

# nantes-citoyennete.com

Conseil de développement Nantes métropole

---

## **Délégation "Enjeux du développement durable"**

---

22 novembre 2010



Rapporteurs : Jean-Claude GUYARD, Jean DOUZON

### **Contribution du Haut Comité Français pour la Défense Civile et Économique des Pays de la Loire**

**HYDROGENE**

**L'énergie du futur ?**



**HAUT COMITE FRANÇAIS POUR LA DEFENSE  
CIVILE ET ECONOMIQUE DES PAYS DE LA LOIRE**

**HYDROGENE**  
**L'énergie du futur ?**

**RAPPORTEURS**

**Jean-Claude GUYARD  
Jean DOUZON**

**Section de la Presqu'île Guérandaise**

**Octobre 2010**

# ETUDE : HYDROGENE

## Sommaire

### 1- Généralités

### 2- Les méthodes de production de l'Hydrogène

#### 2.1 A partir de combustible fossile

#### 2.2 A partir du CO<sub>2</sub>

#### 2.3 Par photo électrolyse de l'eau

#### 2.4 Par dissociation de l'eau à partir d'un réacteur nucléaire

#### 2.5 Par transformation thermochimique de la biomasse

#### 2.6 Par électrolyse de l'eau

#### 2.7 Par des organismes photosynthétiques

Origin Oil produit de l'hydrogène à partir d'algues.

Inauguration d'une centrale à hydrogène "grand format" près de Venise

Hydrogenics - Des commandes d'électrolyseurs en Russie et au Moyen-Orient

Le Maroc pourrait bien devenir un grand fournisseur mondial d'énergie

### 3-Les méthodes de stockage

#### 3.1- Stockage sous forme comprimé

#### 3.2-Stockage sous forme liquide (cryogénique)

#### 3.3- NaBH<sub>4</sub>: Hydrogen on demand

#### 3.4- Hydrures métalliques

#### 3.5-Charbon actif, Nano fibres et Nanotubes en carbone

Stockage de l'énergie - l'Allemagne prend de l'avance

### 4 -Les piles à Hydrogènes

#### 4.1-Aspect environnemental

#### 4.2-Combustion de l'hydrogène

#### 4.3-Contexte technique

### 5- Le transport et la mise à disposition

### 6-CONCLUSIONS

### Annexe- Exemples de réalisation

1-La région Pays de Loire :

2-Projet STIRLING :

3-Réseau de bus de DUNKERQUE :

4-MX 24, le sous-marin avec des ailes

5- Des voiliers pourraient produire de l'hydrogène à partir des énergies marines

6- La 2ème station à hydrogène du Royaume-Uni installée sur un campus

7- Système de production d'hydrogène combustible pour chaudière

8- Glucose - de l'énergie pour les organes artificiels

9- Les piles à combustible boivent du petit-lait

10- Wal-Mart : une flotte de chariots élévateurs à hydrogène

11-Airbus dévoile un futur aéronef éco-efficient.

12- Le drone à l'hydrogène

13- Riversimple Urban Car : une voiture électrique à hydrogène, grand public

14-Dix scooters électriques à piles à combustible pour 350.000 \$

15- Le vélo électrique à pile à combustible existe !

16- Avenir brillant pour Arcola Energy

17- Bouygues : Des antennes relais alimentés en Hydrogene

### Bibliographie

# ETUDE : HYDROGENE

L'**hydrogène** est un élément chimique de symbole **H** et de numéro atomique 1. , de masse volumique 0,089 9 kg/m<sup>3</sup>

Il est le principal constituant du Soleil et de la plupart des étoiles, dont l'énergie provient de réactions de fusion thermonucléaire de l'hydrogène.

Le nom hydrogène est composé par le préfixe « hydro », du grec ὕδωρ (*hudôr*) signifiant « eau », et par le suffixe « gène », du grec γεννᾶν (*gennen*), « engendrer ». Ce nom a été inventé par Lavoisier pour désigner le gaz appelé à l'époque « air inflammable » et qui avait été mis en évidence par Cavendish en 1766 (il s'agit du gaz de formule chimique H<sub>2</sub> dont le nom scientifique est désormais dihydrogène).

## 1-Généralités

Nous disposons aujourd'hui des énergies fossiles : uranium, pétrole, charbon, gaz..., qui nous permettent de produire de l'électricité et de servir de carburant. Les prévisions actuelles annoncent un épuisement à terme des stocks.

Il restera ensuite, le bois, l'hydraulique, et la recherche d'une énergie productible en grande quantité et stockable.

Le soleil, le vent, l'eau et les déchets seront les seules possibilités disponibles.

On notera que l'éolien et le photovoltaïque sont utilisés déjà. Ces solutions sont limitées car la production est erratique et non stockable aujourd'hui.

