

Sommaire

Introduction.....	2
Situation des énergies et présentation de l'hydrogène.....	3
Production du dihydrogène.....	5
Application directe du dihydrogène comme combustible.....	12
Combustion dans une fusée.....	13
Essai de combustion directe.....	15
Emploi de l'hydrogène pour les véhicules particuliers.....	17
Une expérience concrète : la maison Friedli.....	19
Stockage de l'hydrogène.....	20
Les piles à combustibles.....	22
Etude expérimentale d'une pile à combustible.....	30
Applications de l'hydrogène grâce aux piles à combustibles.....	33
Effet de serre.....	35
Conclusion.....	45
Bibliographie	46
Remerciements.....	47

Introduction

Nous avons étudié les propriétés énergétiques du dihydrogène et les applications qui en découlent. Pour cela nous avons effectué une recherche documentaire préliminaire pour réduire les risques expérimentaux et approfondir nos connaissances sur le dihydrogène. Nous avons aussi pris contact avec des professionnels tels que l'association française du dihydrogène, le CEA et le CUEPE lors d'un déplacement à Genève. Cela nous a aussi permis de cibler plusieurs expériences à réaliser pour vérifier l'exactitude de la synthèse de la recherche documentaire.

Situation des énergies et présentation de l'hydrogène

A l'aube du 21^{ème} siècle, la production mondiale d'énergie est essentiellement basée sur des combustibles fossiles. Pétrole, charbon et gaz naturel (3 combustibles fossiles) représentent à eux seuls 90% de la demande en énergie primaire. L'énergie nucléaire quant à elle représente 6% ; cette énergie est basée sur la fission de l'uranium 235.

Or, on remarque que 96% de la consommation mondiale d'énergie primaire est basée sur des ressources non renouvelables et cette consommation ne cesse d'augmenter.

La production d'énergie est liée à l'accroissement de l'effet de serre, notamment à l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère. Ainsi, au 20^{ème} siècle, la température moyenne de l'air à la surface du globe a augmenté d'environ 0,5°C ; ce qui entraîne des modifications climatiques irréversibles (fonte des glaces, élévation du niveau de la mer...).

Des accords internationaux, adoptés suite au sommet de Rio en 1992 et au protocole de Kyoto en 1997, visent à réduire de 5% les émissions de CO₂ dans les pays industrialisés malgré les difficultés que cela entraîne au niveau de la production d'énergie.

D'après de récentes estimations, si la consommation est maintenue à ce rythme, dans 40 ans les réserves de pétrole seraient épuisées. Quant au gaz naturel et au charbon, ils disparaîtraient respectivement dans 60 et 200 ans.

Certains pays, dépourvus de ressources fossiles, tels que la France ne peuvent subvenir seuls à leurs besoins énergétiques : ils n'ont pas une indépendance énergétique totale. Ces sources d'énergies ne satisfont donc pas ces pays.

Enfin, 75% des réserves de pétrole sont localisées dans l'OPEP, ce qui risque d'entraîner une hausse considérable des prix.

Par conséquent, si nous persistons dans cette voie, 3 problèmes vont se présenter à nous : l'augmentation de CO₂ ayant pour conséquence des changements climatiques, une aggravation de la pollution dans les zones urbaines et la raréfaction des combustibles fossiles.

Il devient donc impératif d'utiliser de nouvelles sources primaires d'énergie, de préférence renouvelables. L'hydrogène, qui est à la fois renouvelable, compatible avec toutes les autres sources d'énergie et sans effets polluants, semble être l'une des meilleures solutions proposées à ce jour.

L'hydrogène est un gaz très explosif, inodore et incolore; c'est le plus léger de tous les éléments chimiques. Son numéro atomique est égal à 1.

Dès le XVI^{ème} siècle, les alchimistes savaient préparer l'hydrogène gazeux ou dihydrogène par l'action de certains métaux sur les acides. C'est en 1766 que le chimiste anglais Henry Cavendish, physicien et chimiste britannique, né en France, fondateur de l'électrostatique, démontra que l'hydrogène était un élément en mesurant sa densité et le volume de gaz dégagé à partir d'une quantité donnée d'acide et de métal (l'hydrogène était obtenu en faisant réagir de l'acide sulfurique sur du fer). En 1781, Lavoisier proposa le nom d'hydrogène. Le mot hydrogène signifie "qui produit de l'eau". L'hydrogène est en effet un gaz qui brûle dans l'air et qui, en se combinant avec l'oxygène, produit de l'eau. Du point de vue historique, la réputation de l'hydrogène au niveau de la sécurité est très mauvaise. En effet le 6 mai 1937, le Zeppelin LZ-129

(rempli d'hydrogène) prit feu bien que l'hydrogène ne fut le détonateur de l'accident. De plus l'hydrogène, bien que très volatil, est très explosif. Pourtant, il fut utilisé comme gaz de ville au début du XX^e siècle. De plus il n'est pas polluant.

L'hydrogène ne représente que 0,8% de la masse de l'écorce terrestre; sur Terre, c'est l'eau qui constitue le composé d'hydrogène le plus abondant. En effet, l'hydrogène libre est rare, c'est un constituant des gaz rejetés par les volcans.

Production du dihydrogène

L'hydrogène a un avenir certain dans le domaine de l'énergie. Nous étudierons donc les possibilités envisageables pour sa production à grande échelle. Dans le cas d'une production à grande échelle, il faut tenir compte des rendements et des possibilités économiques.

I) Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures

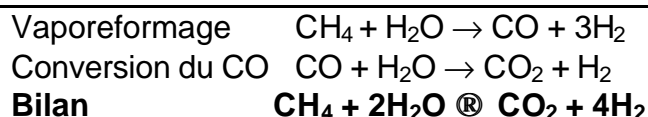
Il existe plusieurs méthodes qui permettent de convertir des hydrocarbures en hydrogène. Néanmoins, elles entraînent la formation de dioxyde de carbone, qui est au centre des polémiques actuelles sur les problèmes liés à l'effet de serre. Elles présentent donc des avantages économiques et pratiques mais ne sont pas très écologiques.

N.B. : les exemples sont rédigés à partir du méthane car c'est le principal composant du gaz naturel.

A-Le vaporeformage

Il consiste à transformer des charges légères d'hydrocarbures (méthane, gaz naturel...) en gaz de synthèse composé de monoxyde de carbone et de dihydrogène. Pour cela on fait réagir l'hydrocarbure avec de la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel entre 840 et 950 °C. A partir du gaz de synthèse, on convertit le monoxyde de carbone à l'aide de vapeur d'eau pour obtenir du dioxyde de carbone et du dihydrogène.

Le vaporeformage du méthane CH₄ :



Au final il faut séparer le dioxyde de carbone du dihydrogène et éliminer les impuretés. Deux procédés ont été développés pour y parvenir :

-l'adsorption sélective sur tamis moléculaire (procédé PSA) : élimination des impuretés par des lits de tamis moléculaires.

-enchaînement de deux réactions : la décarbonatation pour éliminer le dioxyde de carbone et la méthanation qui consiste à faire la réaction inverse du vaporeformage et de la conversion du monoxyde de carbone pour éliminer les derniers résidus.

B-L'oxydation partielle

Elle permet de produire de l'hydrogène à partir de charges plus ou moins lourdes d'hydrocarbures en les faisant réagir avec du dioxygène à une température et une pression élevée. Cette réaction produit du gaz de synthèse composé de monoxyde de carbone et de dihydrogène. Il faut ensuite convertir le monoxyde de carbone en le faisant réagir avec de la vapeur d'eau pour obtenir du dioxyde de carbone et du dihydrogène.

L'oxydation partielle du méthane CH₄ :

Oxydation partielle	$\text{CH}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$
Conversion du CO	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
Bilan	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$

Cette méthode nécessite aussi une purification : les deux procédés envisagés pour le vaporeformage sont appropriés à l'oxydation partielle.

II) Production nucléaire d'hydrogène

Les réserves nucléaires de la Terre sont considérables. C'est pourquoi l'utilisation de l'énergie nucléaire qui a l'avantage de ne pas produire de CO₂ est donc envisagée pour produire de l'hydrogène. Les possibilités de production s'orientent vers la dissociation de la molécule d'eau qui est, elle aussi, très abondante. Cette dissociation peut se faire selon deux voies :

- l'électrolyse de l'eau par du courant électrique produit par une centrale nucléaire
- des cycles thermochimiques endothermiques alimentés en chaleur par une centrale nucléaire.

L'électrolyse de l'eau fait appel à la réaction suivante : $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$.

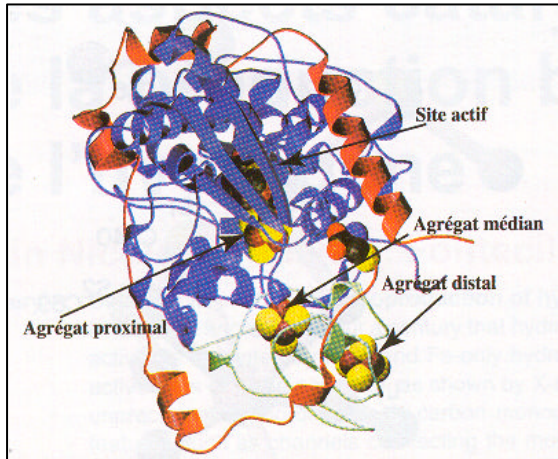
Elle s'opère par le biais du courant électrique produit dans ce cas par une centrale nucléaire. On envisage aussi d'utiliser l'énergie électrique récupérée sur le réseau pendant les heures creuses : l'hydrogène serait alors un moyen de stocker l'énergie tel une batterie d'accumulateurs. Néanmoins l'électrolyse de l'eau dévoile un faible rendement énergétique : 25 à 30%.

Les cycles thermochimiques présentent un rendement énergétique supérieur : de l'ordre de 50%, voire 60% en cas de cogénération d'électricité. Dans cette voie, l'énergie nucléaire est utilisée pour apporter la chaleur nécessaire à la réalisation des réactions. Il s'agit de cycles car la dissociation de l'eau est réalisée suite à plusieurs réactions dont les sous-produits sont réinvestis.

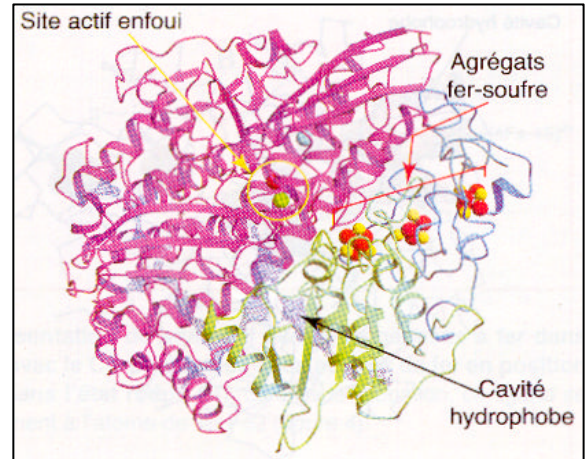
III) Production d'hydrogène à partir d'enzymes

On connaissait l'existence d'enzymes capable de réaliser la réaction réversible de l'oxydation de l'hydrogène depuis un siècle : les hydrogénases. Elles sont particulièrement étudiées depuis le premier choc pétrolier en 1973.

On distingue deux grandes familles d'hydrogénases :



les hydrogénases à fer : très actives, plutôt productrices d'hydrogène mais sensibles aux inhibiteurs comme le monoxyde de carbone et l'oxygène.



les hydrogénases à nickel-fer : peu actives, moins sensibles aux impuretés, mais plutôt consommatrices d'hydrogène.

Elles réalisent la réaction suivante : $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$. Elles sont capables de la faire dans les deux sens.

Ces enzymes font l'objet de nombreuses recherches afin de comprendre et de tirer profit de la manière de produire de l'hydrogène selon la nature. On envisage ainsi d'adapter les hydrogénases à l'utilisation industrielle de l'hydrogène ou bien de les mimer. En effet, elles possèdent des propriétés catalyseuses qu'il serait intéressant d'analyser afin de pouvoir les reproduire.

Ce procédé est en cours d'étude et n'a actuellement aucune finalité concrète.

IV) Production d'hydrogène en utilisant la biomasse

La biomasse correspond à tous les végétaux qui se développent sur la planète grâce à l'assimilation de l'énergie solaire. Elle représente une ressource renouvelable considérable.

On distingue, parmi les ressources utilisables pour la production d'énergie :

-la biomasse forestière : bois d'œuvre, rémanents forestiers, bois de taillis, écorces, chutes.

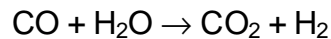
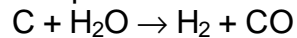
-la biomasse agricole : pailles, plantations possibles sur la jachère.

-les déchets : bois, papiers et cartons usagés, farines animales, autres résidus.



On estime que l'on peut produire 15% de la consommation d'énergie primaire en France avec les ressources actuelles de biomasse.

Pour produire du dihydrogène à partir de la biomasse, il faut faire une transformation thermochimique. Les produits de la biomasse sont composés principalement de $C_6H_9O_5$. La première étape consiste donc à sécher la matière qui devient alors $C_6H_7O_4$. Ensuite, on chauffe à 600°C , pour provoquer la dégradation thermique : c'est la thermolyse. Après cette étape, les produits sont à 70% gazeux, sous forme de CH_4 , H_2 , CO , CO_2 et quelques indésirables tels les goudrons. Les 30% solides restants sont essentiellement composés de carbone. On continue donc à élever la température jusqu'à 1000°C pour gazéifier le carbone. On introduit ensuite de la vapeur d'eau qui, réagissant avec le carbone, produit du dihydrogène et du monoxyde de carbone. On convertit ensuite le CO par une réaction avec de l'eau.

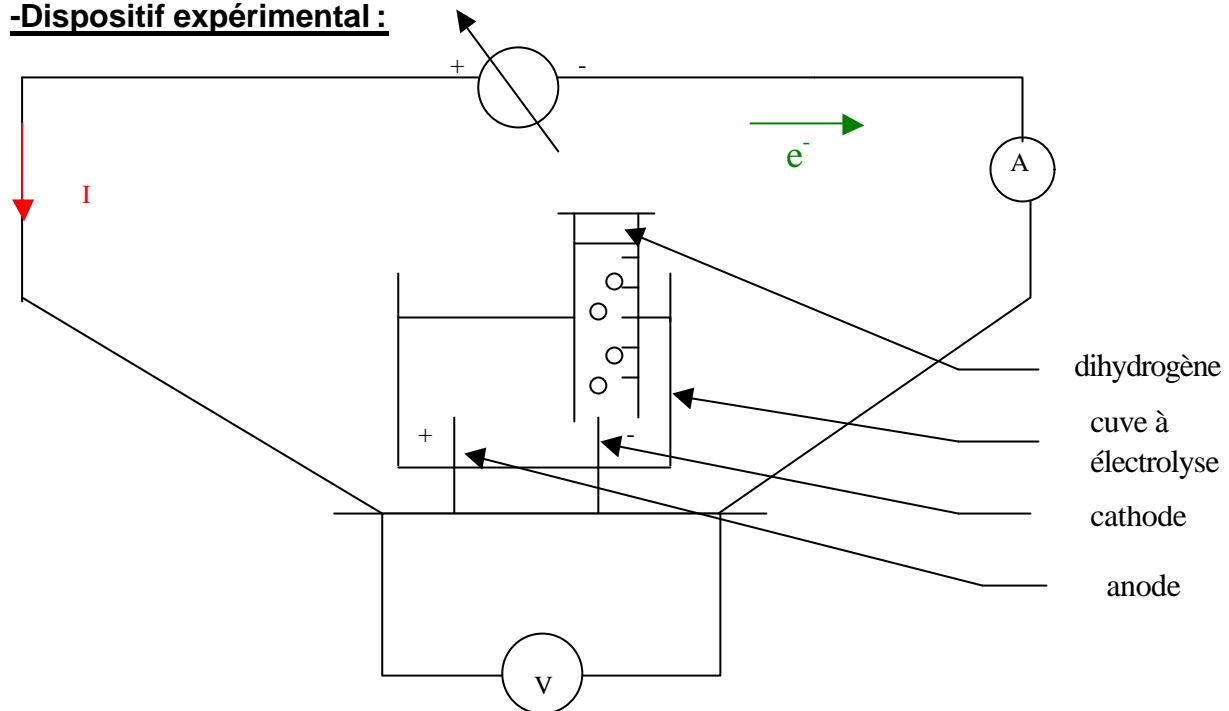


Après cette opération, on élève la température jusqu'à 1100°C afin d'éliminer les acides et les goudrons. Enfin, on raffine le gaz de biomasse pour récupérer le dihydrogène.

