapide (200 km/h). Ses performances sont relativement proches de celles de la Honda FCX, bien que légèrement meilleures, à l'exception encore une fois de son autonomie qui se rapproche des 1000 km.

On peut donc voir que la meilleure élève de nos prototypes utilisant une PAC, possède une marge de progression en terme de vitesse et surtout d'autonomie avant d'atteindre le niveau de performances des actuelles voitures à essence.

3.1.3.4. Bilan carbone

Afin de comparer en termes de pollution un véhicule classique et une voiture à hydrogène nous en avons établi les bilans en équivalent carbone. Pour ce, nous avons demandé de l'aide au groupe « Bilan carbone ». Ces derniers, nous ont répondu que pour établir un bilan carbone il fallait connaître :

- La composition du véhicule en matériaux.
- Sa consommation en carburant, ainsi que tout ce qu'il consommait tout au long de sa vie.
- Le mode de destruction de ses constituants.

Ces informations étaient difficiles à trouver, nous n'avons donc pas pu comparer beaucoup de véhicules. Néanmoins, nous avons recueilli les informations nécessaires pour établir le bilan carbone d'une Laguna II diesel. Puis, nous avons considéré la même voiture en supposant que celle-ci consommait 1 L d'hydrogène pour 100 km, à la place du gazole.

Voici les renseignements recueillis sur la Laguna :

Composition :

Laguna 2 diesel poids total 1416 kg dont :

- 38,8% de tôle d'acier soit 549,4 kg
- 14,7% d'acier massif soit 208,2 kg
- 13,6% de plastiques soit 192,6 kg
- 9,9% d'aluminium soit 140,2 kg
- 8,4% de fonte soit 118,9 kg
- 5,8% de caoutchoucs soit 82,1 kg
- 2,9% de verre soit 41,1 kg
- 2,5% de fluide (huiles) soit 35,4 kg
- 1,5% de cuivre soit 21,2 kg
- 0,8% de plomb soit 11,3 kg
- 0,8% de matériaux naturel (bois, cuir, coton) soit 11,3 kg
- 0,2% d'autres métaux (zinc, magnésium...) soit 2,8 kg
- 0,1% de céramique soit 1,4 kg

Consommation :

Cette voiture consomme 7,2L au 100km, sachant qu'une voiture fait environ 200 000km dans sa vie. A chaque vidange, on remet 1,5L d'huile, et on fait une vidange tous les 30 000km, on en fait donc 6 ou 7. Enfin, on change environ 3 fois les pneus en comptant qu'un pneu (juste le caoutchouc) fait à près 20kg.

Destruction :

Les matériaux recyclés sont l'acier, les huiles, les métaux lourds, le verre et les pneus (dans le bitume des routes). Le reste tel que les matériaux plastiques est plutôt brûlé.

Avec ces informations, le groupe « Bilan carbone » nous a répondu :

Bilan carbone de la Laguna :

- Matériaux entrants : 1,666 tonnes équivalent carbone.
- Transport : 12,127 tonnes équivalent carbone.
- Déchets directs : 0,0039 tonnes équivalent carbone (ce qui concerne le recyclage et l'incinération)

TOTAL = **13,7969** tonnes équivalent carbone

Bilan carbone de la voiture à hydrogène :

- Matériaux entrants : 1,666 tonnes équivalent carbone.
- Transport : 0,00729 tonnes équivalent carbone.
- Déchets directs : 0,0039 tonnes équivalent carbone.

TOTAL = **1,6778** tonnes équivalent carbone

Pour le bilan de la voiture à hydrogène, il faut tout de même noter que celui ne prend pas en compte la production de CO₂ par vaporeformage de gaz naturel ou l'utilisation d'énergie électrique pour l'hydrolyse. (Voir le paragraphe sur la production d'hydrogène et celui sur les problèmes écologiques.)

3.1.3.5. Les limites techniques : le stockage

Le stockage et le transport de l'hydrogène freinent l'arrivée de l'hydrogène sur le marché. Ce gaz, 14 fois plus léger que l'air, renferme, à volume égal, 2 fois plus d'énergie que le gaz naturel et 3 fois plus d'énergie que le pétrole. Mais c'est aussi un gaz dangereux qui s'enflamme facilement en présence d'oxygène (cf. : l'incendie du zeppelin d'Hindenburg en 1937).

Le plus souvent, l'hydrogène est comprimé sous 250 à 700 bars dans des bombonnes ou des réservoirs souterrains. Mais mettre un gaz sous pression nécessite un apport énergétique important ; et d'autre part, le volume des cuves reste trop important. La liquéfaction à -253°C, sous pression atmosphérique apporte une solution au problème du volume, mais les techniques cryogéniques sont également très gourmandes en énergie.

A l'avenir, le stockage de l'hydrogène pourrait être solide : les ions d'hydrogène peuvent remplir des interstices d'alliages de métal léger, formant ainsi un hydrure. Cette réaction d'absorption étant exothermique, il faut ensuite chauffer le matériau hôte pour libérer l'hydrogène. Le stockage solide de l'hydrogène permettrait d'éviter les risques liés aux hautes pressions, si les réactions d'absorption et libération s'opèrent à cadence acceptable ce qui est le cas à température modérée. Une équipe suisse norvégienne a récemment découvert une forme instable de LiBH₄, qui serait un candidat intéressant pour le stockage solide. Cependant ces matériaux sont difficiles à manipuler.

Si l'utilisation de l'hydrogène venait à s'étendre, le potentiel du stockage solide serait alors très large, notamment dans les stations de ravitaillement.

3.2. ETUDE EXPERIMENTALE

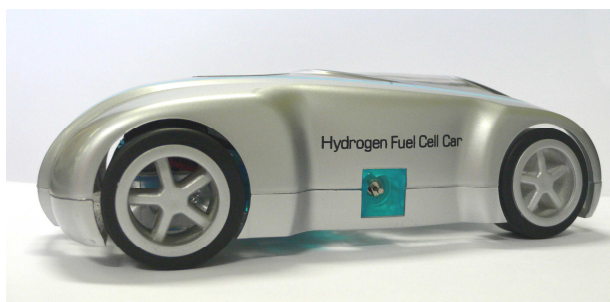


Fig. 7 : H-RACER, modèle miniature de voiture à hydrogène

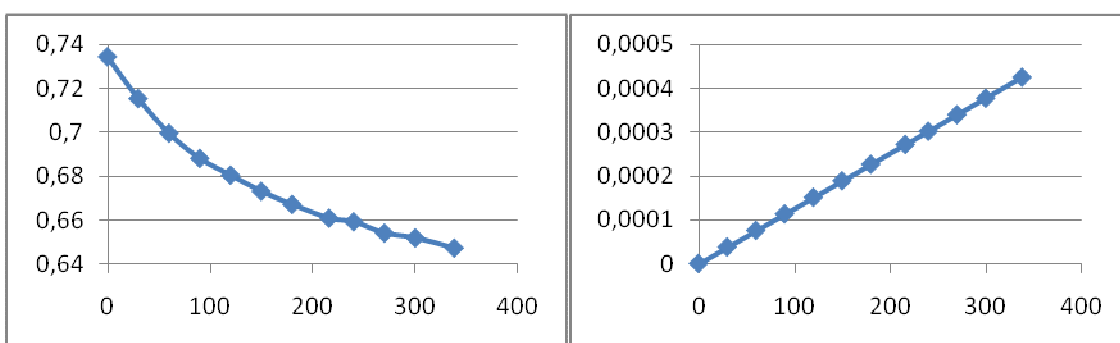
Nous nous sommes efforcés d'avoir une étude la plus complète possible, d'un bout à l'autre du processus de production et d'utilisation de l'hydrogène. C'est pourquoi nous avons commencé par étudier l'électrolyseur et nous avons ainsi pu calculer la quantité d'hydrogène produite dans des conditions données. Ces données ont ensuite été réutilisées lors de l'étude de la voiture.

3.2.1. Etude de l'électrolyseur



Fig. 8 : Électrolyseur étudié

L'électrolyseur est constitué d'un réservoir d'eau (déméralisée) et d'une cellule qui sert d'électrode. Cette dernière correspond à la partie bleue visible sur la photo. Le système est alimenté par deux piles de 1,5 V. Il est possible d'utiliser un panneau solaire photovoltaïque en source d'énergie.



Courbe 1 : Puissance électrique apportée à l'électrolyseur en fonction du temps

Courbe 2 : H₂ produit en fonction du temps

La puissance fournie décroît au cours du temps. Ce phénomène peut s'expliquer par la saturation de la membrane de l'électrolyseur et dans une moindre mesure, par l'usure des piles.

L'intensité étant quasiment constante et l'eau en excès, nous avons considéré la vitesse de réaction est constante, la production de dihydrogène est donc une fonction linéaire. Ces mesures nous ont permis de déduire la quantité de dihydrogène produite par l'électrolyseur en fonction du temps.

On est arrivé au résultat suivant : $1,25 \cdot 10^{-6} \text{ mol}_{\text{H}_2} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.2.2. Etude de la PAC fournie

La pile à combustible est le dispositif qui lors de la transformation de l'hydrogène et l'oxygène en eau produit de l'électricité. Sur la photo l'électrolyseur se trouve à gauche et la pile à droite. L'électrolyseur produit l'hydrogène et l'oxygène qui sont envoyés dans la pile au moyen de tuyaux flexibles. La pile se décharge dans une résistance dont on peut faire varier la valeur (à droite sur la photo). Et enfin un ampèremètre mis en série dans le circuit électrique de l'électrolyseur nous permet d'avoir précisément l'intensité « en entrée », et un voltmètre aux bornes de la pile nous donne la tension de celle-ci.

Le but de ces manipulations est d'en savoir un peu plus sur la pile à combustible en se familiarisant avec.

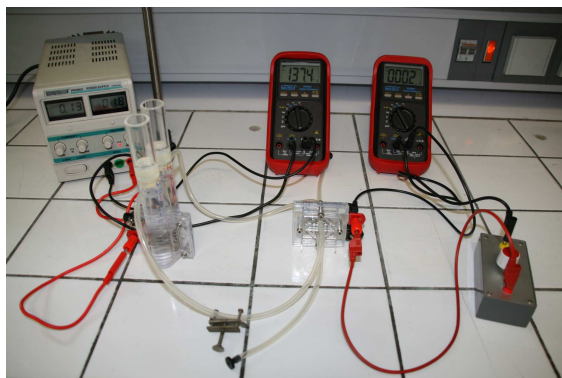
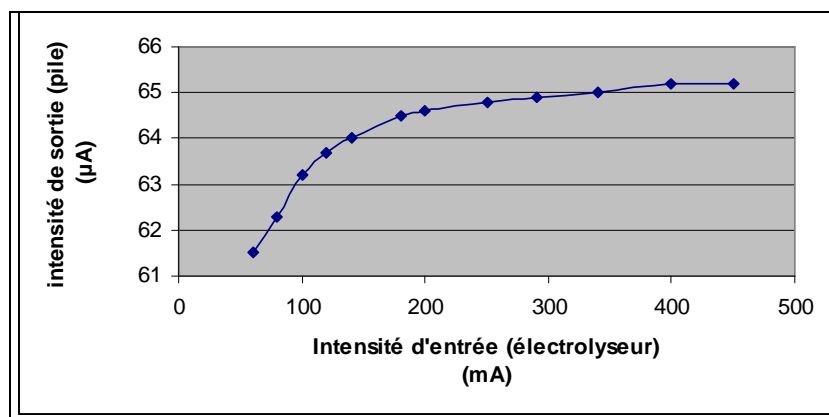


Fig. 9 : Montage expérimentale pour l'étude de la PAC

Le premier montage réalisé est celui proposé par le constructeur du modèle pédagogique de la pile : la pile à hydrogène est directement alimentée par l'électrolyseur lui-même alimenté par un générateur de courant continu.

Nous voulions voir si, sur une plage d'intensité donnée, il serait possible d'observer une saturation de la pile ou un comportement linéaire. Pour ma part, je m'attendais à un comportement linéaire.

On cherchait alors à mesurer l'intensité du circuit pile-résistance en fonction de l'intensité que l'on appliquait à l'électrolyseur. Dans un premier temps, il nous a d'abord été difficile d'obtenir des mesures puisque la pile se déchargeait dans le boîtier fourni par le constructeur. La résistance maximale applicable à l'aide du boîtier fourni par PIERRON ne dépassait pas les 200 Ω . Mais à notre grande surprise l'intensité ne cessait de croître. Nous avons donc eu l'initiative d'augmenter considérablement la résistance pour atteindre les K Ω . Les mesures sont donc devenues plus stables.

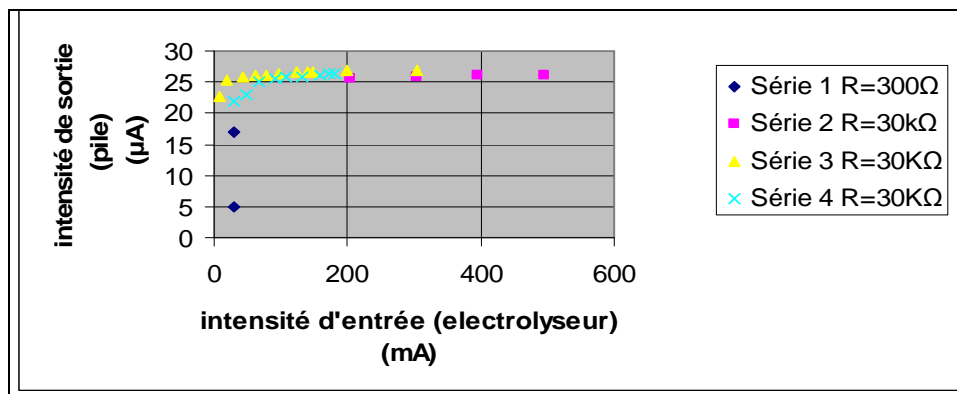


Courbe 3 : Intensité à la sortie de la pile en fonction de l'intensité d'entrée à l'électrolyseur

La semaine suivante nous retenons la même expérience pour des résistances différentes. De nouveau, et pour des raisons que nous ignorons toujours, la tension et l'intensité en sortie semblaient croître indéfiniment nous empêchant de recueillir des résultats valables. Dans l'objectif d'optimiser notre temps pour obtenir des mesures satisfaisantes, nous décidions à nouveau d'augmenter la résistance, mais le problème demeurait. Finalement, et bien heureusement, l'intensité et la tension de sortie se stabilisèrent sans que l'on puisse toujours y apporter la moindre explication. La résistance était alors de 30 K Ω . Nous commençons donc à réunir de nouvelles mesures exploitables.