***Le recours à l'hydrogène comme vecteur énergétique propre est l'une des solutions pour répondre aux actuels défis énergétiques.***

## **2-Les méthodes de production de l'Hydrogène**

*L'hydrogène est un vecteur d'énergie. La question de sa provenance est souvent soulevée. En fait, l'hydrogène peut être produit de différentes manières à partir de différentes sources d'énergie, y compris les énergies fossiles, renouvelables et nucléaires. Certaines technologies sont déjà bien établies tandis que d'autres requièrent des recherches et des développements considérables.*

*Étant donné que l'hydrogène peut être produit à partir d'un large éventail de sources primaires, il peut largement contribuer à l'amélioration de la sécurité de l'approvisionnement énergétique.*

*Nous ne développerons pas toutes les méthodes de production mais nous les citerons*

### **2,1 -A partir de combustible fossile**

De par leur disponibilité, leur prix, leur intégration dans le raffinage et la pétrochimie et leur bonne réactivité chimique, plus de 90% de la production d'hydrogène est assurée à partir d'hydrocarbures.

### **2,2 - A partir du CO2**

### **2,3- Par photo électrolyse de l'eau**

### **2,4- Par dissociation de l'eau à partir d'un réacteur nucléaire**

### **2,5 - Par transformation thermochimique de la biomasse**

Filière thermochimique de production de bio hydrogène Consommation d'énergie et émission de gaz à effet de serre pour la production d'hydrogène Coût de production de l'hydrogène Perspective de développement pour la France

### **2,6 - Par électrolyse de l'eau**

Quelques rappels sur l'électrolyse :

La décomposition de l'eau par électrolyse s'écrit de manière globale:  $H_2O$  donne  $H_2 + \frac{1}{2} O_2$  avec une enthalpie de dissociation de l'eau :  $\Delta H=285$  kJ/mole

Cette décomposition nécessite un apport d'énergie électrique, dépendant essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de réaction. Le potentiel théorique de la décomposition est de 1.481 V à 298 K. Les valeurs classiques des potentiels de cellules industrielles sont de l'ordre de 1.7 à 2.1 V, ce qui correspond à des rendements d'électrolyse de 70 à 85 %. La consommation électrique des électrolyseurs industriels (auxiliaires compris) est généralement de 4 à 6 kWh/Nm<sup>3</sup>, et il convient d'éliminer en permanence la chaleur dégagée liée aux irréversibilités.

L'alimentation minimale en eau d'un électrolyseur est de 0.8 L/Nm<sup>3</sup> d'hydrogène. En pratique, la valeur réelle est proche de 1 L/Nm<sup>3</sup>. L'eau introduite doit être la plus pure possible car les impuretés demeurent dans l'équipement et s'accumulent au fil de l'électrolyse, perturbant in fine les réactions électrolytiques par :

- la formation de boues

- l'action des chlorures sur les électrodes

Une spécification importante sur l'eau porte sur sa conductivité ionique (qui doit être inférieure à quelques  $\mu\Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$ ).

Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode, conducteurs électroniques) reliées à un générateur de courant continu, et séparées par un électrolyte (milieu conducteur ionique). Cet électrolyte peut être :

- soit une solution aqueuse acide ou basique,
- soit une membrane polymère échangeuse de protons
- soit une membrane céramique conductrice d'ions  $\text{O}^{2-}$ .

L'**électrolyse industrielle** est réalisée généralement à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration varie en fonction de la température (typiquement de 25% en masse à 80°C jusqu'à 40% à 160°C). La potasse est préférée à la soude, essentiellement pour des raisons de conductivité supérieure à niveau de température équivalent et de meilleur contrôle des impuretés chlorures et sulfates.

Il existe de nombreux fournisseurs proposant des technologies très diversifiées, notamment en termes de nature de l'électrolyte et de technologie associée, allant d'un possible couplage amont avec une alimentation électrique renouvelable (photovoltaïque ou éolien), à la fourniture finale directe d'hydrogène sous pression.

**L'électrolyse alcaline** est proposée en modules de petite ou moyenne capacité (0,5-800 Nm<sup>3</sup>/h d'hydrogène). Les modules comprennent généralement une alimentation électrique, les cellules d'électrolyse, une unité de purification de l'eau, une unité de déshumidification des gaz, une unité de purification de l'hydrogène, un compresseur et un système de contrôle. Certaines technologies d'électrolyseurs fonctionnent directement sous pression [4]. Les modules de petite capacité opèrent typiquement de 3 à 30 bars.