Le rendement de la transformation thermochimique est de 3KWh produits /1Kwh consommé.

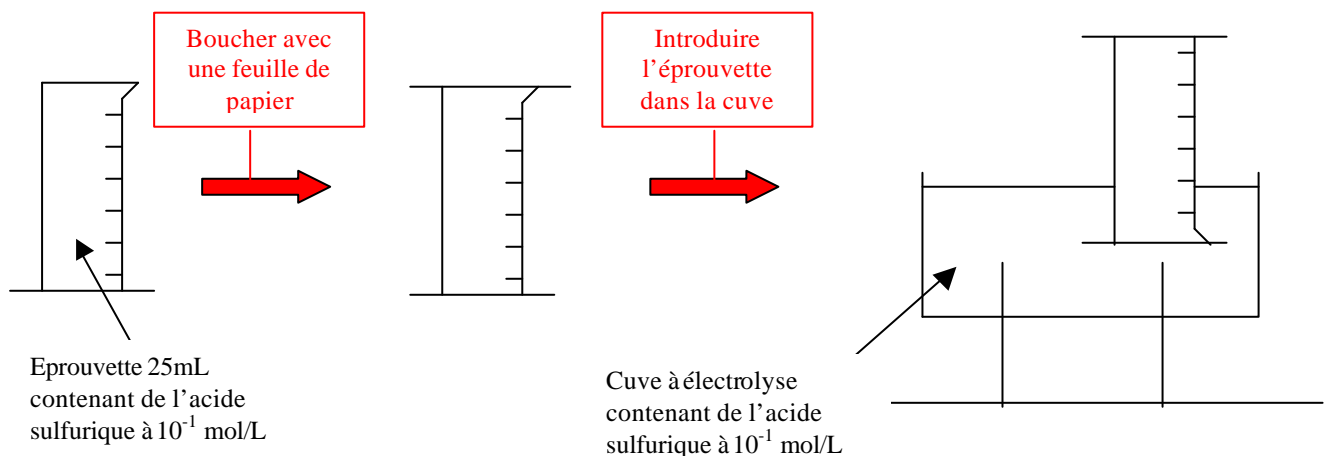
IV) Notre méthode de production

-Dispositif expérimental :



-Protocole expérimental :

- On introduit dans la cuve à électrolyse de l'acide sulfurique à 10^{-1} mole par litre.
- On place dans la cuve une éprouvette comme ci dessous, remplie elle aussi d'acide sulfurique à 10^{-1} mole par litre. Attention : il faut éviter la formation d'une bulle d'air à l'intérieur de l'éprouvette !
- Placer l'éprouvette au-dessus de la cathode (borne négative de la sonde)



- La production de dihydrogène peut commencer ; il ne reste plus qu'à mettre en marche le générateur à une tension 30 Volts.
 - L'acide contenu dans l'éprouvette se vide peu à peu et est remplacé par le dihydrogène.
 - La production est terminée lorsque tout l'acide contenu dans l'éprouvette a été remplacé par le dihydrogène.
- Attention!! L'hydrogène étant un gaz très explosif, il est très important d'en produire qu'en très petite quantité afin d'éviter tout incident.

Informations complémentaires :

Sur l'anode, on trouve un dégagement de dioxygène. En fait cette expérience correspond à l'hydrolyse de l'eau : $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$.

La présence du voltmètre et de l'ampèremètre n'est pas anodine : ils serviront à calculer le rendement de l'électrolyseur.

Cette méthode est adaptée à une production minime, sécurisée et pratique mais ne correspond pas aux critères de production à grande échelle.

-Calcul du rendement de l'électrolyseur :

Paramètres et constantes

-Acide sulfurique à 1 mol/L

-température $T = 23^\circ\text{C} = 296.15 \text{ K}$

-pression $p = 10^5 \text{ Pa}$

-intensité $I = 3.02 \text{ A}$

-tension $U = 5.72 \text{ V}$

-chaleur de combustion du H_2

$Q = 286 \times 10^3 \text{ J/mol}$

- $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

- $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

- $R = 8.31 \text{ SI}$

Résultats

Volume expérimental de dihydrogène obtenu

$V(\text{H}_2)_{\text{exp}} = 40 \times 10^{-3} \text{ L}$

Temps de fonctionnement de l'électrolyseur

$t = 97.5 \text{ s}$

Calcul théorique :

$$I = (e \times n_{e^-})/t \quad \Leftrightarrow \quad n(e^-) = (I \times t)/e$$

$$n(\text{H}_2)_{\text{th}} = n_{e^-}/2N_A$$

$$n(\text{H}_2)_{\text{th}} = (I \times t)/(2N_A \times e)$$

$$n(\text{H}_2)_{\text{th}} = 1.526 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Calcul expérimental :

D'après la loi des gaz parfaits, $V_m = (R \times T)/p$

D'où $V_m = 24.6 \text{ L/mol}$

$$n(\text{H}_2)_{\text{exp}} = V(\text{H}_2)/V_m$$

$$n(\text{H}_2)_{\text{exp}} = 1.626 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Rendement énergétique :

$$P(\text{H}_2)_{\text{exp}} = (n(\text{H}_2)_{\text{exp}} \times Q)/t$$

$$P(\text{H}_2)_{\text{exp}} = 4.77 \text{ W}$$

$$P_{\text{fournie}} = U \times I$$

$$P_{\text{fournie}} = 17.27 \text{ W}$$

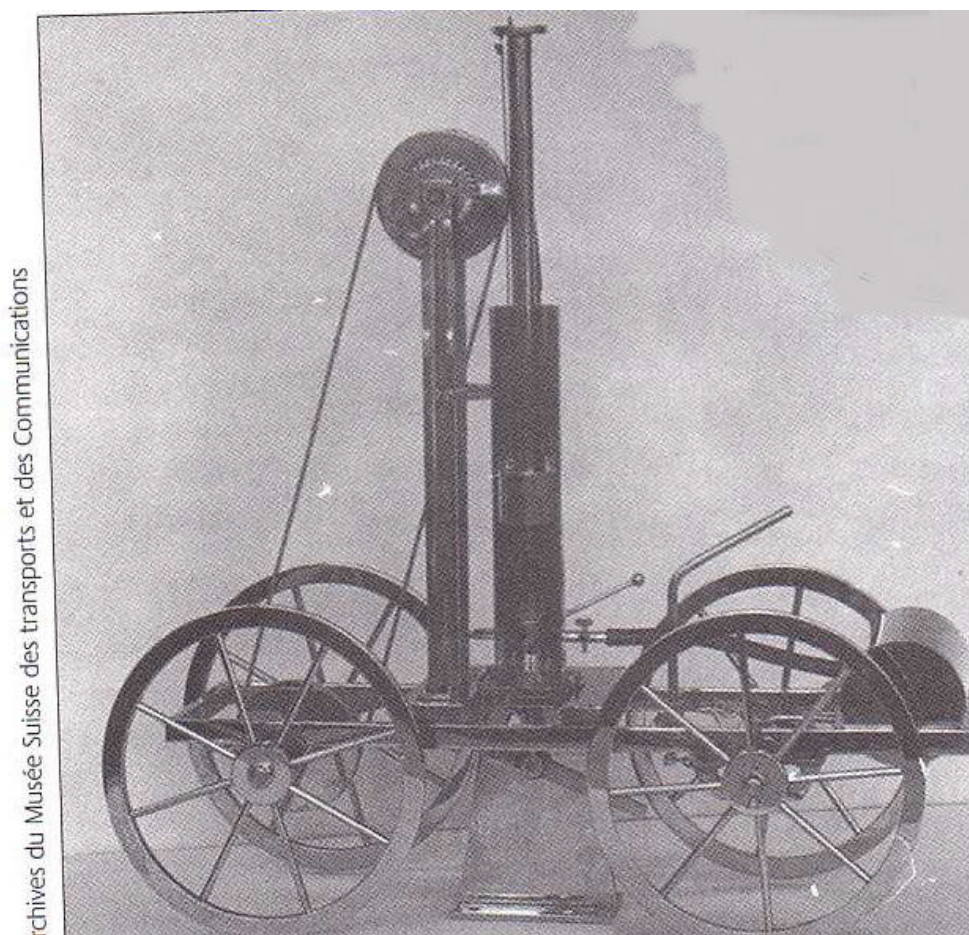
$$\rho = (P(\text{H}_2)_{\text{exp}} \times 100)/P_{\text{fournie}}$$

$$\rho = 27.61 \%$$

Conclusion : Si la société choisit l'hydrogène comme vecteur énergétique du futur, il faudra que celui-ci soit produit à grande échelle et soit financièrement accessible. Par conséquent, on s'interroge dès à présent sur les possibilités qui se présentent pour sa production. Ainsi, parmi toutes les éventualités évoquées dans cette partie, les défauts majeurs sont écologiques, financiers ou naturels. En effet la production parallèle de CO₂, la nécessité de travaux de recherches et de développement considérables et l'épuisement ou l'insuffisance de certaines ressources imposent l'utilisation en parallèle de plusieurs modes de production.

Application directe de l'hydrogène comme combustible

Outre son emploi dans les piles à combustible, l'hydrogène peut être utilisé comme combustible direct. Par exemple, l'hydrogène peut servir comme carburant pour des véhicules sans utiliser de pile (comme le montre le prototype d'une voiture ci-dessous). De même, l'hydrogène peut s'appliquer dans des engins de la vie courante tels qu'une tondeuse à gazon. C'est ainsi qu'une tondeuse à gazon fut créée par des chercheurs de l'université de Genève. L'hydrogène peut donc se substituer aux carburants classiques et de manière concluante.



Archives du Musée Suisse des transports et des Communications

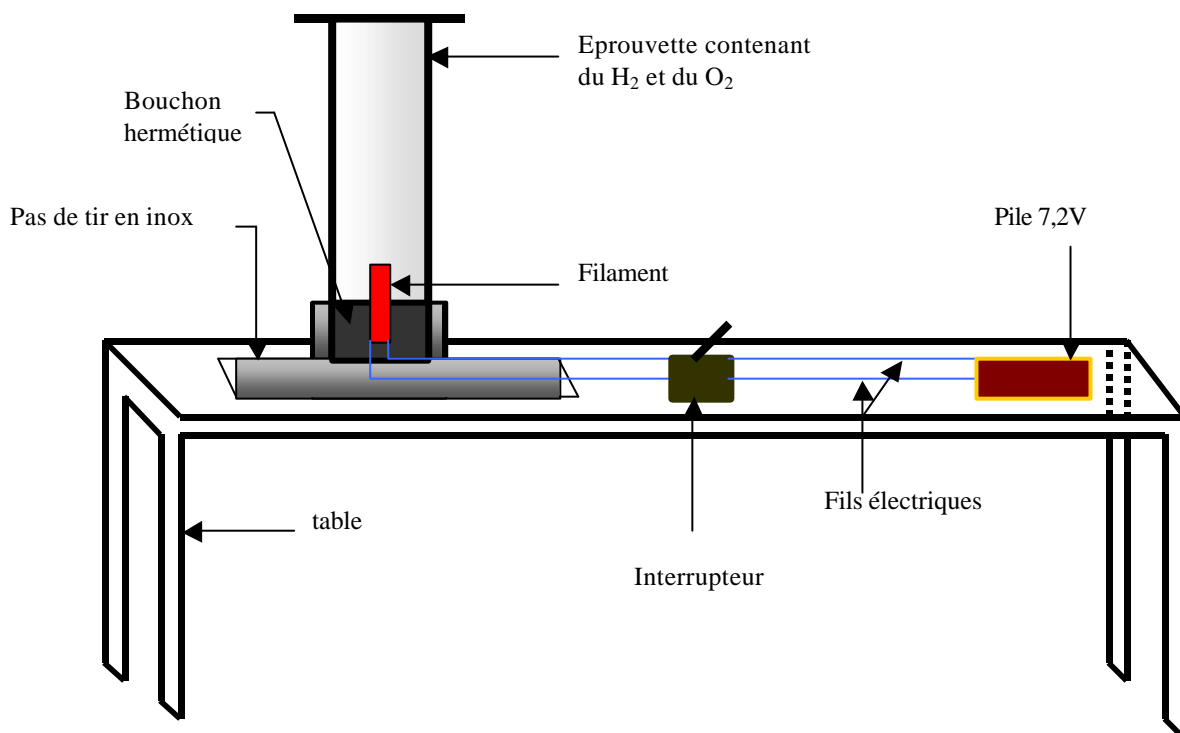
*Le premier moteur à explosion construit en 1805 était propulsé au dihydrogène
(source : la Recherche n° 357 octobre 2002)*

Notre groupe a tenté de vérifier les capacités de l'hydrogène par lui-même. Pour cela, nous avons décidé de faire fonctionner un moteur classique non pas avec de l'essence, mais avec de l'hydrogène. Seulement avant de se lancer dans une telle expérience, nous avons vérifié que l'hydrogène explosait bel et bien et qui était capable de générer de l'énergie utilisable. C'est ainsi que nous avons décidé de faire décoller des "fusées"; le protocole étant précisé après. L'expérience de la fusée n'avait pour but que de nous préparer à la réalisation d'un moteur fonctionnant à l'hydrogène.

Combustion directe de l'Hydrogène dans une fusée

Afin de démontrer les propriétés explosives de l'hydrogène gazeux, nous avons décidé de l'utiliser comme carburant pour un projectile, où lors de la combustion instantanée dans l'enceinte fermée de ce même projectile, il sera projeté en l'air. Pour cette expérience, nous avons utilisé une éprouvette en plastique de 25mL comme réservoir à hydrogène et projectile dit: "fusée".

I) Montage expérimental



II) Protocole expérimental

-Nous disposons d'une éprouvette contenant de l'oxygène et de l'hydrogène en proportions stoechiométrique.

-La mise à feu s'effectue par pression sur l'interrupteur. Cette dernière a lieu grâce au branchement en série d'une pile 7,2 V, d'un interrupteur et d'un filament très fin qui devient incandescent lors du passage du courant. Ce filament se situe au sein même du bouchon.