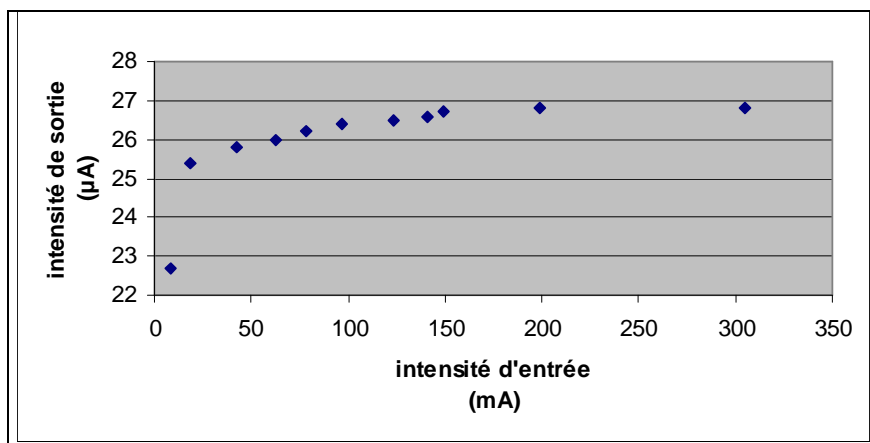
Nous avons effectué quatre séries d'expériences :

- Série 1 : avec une résistance de **300 Ω** , mais pour cette résistance le système semblait ne jamais se stabiliser.
- Série 2 : avec une résistance de **30K Ω** , même si le système n'est pas vraiment « stable ».
- Série 3 : avec une résistance de **30K Ω** , miraculeusement tout fonctionna « correctement ».
- Série 4 : avec une résistance de **30K Ω** , car il nous manquait des points.
-



Courbe 4 : Intensité à la sortie (pile) en fonction de l'intensité d'entrée (électrolyseur)

On remarque bien que la 1^{ère} série ne se raccorde pas du tout aux autres séries, rien d'étonnant puisque la résistance était différente. Les séries 2 et 3 coïncident presque, la pente semble être la même. Les séries 3 et 4 coïncident aussi, hormis les 2 premiers points. Si l'on conserve seulement la série 3 on obtient une courbe proche en allure de celle faite lors des premières expérimentations (avec une résistance de 12KΩ).



Courbe 5 : Intensité à la sortie (pile) en fonction de l'intensité d'entrée (électrolyseur) à partir de la série 3

On observe ce qui semble être une saturation du système. En effet, pour des intensités supérieures à 200 mA l'intensité de sortie se fixe à 27µA.

Cette saturation du système électrolyseur-pile est forcément due à l'électrolyseur puisque le constructeur nous indique que la pile à combustible consomme plus vite l'hydrogène qu'il n'est formé par l'électrolyseur (la pile consomme 7ml/min et l'électrolyseur produit 3,5 ml/min). Au niveau de l'électrolyseur, la surface de l'électrode et la vitesse de la réaction d'électrolyse peuvent être des facteurs explicatifs de cette saturation. En améliorant la surface de l'électrode, il devrait être possible de déplacer cette saturation pour des intensités supérieures et ainsi obtenir une meilleure intensité de sortie de saturation. Il faut souligner que d'après nos résultats la saturation est obtenue pour une intensité de sortie très faible (27 µA). Sur cette expérience, on fournit beaucoup plus d'énergie au système que celui-ci nous en restitue. Cela apparaît complètement inutile car dans ce contexte la pile à combustible n'est pas rentable.

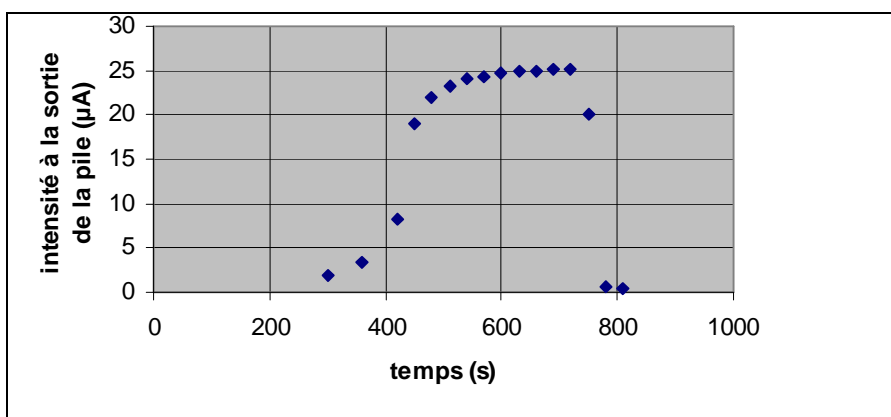
Mais revenons sur les différences entre les séries 3 et 4 de la courbe 4. Il n'y a aucune raison pour que les points ne coïncident pas. En fait la série 3 a été effectuée avant la série 4. On a réalisé les différentes mesures en diminuant petit à petit l'intensité d'entrée (électrolyseur). La prise de mesure s'étant bien passé nous décidons d'aller chercher des points intermédiaires pour que notre courbe soit plus précise (c'est la série 4) mais cette fois nous faisons varier l'intensité par ordre croissant. Les

deux premiers points obtenus ne coïncident pas avec la série 3. On remarque que dans la série 3 on obtient une intensité de sortie de $22,7\mu\text{A}$ pour une intensité d'entrée de 8mA alors que dans la série 4 pour obtenir une intensité de sortie équivalente ($22\mu\text{A}$, $22,9\mu\text{A}$) il faut fournir un courant de respectivement 30mA et 49mA . On peut peut-être l'expliquer par le fait que « l'inertie » de la pile est importante, la pile met longtemps à se décharger lorsque l'on coupe l'alimentation en hydrogène. Donc le fait de partir des hautes intensités a donné de l'élan à la pile, du coup il lui faut moins d'énergie pour produire une même intensité de sortie que dans le cas où elle part d'une faible intensité. L'analogie n'est peut être pas très pertinente mais il est plus facile pour un cycliste d'atteindre une certaine vitesse lorsqu'il descend une pente que lorsqu'il la remonte.

Ces premières expériences nous ont permis de voir que l'électrolyseur a un régime de production d'hydrogène maxi pour une certaine intensité, on suppose qu'en fait plus il y a d'hydrogène arrivant à la pile plus le courant débité par celle-ci est important. Mais nous ne pouvons rien dire à propos du comportement de la pile en elle-même. C'est dans ce but que l'on a effectué les mesures suivantes.

Avant toute mesure une « purge » de la pile est effectuée pour être sûr d'avoir des conditions de départ « identiques » pour différentes mesures.

Les différentes mesures ont été effectuées sur le montage (voir photo montage) avec des résistances différentes.

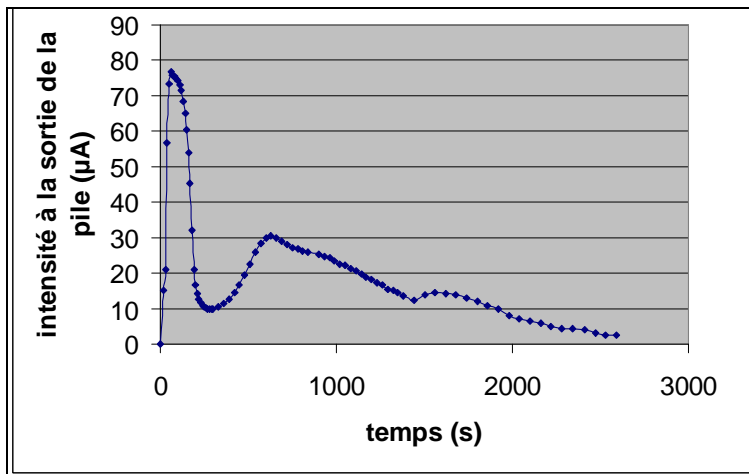


Courbe 6 : $I(t)$ pour $R=30\text{k}\Omega$

Dans un premiers temps l'électrolyseur produit et stocke l'hydrogène et l'oxygène. On accumule environ 10ml d' H_2 et donc environ 5 d' O_2 (la quantité produite est très approximative car on la lit sur la graduation présente sur l'électrolyseur, mais elle n'aura pas beaucoup d'importance pour nous). Ensuite on laisse entrer l'hydrogène et l'oxygène dans la pile. Sur la courbe cela correspond à $t=300\text{s}$. On voit bien que l'intensité augmente assez rapidement, après une petite période « d'amorçage » entre $t=300\text{s}$ et $t=400\text{s}$, vers une valeur limite qui se trouve aux alentours de $25\mu\text{A}$, ce qui nous déçoit. Le courant fourni par la pile nous semble vraiment très faible puisque le constructeur nous indique que le débit maximum est de 1000mA ! Mais le fait d'utiliser des résistances de valeur élevées ($30\text{k}\Omega$) par rapport aux résistances proposées pas le constructeur (allant de 20 à 200Ω) en est sûrement l'explication mais nous n'arrivons pas avec ces valeurs à « stabiliser » le courant en sortie de la pile.

La chute de l'intensité pour les 3 dernières valeurs correspond à la rupture de l'alimentation en oxygène. En effet par curiosité nous avons voulu voir si la pile était capable, maintenant que son débit était relativement constant, de fonctionner avec l'oxygène de l'air ambiant. Et bien ça n'a pas l'air de marcher aussi bien.

Nous effectuons le même type de mesures avec une résistance de $10\text{k}\Omega$.



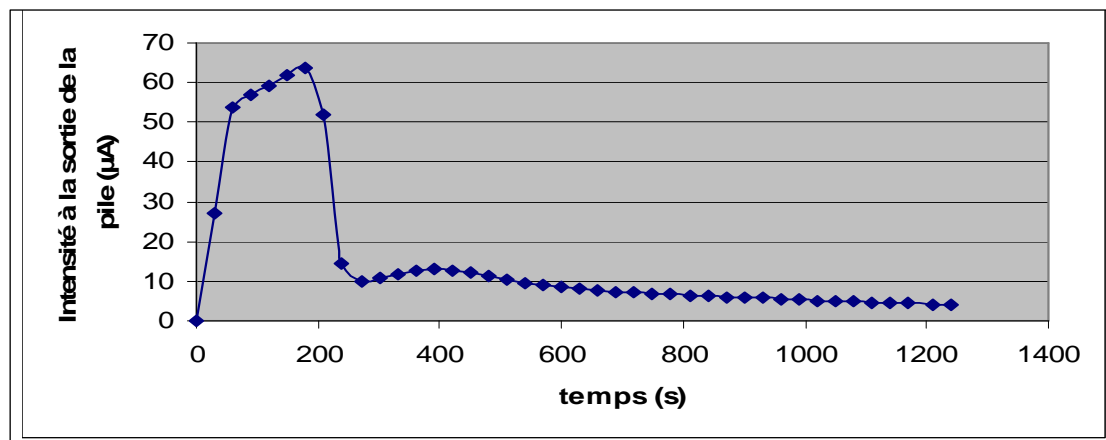
Courbe 7 : $I(t)$ pour $R=10k\Omega$

Nous obtenons, un peu surpris, cette courbe. Le montage était rigoureusement le même, la pile a été « purgée » comme pour la première mesure. La valeur maximum atteinte cette fois est $76,7\mu A$. Mais l'intensité ne s'y stabilise pas, contrairement à la première mesure, il s'agit juste d'un pic d'intensité. Le reste de la courbe nous est encore plus étrange. On remarquera juste que le rapport entre les résistances et l'inverse du rapport des intensités maximum sont très proche.

$$R1/R2 = 30/10 = 3$$

$$I_{max2}/I_{max1} = 76,7/25,1 = 3,06$$

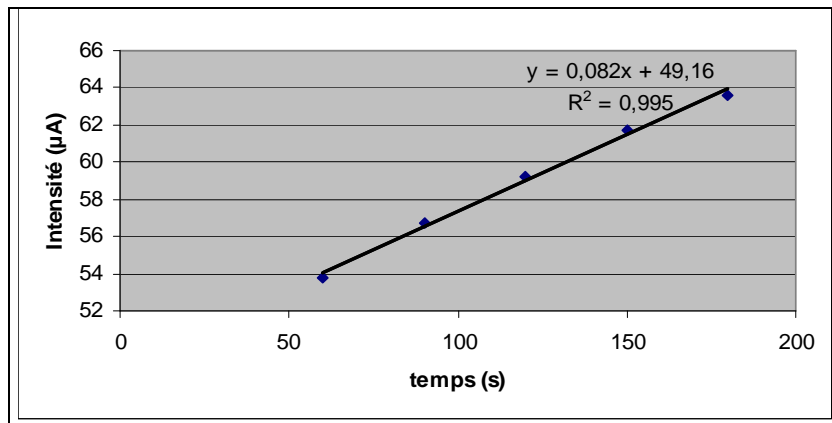
Nous effectuons une nouvelle mesure sur le même schéma. Et la encore un résultat différent !



Courbe 8 : $I(t)$ pour $R=10k\Omega$

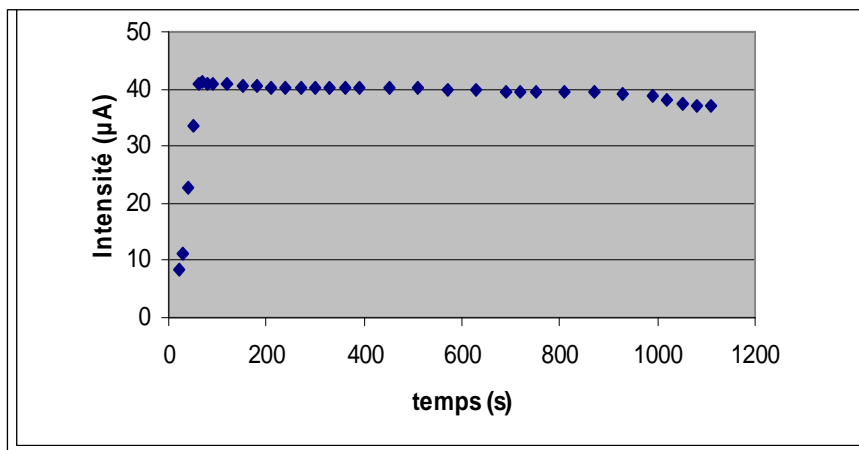
Le résultat est différent mais il peut s'expliquer. Quelques secondes après avoir ouvert l'arrivée d' H_2 et d' O_2 , la réserve d'hydrogène s'est brutalement vidée (alors que dans les expériences précédentes la réserve d'hydrogène mettait un bon bout de temps avant d'être totalement consommée). On ne peut l'expliquer que par une fuite de notre montage. On voit bien que la pile se trouve à court d'hydrogène vers $t=200s$, elle n'atteint pas le maximum d'intensité de $77\mu A$ (atteint lors de la mesure précédente avec exactement le même montage et même résistance).

Mais on notera que la partie supérieure de la courbe est quasi linéaire. Nous ne savons pas s'il faut y voir un comportement caractéristique de la pile ou une pure coïncidence. Le tracé à part de ces 5 points nous donne le graphe et l'approximation linéaire suivante :



Courbe 9 : partie supérieure de $I(t)$ tirée de la courbe 6

Enfin dernière mesure effectuée,



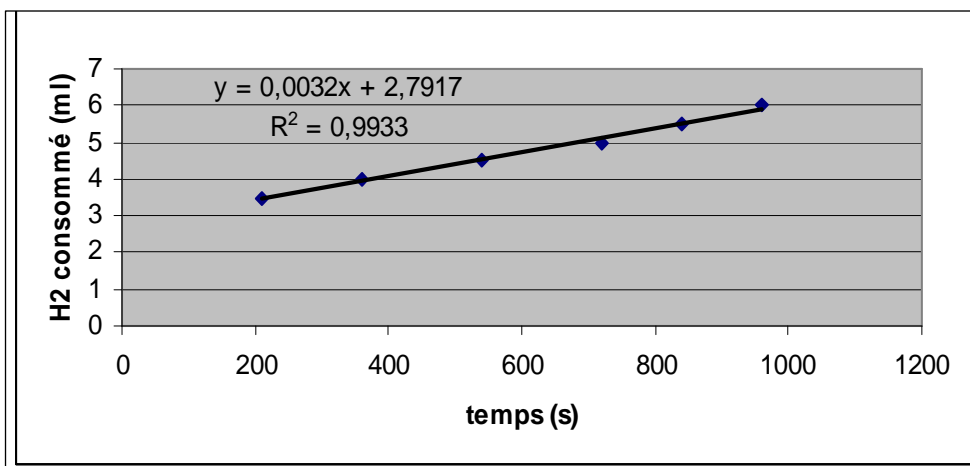
Courbe 10 : $I(t)$ pour $R=20k\Omega$

Dans cette configuration la résistance est de $20k\Omega$, l'intensité augmente rapidement avant de se stabiliser à environ $41\mu A$, puis régresse lentement. On retrouve à peu près les mêmes caractéristiques de la première mesure (courbe 6), sauf qu'il n'y a pas cette zone « d'amorçage » et le régime « permanent » est atteint beaucoup plus rapidement $t=70s$ environ pour ce cas et $t=210s$ pour notre premier cas. La résistance joue certainement un rôle, plus elle est importante plus le système met du temps à se stabiliser. On pourrait imaginer qu'on puisse obtenir le même type de graphe. Mais les mesures ont été faites à la main, l'allure de la courbe peut, dans ces conditions, être très imprécises surtout si le temps de mise en stationnarité est très court (ici 70s).