**Electrolyse acide PEM** se distingue de la précédente par un électrolyte solide à membrane polymère PEM (Proton Exchange Membrane) conductrice de protons. Les avantages de cette technologie sont la compacité, la simplicité du design et du fonctionnement, la limitation des problèmes de corrosion et des performances sensiblement supérieures. Cependant le coût de la membrane polymère (3-30 mm d'épaisseur, environ 100 €/m<sup>2</sup>) et l'utilisation d'électrocatalyseurs à base de métaux nobles conduisent à des équipements plus onéreux que les électrolyseurs alcalins de même capacité. L'électrolyse à membrane polymère est considérée par beaucoup comme une technologie d'avenir, car elle peut bénéficier des nombreux développements sur les piles à combustibles de technologie PEM, et de la réduction des coûts associée. L'électrolyse à membrane polymère de petite capacité est d'ores et déjà une technologie mature, utilisée depuis plusieurs dizaines d'années pour des applications sous-marines et spatiales (pour la génération d'oxygène dans les compartiments vie).

**Electrolyse SOFC** est directement issue des développements de la pile à combustible type SOFC, fonctionnant vers 900 – 1000°C. Elle se révèle intéressante si on l'alimente à la fois en électricité et en chaleur pour maintenir la température élevée souhaitée, le rendement peut alors être supérieur à 80%. Elle est essentiellement destinée à être couplée à un système solaire à concentration ou à un réacteur nucléaire à haute température. Elle est au stade de la recherche dans divers laboratoires comme *CERAMATEC* ou *Idaho National Engineering and*

## **L'hydrogène par électrolyse de petite ou moyenne capacité : oui, mais à quel coût ?**

Evoquer la distribution d'un nouveau combustible, même à un stade préliminaire, exige non seulement une analyse cycle de vie, mais aussi une analyse économique globale (coût capital, coûts opératoires et maintenance).

Quelques études ont été publiées à ce jour [2, 3,5]. Le coût de l'hydrogène produit localement par électrolyse est d'abord et avant tout lié à celui de l'électricité et à son mode de production. Dans le cas d'une électricité « verte », ce sont les coûts en capitaux du système renouvelable (photovoltaïque, éolien...) qui influenceront.

### **Vers une production massive et économique d'hydrogène (Paris, 8 avril 2009)**

**Le recours à l'hydrogène comme vecteur énergétique propre est l'une des solutions pour répondre aux actuels défis énergétiques. Afin de produire ce carburant du futur, l'électrolyse de l'eau figure parmi les filières "écologiques" les plus prometteuses. Principal écueil : son rendement. Soucieux d'optimiser cette technique, des chercheurs de quatre laboratoires du CNRS<sup>1</sup>, en collaboration avec les entreprises AREVA NP et SCT, sont parvenus, pour la première fois, à produire de l'hydrogène en quantité notable par une nouvelle méthode. Leur technologie innovante, protégée par un brevet aujourd'hui rendu public, pourrait dans un avenir proche être développée à grande échelle et permettre d'obtenir de l'hydrogène, à moindre coût et surtout, sans émission de gaz à effet de serre.**

Plus énergétique que le pétrole ou le gaz naturel, non polluant et non toxique, l'hydrogène pourrait progressivement suppléer les énergies fossiles et répondre à l'essentiel de nos besoins énergétiques. Problème : si l'atome d'hydrogène, lié à l'oxygène, est très abondant sous forme d'eau, les molécules d'hydrogène, elles, ne se trouvent pas à l'état pur. Le défi auquel s'attèlent les chercheurs est donc de produire de l'hydrogène, sans dégagement de dioxyde de carbone. Pour cela, l'électrolyse de l'eau, c'est-à-dire sa décomposition en hydrogène (H) et oxygène (O), est l'une des solutions envisagées. Aujourd'hui maîtrisée, cette technique présente toutefois des inconvénients majeurs : son rendement ne dépasse pas 80 %, son coût de production est trop élevé et certains matériaux utilisés polluants ou même dangereux.

Comment pallier ces défauts ? Pour y parvenir, plusieurs spécialistes ont, depuis 2004, réuni leurs expertises dans le cadre d'un programme de recherche sur la production massive d'hydrogène propre : quatre équipes de recherche se sont ainsi associées aux entreprises AREVA NP<sup>2</sup>, filiale du groupe AREVA, et SCT<sup>3</sup>, l'un des leaders mondiaux dans l'association métal – céramique.

Pour obtenir de l'hydrogène par électrolyse de l'eau avec un meilleur rendement, il faut chauffer : deux voies sont alors possibles. La première plus "traditionnelle" utilise la conduction par ions O<sup>2-</sup> tandis que la seconde s'appuie sur la circulation des protons (ions H<sup>+</sup>). Principal avantage de la voie protonique : elle requiert des températures plus faibles, de l'ordre de 600°C. À de telles températures, une bonne conductivité des protons peut être envisagée, tout en utilisant des matériaux peu onéreux et fiables. C'est pourquoi les scientifiques ont choisi d'explorer et d'optimiser cette voie.