-L'hydrogène étant un gaz explosif, le fil rougissant entraîne l'explosion.

-Pour que la fusée décolle le plus haut possible : pour éviter les pertes de compression lors du décollage, on a bouché la fusée (éprouvette) à l'aide d'un bouchon hermétique et introduit la fusée dans un pas de tir en inox.

Pour tester les capacités de l'hydrogène en conditions expérimentales, nous avons tout d'abord calculé la hauteur théorique.

hauteur théorique = $W/(m \times G)$

W : L'énergie molaire de combustion de l'hydrogène x quantité de matière ;

$n(H_2) = (P \times V)/(R \times T)$ avec $P = 10^5$ bar ; $V = 2/3 \times 25 \cdot 10^{-6} m^3$; $R = 8,31$ SI ; $T = 295$ K.

$n(H_2) = 6,8 \cdot 10^{-4}$ mol.

L'énergie molaire de combustion de l'hydrogène = 285 KJ par mol

$W = 6,8 \cdot 10^{-4} \times 285 \cdot 10^3$

$W = 193,8$ J

- $m = 14,1$ g

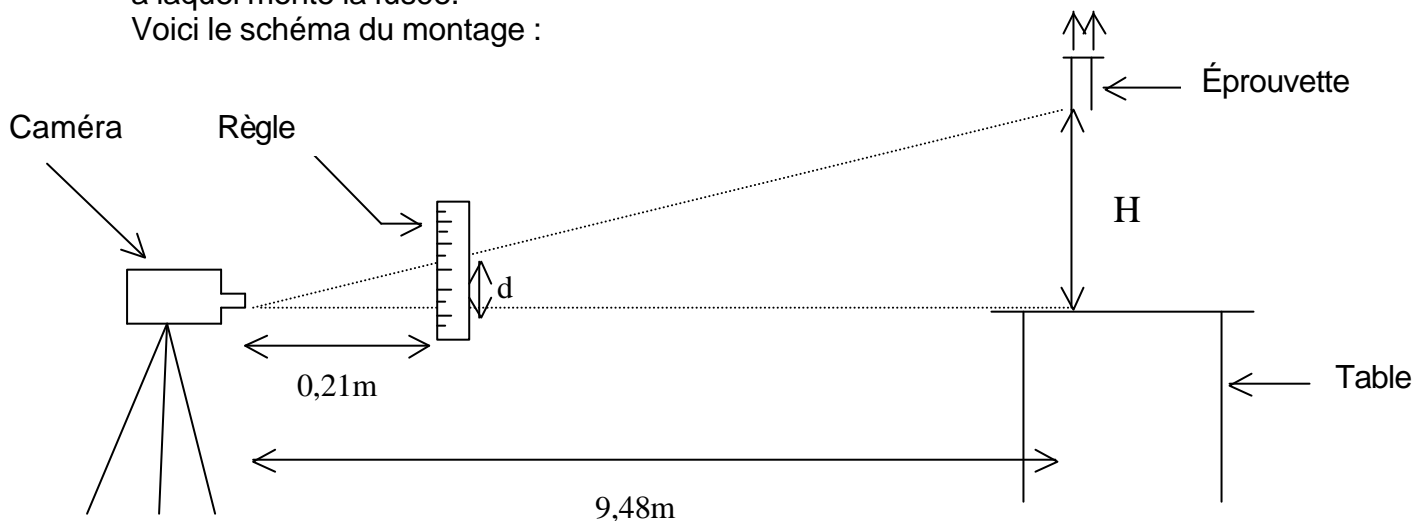
- $G = 9,8$ N

hauteur théorique = $193,8 / (14,1 \cdot 10^{-3} \times 9,8)$

⇒ Valeur théorique = 1400 mètres

Nous avons après de multiple répétition de l'expérience, filmé le décollage de la fusée et nous avons pu mesurer la hauteur expérimental grâce au théorème de Thalès. Nous avons placé un repère gradué a une distance connue de l'objectif, la caméra étant elle aussi a une distance définie de la table de lancement afin de pouvoir calculer la hauteur a laquel monte la fusée.

Voici le schéma du montage :



▪ Valeur expérimentale :

- Sur l'appui vidéo nous avons mesuré un d valant 6,5cm.

Or d'après le théorème de Thalès : $0,21/9,48 = d/H$.

D'où Hauteur = $9,48d/0,21$

⇒ Hauteur = 2,93mètres

♦ Grâce a ces valeurs nous avons pu déterminer le rendement de la fusée :

Rendement = valeur expérimentale / valeur théorique x 100

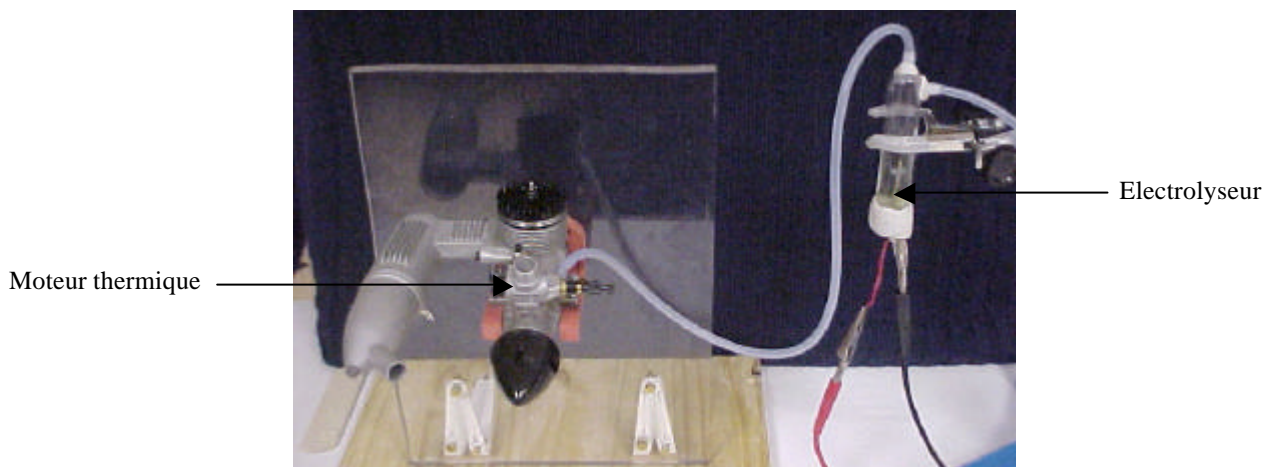
= $2,93 \times 100 / 1400$

Rendement = 0,21%

Essais de combustion directe

L'hydrogène comme l'essence ayant des propriétés explosives, il nous est paru comme envisageable le fait de l'utiliser comme l'essence en combustion directe dans un moteur à explosion. Cependant, même si un moteur utilise de l'hydrogène, il est toujours soumis au cycle de Carnot qui limite son rendement à 70%, et même si la combustion de l'hydrogène est beaucoup plus « propre » que celle d'une essence ordinaire, le moteur rejettera toujours un peu de monoxyde d'azote.

Par sécurité nous ne stockons pas l'hydrogène car nous n'avons pas en main les technologies qui permettent de le faire. Ainsi nous produisons l'hydrogène à l'aide d'un électrolyseur relié directement au carburateur d'un petit moteur thermique.



Notre dispositif expérimental

Calcul de la puissance fournie par cet électrolyseur ainsi que son rendement énergétique

Données:

$$-I = 3A$$

$$-U = 4,6V$$

$$-Tps: 34s$$

$$-V_{\text{prod}} = 20 \text{ mL} \Leftrightarrow V(\text{H}_2)_{\text{prod}} = 13,3 \text{ mL}$$

$$-T = 23^\circ\text{C} = 296,15 \text{ K}$$

$$-P = 10^5 \text{ Pa}$$

$$-R = 8,31 \text{ SI} = \text{Constante}$$

$$-V_m = 24,6 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$-Q(\text{H}_2) = 286 \text{ KJ/mol}$$

Calcul théorique de la puissance :

$$P = U \times I$$

$$P = 4,6 \times 3,0$$

$$P = 13,8 \text{ W}$$

Calcul expérimental de la puissance:

$$P(\text{H}_2)_{\text{exp}} = [V(\text{H}_2)_{\text{exp}} \times Q(\text{H}_2)] / (t \times V_m)$$

$$P(\text{H}_2)_{\text{exp}} = (13,3 \cdot 10^{-3} \times 286 \cdot 10^3) / (34 \times 24,6)$$

$$P(\text{H}_2)_{\text{exp}} = 4,55 \text{ W}$$

Calcul du rendement énergétique de l'électrolyseur :

$$\rho = (P_{\text{H}_2\text{exp}} / P_{\text{fournie}}) \times 100$$

$$\rho = (4,55 / 13,8) \times 100$$

$$\rho = 33 \%$$

L'électrolyseur du moteur a donc un rendement de 33%.

Le principe est simple mais en pratique des problèmes se posent :

Tout d'abord, l'hydrogène étant un gaz , il faut que toute l'installation soit étanche. Ainsi nous avons condamné l'arrivée d'air du carburateur et nous n'utilisons que le dioxygène produit par l'électrolyseur.

Ensuite, le réglage du débit d'hydrogène entrant dans le moteur est très dur à effectuer mais il est capital car si il n'en entre pas assez l'explosion ne se fait pas et si il en rentre trop il y a des risques d'explosion en sortie de moteur.

Ainsi on a constaté sur un document de modélisme, qu'un moteur de 2,5cm³ a besoin d'une puissance d'environ 500W pour fonctionner normalement. Or l'hydrogène produit par notre électrolyseur n'apporte qu'une puissance de 4,55W. Cela explique donc que notre moteur ne peut pas encore marcher avec du dihydrogène en combustion directe.

Emploi de l'hydrogène pour les véhicules particuliers

L'hydrogène semble être le futur remplaçant de l'essence également pour les véhicules particuliers (comme le montre ce prototype de voiture ci-dessous). Dans cette partie, nous étudierons les avantages et problèmes rencontrés par cette source d'énergie dans le domaine de l'automobile, ainsi que trois aspects importants : la sécurité, la distribution et l'avenir.



Depuis le premier choc pétrolier en 1973, les constructeurs fabriquent des modèles automobiles consommant de moins en moins de carburant. Cette tendance s'amplifie avec l'augmentation du nombre de véhicules ce qui entraîne une augmentation du rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (ex:CO₂). De plus, les réserves de pétrole et de gaz diminuent. Il faut donc un substitut qui semble être l'hydrogène qui présente de nombreux avantages tels que:

- Un rendement énergétique important
- L'absence de polluants

L'utilisation de l'hydrogène pur dans les piles à combustible permet un rendement élevé, une forte compacité, un système simple et aucun rejet de polluant.

Cependant, l'hydrogène ne sera utilisé dans les véhicules particuliers de façon massive qu'aux alentours de 2020.

Mais, outre les problèmes de fabrication et de coûts, l'hydrogène rencontre 3 problèmes pour son utilisation aux véhicules particuliers:

- La mise en place d'un réseau de distribution grand public ne pourra être créé tant qu'il n'existera pas un mode de stockage standardisé.
- Le stockage à bord d'un véhicule n'est pas assez performant au niveau de la masse et du volume. Le mode de stockage devra se rapprocher de celui des carburant qui est compact, sûr et peu onéreux.
- La sécurité et la fiabilité ainsi que l'utilisation des véhicules à hydrogène doivent être au moins aussi performant que les véhicules actuels à moteur à combustion interne.

Le réseau de distribution doit être très dense, sinon les usagers seront limités dans leurs déplacements ce qui engendrera un frein à l'utilisation de ce carburant.

L'avenir devrait donner raison à l'hydrogène comme futur vecteur énergétique notamment grâce aux quatre points suivant:

- La raréfaction du pétrole
- La réduction de l'effet de serre
- La diversification des énergies et la production d'énergie renouvelable.

CONCLUSION : L'utilisation de l'hydrogène comme carburant contribue à la baisse des émissions de CO₂ dans l'air. Utilisé dans une pile à combustible, le rendement est très élevé. Le stockage à bord du véhicule doit être optimisé au niveau de la masse, du volume, du coût et de la sécurité.

Une expérience concrète : la maison Friedli

En Suisse, un particulier expérimente une installation de production et de stockage de dihydrogène à partir d'énergie solaire au sein d'une maison résidentielle. L'organigramme ci-dessous détaille son mode de fonctionnement :

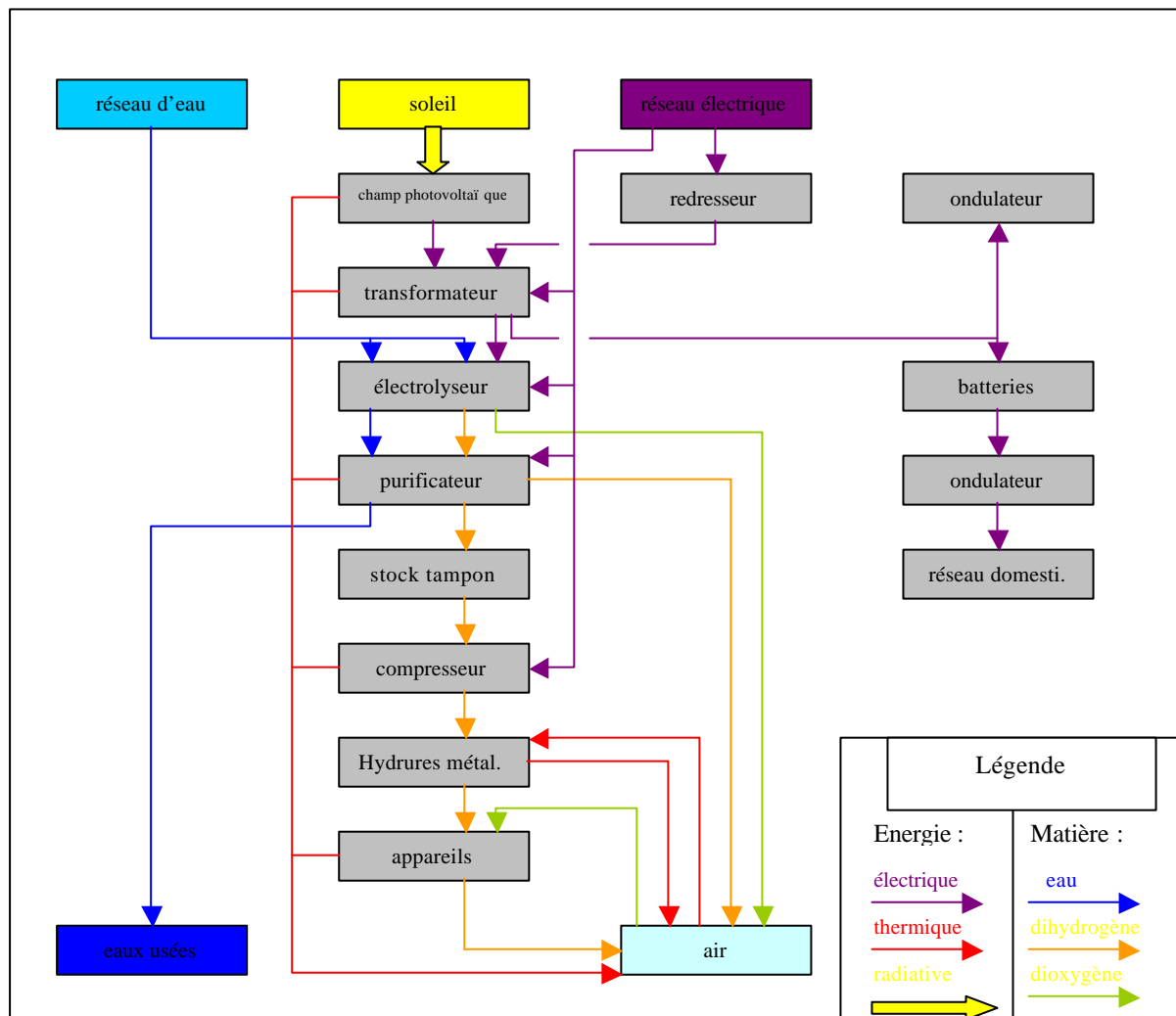


Schéma de fonctionnement de l'installation

L'hydrogène est alors utilisé comme moyen de stockage d'énergie dans des réservoirs à base d'hydrures métalliques. Dans cette installation, il sert surtout au stockage à court terme. En effet, le dihydrogène est réinvesti dans la locomotion d'un minibus bicombustible (essence/dihydrogène), ou dans le fonctionnement des appareils domestiques. L'objectif final restant d'expérimenter une installation capable d'effectuer un stockage énergétique saisonnier en parallèle avec l'utilisation directe et instantanée de l'électricité issue des panneaux solaires : stockage important de rayonnement solaire sous forme de dihydrogène en été, puis utilisation des stocks en hiver. On obtiendrait alors un logement indépendant au niveau de sa consommation annuelle d'énergie.