On constate de nouveau dans ce cas que $R1/R4$ et I_{max4}/I_{max1} sont très proches.

$$R1/R4 = 30/20 = 1,5$$

$$I_{max4}/I_{max1} = 41,2/25,1 = 1,64$$



Courbe 11 : Consommation d'hydrogène de la pile en fonction du temps à partir de la courbe 8

Si on s'intéresse à la consommation en hydrogène de la pile, on peut la considérer constante, à condition que le « régime stationnaire » soit atteint. Si on extrapole l'approximation en 0 on trouve que la quantité d' H_2 à $t=0$ est de 2,8ml ce qui n'a pas de sens. Mais il est facile de s'imaginer qu'au départ la pile est vide et qu'elle va donc consommer « beaucoup » d'hydrogène afin d'arriver au « régime stationnaire ».

Malheureusement dans le feu de l'action nous n'avons pas pensé qu'il serait très intéressant d'avoir les points correspondant à la « mise en stationnarité ».

A partir de l'approximation linéaire plutôt « bonne » ($R^2=0,9933$) on peut en déduire la consommation de la pile en « régime permanent ». On trouve donc 0,0032 ml/s soit environ 0,192 ml/min. On est très loin des 7ml/s maxi annoncés par le constructeur.

On a donc pu remarquer qu'en général l'intensité de la pile se stabilise à un maximum. Le temps d'établissement de cette stationnarité dépend de la résistance du circuit. Mais le comportement de la pile n'est pas aussi simple puisque pour certaines résistances on obtient des courbes complètement différentes.

Mais nous pouvons revenir sur nos toutes premières mesures où l'on avait conclu que l'on observait simplement la saturation de l'électrolyseur en s'appuyant sur les chiffres du constructeur. Or la consommation de 7ml/min est atteinte lorsque que la pile débite 1000mA ! Dans notre cas le maximum d'intensité observé était de 77 μ A. Il est clair que la consommation de notre pile ne sera pas la même. Il était facile de l'observer lors de nos mesure, l'hydrogène mettait tellement de temps à être consommé que nous n'avons jamais poursuivit les mesures jusqu'à l'épuisement de l'hydrogène. Donc nos toutes premières mesures nous donnent vraisemblablement le comportement de la pile. Il est vrai que si on s'intéresse à l'intensité maximale à la sortie de la pile obtenue pour une résistance de 30k Ω on trouve environ 26 μ A (courbe 5) et on trouve 25 μ A pour la courbe 6.

Pour conclure on retiendra que la pile à combustible semble atteindre un régime maximal de fonctionnement au bout d'un certain temps qui dépend entre autre de la résistance du circuit de la pile. Mais le trop peu de mesures effectuées ne nous permet pas de généraliser et les résultats obtenus nous semblent parfois aléatoires. Mais il est certain que la pile possède une certaine « inertie » qui on l'a vu pose des problèmes de « réversibilité ». La pile ne répond pas instantanément à une variation au niveau de l'alimentation en hydrogène. De plus l'utilisation de la pile tel quel n'a strictement aucun intérêt, la rentabilité est très faible. Il faut ajouter à cela le fait que la pile que nous avons utilisé marche bien que lorsque qu'elle est alimentée en oxygène « pur » et que son fonctionnement est très limité à « l'air libre ». Même s'il s'agissait d'un modèle pédagogique peu sophistiqué on peut se poser la question quand à la rentabilité des pile à combustible qui semble très limitée.

3.2.3. Etude de la H-RACER

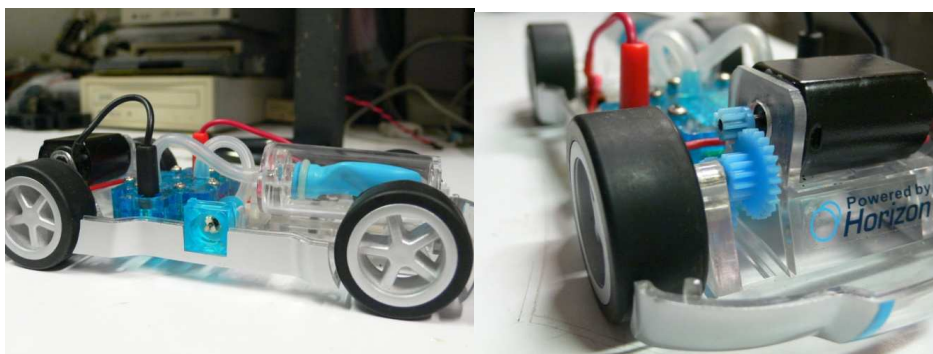


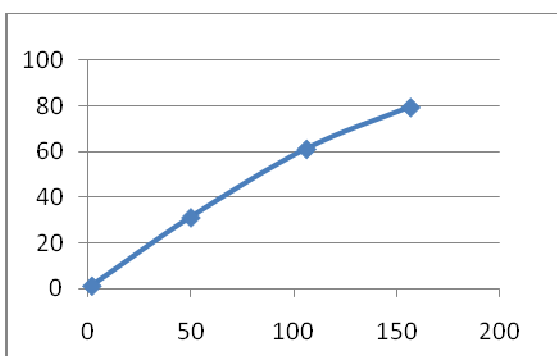
Fig. 10 : Vue d'ensemble de l'H-Racer sans sa coque

On observe la valve (au centre en bleu), qui permet de remplir le réservoir (ballon bleu dans le cylindre de plastique). Le réservoir est relié par des tuyaux à la pile à combustible qui, à son tour, alimente le petit moteur électrique. Le moteur transmet son mouvement à l'essieu avant à l'aide d'engrenages.

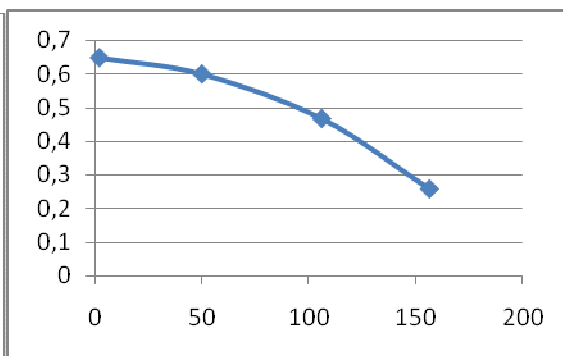
Caractéristiques techniques :

- Masse : 177 g
- Longueur : 155 mm
- Largeur : 73 mm
- Diamètre des roues : 30 mm

Série 1 :



Courbe 12 : Distance (m) parcourue par le modèle réduit en fonction du temps (s)



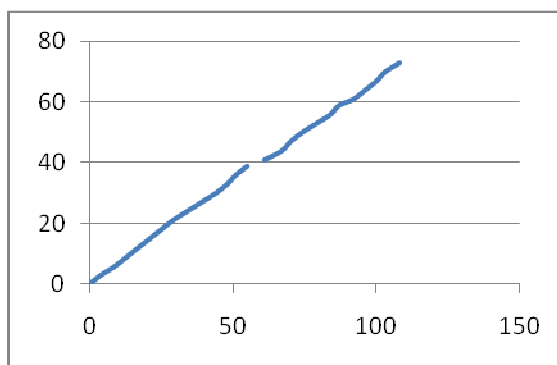
Courbe 13 : Vitesse du modèle réduit (m.s-1) en fonction du temps (s)

Mesures effectuées jusqu'à l'arrêt de la voiture :

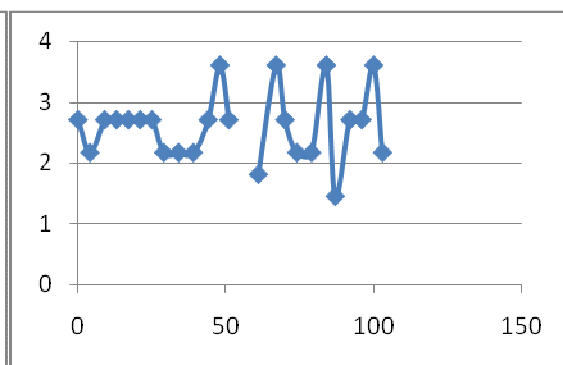
- Temps d'électrolyse : 2 minutes 30 secondes
- Distance totale : 79,5 m
- Vitesse moyenne : 0,506 m.s⁻¹

Observations : La vitesse décroît au cours de la course du modèle réduit.

Série 2 :



Courbe 14 : Distance (m) parcourue par le modèle



Courbe 15 : Vitesse du modèle réduit (m.s-1) en

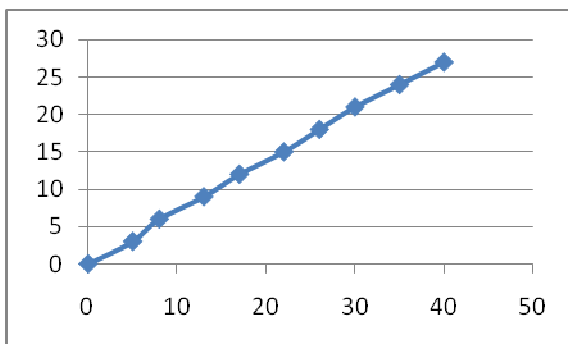
réduit en fonction du temps (s)

fonction du temps (s)

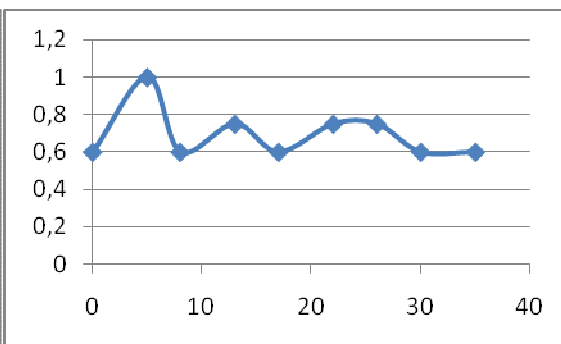
- Temps d'électrolyse : 1 minute
- Distance totale : 73 m
- Vitesse moyenne : $0,676 \text{ m.s}^{-1}$

Observations : La voiture s'est arrêtée (à $t=61 \text{ s}$) mais est repartie après une manipulation de la valve. L'évolution irrégulière de la vitesse peut sans doute être attribuée aux aléas de l'expérience. En effet, la voiture ayant une trajectoire légèrement curviligne, nous devons redresser la voiture pour obtenir une trajectoire rectiligne.

Série 3 :



Courbe 16 : Distance (m) parcourue par le modèle réduit en fonction du temps (s)

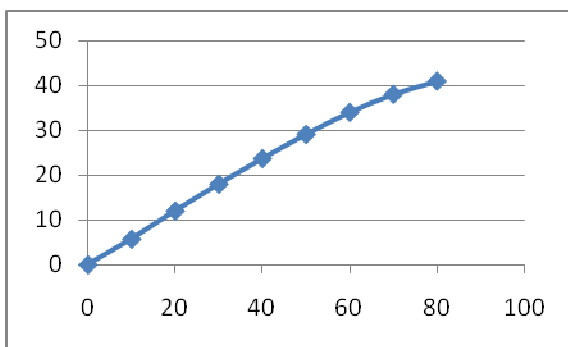


Courbe 17 : Vitesse du modèle réduit (m.s^{-1}) en fonction du temps (s)

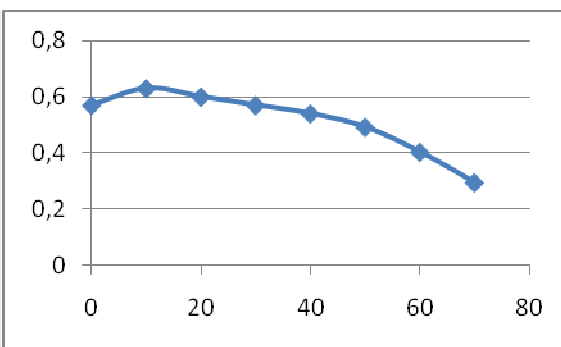
- Temps d'électrolyse : 30 secondes
- Distance totale : 27 m
- Vitesse moyenne : $0,675 \text{ m.s}^{-1}$

La vitesse met un certain temps à s'équilibrer au début de la course de la voiture, ceci peut être dû à la faible pression dans le réservoir.

Série 4 :



Courbe 18 : Distance (m) parcourue par le modèle



Courbe 19 : Vitesse du modèle réduit (m.s^{-1}) en

réduit en fonction du temps (s)

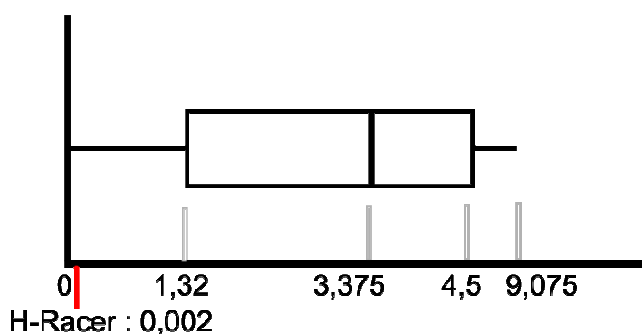
fonction du temps (s)

- Temps d'électrolyse : 30 secondes
- Distance totale : 41 m
- Vitesse moyenne : $0,512 \text{ m.s}^{-1}$

Les courbes sont assez régulières et concordent avec les résultats de la première série d'expériences.

Consommation de la H-RACER

Ici, nous avons interprété les résultats obtenus concernant la consommation en H_2 de la voiture. Pour cela, nous l'avons comparé avec la consommation des voitures étudiées dans le tableau comparatif.



Nous remarquons que le modèle H-Racer consomme très peu par rapport aux voitures réelles. La différence est très certainement due à la différence de gabarit entre les voitures.

3.2.4. Etude d'une voiture conventionnelle : Citroën Saxo (essence)

Notre but dans cette partie est de comparer la puissance et la consommation de différents véhicules et d'étudier les différents facteurs qui peuvent jouer sur la consommation et donc la pollution.

La prise diagnostique, connexion avec le ordinateur

Suite à une visite sur www.forum-auto.com, nous avons vu qu'il était possible d'utiliser la prise diagnostique des voitures afin de prendre des mesures de puissance et de consommation. Cela est possible depuis une loi visant à standardiser cette prise diagnostique sur tous les véhicules essence depuis 2001 et tous les véhicules diesel depuis 2004 (protocole ISO9141-2 et ISO14230-4).