<sup>1</sup> Institut européen des membranes (IEM, CNRS / Université de Montpellier / ENSCM), Laboratoire de plasticité, endommagement et corrosion des matériaux (LPECM, CNRS / École des Mines de Saint-Étienne), Laboratoire de dynamique, interactions et réactivité (Ladir, CNRS / UPMC) et Laboratoire "Interfaces et systèmes électrochimiques" (Lise, CNRS).

<sup>2</sup> Consulter le site web

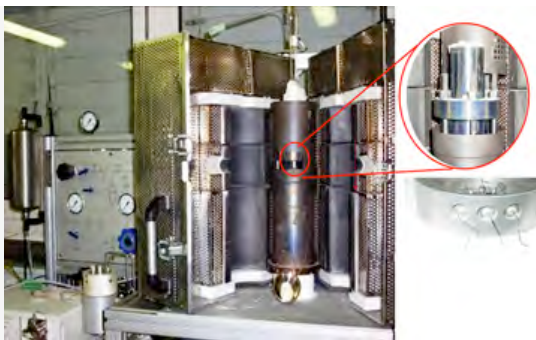
<sup>3</sup> Consulter le site web

Leur travail s'est déroulé en deux étapes : ils ont tout d'abord conçu un dispositif pour étudier in situ les matériaux constituant l'électrolyseur puis, ils ont mis au point deux électrolyseurs instrumentés, c'est-à-dire comportant entre autres, des capteurs de température, de pression, de mesure de l'intensité du courant produite. Les scientifiques ont ainsi pu déterminer avec précision les conditions requises pour obtenir de l'hydrogène en grande quantité et de façon fiable. L'une de leurs idées novatrices a été d'effectuer l'électrolyse sous pression (entre 50 et 100 bars). Et elle s'est révélée efficace... En effet, les principaux paramètres des électrolyseurs s'en sont trouvés améliorés : les premiers essais effectués permettent d'atteindre des quantités d'hydrogène notables, avec un niveau de courant bien supérieur à ce qui avait été fait précédemment par leurs concurrents étrangers travaillant sur la filière protonique. De plus, cette nouvelle technologie abaisse de près de 200°C la température de fonctionnement par rapport à la solution par conduction par ions  $O^{2-}$ . Un dernier atout : en permettant l'usage d'alliages commerciaux, elle diminue le coût de l'hydrogène produit. Ce résultat, prometteur et capital pour l'avenir économique de la filière hydrogène, laisse espérer le développement de technologies rentables et économiques. Même si avant de produire de l'hydrogène massivement et à bas coût, des efforts sont encore nécessaires. Un travail de perfectionnement du dispositif est d'ores et déjà envisagé. *Ce travail a bénéficié du soutien d'AREVA NP et de l'ANR.*



© AREVA NP/ IEM

L'un des prototypes instrumentés permettant de produire de l'hydrogène (800°C, 50 bars), avec à gauche le système de gestion des gaz (vapeur d'eau, air, hydrogène) et à droite la cellule chauffée.



© AREVA NP/ IEM

Second prototype de production d'hydrogène fonctionnant à 650°C et sous 100 bars. Les zooms montrent l'extérieur du cœur de la cellule électrochimique ainsi que les passages métal-céramique



## 2,7 -Par des organismes photosynthétiques

### Production biologique d'hydrogène par des algues



**La production biologique d'hydrogène** correspond à la production d'hydrogène par des algues au sein de bioréacteurs. Les algues peuvent produire de l'hydrogène sous certaines conditions. On a découvert à la fin des années 1990 que les algues privées de soufre passent de la production d'oxygène (photosynthèse classique) à la production d'hydrogène.

### Problèmes rencontrés lors de la conception de bioréacteurs

#### *Limitation de la production d'hydrogène d'origine photosynthétique par l'accumulation d'un gradient de protons*

- Inhibition efficace de la production d'hydrogène d'origine photosynthétique par du dioxyde de carbone
- Nécessité de liaison du bicarbonate au photosystème II (PSII) pour l'efficacité de l'activité photosynthétique
- Acheminement efficace des électrons par l'oxygène lors de la production d'hydrogène par les algues
- Faisabilité en termes économiques : l'efficacité énergétique - le pourcentage de conversion de la lumière en hydrogène - doit atteindre 7 à 10% (les algues en conditions naturelles atteignent au plus 0,1%)

Plusieurs tentatives pour résoudre ces problèmes sont en cours.