Cette installation de production fonctionne depuis 1991 sans problèmes majeurs. Afin d'atteindre une production d'hydrogène conséquente et d'expérimenter un réel stockage saisonnier, il faudrait impérativement augmenter la capacité de stockage. L'intégration complète de cette installation sur une maison résidentielle en ferait ainsi un projet pilote abouti particulièrement intéressant pour l'avenir de l'hydrogène dans le domaine de l'énergie.

Stockage du dihydrogène

La molécule de dihydrogène est la plus petite molécule existante car elle est composée de deux atomes dont le rayon est le plus minime : l'hydrogène. Par conséquent, son stockage dans un volume donné nécessite des conditions rigoureuses pour éviter les fuites. De plus, cette molécule est très facilement inflammable ou explosive, d'où la nécessité de contrecarrer ce danger. Pour les applications auxquelles, on destine l'hydrogène les modes de stockage actuels ne suffisent pas.

1) Le stockage haute pression

Pour stocker le dihydrogène sous haute pression, le matériau composant le réservoir doit posséder de nombreuses qualités qu'il est actuellement impossible de réunir. En effet, le stockage haute pression est envisagé principalement dans le domaine des applications mobiles, avec notamment les réservoirs pour piles à combustibles ; le réservoir se doit donc d'être léger et résistant à la fatigue provoqué par les conditions thermiques et mécaniques. Il faut aussi qu'il soit protégé contre la corrosion et la perméation (traversée d'une paroi par un flux gazeux). De plus, le réservoir doit être économiquement compétitif.

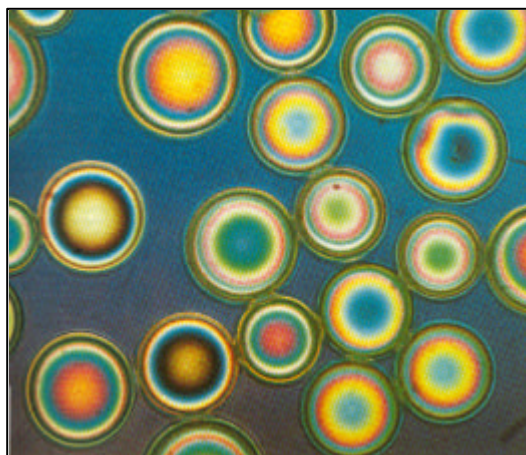
Actuellement, la meilleure paroi obtenue se compose d'un alliage d'aluminium ou encore d'acier austénitique. Bien que ces matériaux soient sûrs du point de vue de leur utilisation, ils n'en restent pas moins coûteux et présentent une capacité massique faible (2 à 3 %).

N.B. : la capacité massique est le rapport entre la masse de gaz stockée et la masse du réservoir.

Les recherches se portent à présent sur l'amincissement de ce réservoir métallique afin de le doubler de polymères et ainsi augmenter la capacité massique. Les polymères ont en effet l'avantage d'être légers et de faible coût.

Une autre méthode de stockage est en cours d'étude : le stockage dans des micro ballons en verre. Ces ballons ont un diamètre de l'ordre du millimètre et une épaisseur de quelques micromètres. Ils sont remplis par perméation autour de 400°C et peuvent ensuite résister à des pressions élevées. Le gaz est libéré par destruction du verre ou par chauffage. Cette forme de stockage limite les risques d'explosion.

*Les micro ballons en
verre
Diamètre : 500 μm
Épaisseur : 5 μm*



Il faut remarquer que le stockage haute pression entraîne une perte de rendement : en effet, la compression consomme de l'énergie.

II) Le stockage basse pression

Le stockage basse pression est moins contraignant que le précédent mais l'autonomie que le réservoir permet est plus faible. Par conséquent, on recherche actuellement des moyens de stocker plus de dihydrogène dans un même volume et même pression. Les phénomènes d'adsorption et d'absorption sont la solution de cette amélioration du stockage basse pression.

L'adsorption est un phénomène physique qui retient les molécules de gaz à la surface d'un solide sous l'effet des forces de Van der Waals.

L'absorption est une propriété chimique que possède certains liquides ou solides de retenir certaines substances (gaz ou liquides) dans la totalité de leur volume.

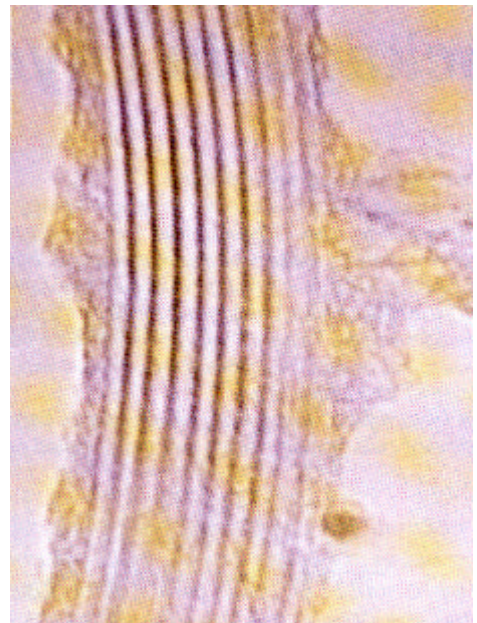
On envisage ainsi de stocker l'hydrogène sous forme d'hydrures métalliques : hydrure de magnésium, hydrure de titane-fer, hydrure de palladium...etc. En effet ces matériaux ont la capacité d'absorber l'hydrogène et de le restituer en temps voulu. Ainsi, on peut augmenter la capacité de stockage d'un réservoir sans augmenter la pression du gaz. Cependant cette méthode est présentement en cours d'étude car on ne connaît pas encore l'hydrures métallique idéal.

Il faudrait que celui-ci:

- soit peu sensible aux impuretés présentes dans l'hydrogène (H_2O , CO , O_2 , $S...$)
- ait une cinétique d'absorption/désorption rapide
- possède une capacité massique d'absorption élevée
- ait une pression d'équilibre à température ambiante faible

Ces qualités sont nécessaires à l'utilisation de ce mode de stockage dans les applications mobiles et stationnaires.

A partir du principe d'adsorption et de la découverte du Japonais Sumio Iijima sur les nanotubes de carbone (photo ci-contre), on a étudié l'utilisation de ces derniers pour augmenter les capacités des réservoirs d'hydrogène. Les nanotubes de carbone sont des tubes de carbone d'un diamètre de l'ordre du nanomètre, ils semblent posséder des capacités d'adsorption exceptionnelles : jusqu'à 65% d'hydrogène supplémentaire théoriquement, mais expérimentalement on atteint seulement quelques %. De plus ces tubes sont aujourd'hui très difficiles à créer en grande quantité. Les nanotubes de carbone font par conséquent l'objet de nombreuses recherches afin d'améliorer leur synthèse, leur prix de revient et leurs qualités d'adsorbant.



Conclusion : Le stockage du dihydrogène n'est pas encore idéal. Les formes de stockage évoquées ne sont pas applicables à toutes les utilisations de l'hydrogène. Il faudra donc arriver à une forme de stockage polyvalente à la fois sûr et efficace qui permette d'englober la totalité des applications auxquelles l'hydrogène est destiné.

Au sein de notre projet, nous n'avons pas pu réaliser de stockage important car le dihydrogène est une espèce dangereuse (explosive). De plus nos stockages n'étaient pas performants dans le temps car le dihydrogène est très pénétrant et nous ne disposons pas de matériaux adaptés pour contrer cette particularité.

Les piles à combustibles

Non polluante, la pile à combustible (PAC) a fait ses preuves sur les engins spatiaux. Elle nourrit aujourd'hui de nouvelles ambitions : propulser nos voitures, éclairer et chauffer nos maisons .Mais des difficultés subsistent.

En théorie c'est l'idéal. Au départ : de l'oxygène et de l'hydrogène ; combustibles bon marché et facilement accessibles ; à l'arrivée : une électricité « propre », sans déchets toxiques ni nuisances...Le tout avec un excellent rendement et une fiabilité établie depuis des décennies sur des engins spatiaux. Bref, une solution si parfaite qu'on s'attendrait à la voir partout. Or, force est de constater, qu'on est sur ce point bien loin du compte. Bien qu'aujourd'hui la pile à hydrogène refait surface ; en raison des problèmes énergétiques tel l'épuisement à terme des énergies fossiles comme le pétrole ; elle n'a toujours pas franchi le seuil de notre vie quotidienne. Avant de comprendre pourquoi ,il faut vous parlez plus en détail de cette pile à combustible.

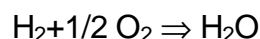
I) Historique

Après que Henry Cavendish ait identifié vers 1760 les principales caractéristiques de l'hydrogène, en l'espace de trente ans à partir de 1839, l'anglais William Grove découvre la pile à combustible, le français Gaston Planté découvre l'accumulateur au plomb(1859) et le Belge Théophile Gramme découvre le moteur électrique(1869) : ainsi, dès le milieu du XIX ème siècle , l'europe créait les premiers éléments d'une chaîne complète de traction électrique « propre », précurseur des véhicules du futur que l'on attend vers 2010...ou 170 ans plus tard !

Entre temps et depuis la découverte de Grove, la pile à combustible est tombée dans l'oubli jusqu'au début des années soixante quand General Electric l'a reprise pour la développer et en installer deux modules de 1KW dans les premières capsules spatiales Gemini : c'est le véritable point de départ de l'aventure industrielle de cette technologie.

II) Le principe de fonctionnement

Il est extrêmement simple : il s'agit d'une combustion électrochimique (convertisseur d'énergie) et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène avec production simultanée d'électricité , d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale universellement connue :

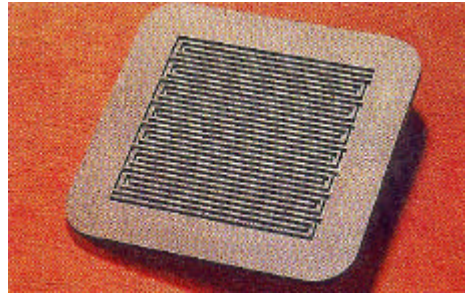


Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes garnies de catalyseur à base de platine,(l'anode pour l'oxydation de l'hydrogène et la cathode ou la réduction de l'oxygène) et séparées par un électrolyte (corps qui fondu ou en solution, peut dissocier en ions sous l'action d'un courant électrique) ; c'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

III) Le mécanisme

En présence de platine, une molécule d'hydrogène se dissocie en deux ions d'hydrogène et cède deux électrons à l'anode. Ces derniers, bloqués par l'électrolyte, membrane qui ne laisse passer que les protons, empruntent un circuit électrique extérieur. Arrivés sur la cathode , ils se combinent à l'oxygène de l'air qui se combine lui même avec les protons H+ pour former de l'eau. Pour obtenir une tension suffisante

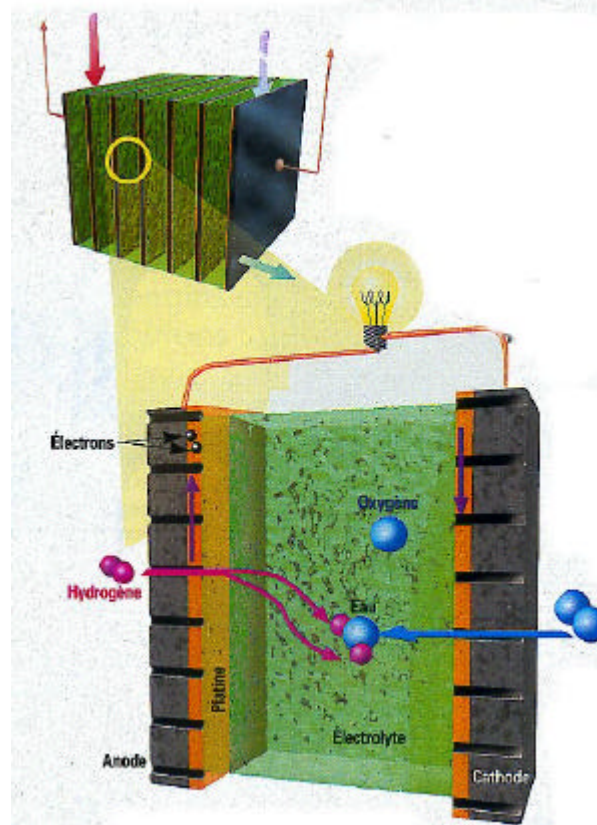
il suffit alors d'empiler les éléments en série. Un matériau d'interconnexion (plaque bipolaire) permet l'assemblage des cellules entre elles. Il a pour fonction de collecter les électrons provenant des électrodes mais aussi de séparer les gaz comburant et combustible.



Exemple de plaque bipolaire en composite organique

Le principe de fonctionnement est donc tout à fait similaire à celui d'une pile électrique conventionnelle. Dans cette dernière, l'oxydant et le réducteur sont progressivement consommés et on s'en débarrasse lorsque la matière active est épuisée. Dans une pile à hydrogène, l'anode est alimentée en continu par de l'hydrogène (combustible) (d'où le nom pile à hydrogène) provenant d'un réservoir, et la cathode est alimentée par l'oxygène de l'air (comburant).

L'hydrogène n'est pas le seul élément capable d'alimenter les piles à combustible : le méthanol par exemple fait parti de ces autres combustibles. Le principe de fonctionnement reste alors basé sur un échange d'électrons, en revanche l'équation de la réaction et par conséquent les rejets (produits de la réaction) sont différents. Si on utilise du méthanol ou du gaz naturel, on observe des émissions de CO très faible et des émissions de CO₂ légèrement inférieure à celle d'un moteur thermique, mais la pile n'est alors plus « propre ».