C'est un consultant, récemment diplômé à l'ENS, qui a développé un logiciel nommé dynOBD capable de dialoguer avec la voiture et de récupérer des informations fournies par les différents capteurs (sondes, débitmètre, ...) telles que la vitesse de la voiture, la vitesse de rotation du moteur, la consommation de carburant, le volume et la température de l'air admis et de nombreuses autres informations. Toutes ses explications et commentaires sont disponibles à l'adresse suivante : <http://www.forum-auto.com/pole-technique/section10/sujet376628.htm>.

En connectant l'ordinateur à la prise diagnostique par l'intermédiaire d'une interface ELM323 connectée avec une prise USB sur l'ordinateur et avec un câble OBD2 sur la voiture, on interroge directement le calculateur d'injection qui nous renseigne sur les différentes informations.



Fig. 10 : Principe de diagnostic

Nous nous sommes donc procuré cette interface (sur la boutique e-bay « ScanTool.net ») ainsi que le logiciel dynOBD disponible gratuitement sur le site Internet de son concepteur : <http://cozimtech.fr.st/dynobd.zip>.

L'intérêt de cet outil

Nous espérons ainsi prendre des mesures sur la Toyota Prius, voiture hybride essence/électrique. Il était très intéressant de comparer ce véhicule avec une voiture fonctionnant uniquement à l'essence puisque la Toyota Prius récupère l'énergie cinétique lors des phases de décélération sous forme d'énergie électrique qu'elle stocke dans ses batteries ; celle-ci étant ensuite restituée au démarrage, à faible allure ou en phase de faible accélération. Cette voiture a donc l'avantage de récupérer une partie de l'énergie perdue lors des freinage et décélération.

Malheureusement, nous ne sommes pas parvenus à prendre des mesures sur cette voiture. L'ordinateur remarquait qu'il était connecté à une voiture mais des messages d'erreurs signalaient qu'aucun dialogue n'était possible.

Cela est probablement dû au fait que la voiture possède un moteur électrique et que le moteur thermique ne fonctionne que par intermittence. Le logiciel Toyota (plus communément appelé la « valise ») doit être très spécifique pour cette voiture. Malgré de nombreux appels et une visite chez Toyota, nous n'avons pas réussi à obtenir de l'aide d'un technicien, même si celui-ci nous a dit (lors de notre premier appel) qu'il pourrait nous aider. Rappelons que cette « valise » rapporte énormément d'argent au constructeur car le particulier est obligé d'amener sa voiture au garage pour n'importe quelle réparation puisqu'il faut repasser le véhicule à la « valise » afin de mettre le calculateur à jour. Si tous les particuliers un peu bricoleurs pouvaient brancher leur véhicule à leur ordinateur portable pour remettre ce calculateur à jour après une vidange, un changement de batterie, une alerte pour un niveau de liquide de frein trop bas... le manque à gagner serait incontestable. C'est certainement à cause de cette crainte que nous n'avons pas pu obtenir de l'aide du personnel de Toyota.

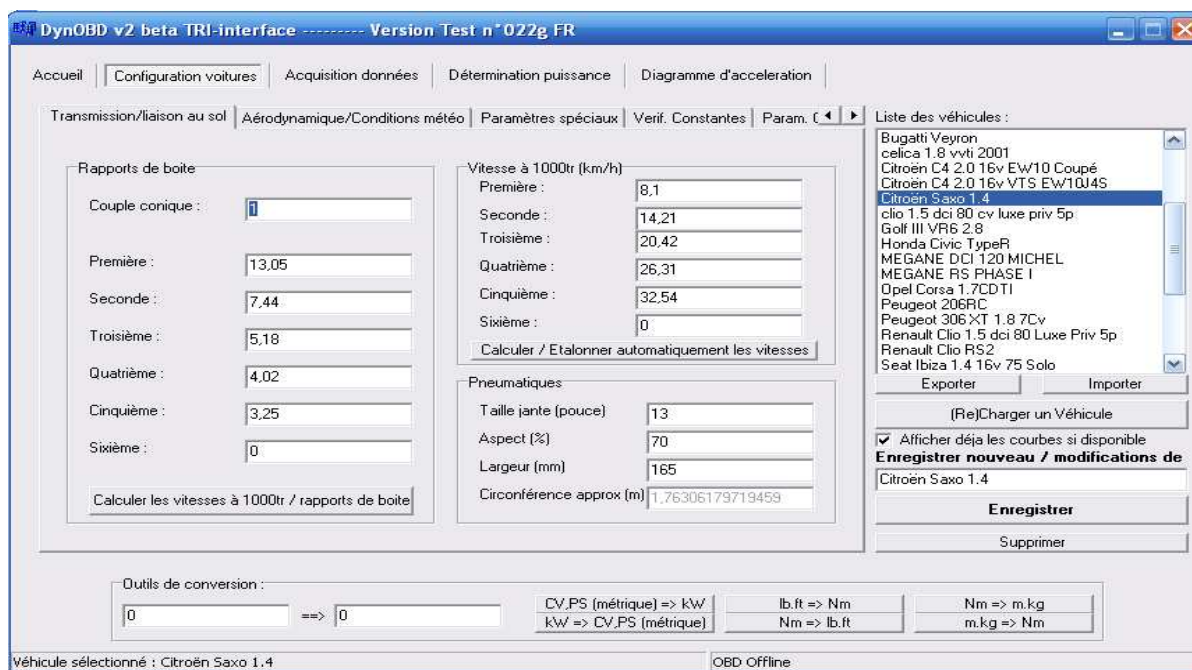
Nous sommes également allés demander de l'aide chez Renault car nous disposions d'une Laguna 2 mais les réponses étaient semblables à celles de Toyota.

Nous nous sommes donc concentrés sur une voiture plus simple (utilisant moins l'électronique) et avec laquelle nous arrivions à nous connecter, une Citroën Saxo 1,4L essence. Malheureusement, cette voiture ne dispose pas de débitmètre pour mesurer la consommation. Nous avons donc pris des mesures de puissance sur cette voiture dans différentes conditions et nous avons réalisé en parallèle des mesures de consommation sur une Renault 21 essence 2,2L qui dispose d'un ordinateur de bord affichant entre autre la consommation moyenne.

Prises des mesures de puissance sur la Citroën Saxo

Décrivons tout d'abord la technique :

1^{ère} étape : Il faut entrer un certain nombre de données, les caractéristiques de la voiture. Pour la Citroën Saxo, c'est le concepteur du logiciel qui a récupéré la plupart des données (rapports de boîte, aérodynamique, coefficient de frottement des pneumatiques, coefficient de perte de transmission) chez Citroën.



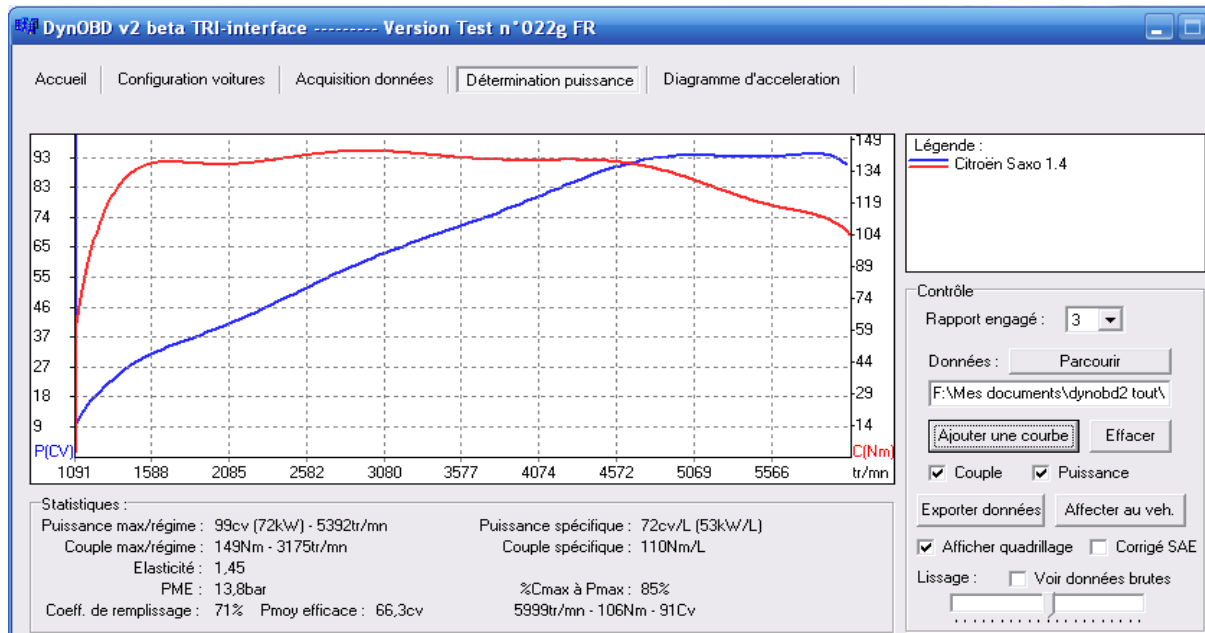
2^{ème} étape : Il faut connecter l'ordinateur à la prise diagnostique située dans le boîtier de fusibles.



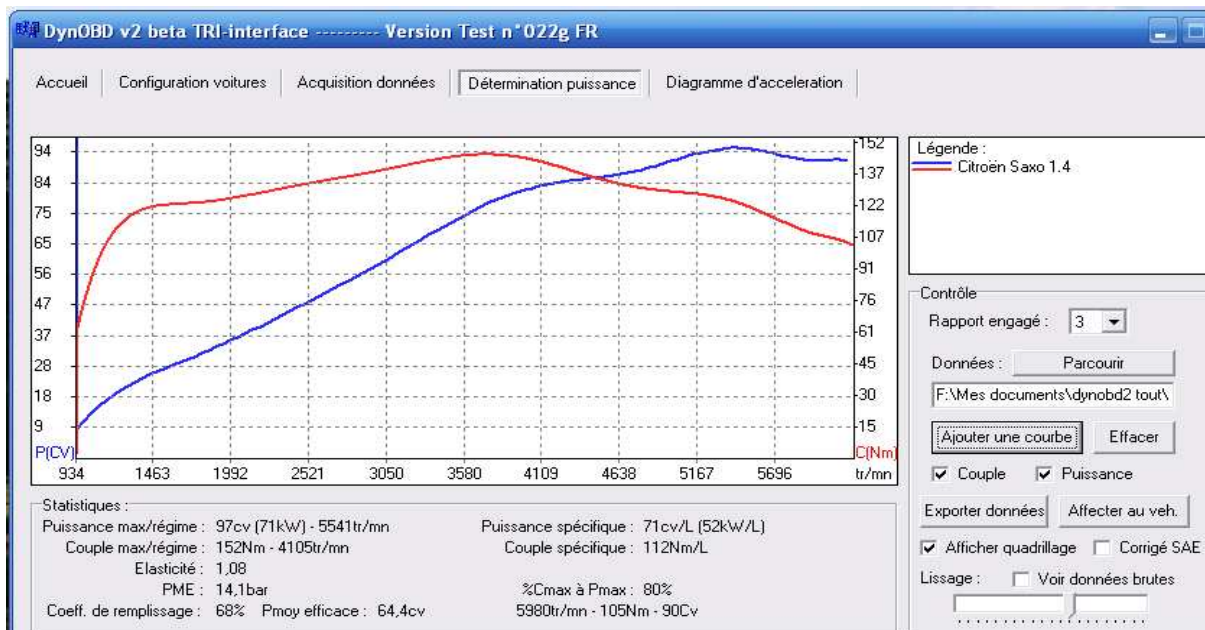
3^{ème} étape : Se placer sur une route plane et droite, et veiller à ce qu'il n'y ait pas de vent. Enclencher la troisième et se mettre au régime de ralenti.

4^{ème} étape : Lancer l'acquisition, accélérer jusqu'à la limitation de régime (début de la zone rouge), et stopper l'acquisition.

On obtient alors les courbes de puissance et de couple.
 Nous ne présenterons ici que trois courbes mais nous avons fait un certain nombre d'acquisitions afin de vérifier nos résultats.

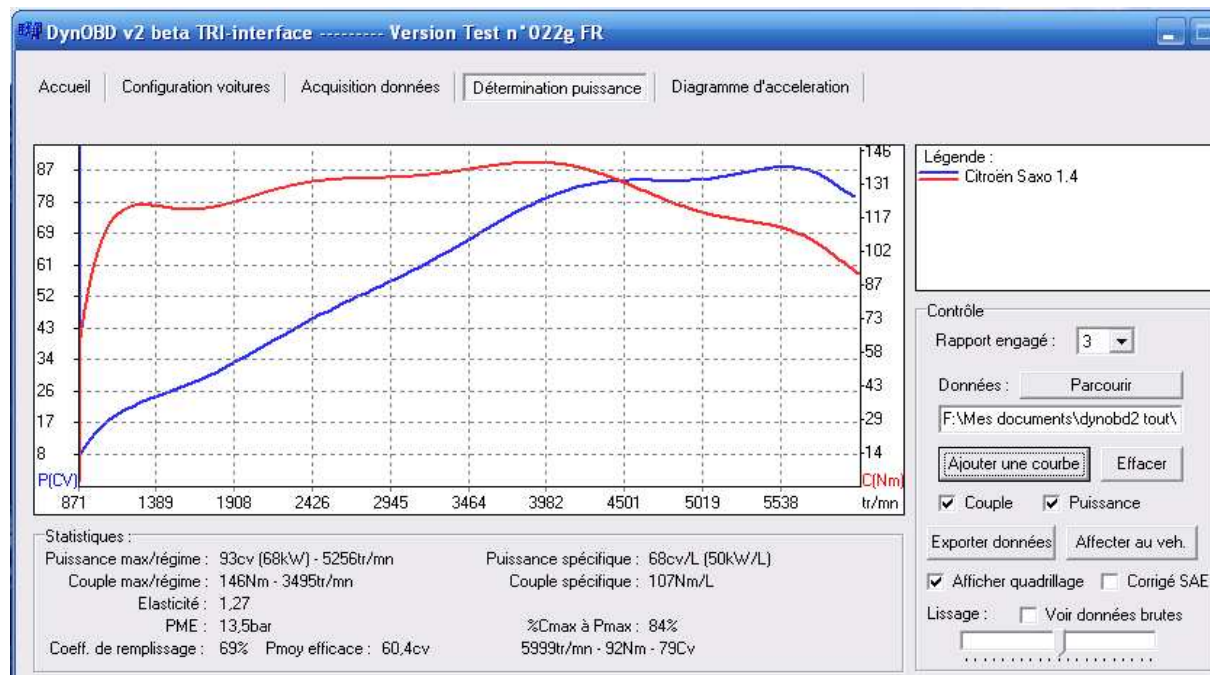


Courbe 14 : avec un passager



Courbe 15 : avec un passager et toutes les vitres grandes ouvertes

Nous avons constaté que nous perdons de la puissance lorsque les vitres sont ouvertes, soit environ 2 à 3cv (cf. « puissance max » et « Pmoy efficace » dans le cartouche sous la courbe). En ouvrant les vitres, nous modifions l'aérodynamique de la voiture. Celle-ci joue donc rôle dans la puissance et la consommation de la voiture (ce n'est pas une découverte, mais nos mesure sont suffisamment sensibles pour mettre en évidence ce phénomène). La perte de puissance est de l'ordre de 2%.