#### ***Historique***

En 1939, le chercheur allemand Hans Gaffron de l'université de Chicago, observe que l'algue verte qu'il étudie, Chlamydomonas reinhardtii, passe parfois de la production d'oxygène à la production d'hydrogène. Gaffron n'a jamais élucidé la cause de ce phénomène, et les recherches dans ce sens ont échoué pendant plusieurs années. À la fin des années 1990, le professeur Anastasios Melis, chercheur à l'université de Californie à Berkeley, découvre que si le milieu de culture de l'algue est dénué de soufre, alors celle-ci passe de la production d'oxygène (photosynthèse classique) à la production d'hydrogène. Il s'aperçoit que l'enzyme responsable de cette réaction est l'hydrogénase, et que cette dernière n'est pas active en présence d'oxygène. Melis découvre que la diminution de la quantité de soufre disponible pour l'algue interrompt son flux d'oxygène interne, ce qui conduit à un environnement permettant à l'hydrogénase de réagir, causant la production d'hydrogène par l'algue. Chlamydomonas moeweesii est également un bon candidat pour la production d'hydrogène

2006 - Des chercheurs de l'université de Bielefeld et de l'université du Queensland ont modifié génétiquement l'algue verte monocellulaire Chlamydomonas reinhardtii afin qu'elle puisse produire une grande quantité d'oxygène. Stm6 peut à long terme produire cinq fois le volume produit par la forme naturelle de l'algue, ce qui correspond à une efficacité énergétique de 1,6 à 2%.

2006 - Un travail non publié de l'université de Californie à Berkeley (programme réalisé par le Midwest Research Institute, agissant pour le NREL) aurait permis de dépasser le seuil de rentabilité économique de 10% d'efficacité énergétique. En réduisant les piles de chlorophylle dans les organelles photosynthétiques, Tasios Melis a "probablement" dépassé ce seuil.

2006 - À l'[université de Karlsruhe](http://www.universite.de), un prototype de bioréacteur contenant entre 500 et 1000 litres de cultures d'algues est en train d'être développé. Le réacteur doit être utilisé pour démontrer la faisabilité économique du système au cours des cinq prochaines années.

### Aspects économiques

*Une ferme d'algues de la taille du Texas produirait assez d'hydrogène pour pourvoir aux besoins mondiaux. Environ 25000 kilomètres carrés suffisent pour remplacer l'utilisation d'essence aux États-Unis (moins du dixième de la surface utilisée pour la culture de soja dans ce pays).*

### **INFORMATION : Origin Oil produit de l'hydrogène à partir d'algues.<sup>4</sup>**

Origin Oil a présenté une technologie révolutionnaire pour produire de l'hydrogène à partir d'algues vivantes. Le 'Hydrogen Harvester' utilise peu ou pas d'énergie, ne nécessite pas de privation de soufre ou toute autre technique stressante pour les algues, et il n'y a aucune modification génétique. Les algues produisent déjà de l'oxygène par photosynthèse. La récupération d'hydrogène permet de fournir les éléments nécessaires à la production d'électricité en utilisant les piles à combustible. Cette énergie peut être utilisée pour compenser les besoins en électricité de la culture d'algues, de leur récolte et de leur transformation en aval. La coproduction d'hydrogène sur le site de production d'algues est une évolution essentielle pour la réalisation d'une bio-raffinerie d'algues totalement intégrée. La technologie du « Hydrogen Harvester » éliminerait la nécessité de pipelines d'hydrogène et la dépendance aux raffineries existantes qui sont généralement éloignées des sites idéaux pour la culture des algues.

### ***Produire, où et comment ?***

*Nous sommes loin de pouvoir remplacer une centrale nucléaire par son équivalent en production d'hydrogène. On ne sait réaliser que des installations de petite taille à proximité d'une installation éolienne ou photovoltaïque.*

*La composition de cet équipement pourrait être :*

*Une éolienne ou des panneaux voltaïques*

*Un purificateur d'eau (Osmoseur)*

*Un bloc électrolyseur*

*Un compresseur pour stockage sous haute pression.*

*Une pile à combustible*

*La fabrication industrielle en grande série permettra de réduire le coût encore élevé de cet équipement. Toutefois des développements récents sont prometteurs.*

<sup>4</sup> <http://www.originoil.com/company-news/>, 08/07/2010

## **INFORMATION : Hydrogenics - Des commandes d'électrolyseurs en Russie et au Moyen-Orient<sup>5</sup>**

Le 15 juillet dernier, Hydrogenics a annoncé des commandes pour la Russie et le Moyen-Orient. En Russie, Hydrogenics fournira un électrolyseur pour une grande entreprise industrielle dans la ville de Tomsk. Cet électrolyseur alimentera une unité Hy STAT pour la production d'ampoules. L'autre commande, avec Siemens, est un électrolyseur utilisé pour le dessalement d'eau de mer et pour l'alimentation d'une centrale électrique en construction en Arabie Saoudite. Les deux électrolyseurs seront livrés au cours du second semestre de 2010.