Schématisation générale du mécanisme des piles à combustibles

IV) Les avantages

Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de température, de 20°C à 1000°C. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et les électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient, mais le principe général est inchangé.

La plupart de ces piles fonctionnant à basse et moyenne température, l'hydrogène est le combustible le plus utilisé car c'est celui qui possède la plus grande réactivité. De plus, par rapport aux convertisseurs d'énergie classiques (moteurs à combustion interne, turbines), les piles à combustibles présentent un certain nombre d'avantages :

- Rejet exclusif de vapeur d'eau et de chaleur: la pile à combustible est donc une technologie propre du moment que l'on utilise du dihydrogène pur.
- La réaction chimique se fait à une température plus basse que la combustion dans les moteurs.
- Le rendement de conversion est très élevé (le rendement électrique brut peut atteindre 50% et le rendement global peut aller jusqu'à 80% en cogénération) car il n'est pas soumis aux limitations du cycle de Carnot.
- Elles sont plus silencieuses car il n'y a que les pompes pour objets mobiles qui peuvent être la source de bruit.
- Elles peuvent utiliser différents types de combustibles
- Elles réalisent en une seule étape la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, tandis que les centrales thermiques la réalise en au moins trois étapes.

V) Différents types de piles à combustible

Les piles peuvent être classées suivant de nombreux critères : température de fonctionnement, nature de l'électrolyte (solide ou liquide, acide, base, ...), charge de l'ion diffusant dans l'électrolyte, type de combustible, pile à oxydation directe ou indirecte. La classification communément adoptée est basée sur la nature de l'électrolyte et on distingue cinq types principaux de piles à combustibles :

- les piles à électrolyte alcalin (AFC : alkaline fuel cell),
- les piles à électrolyte polymère solide (PEMFC : proton exchange membrane fuel cell),
- les piles à acide phosphorique (PAFC : phosphoric acid fuel cell),
- les piles à carbonate fondu (MCFC : molten carbonate fuel cell),
- les piles à oxyde solide (SOFC : solid oxide fuel cell).

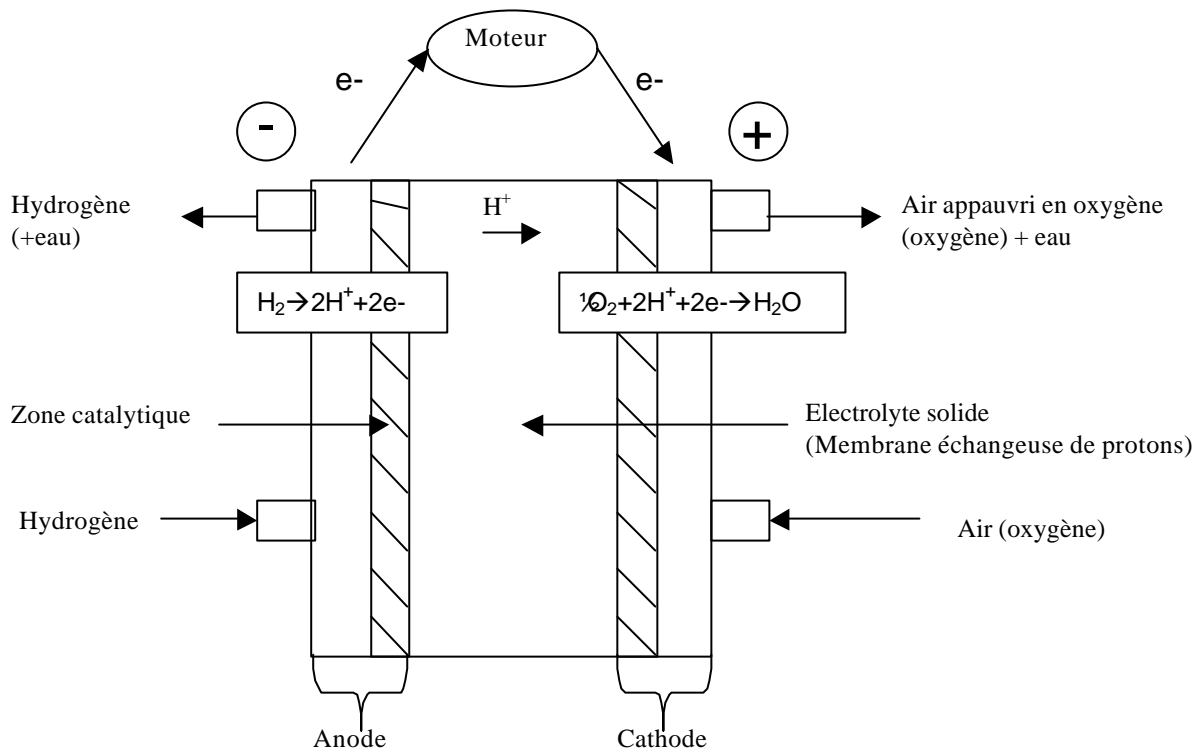
Tableau sur les différentes piles à combustible

Type de pile	Température de fonctionnement (°C)	Electrolyte	Réaction sur l'anode	Réaction sur la cathode	Domaine d'utilisation
AFC	60-90	Alcalin KOH LIQUIDE	$H_2 + OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	Espace, Transport
PEMFC	60-90	Polimère perfluoré SO ₃ ⁻ H ⁺ SOLIDE	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	Portable, transport, stationnaire
PAFC	160-220	Acide phosphorique PO ₄ H ₃ LIQUIDE	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	stationnaire
MCFC	620-660	Sel fondu Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃ LIQUIDE	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	stationnaire
SOFC	750-1000	Céramique ZrO ₂ /Y ₂ O ₃ SOLIDE	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	Transport, stationnaire

La pile AFC (alkaline fuel cell) : a été essentiellement développée pour l'espace après que les premières piles de type acide, réalisées pour les vols spatiaux Gemini, n'aient pas donné toute satisfaction du fait de l'absence de membrane électrolyte performante (la membrane Nafion de Dupont de Nemours ayant été mise au point environ 10 ans plus tard). Aujourd'hui, ce type de piles (en 2 modules de 5kW), accompagne tous les vols habités de la Nasa et donne entière satisfaction. Cette technologie pourrait atteindre des coûts assez bas mais, de par son principe, elle est handicapée par un inconvénient lié à la nécessité de devoir traiter l'air (source de comburant oxygène pour la pile) pour éliminer le CO₂, polluant majeur de la potasse électrolyte.

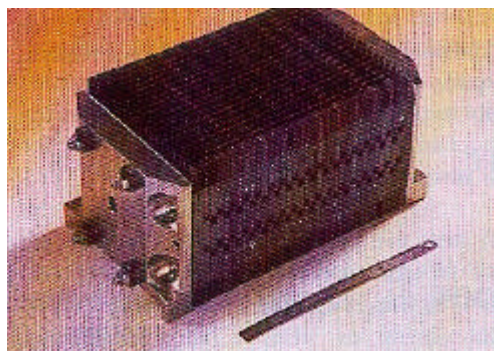
La pile PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) : est la pile sur laquelle sont concentrés les plus gros efforts de développement. Ce constat tient au fait que la pile PEM a été retenue, par tous les grands constructeurs automobiles, comme convertisseur électrochimique des véhicules légers du futur. Ces efforts de recherche pour augmenter les performances et diminuer le coût, aussi bien de la pile elle-même que de ces périphériques, sont à la hauteur de l'enjeu c'est à dire considérables. Tous les grands constructeurs mondiaux ont à l'heure actuelle lancé des prototypes. A en croire ces constructeurs, de petites séries de véhicules à pile à combustibles seront mises sur le marché à partir de 2005-2010. Autour de ce développement se sont ensuite greffées de nombreuses applications dans toutes les gammes de puissances depuis le Watt jusqu'au MW.

Schéma du principe d'une pile à combustible hydrogène/oxygène (type PEMFC)



Electrolyte : corps qui, fondu ou en solution, peut se dissocier en ions sous l'action d'un courant électrique.

Ici, l'électrolyte permet de déplacer un ion H^+ de l'anode à la cathode afin de permettre une réaction avec la cathode.



Prototype de pile PEMFC de 1 KWh (CEA)

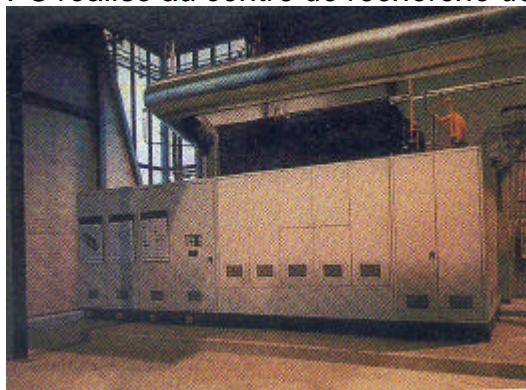
La pile PAFC (phosphoric acid fuel cell) : La partie la plus visible de l'activité PAFC dans le monde se résume à cette société américaine (ONSI Corp.) qui commercialise une pile de 200kW depuis plusieurs années avec un certain succès (plus de 2 millions d'heures de fonctionnement cumulées). Leur coût est voisin de 3000 euros/kW se qui reste cher. Malgré ces durées de fonctionnement, les développements potentiels de cette technologie ne sont pas considérés comme très importants. Des inconvénients majeurs sont que l'acide phosphorique se solidifie en augmentant de volume, ce qui impose de fortes contraintes en cas d'arrêt, et que le milieu est très agressif, ce qui limite les températures susceptibles d'être atteintes et nécessite d'utiliser des matériaux coûteux.

La pile MCFC (molten carbonate fuel cell) : de nombreux prototypes ont été construits et testés depuis plusieurs années notamment au Japon. Ce type de piles ne requiert pas la présence de métaux précieux, mais des difficultés majeures d'ordre technologique subsistent (fonctionnement en milieu corrosif à température très élevée, problèmes d'étanchéité des cellules).

La pile SOFC (solid oxide fuel cell) : elle possède des performances présentes et potentielles intéressantes. En effet, ses rejets thermiques atteignent 800°C, ce qui permet une valorisation intéressante au travers de cycles combinés, ce qui conduit à un rendement global supérieur à 80% (très élevé). En outre, elle permet l'utilisation directe d'hydrocarbures qui peuvent être facilement reformés en se passant de catalyseurs à base de métaux nobles. Ainsi cette filière fait l'objet d'efforts importants aussi bien aux USA, au Japon, ou en Europe où l'on développe deux familles technologique : la technologie cylindrique et la technologie planaire (plus complexe, mais potentiellement plus compacte et peut être plus économique).



Prototype de pile SOFC réalisé au centre de recherche de Jülich en Allemagne



Exemple de cycle combiné à travers cette unité de 100KW comprenant un module SOFC

Toutes ces piles fonctionnent généralement autour d'un point qui correspond à un rendement brut de l'ordre de 50%. Chacune de ces piles possède ses propres particularités, un utilisateur fera donc un choix selon les paramètres qui lui sont imposés par son cahier des charges, comme :

La température de fonctionnement : ce choix a des conséquences sur le temps de démarrage et sur le souhait ou non de valoriser la chaleur produite. C'est ainsi qu'on choisit la PEMFC ou l'AFC pour les véhicules automobiles légers, la basse température permettant à la fois un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur par des systèmes de refroidissement classiques actuels. Et c'est ainsi qu'on pourra choisir la SOFC si on veut profiter au mieux de l'énergie résiduelle contenue dans ces rejets gazeux à haute température pour alimenter un cycle thermodynamique aval.

La durée de vie : les piles « tout solide » (PEMFC et SOFC) peuvent prétendre à des durées de vie sensiblement supérieures à celles qu'exigent la manipulation et le transfert d'un électrolyte liquide, lequel est de surcroît à l'origine de phénomènes de corrosion pas toujours facile à contrôler. La PEMFC a par exemple déjà fait la preuve d'un bon fonctionnement au delà de 50000 heures.

Les contraintes de volume et de masse : selon que l'application est mobile (portable, transports) ou fixe (générateurs stationnaires), on peut être amené à faire des choix différents. Par exemple, la PEMFC se présente actuellement comme la plus compacte (2kW/litre et 500W/litre et par kilo pour le système générateur électrique complet) . c'est l'une des principales raisons pour laquelle elle a été sélectionnée pour la quasi totalité des projets de générateurs mobiles.

L'échéance : les divers types de piles ne sont pas aujourd'hui au même stade de développement. Ainsi les PAFC sont les plus développées car (nous l'avons vu précédemment) elles sont disponibles et déjà vendues à plus de 200 exemplaires. En comparaison la PEMFC est aujourd'hui au stade de prototype et ne devrait être construite en grande série qu'à partir de 2005.

Le coût attendu : du fait de son marché potentiel (le transport automobile) et de son fort développement probable, la pile PEMFC, sera très vraisemblablement celle qui atteindra les prix les plus bas (environ 50 euros /kW) ce qui lui permettrait de concurrencer le prix actuel de l'électricité. Mais d'autres considérations telles : le coût du système, la nécessité de valoriser les rejets thermiques, la nature du combustible,...) peuvent conduire à un autre choix de pile à combustible.

V) Des problèmes subsistent

Quand l'intérêt de la pile à combustible s'est révélé vers la fin des années 80, les développements ont porté bien davantage sur la pile que sur le combustible, sur la base de l'état des connaissances respectives de l'époque. Aujourd'hui, du fait des progrès technologiques obtenus sur la pile, force est de constater qu'un déséquilibre inverse est apparu et qu'on en sait beaucoup moins sur le combustible que sur la pile !...D'où un effort accru sur cette thématique.

Le combustible le plus approprié pour tous les types de pile étant l'hydrogène cela pose d'énormes problèmes notamment pour le stockage.

Au sein même de la pile, le platine qui recouvre les électrodes reste le talon d'Achille de cette dernière. En effet, ce métal précieux est très coûteux (30 à 40000 euros/kg). Si on ajoute à cela des membranes électrolytiques assez complexes (elles doivent laisser passer les protons H⁺ et empêcher les ions de se promener dans le milieu qui sépare les électrodes sinon on aurait des courts circuits) on arrive à un prix de revient du dispositif très élevé.

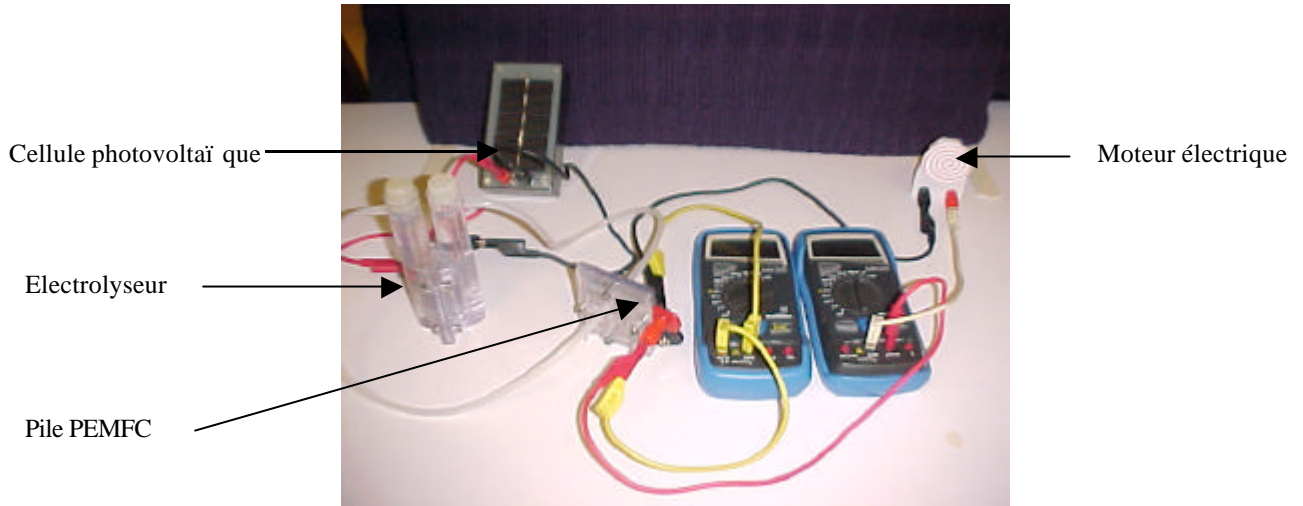
Mais la recherche avance très rapidement et on trouve déjà des solutions pour remplacer le platine et fabriquer des membranes de moins en moins chères. On parle déjà de piles à un prix plancher de 50 euros/kW.