Courbe 16 : avec 3 passagers (vitres fermées)

Le poids du véhicule est de 1080kg (dont 130kg = poids du conducteur et du passager). Nous constatons qu'en rajoutant un poids de 140kg (2 passagers supplémentaires), soit un surpoids de 13%, la puissance moyenne efficace a diminué de 6cv, donc de 6% environ (de même pour la puissance maximale). Le poids du véhicule a une influence sur sa puissance, donc sur sa consommation.

Mesures de consommation sur la Renault 21

En parallèle, nous avons réalisés des mesures sur la Renault 21 pour vérifier nos résultats précédents. Précisons que cette voiture date de 1993 et dispose d'un moteur essence 2,2L GTX injection de 130cv (ceci expliquant la consommation qui peut paraître « élevée »). Elle a par ailleurs été équipée au GPL en 1999. Elle a donc deux réservoirs (65L d'essence et 40L de GPL) et peut fonctionner aux deux carburants, il suffit d'appuyer sur un interrupteur sur le tableau de bord pour passer de l'un à l'autre.

Remarque concernant le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) :

Il n'y a pas de moteur spécifique au GPL, c'est un moteur essence classique. Il est donc possible d'équiper une voiture essence avec un kit GPL dans un garage spécialisé. Il suffit de mettre un réservoir (souvent situé à la place de la roue de secours) et un détendeur placé à proximité du moteur que l'on relie à l'injection. Deux électrovannes situées sur l'arrivée d'essence et de GPL permettent changer de carburant (même en roulant). Les avantages de rouler au GPL sont nombreux : Le litre coûte 0,75€, soit la moitié de l'essence, moins de rejet de NOx et CO₂, 80% de rejet de particules en moins par rapport au diesel. De plus, le moteur ne s'encrasse pas car la combustion est complète, la durée de vie du moteur est donc prolongée et l'huile moteur garde ses propriétés lubrifiantes plus longtemps, ce qui permet d'espacer les vidanges. Les deux seuls inconvénients : le réservoir prend de la place (puisque celui d'essence est conservé) et la consommation est légèrement plus élevée au GPL qu'à l'essence. Cependant, ces deux inconvénients ne sont pas valables sur une voiture neuve équipée au GPL car le calculateur est réglé à la fabrication et la forme ainsi que la taille des réservoirs sont adaptés à la voiture.

Nous avons donc relevé des mesures sur cette voiture.

Influence de l'aérodynamique :

Sur un trajet de 90km sur autoroute en roulant à 130km/h (plus ou moins 10km/h), les fenêtres fermées et à 3 personnes dans la voiture, la consommation était de 12,1L/100km.

Sur ce même trajet, dans les mêmes conditions, mais toutes vitres ouvertes, la consommation était de 12,6L/100km, soit environ 4% en plus.

Influence du poids du véhicule :

Compte tenu du prix du carburant, nous n'avons pas vérifié l'influence du poids, mais la différence est flagrante lors des départs en vacance lorsque la voiture est remplie de bagages...

Influence de la conduite :

Nous avons comparé la conduite de deux personnes sur une traversée de Rouen. La distance était de 15 km. La première personne, conduisant assez calmement, a consommé 11,3L, alors que la deuxième, en conduisant très « nerveusement » a consommé 12,9L soit 14% en plus.

Nous avons également effectué un trajet de 30km en cycle extra urbain (mais pas sur autoroute) : La première personne a consommé 9,7L en conduisant à l'économie et en anticipant. La deuxième n'hésitant pas à accélérer fort dès qu'elle le pouvait (sans toutefois dépasser les limitations de vitesse) a consommé 12,2L soit 25% en plus.

Conclusion :

Nous voyons donc que les plus grosses économies de carburant peuvent être réalisées en adoptant une conduite calme. Les différences de consommation peuvent paraître élevées dans nos expériences mais l'âge et la puissance de ce moteur peuvent expliquer les fortes consommations lors des accélérations poussées. D'après nos mesures, la surconsommation est de 14% en zone urbaine, et elle atteint 25% en zone extra-urbaine.

Le deuxième facteur important est le poids du véhicule et du chargement. Pour un ajout de 13% de masse, il y a une perte de puissance de 6%.

Enfin, le fait d'ouvrir les vitres à une vitesse relativement élevée augmente de 4% la consommation. Notons qu'à moins de 70km/h, la différence était négligeable. L'aérodynamique de la voiture influe sur la consommation, surtout à haute vitesse. Cela peut être expliqué par le fait que les frottements de l'air sont proportionnels à la vitesse au carré.

Concernant les prises de mesures grâce à la prise diagnostique, nous avons manqué de temps pour vraiment exploiter le logiciel et comparer des véhicules plus récents disposant de débitmètre afin de faire des mesures de consommation en même temps que les mesures de puissance. Nous avons aussi manqué d'aide de la part de techniciens spécialisés.

3.3. ENJEUX VIS-A-VIS DE L'ENERGIE

3.3.1. Point de vue énergétique⁴

3.3.1.1. La situation énergétique actuelle

Pour mieux comprendre l'évolution actuelle des modes de productions d'énergies, il faut se baser sur des faits concrets et comparer la situation française avec la situation mondiale. Aussi, regardons dans un premier temps ce qu'il en est au niveau de la production d'électricité en France :

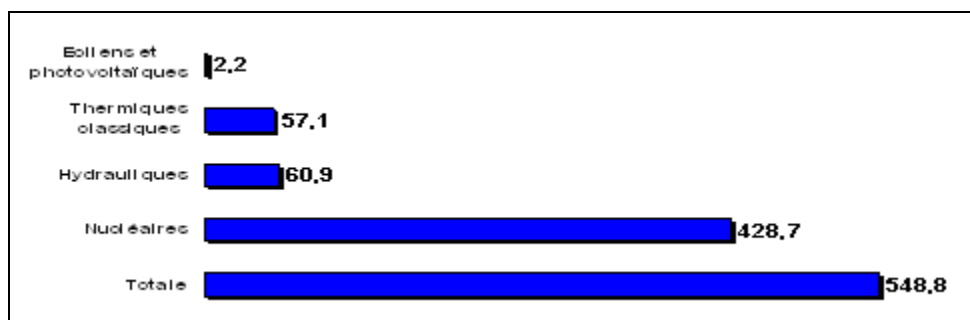


Fig. 11 : Quantité d'électricité produite en France en 2006 (TWh)

Nous pouvons remarquer combien l'énergie nucléaire tient une place écrasante dans la production d'électricité en France. Viennent après l'hydraulique, et seulement en troisième position les moteurs thermiques classiques. On peut donc en conclure que la France privilégie l'énergie nucléaire pour produire son électricité. Pourquoi n'en serait-il pas de même pour les moyens de transport tels que la voiture ?

Voici encore l'exemple de la domination du nucléaire en France, avec la répartition des sources d'énergies :

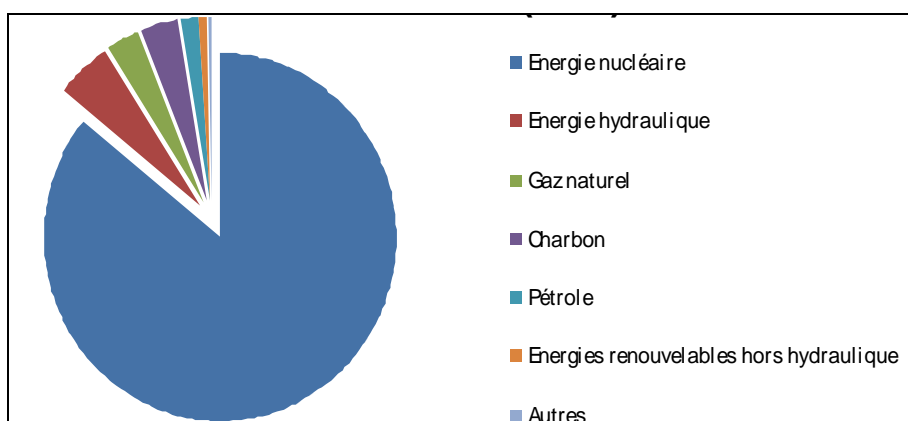


Fig. 12 : Répartition des sources d'énergies utilisées dans la production d'électricité en France en 2006

Pour bien remettre ces graphiques dans leur contexte, nous pouvons comparer la production d'électricité en France que nous venons juste d'observer avec la production d'électricité dans le monde :

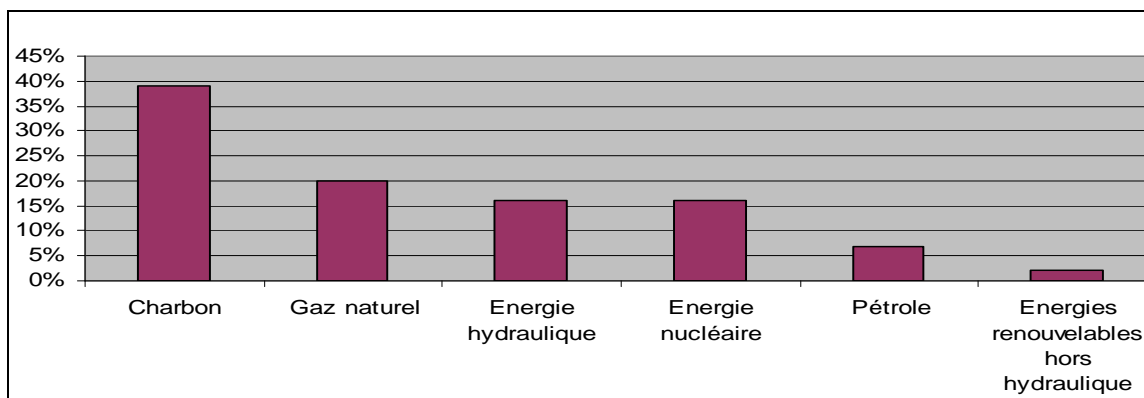


Fig. 13 : Origine de la production d'électricité dans le monde

Ici, ce n'est plus l'énergie nucléaire qui prédomine, elle n'arrive qu'en 4^{ème} position. Le charbon se révèle la principale source de production d'électricité. Ceci peut s'expliquer par le fait que le charbon est la source d'énergie la plus facile à exploiter notamment pour les pays peu développés. Cependant, c'est aussi la plus nocive pour l'atmosphère terrestre. On peut donc réaliser combien il est important de réagir face à cette situation peu favorable à la préservation de l'environnement. Et si on ne peut intervenir au niveau mondial pour limiter les émissions de gaz à effets de serre, il est possible d'innover en matière de production d'énergies pour encore diminuer ces émissions, même si c'est au niveau local. La voiture à hydrogène est un exemple parmi de nombreux autres qui peuvent apporter une petite part de solution au problème des émissions des gaz à effets de serre dus aux transports humains.

3.3.1.2. Les perspectives d'évolution concernant les productions d'énergie

La production d'électricité par le nucléaire pose également un problème écologique en raison des déchets. Des innovations dans ce domaine permettraient d'envisager la production d'hydrogène avec zéro émission de polluants. C'est pourquoi les technologies suivantes sont étudiées et développées.

Four solaire :

Cette technique consiste en la récupération des rayons du soleil par des miroirs multiples et utilise la chaleur résultante de la concentration des rayons pour produire de l'énergie. Il s'agit d'une technologie peu utilisée pour l'instant dans ce domaine, puisque les fours solaires sont avant tout des fours c'est-à-dire destinés à la préparation des aliments. Il existe tout de même des fours solaires destinés à la recherche, comme ceux de Tachkent ou encore d'Odeillo, qui permettent d'atteindre des températures avoisinant les 3000°C. Cette technologie présente pour le domaine de l'énergie l'inconvénient de travailler avec la forme la plus "dégradée" de l'énergie : la chaleur.

Usine marémotrice :

Il s'agit là d'utiliser l'énergie cinétique des vagues de la mer lorsque celles-ci montent, ainsi que leur énergie potentielle lorsqu'elles descendent. Elle fonctionne avec une turbine plongée dans l'eau qui peut fonctionner dans les deux sens de rotation pour produire de l'électricité. Ce mode de production n'est absolument pas développé puisqu'il ne concerne que quelques expériences plus ou moins importantes. Son utilisation à grande échelle supposerait des conséquences environnementales non négligeables pour les sites concernés.

Centrale à fusion nucléaire :

Il s'agit de récupérer l'énergie calorifique émise par rayonnement lors de la réaction nucléaire de fusion de noyaux d'atomes légers, soit environ le contraire de ce qui est fait actuellement dans les centrales nucléaires avec des noyaux lourds. Ce principe est actuellement expérimental et pose encore de nombreux problèmes techniques pour les deux types de technologie existants : la fusion par confinement magnétique, processus continu mis en oeuvre prochainement dans le réacteur expérimental ITER ; et la fusion par confinement inertiel, processus répétitif. Cependant, la fusion est la nouvelle réaction nucléaire (plus écologique) qui porte la confiance des scientifiques de l'énergie européens actuels.

Hydrolienne (énergie des courants marins) :

Comme une éolienne est une turbine entraînée par le vent pour produire de l'électricité, l'Hydrolienne est, elle, entraînée par les courants marins dans le même but. Ce processus est encore expérimental mais les premières hydroliennes sont actuellement mises en place par EDF sur le réseau fluvial français à titre d'essai, ce qui en fait des centrales hydroélectriques (non marines). Cependant, le principe diffère de celui des barrages hydroélectriques.

Usine maréthermique :

Il s'agit d'une machine thermique fonctionnant avec une source chaude et une source froide : l'eau de surface des mers, chaude, et l'eau des profondeurs, plus froide. Le rendement dépend de la différence de température, et la quantité d'énergie produite par ce moyen pourrait, selon certaines études, être très conséquente s'il est mis en place à une assez grande échelle. Cette technique n'est pour l'instant pas exploitée officiellement de façon industrielle.

Énergie des vagues (énergie houlomotrice) :

Cette idée consiste en la récupération de l'énergie mécanique donnée aux vagues par le vent. Si en théorie ce moyen permettrait de fournir 10 % de la consommation mondiale d'électricité, il est encore très hypothétique.

3.3.2. Point de vue écologique⁵

3.3.2.1. L'effet de serre

Le réchauffement climatique est la conséquence directe de la production de gaz à effet de serre. On peut comparer les différents gaz à effet de serre à l'aide de leur Potentiel de Réchauffement Global (PRG). Le PRG est basé sur les propriétés radiatives des gaz, son calcul se fait par référence au CO₂, ainsi le PRG du CO₂ est 1. Ces gaz absorbent des rayonnements énergétiques d'origine solaire (rayons infrarouges) qui, après avoir été réfléchis ou réémis par la Terre, auraient dû sortir de l'atmosphère et repartir vers l'espace. Les gaz à effet de serre absorbant de l'énergie voient donc leur température augmenter et celle de l'atmosphère avec, ce qui a des répercussions écologiques évidentes : hausse globale de température et donc disparition de certains écosystèmes et déplacement des autres. Les gaz à effets de serre sont en majorité la vapeur d'eau (55%) et le dioxyde de carbone (39%). Il est également important de considérer la durée de vie du gaz.