## **INFORMATION : Inauguration d'une centrale à hydrogène "grand format" près de Venise<sup>6</sup>**

En juillet 2010, le groupe italien Enel a inauguré, près de Venise, la plus grande centrale électrique à hydrogène au monde. Cette centrale se situe à Fusina. La puissance de cette centrale, qui n'émet pas de CO<sub>2</sub>, est de 16 mégawatts et sa production sera de 60 millions de kilowatts/heure par an, ce qui permettra de fournir de l'énergie à environ 20.000 foyers en évitant l'émission de plus de 17 000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an. La phase expérimentale de la production avait commencé en août 2009 avec un investissement de 50 millions d'euros.

## **INFORMATION : Le Maroc pourrait bien devenir un grand fournisseur mondial d'énergie<sup>7</sup>**

Selon, Hans Peter Dürr, physicien allemand, prix Nobel, le Maroc, avec ses quelque 3.500 à 4.000 heures de soleil par an ainsi que l'eau froide de l'Océan Atlantique, dispose de perspectives de production d'hydrogène solaire optimale. La production d'hydrogène solaire peut être salvatrice pour ce pays car elle remplacerait les énergies fossiles, payées au prix fort. Si le Maroc réussit à produire l'énergie solaire, il pourrait bien devenir un grand fournisseur mondial d'énergie. Avec l'hydrogène solaire, le Maroc pourrait garantir entièrement son indépendance énergétique. Il pourrait, ainsi, développer une nouvelle industrie automobile et même exporter de l'énergie. Il souligne enfin que le Maroc a signé le protocole de Kyoto, ce qui l'oblige à respecter tous ses engagements. L'alternative pour lui, c'est l'hydrogène, une matière très abondante et bon marché et qui peut être facilement produite au Maroc.

<sup>5</sup> <http://www.hydrogenics.com/>, 15/07/2010

<sup>6</sup> <http://www.lemoniteur.fr/>, 12/07/2010

<sup>7</sup> <http://www.le-verdoyant.fr/Hydrogene-H2->,13/07/2010

### **3-Les méthodes de stockage :**

Il existe de multiples modes de stockage de l'hydrogène. Si les deux premiers modes de stockage sont actuellement les plus utilisés, ils sont loin de satisfaire par leurs performances; aussi les autres modes sont également étudiés. L'évaluation de ces performances se fait surtout par les densités volumétriques et gravimétriques (de l'hydrogène et de l'ensemble avec le stockage) et les conditions générales de stockage et de déstockage de l'hydrogène (efficacité, vitesse, appareils annexes nécessaires...). A ceci s'ajoute les critères déterminants de la sécurité et du coût. Les modes de stockage sont les suivants (liste non exhaustive):

- comprimé,
- liquéfié,
- NaBH<sub>4</sub>,
- hydrures métalliques,
- charbon actif, nano fibres et nanotubes en carbone,
- fullerènes...

#### **3,1- Stockage sous forme comprimé**

C'est l'un des plus utilisé actuellement (PSA, Nissan, DaimlerChrysler): la pression va de 200-350 à 700 bars. Des stations services existent déjà: on peut citer Munich, Chicago, Détroit ou Hambourg.

**Procédé:** La compression nécessite de l'énergie, l'évaluation de celle ci dépend du processus considéré: le processus de compression isotherme n'est pas réalisable, le processus adiabatique est plus proche de la réalité. Une compression à plusieurs étages avec un refroidissement entre chaque étage permet de se rapprocher du mode isotherme: l'énergie dépensée se situe entre ces deux limites. Lors d'un remplissage rapide, on assiste à une augmentation de température. On peut évaluer à 10% du PCI l'énergie nécessaire pour comprimer H<sub>2</sub> de 1 à 700 bars.

**Réservoir:** H<sub>2</sub> peut être stocké dans des bouteilles de 10 L jusqu'à des réservoirs de 10.000 m<sup>3</sup>. Les bouteilles commercialisées actuellement permettent des pressions jusque 350 bars. Il existe des réservoirs ronds ou cylindriques: les premiers sont peu adaptés aux applications automobiles pour des raisons de place, les seconds rendent une adaptation de la géométrie du véhicule nécessaire. Thiokol a développées réservoirs elliptiques pour réduire le volume. Le réservoir est fait de métal très résistant à la corrosion, souvent de l'aluminium renforcé par des fibres en carbone (pour des raisons de poids). Pour réduire davantage le poids, on tente d'introduire des polymères dans la structure.