Conclusion : Depuis une quinzaine d'année, les piles à combustible, du fait de leurs performances énergétiques et environnementales, connaissent un développement spectaculaire dans toutes les gammes de puissance : du mW au MW. Même si le problème du coût et du stockage subsiste, les annonces très optimistes des chercheurs ne peuvent que convaincre les clients, d'autant plus que les technologies de stockage font l'objet d'un important effort de recherche. Pour des raisons liées à la fiabilité et à des contraintes d'industrialisation en grande série, le concept d'électrolyte solide semble être le plus attractif . C'est la raison pour laquelle nous ne serions pas étonné de voir apparaître dès 2005-2010 des piles PEMFC et SOFC à travers de nombreuses applications et c'est la raison pour laquelle nous pensons que l'hydrogène, à travers le concept de la pile à combustible s'annonce être l'énergie du futur.

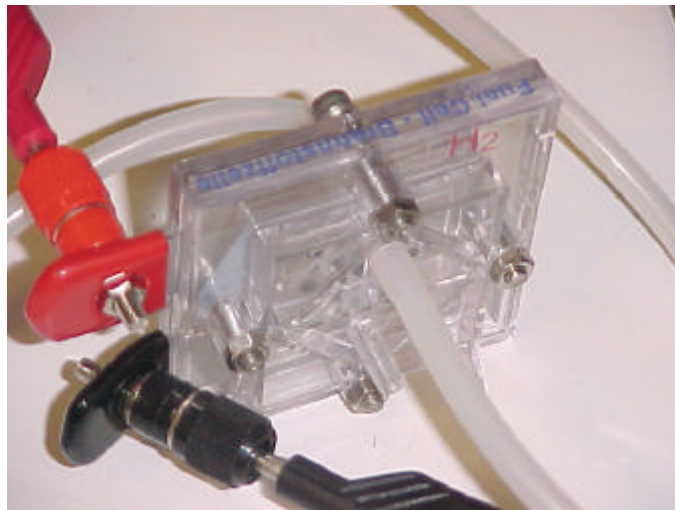
Etude expérimentale d'une pile à combustible

I) Le rendement de la pile PEMFC de Fuel Cell :

Pour vérifier expérimentalement les propriétés de la pile à combustible, nous avons acheté à la firme américaine Fuel Cell Store une pile de type PEMFC de puissance 1W.



Notre dispositif expérimental



Notre pile PEMFC

Pour faciliter nos mesures, on fixe l'intensité du courant aux bornes de la pile et la résistance que nous lui demandons.

Ce rendement de la pile (r) est égal à la puissance expérimentale (P_e) divisée par la puissance théorique (P_t).

A- Calcul de la puissance théorique

La puissance théorique (P_t) est égale à la quantité de matière d'hydrogène que l'on fait rentrer dans la pile $n(H_2)$ multipliée par l'énergie libérée par la combustion de l'hydrogène $Q(H_2) = 286 \text{ KJ/mol}$

$$P_t = n(H_2) \times Q(H_2)$$

On sait que la pile reçoit $V = 2.65 \text{ mL/min}$ de dihydrogène

$$n(H_2) = P \times V / R \times T$$

$$\begin{aligned}
P &= 10^5 \text{ Pa} \\
R &= 8.31 \text{ USI} \\
V &= 2.65 \text{ mL/min} \\
&= 2,65 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{min} \\
T &= 298.6 \text{ K}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
n(\text{H}_2) &= 10^5 \times 2,65 \times 10^{-6} / 8.31 \times 298.6 \\
&= 1,08 \times 10^{-4} \text{ mol/min}
\end{aligned}$$

Donc

$$\begin{aligned}
n(\text{H}_2) &= 1,08 \times 10^{-4} \text{ mol/min} \\
&= 1,8 \times 10^{-6} \text{ mol/s}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q(\text{H}_2) &= 286 \text{ KJ/mol} \\
&= 286 \times 10^3 \text{ J/mol}
\end{aligned}$$

$$P_t = n(\text{H}_2) \times Q(\text{H}_2)$$

$$= 1,8 \times 10^{-6} \times$$

$$286 \times 10^3$$

$$= 515 \text{ mW}$$

Ainsi la puissance théorique de la pile est égale à 515 mW

B- Calcul de la puissance expérimentale

La puissance expérimentale est donnée par la relation :

U : la tension aux bornes de la pile est égale à $4,4 \times 10^{-3} \text{ V}$

I : l'intensité du courant produit par la pile est égale à 0.245 A

$$P_e = U \times I$$

$$\begin{aligned}
P_e &= 4,4 \times 10^{-3} \times 0.245 \\
&= 108 \text{ mW}
\end{aligned}$$

Ainsi la puissance expérimentale de la pile est de 108 mW

C- Calcul du rendement de la pile

$$r = P_e / P_t$$

$$r = 108 / 515 \times 100$$

$$r = 21\%$$

D- Remarques

Lorsque nous avons réalisé les mesures précédentes comburant (dioxygène) et carburant (dihydrogène) étaient dans les proportions stoechiométriques.

Nous avons refait ces mesures dans les mêmes conditions expérimentale en utilisant seulement le dioxygène de l'air.

$$P_e = U \times I$$

Dans ces conditions :

U : la tension aux bornes de la pile est égale à $1,68 \times 10^{-3}$ V

I : l'intensité du courant produit par la pile est égale à 0.095

$$\begin{aligned} P_e' &= 1,68 \times 10^{-3} \times 0.095 \\ &= 16 \text{ mW} \end{aligned}$$

Donc le rendement de la pile dans ces conditions :

$$\begin{aligned} r &= P_e' / P_t \\ &= 16 / 515 \times 100 \\ &= 3.1\% \end{aligned}$$

On constate ainsi que le rendement de la pile est sensible à la quantité de dioxygène. Dans une application mobile par exemple une voiture il est donc nécessaire d'élaborer un système de ventilation afin que la pile est un rendement raisonnable.

II) Les avantages de la pile à combustible par rapport à un moteur à combustion directe

Les moteurs thermiques sont soumis aux limitations du cycle de Carnot. En effet, la chaleur produite lors de l'explosion dans un moteur est convertie d'une part en énergie, et d'autre part en chaleur libérée par le moteur. Cette chaleur est perdue par le moteur. C'est donc une perte d'énergie qui limite au niveau du rendement les moteurs à explosion.

Contrairement à un moteur à explosion, la pile à combustible n'est pas soumise au cycle de Carnot. En effet, la totalité du dihydrogène apporté est convertit en énergie électrique ce qui permet à la pile d'avoir un rendement théorique de 100% (cela sans prendre en compte le phénomène d'entropie).

Le rendement est donc un atout majeur mis en avant aujourd'hui pour justifier les travaux sur les piles à combustibles .

III) Les imperfections des piles à combustible

Aujourd'hui les piles à combustible présente encore des points durs. En effet, nous avons vu précédemment dans l'étude d'une pile PEMFC que l'oxygène comburant de la réaction électrochimique de la pile, limitait son rendement s'il n'était pas en proportion stoechiométrique avec l'hydrogène. Ainsi dans une application automobile, il est nécessaire d'embarquer des systèmes de ventilation qui vont consommer de l'énergie et de ce fait faire baisser le rendement de la pile. De plus, nous avons observé lors de cette étude que la réaction de la pile n'était pas immédiate : il faut attendre environ 1 minute pour que la pile commence à produire de l'énergie. Par conséquent il sera nécessaire d'installer des batteries tampon dans les applications automobiles. Cela afin de permettre l'apport de suffisamment d'oxygène pour ventiler les piles et pour démarrer rapidement.

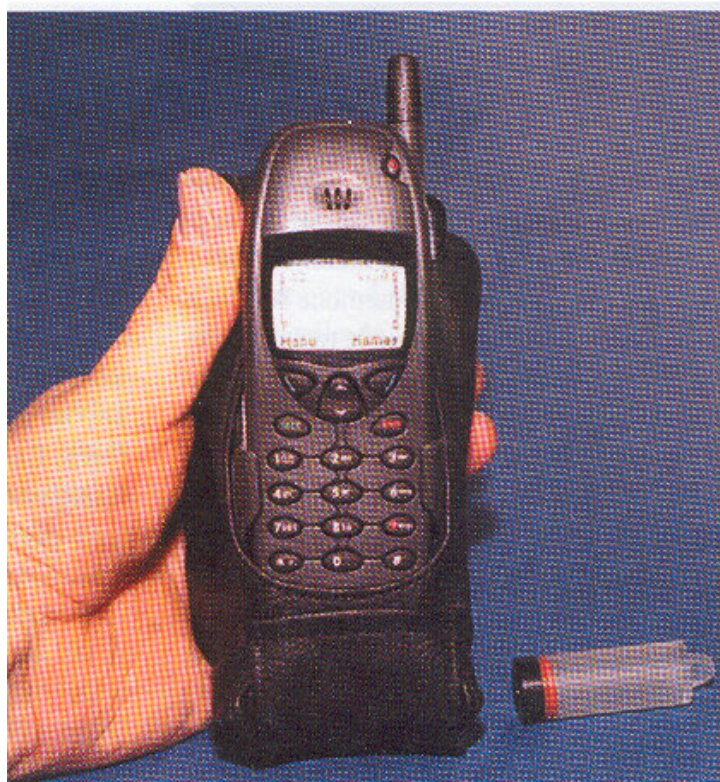
Application de l'hydrogène grâce aux piles à combustible

Il existe aujourd'hui 3 grands domaines dans lesquels on promet un brillant avenir à la pile à combustible :

- l'alimentation d'appareils portables
- la propulsion de véhicules
- les applications stationnaires d'électricité

1) Les applications "portables"

Ce domaine concerne principalement les téléphones et les ordinateurs portables qui connaissent aujourd'hui un essor rapide. Or, ces appareils sont régis par l'autonomie de leur batterie, qui n'est pas très importante. L'idée est de coupler une pile à combustible à une batterie, ainsi l'autonomie ne sera limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène : on rechargera son portable comme on recharge un briquet. On prévoit qu'une recharge donnera cinq à dix fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle. Cette technologie utilisera la pile PEMFC du fait de ses caractéristiques. En France, le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) prévoit de présenter un prototype de pile à combustible miniature intégré d'ici fin 2003.



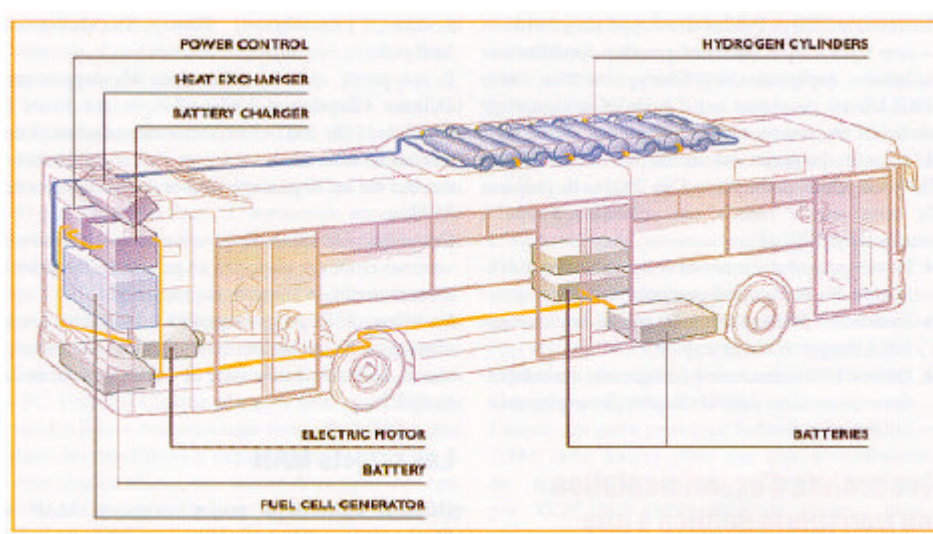
Téléphone portable à pile à combustible miniaturisée présentée en octobre 2000 par la société américaine Energy Related System ; à droite, le réservoir de méthanol amovible.

II) Les applications "transport"

C'est le domaine d'application qui est à l'origine du développement de la pile à combustible vers 1990.

Dans le domaine des véhicules légers, de nombreux prototypes ont déjà vu le jour. La propulsion électrique à partir d'une pile à combustible devra se faire en plusieurs étapes successives. La technologie utilisée dans ces applications sera essentiellement de type PEMFC.

Dans le domaine des véhicules lourds, plusieurs prototypes de bus ont été construits à partir de 1993. Les constructeurs estiment qu'en 2010 on aboutira à des prix équivalents à ceux d'un bus classique. Il est vraisemblable que, le lancement du bus alimenté en hydrogène sous pression sur le toit du véhicule, enclenchera le processus pour la voiture individuelle.



Le véhicule de démonstration Irisbus Cityclass de Turin

III) Les applications "stationnaires"

La génération stationnaire d'énergie peut s'effectuer dans des centrales électriques et par la mise en œuvre de la cogénération électricité-chaleur. Les piles à combustible peuvent être une solution à la difficulté d'implanter de nouvelles lignes électriques. On retrouve deux domaines : la production collective et la production individuelle.

Pour la production collective, on a en France, dans la région parisienne, un modèle de pile qui alimente un groupe HLM qui fonctionne normalement.

Dans le domaine individuel, il y a plusieurs projets en cours, notamment la création d'un générateur de 7kW.

Le domaine du stationnaire sera probablement le premier marché de masse occupé par la technologie de la pile à combustible.

CONCLUSION : En quelques années, les piles à combustible ont connu un développement extraordinaire au niveau de la puissance, qui est passée de quelques mW à quelques MW. Cependant, il faut encore améliorer deux domaines : la durée de vie et le coût, en particulier en ce qui concerne le domaine du transport. Le concept d'électrolyte solide est plus attractif que celui de l'électrolyte liquide; c'est pour cela que le développement des piles PEMFC et SOFC est privilégié. La principale utilisation de l'hydrogène se fera donc sûrement à travers la pile à combustible.

L'effet de serre

I) Introduction

Afin de démontrer l'importance à l'utilisation de l'hydrogène, nous allons tout d'abord tenter d'expliquer ce qu'est l'effet de serre.