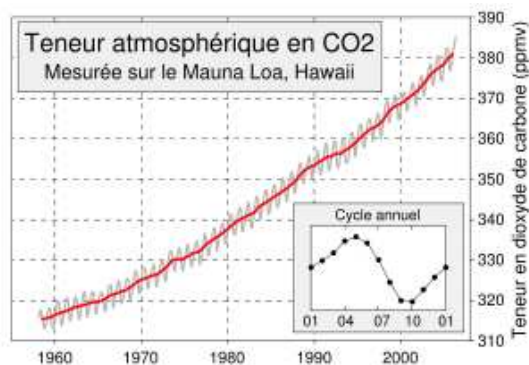


Fig. 14 : Teneur atmosphérique en CO₂ depuis 1960

On observe que le réchauffement climatique est périodique, c'est pourquoi les scientifiques sont divisés sur la gravité du réchauffement actuel. Néanmoins, on observe une hausse rapide de température depuis la seconde révolution industrielle.

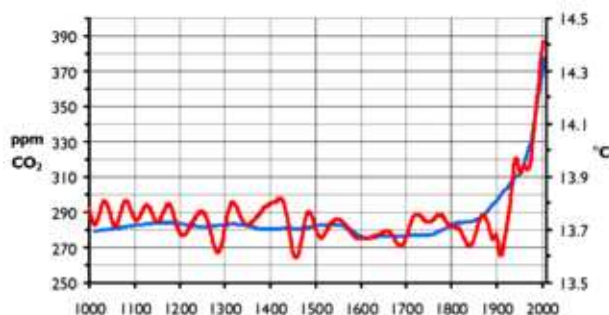


Fig. 15 : Variations de la température et de la quantité de CO₂ depuis le dernier millénaire

Considérons dès à présent la répartition mondiale des émissions de CO₂ :

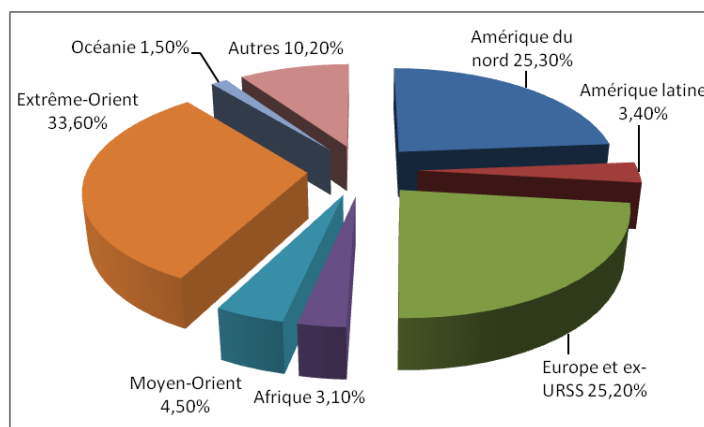


Fig. 16 : Répartition mondiale des émissions de CO₂ en 2004

Ce sont les Etats-Unis qui remportent la palme des pays émetteurs avec 21,8% des émissions de CO₂. La Chine se positionne aussi assez bien avec ses 17,9%, l'Europe des 27 vient compléter ce noyau avec 15,2%. Pour se concentrer sur le cas français, on peut remarquer que la France la 4^{ème} place dans les pays de l'UE émetteurs de CO₂.

Il apparaît cohérent de considérer, dans un deuxième temps, les principales causes des émissions de CO₂, en considérant ici le cas français.

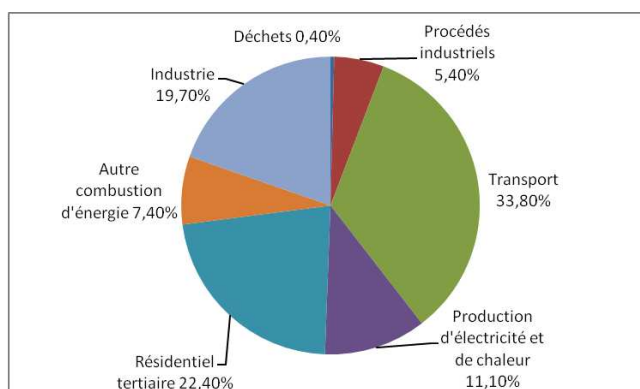


Fig. 17 : Répartition des émissions de CO₂ en France par secteur

Pour approfondir notre raisonnement nous pouvons, dans un troisième temps considérer la principale cause des émissions de CO₂ français, à savoir le transport. On cherche ici, plus précisément, quel mode de transport intervient dans cette émission de CO₂.

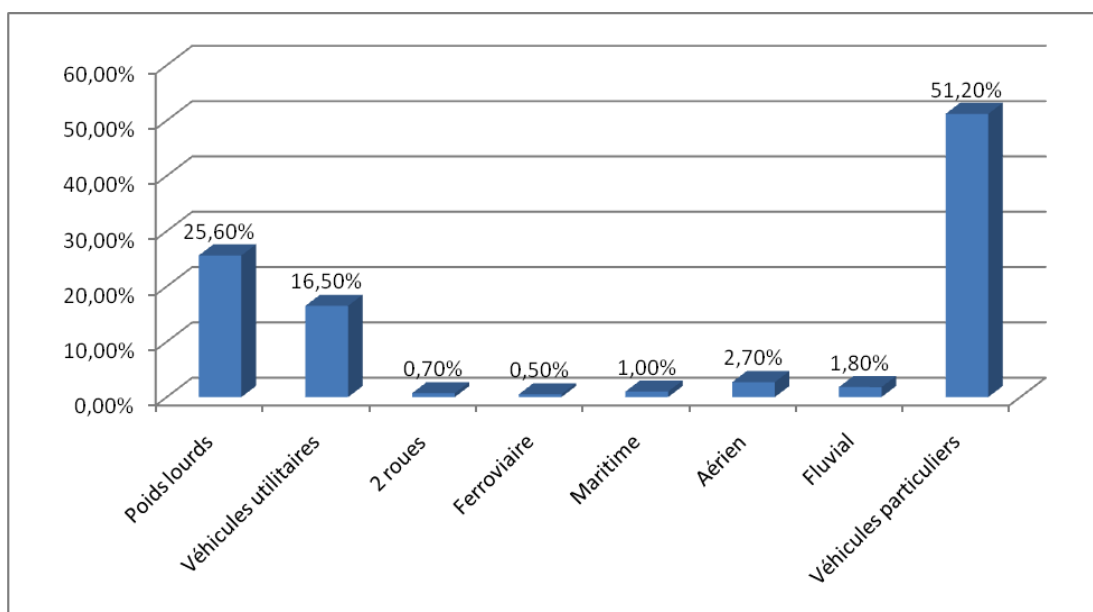


Fig. 18 : Emissions de CO₂ par mode de transport en France

On réalise alors que c'est le déplacement des particuliers qui est à l'origine de la plus grande part d'émission de CO₂ dans le transport en France. D'où l'intérêt de se pencher sur la voiture de demain afin que chacun puisse se désengager de la majeure part de sa participation dans le réchauffement climatique.

Aujourd'hui, le réchauffement climatique est une réalité et pour cause : les chercheurs l'ont établi, la température moyenne globale, c'est-à-dire la médiane des températures de chaque région du monde, a augmenté d'un degré en un siècle. Ceci peut paraître minime mais en considérant tous les effets environnementaux qui accompagnent cette élévation de température, tels que l'augmentation du niveau moyen des mers du globe et l'accroissement de la fréquence d'événements climatiques

extrêmes (cyclone, tempête, canicules,...), il est possible d'appréhender les dangers à moyen et long terme de la modification des conditions climatiques terrestres. On peut aussi souligner que cette élévation de la température n'a jamais été aussi forte en un siècle que ces 25 dernières années. Pour comprendre pourquoi ce réchauffement intervient, il faut en connaître les causes, à savoir principalement l'émission de certains gaz dans l'atmosphère. La vapeur d'eau apparaît comme le principal gaz à effet de serre, le CO₂ n'arrivant qu'en deuxième place. Nous avons donc fait le tour des causes et des conséquences principales, il reste maintenant à traiter la manière de limiter ce problème de réchauffement. Le seul point où il est possible d'agir, c'est la part des activités humaines qui en sont la cause. C'est à ce moment précis qu'il est nécessaire de préciser ceci : l'homme ne tient qu'une part minime dans le dégagement de vapeur d'eau mais un part plus importante dans le dégagement de CO₂ ce qui amplifie le dégagement de vapeur d'eau. Donc si le CO₂ n'est pas le gaz à effet de serre le plus significatif, il est manifestement celui qui entraîne le plus un réchauffement climatique.

3.3.2.2. La pollution atmosphérique

Les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas le seul défaut des moteurs thermiques. Ces derniers émettent également des gaz et particules toxiques.

Les transports :

La part des véhicules routiers dans les émissions de gaz toxiques la pollution de l'air engendrée par les véhicules à moteur est constituée, en 2005, de :

- monoxyde de carbone : 5737 kilotonnes dont 30% dues aux transports;
- monoxyde et dioxyde d'azote : 1198 kilotonnes dont 46% dues aux transports;
- composés organiques carbonés (produits restants de la combustion des hydrocarbures) : 1320 kilotonnes dont 20% dues aux transports;
- hydrocarbures aromatiques : 35 tonnes dont 12% dues aux transports;
- méthane ;
- dioxyde de soufre ;
- particules de suie (carbone) : 1471 kilotonnes dont 7% dues aux transports;
- cuivre : 171 tonnes dont 51% dues aux transports;
- hydrofluorocarbures : 11304 kilotonnes (équivalent CO₂) dont 16% dues aux transports.

Les conséquences sanitaires :

Les gaz issus de la combustion des carburants sont principalement des gaz irritants (dioxyde de soufre, d'azote, ozone) qui altèrent l'activité respiratoire. Ils peuvent déclencher des crises chez les asthmatiques, et provoquer des irritations sur les muqueuses (nez, yeux, gorge). Les particules issues des moteurs diesels provoquent des allergies et des cancers.

- Le monoxyde de carbone provoque une réduction de la quantité d'oxygène transportée par le sang aux muscles, il peut être mortel à haute dose.
- Les oxydes d'azote provoquent des troubles respiratoires des inflammations des voies respiratoires et une sensibilisation aux microbes.
- Les hydrocarbures gazeux sont réputés cancérigènes.
- Le méthane est un gaz à effet de serre.
- Le dioxyde de soufre est irritant pour les voies respiratoires.
- La suie est cancérigène à la respiration.

D'une façon générale la pollution entraîne une augmentation des maladies du système respiratoire et du système cardiovasculaire.

Les conséquences environnementales : Pluies acides, réchauffement climatique, réduction de la biodiversité

Le dioxyde de soufre provoque les pluies acides qui nuisent pour des raisons évidentes à l'environnement là où elles se produisent. Les animaux terrestres sont sensibles aux mêmes problèmes que les humains du point de vue respiratoire, à cause de la qualité de l'air. Certaines espèces végétales comme des champignons ou des lichens pourraient être victimes de certains produits se trouvant dans l'air puis déposés dans la terre ;

En général, les composés toxiques nuisent à la vie, animale ou végétale et il en résulte une diminution de la biodiversité. Dans les villes, la pollution est visible par des dépôts noirs sur les bâtiments.

Pendant son fonctionnement, une voiture munie d'une pile à hydrogène n'émet aucun gaz à effet de serre, ni de particules toxiques. De ce point de vue, c'est un « véhicule propre ».

3.3.3. Point de vue économique⁶

3.3.3.1. La voiture à hydrogène, une voiture économique ?

Coût de la voiture

Coût de recherche : Actuellement, la recherche théorique n'est pas encore assez avancée afin de répondre à toutes les problématiques techniques qu'impose une voiture commercialisable. On estime - selon l'ancien PDG de BMW - que d'ici 2020, les chercheurs auront assez de connaissances sur l'hydrogène et ses techniques d'utilisation pour pouvoir développer un modèle viable à la production de masse. A raison de 12 ans de recherches, on peut compter environ un coût de **120 millions d'euros**.

Coût technique : Cependant la recherche ne suffit pas car, en effet, entre le modèle théorique et le modèle pratique, une large différence existe. Les premiers modèles seront beaucoup trop chers pour être commercialisés. Il nous faudra encore attendre quelques années de démarches, cette fois-ci d'optimisation, avant que le coût d'une telle voiture soit abordable.

Coût de production : Nous en arrivons au coût pour le consommateur. Tout d'abord remarquons que le dernier modèle (prototype) de voiture à hydrogène est de Fiat, il se nomme Phylla. Ce petit bijou de technologie coûte actuellement à la production **75.000€**, ce qui n'est pas rien. On s'intéresse maintenant au prix d'une voiture hybride : prenons par exemple, la Prius (Toyota), qui coûte actuellement **25 000 €** On pourrait donc espérer que dans quelques années une voiture à hydrogène coûte à l'achat à peu près **35 000 €** N'oublions pas le coût d'entretien et de consommation. Il s'avère qu'une voiture à hydrogène est une machine très résistante. En effet, le fait qu'aucun mouvement interne n'est lieu au sein du moteur, lui permet d'avoir une longévité légèrement supérieure. Cependant, ceci n'est que théorique car l'un des enjeux importants de la PAC est sa longévité. De plus, la consommation devient une consommation en hydrogène dont le prix variera en fonction du mode de production choisi, ce que nous verrons plus tard. Pour ce qui est de l'entretien de la voiture, étant conçue de la même manière qu'une voiture classique on peut supposer que le prix d'entretien soit du même ordre de grandeur.

Coût recyclage : Alors que s'amorce une révolution, en terme de production, nous menant vers une éco-production, il est important de noter que les constructeurs s'intéressent de plus en plus (cependant de manière toujours insuffisante) à l'« après utilisation » du produit, c'est-à-dire à son recyclage. En soi, le coût du recyclage est négatif car il permet des bénéfices, s'il est fait. Il est malheureusement facile d'imaginer que tout le monde ne jouera pas son rôle d'éco-citoyen.

Coût de la mise en place : Produire une voiture à hydrogène n'est pas nécessairement équivalent à la production d'une voiture classique, surtout si elle doit être entièrement recyclable, non bruyante, petite, pour correspondre à une circulation plus citadine. Enfin, il faudra repenser et mettre à jour l'ensemble de la filiale : de la production des voitures, à l'usine, en passant par la machine de sous-traitance qui construit les boulons du distributeur.

Coût de l'infrastructure

Coût technique : En premier lieu, il faut savoir que nous avons les connaissances nécessaires pour stocker de l'hydrogène. Cependant, ceci ne correspond pas aux contraintes de l'industrie. En effet, le problème d'une telle molécule, réside dans sa taille. Sa petitesse lui permet d'être perméable à tout type de surface, même très dense comme le plomb. C'est donc un gaz terriblement volatil. Conserver durablement l'hydrogène va donc encore occuper nos chercheurs. Apparemment d'ici 2010, ce problème pourrait être résolu.

Coût des stations : Sur l'ensemble du territoire français on trouve des stations essence, ce réseau sera donc une base effective pour s'équiper de pompes à hydrogène. Nous savons qu'il existe 13.500 pompes, ceci multiplié par le coût d'un réservoir, plus le coût du réseau de distribution, nous arrivons au prix de mise à niveau des stations essence.

Coût de production : Ensuite, l'infrastructure construite, celle-ci nécessitera une certaine maintenance, ce qui influera forcément sur le coût à la pompe. En fonction de l'option technique pour laquelle nous opterons, le prix à la pompe s'en ressentira.

Coût de la filiale

- Production par le nucléaire

Coût de production : Le coût de production de l'hydrogène est actuellement de **8 €/kg**. Celui-ci est accompagné d'un fort coût temporel. En effet, l'hydrogène a un taux de production faible, ainsi il faut fournir (par la méthode électrolytique) 2393 Ah pour produire 1 m³ d'hydrogène. Ces deux composantes détermineront le prix pour le consommateur.