*Avantages: on bénéficie de la maîtrise de la technologie et de la rapidité du remplissage.*

*Inconvénients: cette technique souffre encore de multiples inconvénients:*

- une faible densité volumétrique,
- la nécessité de réservoirs résistants aux chocs et adaptés aux véhicules pour les applications automobiles,
- et surtout une technologie à améliorer pour les hautes pressions avec l'adaptation de tous les auxiliaires : valves, capteurs, détendeurs.

*Constructeurs: Mannesmann, Dynetek, Thiokol, Quantum.*

#### **Stockage sous terrain**

De même que le gaz naturel, il est possible de stocker l'hydrogène sous terre sous forme comprimée: aquifères, cavernes salées (salt cavern)... peuvent et sont déjà utilisés. En Allemagne, la ville de Kiel stocke du gaz de ville depuis 1971, en France, GDF stocke un mélange riche en hydrogène et au Royaume Uni, la société

ICI (Imperial Chemical Industries) le stocke dans les mines de sel. Cette méthode n'est intéressante que pour les quantités importantes d'hydrogène.

### **3,2-Stockage sous forme liquide (cryogénique)**

Dans cette méthode, l'hydrogène est stocké sous forme liquide à  $-253^{\circ}\text{C}$ .

**Réservoir:** le réservoir a souvent une double paroi, avec entre les deux un espace sous vide (pour éviter les pertes thermiques par convection) ou avec des super isolants ou rempli d'air liquide (Linde Gas). Il est en acier mais on tente d'utiliser des matériaux composites. On atteint des densités énergétiques de 22 MJ/kg (rapporté au réservoir).

**Avantages:** le réservoir nécessite peu de place, d'où le choix de BMW, Opel et DaimlerChrysler pour ce type de stockage. Le remplissage est une technologie maîtrisée avec des stations services spécialisées comme celles de Munich.

**Inconvénients:** au vu de la faible température, les pertes thermiques sont inévitables de même que l'évaporation d'une partie de l'hydrogène (phénomène de boil off). Néanmoins, les progrès techniques ont permis d'amener ce boil off à 1% d'évaporation/jour. Il faut aussi amener l'hydrogène à cette température et le liquéfier, ce qui nécessite **30% du PCI de l'hydrogène**.

**Constructeurs:** Air Liquide (Messer Griesheim), Linde Gas.

### **3,3- NaBH<sub>4</sub>: Hydrogen on demand**

Cette méthode de stockage est celle mise au point par [Millenium Cell](#), qui envisage ce type de stockage pour des applications portables, stationnaires et automobiles. Déjà DaimlerChrysler avec la Nocar 5 et PSA avec son prototype H<sub>2</sub>O utilisent cette méthode de stockage. Daimler étudie la faisabilité du projet visant une autonomie de 300 miles avec un plein de 35 gallons de mélange au lieu de 50 gallons.

**Procédé:** il se base sur la réaction entre le borohydrure de sodium NaBH<sub>4</sub> et l'eau donnant de l'hydrogène (et du borate de sodium NaBO<sub>2</sub>), cette réaction nécessite la présence d'un catalyseur qui peut être à base de cobalt ou de ruthénium. Quand on a besoin d'hydrogène, on pompe la solution pour qu'elle entre en contact avec le catalyseur.

**Avantages:** Ce procédé permet l'utilisation d'un fluide non toxique, non inflammable, facilement manipulable qui peut être utilisé dans les applications automobiles; il peut d'ailleurs être stocké dans des réservoirs traditionnels. Cette technologie offre aussi l'avantage d'être à température ambiante et faible pression et surtout de produire un hydrogène totalement pur de CO et autres impuretés.

**Inconvénients:** Des challenges technologiques doivent encore être relevés: il faut éviter des émissions spontanées d'hydrogène, trouver un catalyseur moins cher que le ruthénium (le cobalt requiert une température plus élevée). De plus, il faut recycler NaBO<sub>2</sub>.

### **3,4- Hydrures métalliques**

Certains éléments ont la propriété de former des liaisons (covalentes ou ioniques) avec H<sub>2</sub>, permettant ainsi le stockage, puisque le phénomène est réversible. Toyota a déjà réalisé un prototype avec ce type de stockage.

**Procédé:** Certains métaux ou alliages peuvent stocker des atomes d'hydrogène entre leurs atomes et créer des liaisons chimiques. Il s'agit par exemple du Palladium Pd, du Magnésium Mg, de ZrMn<sub>2</sub>, Mg<sub>2</sub>Ni ou d'alliages comme Mg-Mg<sub>2</sub>Ni. Il existe deux classes d'hydrures: les hydrures à haute et basse température. Le stockage s'effectue à haute pression avec apport de chaleur. La pression de dissociation est fonction de la température: pour des températures entre 0 et 100°C, les pressions se situent entre 2 et 10 bars, mais elles

atteignent 30 à 50 bars avec des températures plus élevées. Le déstockage a lieu à basse pression avec évacuation de chaleur. Les densités énergétiques sont faibles pour les hydrures basse température: 1,5 MJ/kg; elle augmente cependant pour les hydrures haute température: 4 MJ/kg (3,5% massique). Ovonic avance même des chiffres autour de 8 MJ/kg (7% massique).