Certains scientifiques attribuent à l'effet de serre des changements subits de climat et posent ainsi la question des véritables conséquences de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans notre atmosphère.

L'effet de serre est un phénomène naturel. S'il n'existait pas, la Terre serait inhabitable, car la température moyenne à sa surface serait inférieure de quelques 33°C à ses niveaux actuels.

Cependant, ce phénomène est amplifié par les formes contemporaines du développement des activités humaines. En effet, les principaux gaz responsables de l'effet de serre sont produits par l'Homme, du fait de l'industrialisation poussée et de l'énergie consommée pour vivre.

Mais avant de développer notre sujet, une définition de l'effet de serre s'impose; ce terme peut prendre deux significations :

En premier lieu, c'est un effet de serre naturel de la basse atmosphère, ou troposphère, qui contribue à retenir une partie de la chaleur solaire reçue à la surface de la Terre et à maintenir l'équilibre thermique de la planète.

Cependant actuellement, lorsque l'on parle de l'effet de serre, on évoque plutôt les risques liés à la modification actuelle de la troposphère, modification entraînée par certaines activités humaines que nous étudierons dans cette partie.

Après avoir, dans une première partie, expliqué les mécanismes de l'effet de serre, nous envisagerons l'étude de ses causes pour, ensuite, en dégager les conséquences.

II) Le mécanisme de l'effet de serre

A-Explication du mécanisme

L'effet de serre est un phénomène très complexe qui peut se résumer ainsi :

Les rayons solaires, émis durant la journée, qui échauffent la surface de la Terre, traversent facilement l'atmosphère. Au contraire, la nuit, c'est la Terre qui émet des radiations infrarouges de grandes longueurs d'ondes. Ces radiations infrarouges sont absorbées par la vapeur d'eau et les nuages. La troposphère (vapeur d'eau et dioxyde de carbone (CO₂) principalement) se comporte alors comme une "vitre" qui renvoie une grande partie des rayons absorbés vers la surface de la Terre. Ainsi, les pertes de chaleur sont réduites. L'atmosphère est pour ainsi dire, "opaque" aux rayons émis par la Terre. C'est pour cette raison que l'on parle "d'Effet de Serre".

Ce phénomène explique par exemple que durant une même saison, les nuits avec un ciel couvert connaissent des températures plus élevées que les nuits avec le ciel dégagé.

D'autres gaz tels que l'oxyde d'azote (N₂O), les composés chlorofluorocarbonés (CFC), l'ozone (O₃) et le méthane (CH₄) prennent aussi part dans l'effet de serre, mais ils ont un rôle moindre dans le phénomène par rapport au dioxyde de carbone.

On peut représenter le mécanisme de l'effet de serre par ce schéma :



Source : site du gouvernement sur l'effet de serre.

B-Rôle de l'effet de serre

L'effet de serre a donc un rôle très important. C'est ce phénomène qui nous permet de survivre sur Terre. En effet, sans les gaz à effet de serre, la température moyenne sur Terre serait de -18°C environ. La présence de ces gaz assure une température moyenne de 15°C sur notre planète.

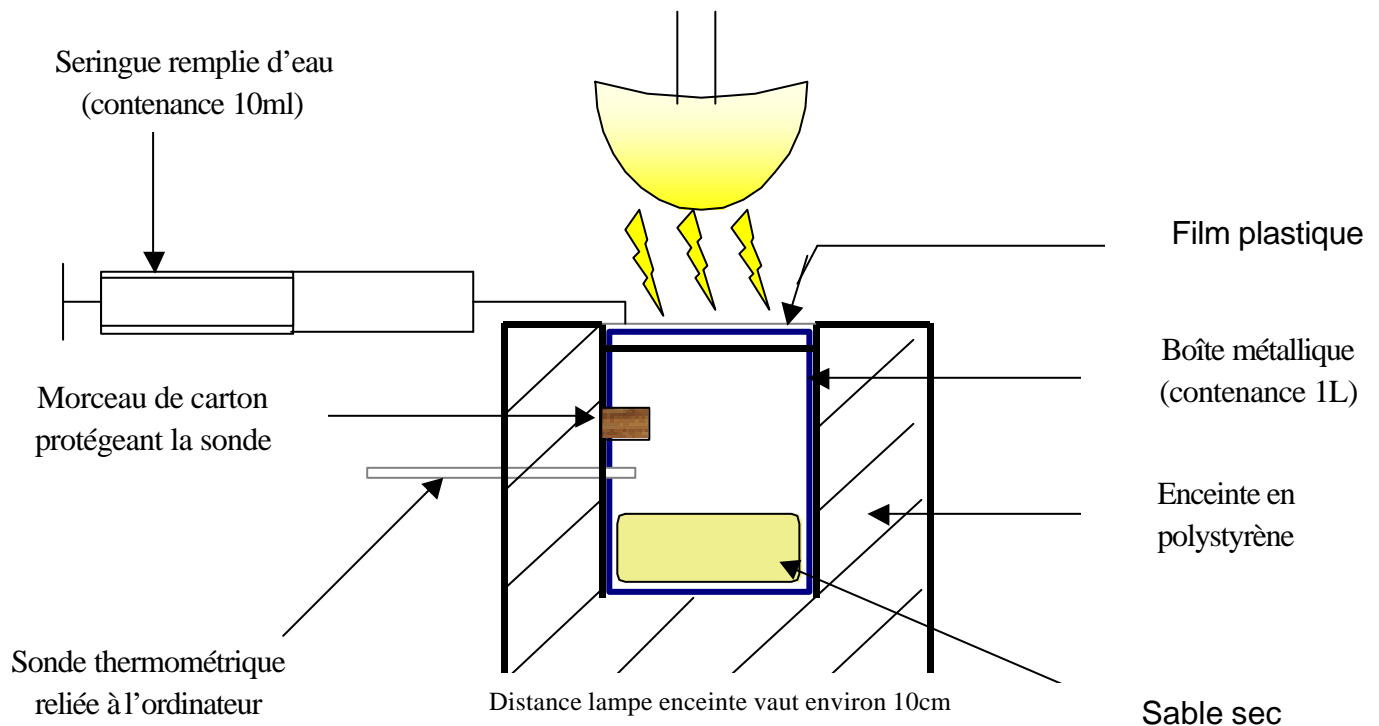
C-Expérience

Pour expliquer l'effet de serre, nous pensions tout d'abord réaliser une manipulation qui aurait montré l'effet du CO_2 dans l'atmosphère terrestre, après avoir été chauffé par une source de chaleur.

Malheureusement, il s'est avéré très difficile de réaliser cette manipulation vu les faibles résultats obtenus par les différentes personnes ayant préalablement tenté l'expérience. Nous avons alors décidé de réaliser cette expérience avec de l'eau, qui à l'état gazeux permet de simuler l'effet de serre dû au CO_2 , du fait, qu'il absorbe tout comme le CO_2 , les infrarouges émis par le sol. Cette manipulation, nous aurons permis de démontrer plus concrètement les actions des gaz à effet de serre.

Dispositif expérimental

Mise en évidence expérimentale de l'effet de serre
(avec de la vapeur d'eau).



Protocole expérimental

- On éclaire l'enceinte à l'aide d'une lampe et on attend que la température se soit complètement stabilisée pour commencer l'expérience.
- Lorsque la température est stabilisée, on lance la manipulation : on introduit de l'eau préalablement chauffée par la lampe à l'aide d'une seringue.
- Pendant 30 minutes on laisse la sonde reliée à l'interface faire ses mesures toutes les 20s.
- Les 30 minutes passées, on trace la courbe de la température en fonction du temps.
- Enfin on analyse cette courbe.

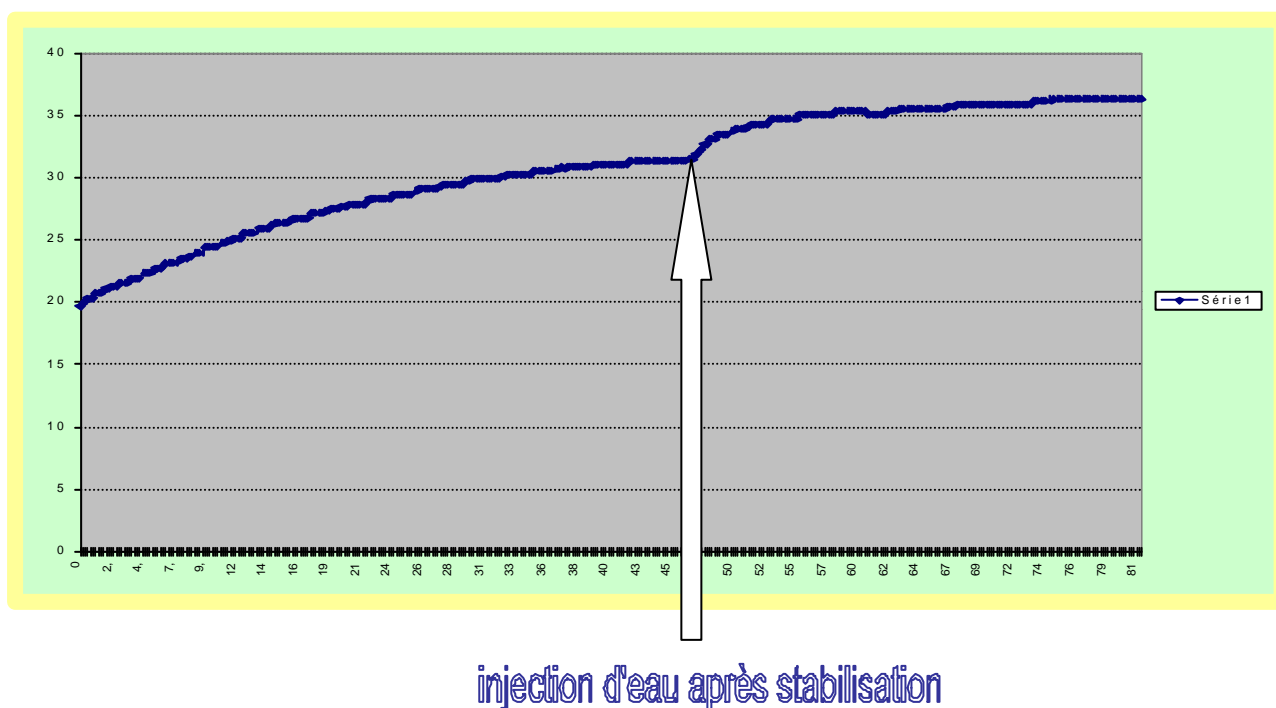
Attention ! Pour bien montrer un effet de serre, il faut réaliser l'expérience à "vide"(sable sec), afin de comparer les deux atmosphères qui devront présenter un écart de température.

Informations complémentaires

Cette expérience peut-être tout à fait valable à l'échelle de la planète puisque sur cette dernière, la vapeur d'eau est le plus important gaz à effet de serre. Pourtant on parle beaucoup plus d'autres gaz comme le CO₂, puisque la vapeur d'eau est d'origine naturelle. Malgré cela, cette dernière joue un rôle certain et important dans le réchauffement de la planète.

Résultats

Voici la courbe obtenu après une manipulation de 82 min:



Lors de la manipulation, la température de l'enceinte sèche s'est stabilisée à 32°C. Après avoir ajouté de l'eau (47^{ème} min), cette température s'est stabilisée à 37°C (à la 82 min). Il y a donc, une différence de 5°C entre une atmosphère sèche et une atmosphère contenant un gaz à effet de serre.

Interprétations

Lorsque l'augmentation de la température s'est stabilisée, l'enceinte a atteint sa "température d'équilibre". On peut en conclure, qu'une atmosphère qui contient des gaz à effet de serre, a une "température d'équilibre" plus importante qu'une n'en contenant pas. C'est à dire qu'une atmosphère composée de gaz à effet de serre, laisse moins échapper d'infrarouges, ce qui entraîne une diminution des pertes de chaleur, et donc un réchauffement de cette atmosphère.

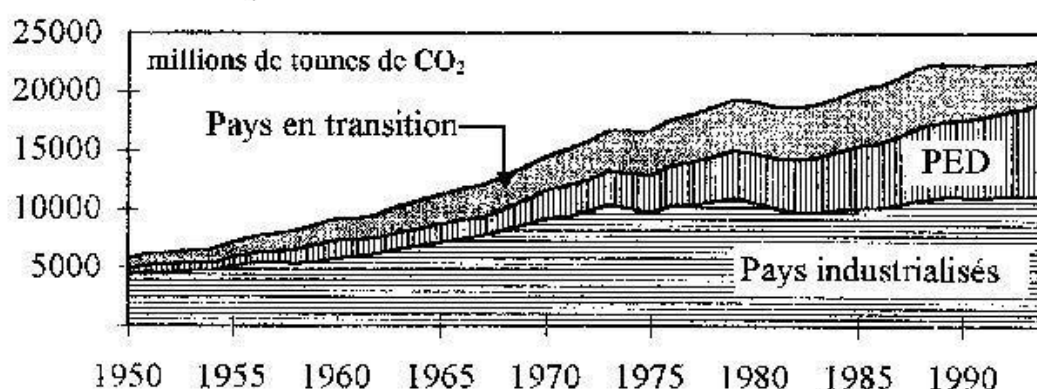
Le phénomène terrestre est le même, plus la concentration en gaz à effet de serre sera importante et plus la température moyenne de la terre sera élevée.

III) Les causes de l'effet de serre

A-Le CO₂

Le CO₂ est, de loin, le plus important des gaz à effet de serre d'origine anthropique (du à l'Homme). A l'état naturel, sa teneur dans l'atmosphère est faible : 0.0294% du volume ou 294 ppm (parties par milliard) ; mais depuis la Révolution Industrielle (milieu du XIX^{ème} siècle), avec l'utilisation massive des combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole), la destruction des forêts tropicales et les feux de brousses qui ravagent la savane, la quantité de dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère et non absorbé par la végétation ne cesse d'augmenter à un rythme de plus en plus rapide.

Les pays industrialisés ont une responsabilité particulière dans l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. En effet, ils en émettent plus des deux tiers aujourd'hui encore.



Source : IEPE/ENERDATA

Enfin, le tableau des émissions de CO₂ par habitants montre également que les **pays industrialisés** émettent beaucoup plus de CO₂ que les **autres pays**.

États-Unis	5,4
Pays-Bas	3,1
OCDE	3,0
Allemagne	3,0
France	1,7
Chine	0,6
Afrique	0,2
Monde	1,1

(Pour information, l'OCDE est l'Organisation de Coopération et de Développement Economique. La France en fait partie, ainsi que 29 autres pays.)

Les autres pays sont les pays en voie de développement et ce sont eux qui feront, à l'avenir, partie des principaux pays responsables de l'accroissement des émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre. Leurs besoins en énergies augmentent fortement, en lien avec leur développement économique et avec leur dynamisme démographique.

De plus, ces besoins en énergies risquent d'être satisfaits, le plus souvent, à partir de charbon, qui est l'énergie fossile la plus polluante pour l'effet de serre. Il s'agit en plus, de la principale ressource énergétique de ces pays, dont l'Inde et la Chine, qui sont les plus importants en nombre d'habitants.

Ainsi, ces deux pays pourraient représenter plus d'un tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre en 2050 comme l'indique le tableau ci-dessous.