Coût de mise en place : De plus, il est fort coûteux de construire des usines à hydrogène et de les entretenir. En effet, pour une telle production il faudrait une quinzaine d'usines sur le territoire, avec autant de réservoir. Ce chiffre est basé sur le nombre de raffineries existantes en France. Ceci n'est pas tout à fait réaliste car la taille de l'usine n'est pas négligeable pour l'aspect organisationnel.

Coût énergétique : Pour ce qui est de la pollution, rappelons que la production d'hydrogène demande de grandes quantités d'énergies qui peuvent être de différents types. Nous considérerons l'énergie électrique car c'est celle que nous gérons le mieux. Pour convertir le parc automobile sachant qu'une voiture consomme environ 0,5 kg au 100 km en moyenne, que l'effectif du parc automobile français s'élèvera à environ 33 millions de véhicule en 2020, il sera nécessaire d'être capable de fournir 2000 milliards de Litres par ans. Sachant qu'il faut 3,6 Wh/L il sera nécessaire d'ajouter à la production électrique française 7,15 TWh/ans, ce qui correspond à une partie non négligeable de la production électrique annuelle française - qui s'élève elle à 548,8 TWh (2006) - soit environ 1,3 % de la production française. Augmenté la production électrique française de quatre pour cent ne sera pas mince à faire et ceci même par l'énergie nucléaire.

- Méthode renouvelable

Coût de recherche : La seule énergie renouvelable connue, mais insuffisamment afin d'être employée, est la méthode de la fusion nucléaire. Cependant de grands espoirs sont en marche. Ainsi, le coût de

recherche nécessaire à la mise en pratique d'un parc automobile par la méthode d'hydrogène est nul, car les efforts de recherche sont déjà suffisants.

Coût technique : Au niveau technique, nous sommes, dans le cas de la France, extrêmement en retard. En effet, la production électrique française est de 548,8 TWh, dont 11,5 % renouvelable soit 63,1 TWh. Si l'on veut mettre en place un parc automobile à hydrogène, cela demande 1,43 GWh/an. La production en énergie par les énergies renouvelables est donc suffisante pour produire l'hydrogène nécessaire au parc automobile. Cependant, l'énergie que l'on utilise quelque part doit être récupérée. Si l'on veut donc réellement avoir un parc automobile propre, comme toute la démagogie politique et médiatique nous laisse entendre, il faudrait augmenter la production d'énergie renouvelable de plus de 11 %.

Coût de production : Le coût de production d'un Litre d'hydrogène par une méthode renouvelable dépend de la méthode utilisée :

- ✓ Éolien : 0,07 € kWh.
- ✓ Hydraulique : 0,035 € kWh.
- ✓ Solaire : 0,05 € kWh.

Mais ceci est très variable et ne correspond qu'à peu de choses car l'énergie en France est centralisée et l'État la fait payer un prix fixe : 0,105 € kWh. Pour le consommateur, le prix ne s'en ferait donc pas ressentir pour autant. Cependant, par une méthode renouvelable pour le producteur, 1000 Litres d'hydrogène lui coûteraient environ 0,65 €.

Coût de mise en place : Le coût de mise en place pour une production d'hydrogène grâce à des énergies renouvelables va être le plus important. En effet, si l'on voulait que l'hydrogène ne soit produit que par des énergies renouvelables, il faudrait que le réseau électrique français soit repensé et reconstruit. Ceci serait alors un chantier monumental.

Coût de pollution : Au final, le rejet de CO₂, par une méthode renouvelable, est théoriquement nul. Cependant, la construction de l'infrastructure, des usines, des véhicules, nécessite un apport en énergie, ce qui pollue. On remarquera quand même que cette solution est la plus écologique.

Comparaison au PIB français

Si l'on veut muter le parc automobile français en parc automobile alimenté à 100 % par l'hydrogène, on a vu qu'il existe deux méthodes, une méthode avec une production de l'hydrogène par le nucléaire, une autre par les énergies renouvelables. La première coûterait (sur 10 ans) **200.000.000 € / an** pour l'état et environ **7.000 €** pour le particulier. La seconde **500.000.000 € / an** et le même prix que précédemment pour le particulier. Sachant que le PIB français en 2006 est de \$2.151 Milliards, on en déduit que, quelque soit la méthode, il sera difficile de mettre en place une telle conversion, même sur une dizaine d'années.

3.3.3.2. Grand public et évolution culturelle

Il s'agit ici d'aborder de manière synthétique la question suivante : « le grand public est-il prêt à renoncer aux voitures thermiques classiques à court voire moyen terme ? ».

Aux vues des crises énergétique et écologique qui touchent la planète et qui ne feront qu'empirer, la réponse pourrait sembler évidente, et pourtant ce n'est pas le cas.

Essayons de déchiffrer les raisons qui conduisent à ce scepticisme.

Un attachement au thermique indéniable :

L'échec des voitures électriques lancées il y a une dizaine d'années (Citroën, Peugeot) l'a démontré : les conducteurs sont attachés à leurs voitures essence. La crainte de ne pas disposer d'une autonomie suffisante (autonomie de 80 à 100 km environ) ou encore l'absence de bruit de ce type de véhicules avait constitué un frein pour les utilisateurs pour qui l'aspect sonore est important, afin d'avertir les piétons notamment.

Des technologies parfois mal présentées :

La technologie hybride commence désormais à s'imposer ; elle connaît un véritable succès aux Etats-Unis, avec la Toyota Prius. Néanmoins, cette réussite connut quelques balbutiements à ses débuts, la faute à un manque d'informations destinées au grand public sur le fonctionnement du système. Aux dires des constructeurs automobiles, il arrivait fréquemment que les gens pensent qu'il s'agissait de voitures électriques. Il fallait en fait que les conducteurs testent eux-mêmes la voiture pour se rendre compte que l'utilisation des hybrides ne diffère en rien de celle des véhicules classiques.

Les grands groupes automobiles devront donc amorcer un réel travail de communication sur les nouvelles technologies qu'ils comptent mettre en place, en proposant par exemple des journées d'essais à l'échelle nationale ou même européenne, et ce en mettant à disposition du grand public les chefs de projets et autres ingénieurs.

Les questions de fiabilité et d'amortissement :

Bien que le prix du pétrole ne cesse d'augmenter, ce n'est pas pour autant que les conducteurs se ruent sur les technologies alternatives. Ils cherchent en premier lieu à s'adapter à la crise, en organisant du covoiturage, en utilisant davantage les transports en commun, etc. Dans le futur, si les constructeurs désirent imposer leurs technologies, ils devront en permanence présenter des données indiquant, en plus de la consommation, le coût de revient de leur véhicule, par exemple au km, et le comparer à ceux du meilleur véhicule contemporain classique (pour ce qui de la consommation et de la pollution). Ils devront également démontrer la fiabilité de leurs modèles sur le long terme, préciser si les révisions, les contrôles devront être plus fréquents que sur des véhicules classiques.

Autre aspect : celui de la sécurité. Si l'on considère la voiture à hydrogène, il sera primordial de rassurer l'utilisateur quant à la sûreté du produit pour ce qui est des explosions.

Le rôle de l'Etat :

Malgré le battage médiatique autour de l'éco-comportement, des énergies renouvelables, je n'ai réussi à trouver aucun sondage ou étude publiques concernant l'avis de la population à l'égard des futurs types de moteurs, c'est-à-dire dans lesquels ils auraient confiance et seraient prêts à investir.

L'Etat a pourtant un rôle central à jouer dans l'avenir des transports. Dans la mesure où, pour le moment, le gouvernement n'envisage pas une modification de la fiscalisation du pétrole, il devra donc intervenir au niveau des systèmes du futur en incitant le citoyen à suivre sa voie. Pour se faire, il sera nécessaire d'appuyer les constructeurs dans leurs démarches de communication, de proposer des avantages fiscaux et de montrer l'exemple en équipant la flotte des collectivités locales en véhicules propres, comme cela se fait déjà.

3.4. DIFFERENTES VISIONS

3.4.1. Interview de M. Bruno FOUCRAS

Le moteur pantone vous y croyez ?

Tel qu'il est présenté le moteur pantone n'est qu'une « grosse blague ». En revanche, il existe effectivement des économiseurs d'énergie tels que les anneaux magnétiques que l'on place à l'entrée des moteurs. Le champ magnétique produit par cet anneau force les molécules de carburant « à avancer en rang deux par deux jusqu'au moteur », ce qui améliore la combustion (car les molécules sont brûlées par deux). D'autre part, l'injection d'eau dans le moteur améliore son rendement car il le refroidit.

Que pensez vous de la voiture à hydrogène ?

Je n'ai pas travaillé en particulier sur la voiture à hydrogène, mais le problème majeur est le stockage de l'hydrogène. En effet, une pression de 700 bars est dangereuse et difficile à réaliser. Pour comparaison, le gaz de ville est stocké sous 1,3 bars.

Pour ce qui est de l'hydrogène en lui-même, étant donné que c'est une molécule très petite, elle peut entrer dans le métal et est donc très corrosive. De plus, si l'hydrogène est stocké sous haute pression, il peut même passer à travers le métal. Le réservoir se vide donc tout seul.

Quel le meilleur système selon vous ? Moteur électrique et pile à combustible, ou moteur à combustion d'hydrogène ?

Je n'ai pas travaillé sur la pile à combustible. Mais effectivement, l'utilisation du platine pose problème car c'est un métal lourd, non seulement cher mais aussi difficilement recyclable et surtout, le platine est cancérigène.

Je suis plutôt séduit par un moteur qui brûle directement de l'hydrogène.

Que pensez vous des bio et agro carburants ?

On obtient un bon rendement : avec une tonne de plantes, on obtient environ 1,2 tonnes de carburant, le rendement maximum est 3 je crois. Mais ce n'est pas réalisable à grande échelle. Pour fournir la France, il faudrait cultiver toute sa superficie : on supprime, les routes, les villes tout !

D'autre part, quand certains disaient que ça pouvait causer des problèmes de faim, ils avaient raison. Par exemple : pour produire des agro carburants, les Etats-Unis achètent du maïs au Mexique mais le résultat est que les mexicains ont faim et 'ont plus assez de maïs pour eux.

Il y a aussi les problèmes de récolte et de pollution : on pourrait utiliser n'importe quel engrais puisque qu'on cultive du maïs pour le brûler.

Le bilan carbone ?

Il faudrait aussi prendre en compte dans la consommation les huiles et les pneus. Les matériaux recyclés sont l'acier, les huiles, les métaux lourds, le verre et les pneus (dans le bitume des routes). Le reste, tel que les matériaux plastiques, est plutôt brûlé.

Et donc quelle solution pour l'après pétrole ?

Plus de voitures ! Du moins, moins de voitures, d'ailleurs c'est ce qui se passe à l'heure actuelle : on développe les transports en communs, on rend petit à petit l'accès au voiture difficile, on permet juste aux riverains de rentrer chez eux. Au bout d'un moment les gens se rendent compte qu'il est plus facile de traverser la ville en bus ou métro qu'en voiture (prendre l'exemple de Rouen). Les parkings à l'entrée des villes sont une bonne idée pour rendre plus efficaces les transports en commun ou l'utilisation des vélos.

Le prix du carburant est aussi un facteur qui incite les gens à réduire les déplacements en voiture : en effet les gens prennent de plus en plus le train. Il n'y a que deux facteurs qui incitent les personnes à agir : la santé et l'argent.

3.4.2. Avis des membres du groupe

Aurélien :

Après étude approfondie du sujet, je reste quelque peu sceptique quant à l'évolution écologique des transports.

Certes des solutions existent, mais les nouvelles technologies ne sont pas encore parfaitement au point, et leur implantation à grande échelle demandera beaucoup de temps. Par ailleurs, le lobby du pétrole demeure plus que jamais d'actualité, freinant un peu plus la recherche et l'activité autour de nouveaux concepts. Je pense donc que la meilleure façon de faire face à la pollution liée aux transports reste d'adopter un comportement écologique, de tous les jours, en utilisant les transports en commun dès que cela est possible ou bien le vélo par exemple.

Benjamin :

En ce qui me concerne j'ai un a priori extrêmement positif sur la pile à combustible pour l'automobile et plus encore sur l'utilisation de l'hydrogène dans les énergies ; et ce, parce que les transports sont parmi les domaines qui représentent un important potentiel de progression du point de vue écologique. J'ai en particulier un a priori important, également très positif, sur le principe du moteur thermique à hydrogène car je pense qu'il permet de conserver l'aspect ludique de la conduite. Cependant, avant de travailler sur ce projet, j'avais déjà conscience des problèmes liés à la production de l'hydrogène mais je pensais que les évolutions technologiques permettraient de palier à ces contraintes.

Pour résumer, je pense que l'avenir de l'automobile réside majoritairement dans les technologies issues de l'hydrogène et que la contrainte majeure réside dans le traitement des déchets nucléaires pour permettre une production quasi illimitée d'hydrogène par hydrolyse de l'eau.

Laurent :

A mon avis le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène pour être converti en électricité à l'aide d'une pile à combustible présente beaucoup d'inconvénients et peu d'avantages au final. Si la production d'hydrogène « écologique » est un vrai défi, la question de son stockage l'est encore plus : il me paraît difficile de stocker et de transporter de grandes quantités de ce gaz, quel que soit la technique employée. De plus, l'utilisation de mousse de platine dans les piles à combustible pose des problèmes au niveau du coût et des ressources naturelles. En supposant que ces problèmes trouvent des solutions dans les années à venir, il me semble quand même plus réaliste d'utiliser des batteries pour faire fonctionner les voitures électriques. Pour moi, la technologie des batteries est aujourd'hui beaucoup plus avancée et plus simple à mettre en œuvre que celle de la pile à combustible.

Laurianne :

J'ai choisi ce projet de P6 car je n'étais pas convaincu par la voiture à hydrogène et que je voulais en savoir plus. Après toutes ces recherches, je n'ai plus tout à fait le même avis. La voiture à hydrogène pourrait peut-être bien faire partie de notre avenir si les chercheurs parviennent à résoudre les problèmes de stockages et de production d'hydrogène. Et, comme nous l'avons expliqué dans ce dossier, il semble que certaines méthodes sont prometteuses (stockage solide, pari Hydrosol).

Martial :

Pour moi, la voiture à hydrogène utilisant la pile à combustible peut être une solution pour le transport de demain. Elle ne rejette pas de CO2 et a un assez bon rendement. La hausse du prix du pétrole et les problèmes écologiques vont accélérer le développement de cette technologie. Si tous les constructeurs font des recherches dans ce domaine, les progrès pourraient être très rapides dans les

années à venir. Concernant la production de l'hydrogène, le nucléaire semble la solution la plus efficace, notamment avec les réacteurs de 4ème génération. D'autres solutions plus écologiques (tel que la production de H₂ avec des bactéries) sont intéressantes mais sûrement moins efficaces pour une production à grande échelle. L'association de tous ces moyens permettra sûrement de produire une quantité d'hydrogène suffisante.

Plus généralement, le bilan de ce projet est plutôt positif. Je connaissais le principe de fonctionnement de cette technologie donc, dans ce domaine, ce projet m'a peu apporté. En revanche, concernant la production, le stockage et le transport de l'hydrogène, j'ai appris qu'il y avait des solutions techniques et que cela est réalisable à grande échelle, bien qu'il y ait quelques inconvénients.

Enfin, c'est la partie expérimentale qui m'a davantage intéressée. J'ai pu connecter un ordinateur à des voitures et « dialoguer » directement avec le calculateur, alors que je ne pensais pas que cela était possible au début du projet. La partie prise de mesure était également très intéressante, nous avons pu estimer les surconsommations dues à différents facteurs tels que l'aérodynamique et le poids du véhicule. Cela nous a permis d'élargir le sujet aux modes de propulsion actuels.

Dans ce projet, le fait de pouvoir choisir la direction de nos études et expériences a été un point positif pour moi.

Nathalie :

Le projet voiture à hydrogène est un sujet qui a attiré mon attention. En lui-même le sujet se révèle fort intéressant mais aussi complexe, il a donc fallu se concentrer sur certains axes. Tout au long du projet, j'ai pu me rendre compte d'une chose assez importante : la part de concession qu'il faut faire pour considérer expérimentalement un phénomène lié au sujet abordé. En effet, par exemple, en considérant les tests sur la voiture, nous ne pouvions disposer de tests sur une voiture à hydrogène, ce qui aurait été idéal, et nous avons finalement dû nous contenter d'une simple voiture à essence... Tout ceci en ne pouvant observer que la puissance et le nombre de tours par minute alors que nous aurions préféré la consommation ou le dégagement de CO₂, pour être plus cohérent avec notre sujet. Ces expériences ont toutefois été très enrichissantes car nouvelles. S'intéresser à une technologie, telle que l'hydrogène pour les voitures, est primordial au vu des enjeux qu'elle implique. Lors de ce projet, il a fallu s'organiser, travailler en équipe (deux groupes de projet réunis), mais cela m'a permis d'appréhender les difficultés et les possibilités qu'offre le travail de groupe. Tout projet a une « fin » cependant je pense que chacun, y compris moi, espérait jusqu'au bout pouvoir l'enrichir car le sujet est riche de pistes à suivre. J'en laisse le soin aux futurs groupes de projet...

Tawnza :

Au jour d'aujourd'hui, l'hydrogène ne semble pas être la meilleure solution en tant que carburant. En effet, bien que son utilisation soit très écologique, sa production reste néanmoins polluante. Il reste donc beaucoup de recherches à faire dans ce domaine afin de trouver un moyen de production non polluant, mais également pouvant être utilisé à grande échelle, et pour une importante quantité d'hydrogène à produire.

D'un point de vue économique, il est évident que l'hydrogène revient assez cher, ce qui fait qu'il n'est pas spécialement à la portée de tout le monde. Cela ne résout pas du tout le problème de la hausse des prix de carburants. Je pense donc que les voitures à hydrogène partout, ce n'est pas pour demain.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Après toutes ces recherches, nous sommes forcés de réaliser que le coût de la technologie voiture à hydrogène est un réel obstacle dans son développement puisque si l'hydrogène produit par reformage peut être vendu à un prix raisonnable, sa production par hydrolyse qui se voudrait plus propre rendrait, elle, l'utilisation d'une voiture à hydrogène hors de prix. En ce qui concerne la distribution du carburant le problème saute là encore aux yeux puisque les 15000 stations services actuelles en France sont incapables de distribuer du dihydrogène et leur remplacement par des stations adaptées coûterait à l'État, ainsi qu'aux entreprises intéressées, des investissements dont on peut comprendre qu'ils les rendent réticents.

D'autre part, la fabrication du dihydrogène par reformage est certes moins polluante que la simple combustion de l'essence. Cependant, elle continue d'émettre du dioxyde de carbone et de plus, elle est également dépendante d'énergies fossiles, puisque réalisée à partir de gaz naturel ou de pétrole. L'apparition dans ce domaine d'une utilisation de plus en plus importante de l'hydrolyse peut donc raisonnablement être envisagée, ce qui risque de provoquer une augmentation des déchets radioactifs engendrés. Le problème de ces déchets fait déjà l'objet de nombreuses recherches puisque l'utilisation des centrales nucléaires pour produire de l'électricité est très répandue, et avec ou sans l'hydrogène, risque de l'être de plus en plus. On peut considérer que la réalité de la voiture 100% propre est dépendante du fait que ces recherches aboutissent un jour sur un moyen de se débarrasser des déchets nucléaires.

A l'issue de ces 14 semaines de recherches, nous avons tout d'abord réalisé que le sujet était bien plus complexe que ce qu'on imaginait. Nous avons donc des difficultés à distinguer les objectifs du projet et à définir des axes de travail. De plus, nous avons dû travailler en groupe : d'abord en groupe de 5 puis de 10 ; et il nous aurait été préférable de communiquer dès le début du projet afin de se répartir clairement les rôles.

Bien entendu, nous en avons appris énormément quant aux différentes technologies utilisant l'hydrogène, et cela nous a fait réfléchir sur l'avenir du transport d'une part, mais également sur l'avenir écologique de notre planète. Nous avons également pu faire des expériences en mesurant des vitesses, des consommations, des puissances. Malheureusement, par manque de temps, nous n'avons pu réaliser toutes les expériences initialement prévues, notamment l'étude de la Toyota Prius.

Enfin, nous avons réalisé que le domaine étudié est encore en évolution, et qu'il reste beaucoup de choses à faire en matière de recherches.

5. ANNEXES

ANNEXE 1 : TABLEAU COMPARATIF DE DIFFERENTS MOYENS DE LOCOMOTION

Moyens de locomotion	Rapport poids puissance (kg/kW)	Rejet de CO ₂ (g/km)	Puissance (kW)	Poids (kg)
Vélo*	408,6021505	-	0,186	76
Locomotive Mountain de la série 241P (snCF 1948-1952)	46,10526316	-	2850	131400
TGV Duplex (troisième génération)	44,31818182	-	8800	390000
Aqua star (bateau à moteur)	24,78134111	918	686	17000
Ford T (1908)	38,88	253	14	544,32
Renault 9 Turbo-1986	12,13333333	207	75	910
Twingo2 1.2 60 ch	21,51162791	132	43	925
Twingo2 1.5 dCi 65ch	20,85106383	113	47	980
Bugatti Veyron	2,727272727	574	715	1950
Fiat Panda Hydrogen – 2007 (prototype 400000 euros !)	28	0	50	1400

VOITURE A HYDROGENE : caractérisation, bilan et étude comparative

Hydrogène 3 - 700	26,5	-	60	1590
Sequel	29,7260274	-	73	2170
207 cc Epure	77,5	0	20	1550
Prius (batterie chargée)	12,14953271	104	107	1300
Prius (batterie déchargée)	22,80701754	104	57	1300

*Soit un cycliste de 76 kg avec le vélo qui effectue un circuit de 90 km de dénivelé moyen de 2% (cas de la moyenne montagne)

Calcul du rejet de CO₂ (valeurs en rouge) :

-1L d'essence consommé rejette 2.3kg CO₂

-1L de gazole consommé rejette 2.7kg CO₂

ANNEXE 2 : TABLEAU COMPARATIF DES DIFFERENTS PROTOTYPES (DONNEES CONSTRUCTEURS)

Nom du prototype	Société	Date de création	Principe	Puissance	Poids	Vitesse max	Autonomie	Bilan carbone	Plein	Consommation
F 600 HY Genius	Mercedes	2006	Moteur électrique alimenté par une PAC et une batterie à haute tension.	85 kW soit 115 ch	2600 kg	170 km/h	400 km		4 kg à 700 bars	1 kg/100 km
FCX	Honda	2006	PAC alimentée par une station domestique de production d'hydrogène par reformage de gaz naturel.	130 ch soit 96 kW	1680 kg	160 km/h	560 km	169 g de GES par km	3,75 kg à 350 bar	0,67 kg/100 km
Hydrogène 3 - 700	General Motor	2003		(94 kW PAC + 60kW moteur) 154 kW soit 209 ch	1590 kg	160 km/h	270 km		4 kg à 700 bars	1,48kg/100 km
Hydrogène 3 - liquid	General Motor	2003		(94 kW PAC + 60kW moteur) 154 kW soit 209 ch	1590 kg	160 km/h	400 km		4,8 kg à -258°C	1,2 kg/100 km
Sequel	General Motor	2005		73 kW soit 99 ch	2170 kg	145 km/h	480 km		8 kg à 700 bars	1,67 kg/100 km

VOITURE A HYDROGENE : caracterisation, bilan et étude comparative

hydrogène 4	General Motor	2008		93 kW (PAC) (+73 kW moteur)			320 km			
Focus FCV	Ford	2002 (2004)		85 kW soit 115 ch			235 à 320 km			
Taxi PAC	PSA	2006	Pile GENEPAC PSA	(5,5 kW PAC + 36 kW batterie) 41,5 kW soit 56 ch	1740 kg		200 à 300 km		1,5 kg à 300 bars	0,6 kg/100 km
Quark	PSA	2006	Pile GENEPAC PSA	1,5 kW (PAC) (+ batterie au nikel)	425 kg	110 km/h	100 km		0,36 kg (9l à 700 bars)	0,36 kg/100 km
FCHV-4	Toyota	2007		90 kW soit 122 ch	1860 kg	155 km/h	290 km		Introuvable (350 bars)	
Tucson FCEV	Hyundai	2006		80 kW soit 109 ch		150 km/h	300 km		2,2 kg (350 bars, 152 l)	0,73 kg/100 km
207 cc Epure	Peugeot	2006	Pile GENEPAC PSA	20 kW soit 27 ch	1550 kg	130 km/h	350 km		3 kg à 700 bars	0,86 kg/100 km
Prius	Toyota	1998	Moteur essence + moteur électrique selon le mode de mode de roulage	82 kW Soit 110 ch	1300 kg	170 km/h	1460 km		45L (essence)	4,3 l/100km (essence)

VOITURE A HYDROGENE : caracterisation, bilan et étude comparative

Super Chief F 250	Ford	2006	Moteur "Tri-flex" utilisant trois carburants : essence ; E85 ; Hydrogène liquide	320 ch (essence, E85) ; 206 kW soit 280 ch (hydrogène)	> 3,5 tonnes catégorie poids lourd (7mde long, 2,34 m de large)					
Hydrogène 7	BMW	2008	moteur à explosion H2 ou essence	191 kw soit 260 ch	2460 kg	230 km/h (bridée)	200 km (H2) + 500 km (essence)		8 kg à - 253°	4 kg/100 km

6. BIBLIOGRAPHIE

ETUDE DE CE QUI EXISTE

¹ Connaître : travail journalistique

- <http://forums.futura-sciences.com/thread115544-2.html>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Bugatti_16.4_Veyron
- <http://snCF.ratp.free.fr/tgv.htm>
- <http://derrieny.club.fr/Puissance.html>
- <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=5720>
- <http://www.ford.fr/?campaignid=Search&advertiserid=GOOGLE>
- <http://www.clean-auto.com/spip.php?article549>
- http://www.moteurnature.com/actu/2003/generalmotors_hydrogen3.php
- http://www.psa-peugeot-citroen.com/fr/psa_espace/communiqués_presse_details_d1.php?id=526
- <http://www.peugeot.fr/ToutsurPeugeot/Peugeotetl'environnement/>
- <http://www.vehiculespropres.net/Prototypes/Voitures/PEUGEOT207CcEpure.html>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/BMW_Hydrogen_7
- <http://translate.google.com/translate?hl=fr&sl=en&u=http://www.hydrogencarsnow.com/toyota-fchv-hydrogen-vehicule.htm&sa=X&oi=translate&resnum=8&ct=result&prev=/search%3Fq%3Dtoyota%2Bfchv-4%26hl%3Dfr%26rls%3DDVFA,DVFA:1970--2,DVFA:fr%26sa%3DG>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Hummer_O2
- <http://www.motorlegend.com/actualite-automobile/hummer-o2/1670.html>
- <http://www.vroom.be/fr/actualite-auto/2013,hyundai-tucson-fcev-suv.html>
- <http://ecologie.caradisiac.com/Hyundai-l-hydrogene-prend-son-envol-086>
- <http://www.moteurnature.com/actu/2006/honda-fcx-concept-hydrogene.php>
- <http://news.caradisiac.com/Honda-FCX-la-vraie-auto-a-hydrogene-arrive-en-2008-702>
- <http://www.honda.fr/car/content/index.fsp>
- http://www.mercedes-benz.fr/content/france/mpc/mpc_france_website/fr/home_mpc/passenger_cars/home/passenger_cars_world/solutions_company/future_technologies/alternative_drive.0004.html
- <http://www.viamichelin.com/viamichelin/fra/tpl/mag5/art20060915/hm/route-mercedes-hydrogene.htm>
- <http://ecologie.caradisiac.com/BMW-Hydrogen-7-pas-si-propre-que-ca-838>
- http://www.gm.com/explore/education/9-12/fuels_energy/sequel.html
- <http://ecologie.caradisiac.com/Salon-de-Geneve-2008-General-Motors-presente-ses-vehicules-verts-et-ses-nouveautes-ecolos-725>
- <http://www.hydrogencarsnow.com/hydrogencars2001.htm>
- Sciences et vie « spéciale automobile 2006 » (hors série)

² Comprendre : ingénierie inverse

- www.fr.wikipedia.org/wiki/pile_a_combustible
- www.futura-sciences.com/.../physique/d/pile-a-combustible-la-fee-hydrogene-lenergie-de-demain_487/c3/221/p1/
- www.enpc.fr/fr/formations/ecole_virt/trav-eleves/cc/cc0304/hydrogene/H2.htm
- Le Monde, 11 janvier 2008, « Quand les bactéries produiront de l'hydrogène ».
- Research'Eu, avril 2008, numéro spécial, « Energie : s'extraire du pétrole ».

³ Critiquer : comparaisons, performances, limites

- www.senat.fr/rap/r05-125/r05-12541.html
- www.total.com/static/fr/medias/topic1492/Hydrogene_2007.pdf
- www.total.com/static/fr/medias/topic1492/Total_2006_hydrogene_piles_combustible.pdf
- www.debatpublic-dechets-radioactifs.org/docs/pdf/dossier-initialisation/edf.pdf
- http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9chet_nucl%C3%A9aire#Production_et_gestion_des_d.C3.A9chets_radioactifs_en_France
- www.edf.fr/accueil-fr/la-production-d-electricite-edf/-nucleaire-120205.html
- <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/stats/0/2000/fr/EG./carte/EG.USE.ELEC.KH.PC/x.html>
- Research'Eu, avril 2008, numéro spécial, « Energie : s'extraire du pétrole ».

ENJEUX VIS-A-VIS DE L'ENERGIE

⁴ Point de vue énergétique

- www.fr.wikipedia.org/wiki/Production_d'%C3%A9lectricit%C3%A9
- www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3229

⁵ Point de vue écologique

- www.environnement.doctissimo.fr/un-air-plus-pur/pollution-et-sante/Quels-effets-sur-la-sante-.html
- www.fr.wikipedia.org/wiki/Image:Emission_de_GES.png
- www.ifen.fr/donnees-essentielles/changement-climatique/l-accroissement-de-l-effet-de-serre/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-par-secteur-en-france.html

⁶ Point de vue économique

- www.xelopolis.com
- www.futura-sciences.com
- Thèse Béatrice BOURDEAU, Université de Savoie
- www.notre-planete.info/actualites/actu_1061_energies_alternatives_vehicules.php
- www.notre-europe.eu/fr/tribunes/publication/hydrogene-la-france-ne-doit-pas-se-laisser-distancer/