	1990	2500
OCDE	48	25
<i>dont Etats-Unis</i>	23	12
Europe de l'Est et ex-Union soviétique	23	17
Chine et Inde	13	38
Reste du monde	16	20

Source : modèle GREEN de l'OCDE, 1998.

B- Les autres gaz responsables

Mais le CO₂ n'est pas le seul gaz d'origine anthropique responsable de l'effet de serre. Même s'ils sont présents, en moins grandes quantités dans l'atmosphère, d'autres gaz ont un rôle dans le réchauffement de la planète. De plus, leur concentration a tendance à augmenter de plus en plus vite depuis 1990.

Il s'agit du méthane (CH₄), du protoxyde d'azote (N₂O) et de composés chlorofluorocarbonés (CFC) auxquels s'ajoutent l'ozone (O₃) ainsi que d'autres hydrocarbures halogénés à fort pouvoir radioactif, tel que les hydrofluorocarbures (HFC) et les perfluorocarbones (PFC), que j'appellerai ici H*.

Tous ces gaz ont un pouvoir d'absorption des radiations infrarouges encore plus puissant que le CO₂ et ils ont diverses origines humaines comme l'indique le tableau suivant :

	Émissions anthropiques en 1990 (en millions de tonnes)	Durée moyenne de séjour dans l'atmosphère en années	Part dans le réchauffement anthropique de la planète (" le forçage radiatif "), en %	Principales sources anthropiques d'émissions
CO ₂	26 000	120	64,2 %	Utilisation d'énergie (80 %) et modification de l'utilisation des sols principalement déforestation (17,3 %), production de ciment (2,7 %).
CH ₄	300	10,5	19,3 %	Production et utilisation d'énergie (25,9 %), fermentation entérique (23,9 %), rizières (17 %), déchets (7,4 %), décharges (10,8 %), combustion de biomasse (8 %), eaux usées domestiques (7,1 %).
CFC	0,7	9,0	9,5 %	Industrie (100 %), principalement réfrigérants, aérosols, agents d'expansion, solvants.
N ₂ O	6	132	4,0 %	Combustion de combustibles fossiles (8,7 %), sols fertilisés (47,8 %), défrichage (17,4 %), production d'acide (15,2 %), combustion de biomasse.
H*	1,2	variable	2,9 %	Activités industrielles : applications comparables à celles des CFC et production d'aluminium

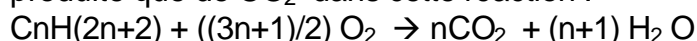
Source : GIEC, 1990, 1992. (tableaux extraits du [site du sénat sur l'Effet de serre](#))

Ces gaz sont susceptibles d'accroître l'effet de serre et de réchauffer la troposphère, provoquant de ce fait une augmentation de l'évaporation et une amplification du rôle de la vapeur d'eau dans le phénomène.

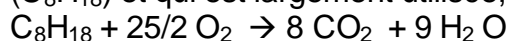
C- La vapeur d'eau

A tous ces gaz présents dans l'atmosphère, il faut donc ajouter l'eau qui est à l'état de vapeur. La combustion des hydrocarbures, largement répandue dans notre société, est l'un des principaux responsables de l'apparition de CO₂. Mais elle entraîne aussi une production de vapeur d'eau dont une grande partie est évacuée vers la Troposphère.

En effet, l'équation bilan de la combustion d'un hydrocarbure montre qu'il y a plus d'eau produite que de CO₂ dans cette réaction :



A titre d'exemple, l'essence qui, sur un plan thermochimique, est assimilable à l'octane (C₈H₁₈) et qui est largement utilisée, a pour équation de combustion :



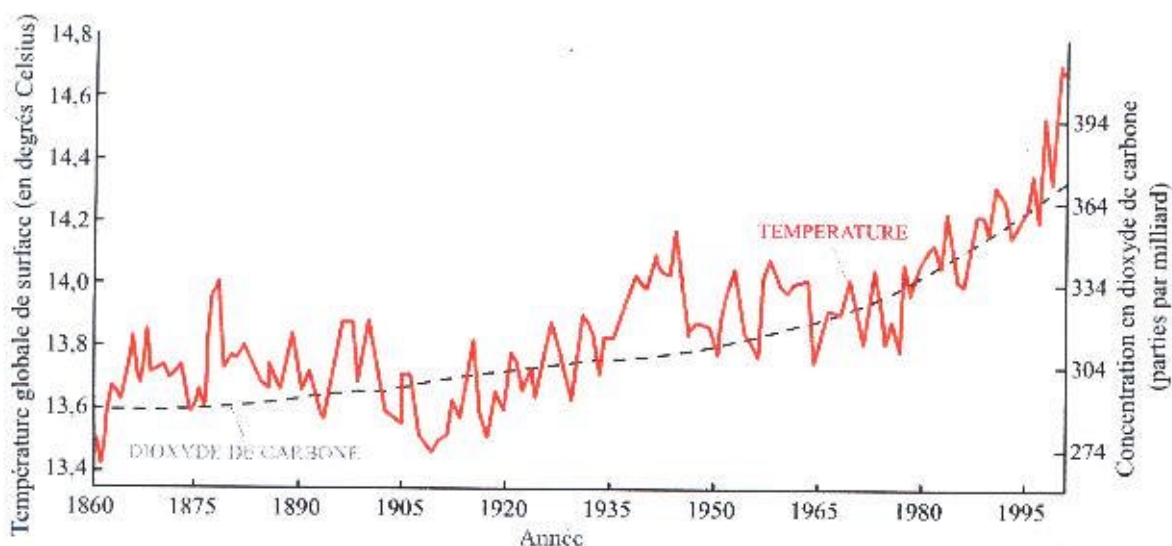
IV) Les conséquences

A-Les moyens de lutte

En 1988, un organisme s'est créé, le GIEC (Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat). Ce groupe est une instance intergouvernementale qui regroupe près de deux mille chercheurs et experts, avec pour mission d'évaluer les données scientifiques disponibles sur l'évolution du climat, d'en apprécier les incidences écologiques et socio-économiques, et de formuler des stratégies possibles de prévention et d'adaptation.

B- Les changements climatiques et conséquences

D'après les recherches de ce groupe, les conséquences seraient nombreuses. Il constate une augmentation de la température depuis l'ère préindustrielle de 0,3 à 0,6 °C et estime que la température moyenne à la surface de la Terre pourrait s'accroître encore de deux degrés au cours du prochain siècle si aucune mesure n'est prise.



Source : Logiciel sur le CO₂ .

D'après cette courbe, on peut remarquer que la température augmente en même temps que la quantité de CO₂ dans l'air. On en conclut donc que les variations de température sont en rapport avec la quantité de CO₂.

Les rapports du GIEC, démontrent très nettement que l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère tend à modifier le climat.

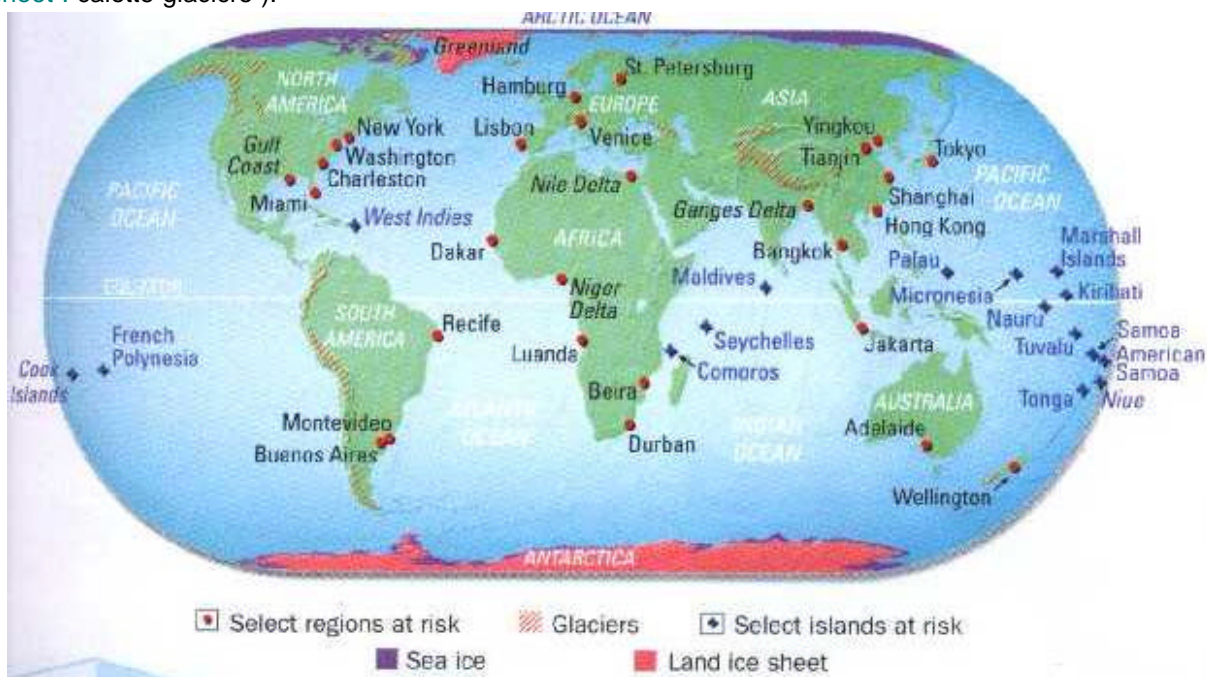
Ce changement climatique s'accompagnerait d'une perturbation du cycle de l'eau et d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles d'origine climatique (sécheresses, inondations, tempêtes, cyclones).

La perturbation du cycle de l'eau se ressentirait, de même, par l'augmentation du niveau de la mer et l'accroissement de la fréquence des tempêtes qui menaceront certains espaces côtiers, par l'extension de maladies infectieuses en raison de l'élévation de la température et de la multiplication des inondations ; et par la diminution de la biodiversité due à la non-adaptation de l'écosystème aux changements climatiques trop rapide. Cette baisse de la biodiversité aurait un impact sur l'agriculture et par conséquent sur une des principales sources d'alimentation des sociétés actuelles.

Cette augmentation de la température ne sera pas sans conséquence directe pour la santé des hommes : ainsi, hormis dans les régions froides où la mortalité due au froid diminuerait, une augmentation de la mortalité et des infections cardio-respiratoires est à craindre, principalement dans les villes. Au niveau économique, l'augmentation de la température de 2,5°C entraînerait une diminution de 1,5 à 2% du PIB mondial.

Voilà la carte des îles et des villes qui pourraient être englouties par l'eau si la terre continuait à se réchauffer :

([Select regions at risk](#) : régions à risque ; [Select islands at risk](#) : îles à risque ; [Sea ice](#) : banquise; [Land ice sheet](#) : calotte glaciaire).



Source : dossier TPE.

Au total, les changements climatiques et géographiques auront des conséquences importantes sur différents plans : économique comme social.

CONCLUSION : L'effet de serre est et sera, dans les décennies à venir une grande préoccupation quant à l'avenir de l'Homme sur la planète.

La préoccupation majeure de ce siècle va être pour nous de réussir à limiter les émissions de gaz à effet de serre, retardant ainsi l'apparition de changements climatiques, par l'utilisation d'énergies propres tel que les énergies solaire, hydraulique ou éolienne, ainsi que l'utilisation de combustibles non polluant comme l'hydrogène.

Cette lutte a déjà commencé, mais les intérêts politiques et économiques passant avant les intérêts écologiques, elle est souvent retardée et n'a pas encore pris assez d'ampleur. Plusieurs conférences sur ce sujet ont déjà eu lieu, aboutissant à certains accords, tels que les accords de Kyoto, qui projettent de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Mais, malheureusement, certains pays signataires refusent de respecter ces accords. (les USA, principal pays émetteur de CO₂ a refusé de les appliquer).

La résolution de ce problème dépend donc d'enjeux politiques et économiques, mais va aussi nous amener à une remise en cause des mentalités et des façons de vivre.

L'industrialisation a été un progrès considérable; cependant, le fait que les émissions de CO₂ deviennent, à long terme, un danger pour l'Homme n'a pas été considéré et cette industrialisation abusive est l'une des principales causes de l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre.

La première des choses à faire est de combattre l'effet de serre, par différents moyens issus de ce même progrès. Il faut accorder de l'importance aux énergies nouvelles et propres. Malheureusement, les recherches scientifiques sur l'hydrogène, n'en sont qu'à leurs débuts. Le progrès doit travailler dans ce sens.

L'effet de serre est à l'origine ce qui nous permet de vivre, mais du fait de nos "abus", ce phénomène se retourne peu à peu contre nous et va, à terme, nous être nocif.

Conclusion

Dans le cadre de notre étude, nous avons constaté que le dihydrogène présente des atouts majeurs qui lui assurent un bel avenir en tant que vecteur énergétique intermédiaire. En effet, ses applications recouvrent un large éventail des besoins énergétiques humains : il est utilisable dans le domaine des transports, des applications stationnaires et portables, sans compter son rendement énergétique élevé. De plus, c'est une énergie propre si sa production s'opère à partir d'une énergie non polluante comme le rayonnement solaire. Cet avantage est capital suite aux récentes polémiques à propos de l'effet de serre.

Cependant, nous avons remarqué au cours de nos expériences que son utilisation est dangereuse car il s'agit d'un gaz explosif. Son emploi nécessite aussi des conditions matérielles rigoureuses au niveau de son stockage et des conduits car ce gaz est très pénétrant. Ainsi nous n'avons pas pu réaliser de stockage important et durable par manque de moyens matériels. Il sera aussi utile de poursuivre les travaux de recherches et de développement afin d'obtenir des installations accessibles à toutes les catégories de la population.

Bibliographie

Les CLEFS du CEA n°44 : « Les nouvelles technologies de l'énergie »

L'actualité chimique de décembre 2001 : « l'hydrogène, carburant de demain ? »

L'association française du dihydrogène (AFH2) et leur site : www.afh2.org

Géo n°159 de mai 1992

Science et Vie n°214 de mars 2001

Encyclopaedia Universalis® ; Article "pétrole"

Logiciel sur le CO₂

Site du gouvernement sur l'effet de serre : <http://www.effet-de-serre.gouv.fr/>

Dossier du Sénat sur l'effet de serre : <http://www.senat.fr/rap/r98-346/r98-346.html>

Agora21: site francophone du développement durable :
<http://www.agora21.org/mies/frame06.html>

Encyclopédie Encarta® 2000 ; Article "effet de serre"

Site de l'Académie de Toulouse rubrique SVT : <http://www.ac-toulouse.fr/svt/joc/joserr.html>

Dossier TPE : www.chez.com/mgltp/index.htm

Site de l'OCDE : www.oecd.org

Site du CNAM : www.cnam.fr/instituts.10_cours/

La Recherche n° 357, octobre 2002 : « Dossier de la voiture à hydrogène. »

« les piles à combustible, état du développement » : PRINGENT. Editions Technip.

« Etude d'une installation de production et stockage d'hydrogène photovoltaïque que : maison friedli a zollbrück, Suisse »

P. Hollmuller , J.-M. Joubert , B. Lachal et K. Yvon

Remerciements.



M Holmuller du Centre
Universitaire d'Etude des
Problèmes de l'Energie
de Genève



M Renaudin du laboratoire de cristallographie de
Genève.



L'association française du
dihydrogène (AFH2)