*Avantages: cette méthode est sûre et déjà utilisée. Les pressions mises en jeu sont faibles. L'hydrogène obtenu est très pur.*

*Inconvénients: la densité énergétique est encore limitée, ce qui donne des réservoirs trop lourds. De plus la cinétique de remplissage doit être améliorée, à basse température. Certains hydrures restent trop chers.*

*Constructeurs: Texaco Ovonic Hydrogen Systems (TOHS) HERA (GfE, Hydro Quebec, Shell Hydrogen).*

### **3,5 -Charbon actif, Nano fibres et Nanotubes en carbone**

**Charbon actif** Le stockage de l'hydrogène dans du charbon actif est connu depuis longtemps. Le remplissage se fait par adsorption. A température et pression ambiante, on atteint des densités énergétiques de 0,5% (masse), mais à très basse température (-186°C) et haute pression (60 bars), on peut atteindre des densités de 8% massique. Plus récemment, on a découvert des méthodes de stockage dans les nano fibres et les nanotubes en carbone qui semblent beaucoup plus efficaces.

**Nanotubes en carbone** Le stockage dans les nanotubes de carbone repose sur le principe suivant: un gaz peut être absorbé en surface d'un solide, où il est retenu par les forces de Van der Waals. Des travaux ont prouvé que les nanotubes de carbone ont des propriétés intéressantes d'adsorption. Il existe en fait deux types de nanotubes: les nanotubes à paroi simple et ceux à parois multiples. Pour les fabriquer, on utilise une décharge électrique entre 2 électrodes de charbon, ou de pyrolyse catalysée d'hydrocarbures dans le cas des nanotubes à parois multiples. Dans les deux cas, il faut purifier des nanotubes obtenus des impuretés présentes. Cette absorption est efficace lorsque le gaz est à haute pression et à basse température. Malgré des premiers résultats prometteurs, le pouvoir de stockage est plutôt proche de 2 à 3% massique dans des conditions de température et de pression normales. Pour avoir des pourcentages plus intéressants, il faut fonctionner sous des conditions de pression ou de température plus contraignantes.

**Nano fibres en carbone** De même que les nanotubes, les nano fibres ont la possibilité de stocker l'hydrogène. La densité massique est assez variable, puisque certains annoncent des chiffres de 65%, et d'autres entre 5 et 10%, selon les conditions opératoires. Certains chercheurs obtiennent de meilleurs résultats en dopant les nano fibres avec du potassium K.

*Dans ces deux derniers cas, les résultats prometteurs donnés par la littérature n'ont pas été reproductibles. Ce mode de stockage reste à l'état de recherche, notamment pour améliorer les performances grâce à l'utilisation de dopants et l'amélioration de la fabrication de masse.*

### **INFORMATION : Stockage de l'énergie - l'Allemagne prend de l'avance<sup>8</sup>**

L'Allemagne a développé le plan cadre le plus vaste pour le secteur du stockage de l'énergie et des piles à combustible dans le monde, soutenu par l'engagement déterminé du pays pour les énergies renouvelables. En 2009, l'électricité issue des sources renouvelables en Allemagne a augmenté pour atteindre 16,1 % de la part totale. L'Allemagne s'engage à fournir 30 % de son électricité par des sources renouvelables d'ici 2020 et 50 % en 2030. Avec plus de 70 % de l'ensemble des projets à l'hydrogène et de piles à combustible de démonstration en Europe, l'Allemagne a déjà pris une longueur d'avance en commercialisant cette technologie. Plus de 350 sociétés et instituts sont déjà actifs sur le secteur allemand. La moitié des ventes de piles à combustible est générée par les exportations, faisant de l'Allemagne une excellente base pour desservir l'Europe et les sociétés cherchant à entrer sur ce marché en développement. La recherche sur la technologie de

<sup>8</sup> enerzine.com, 17/05/2010



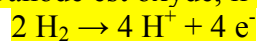
l'énergie est actuellement soutenue par 2,2 milliards d'euros pour la période de 2008 à 2011. Par ailleurs, l'initiative "Mobilité H2" vise à établir une infrastructure complète au niveau national. Les institutions fédérales et régionales ont créé des programmes pour stimuler l'ensemble du spectre de ce secteur, de la R&D au test de marchés.

## 4-Les piles à Hydrogène

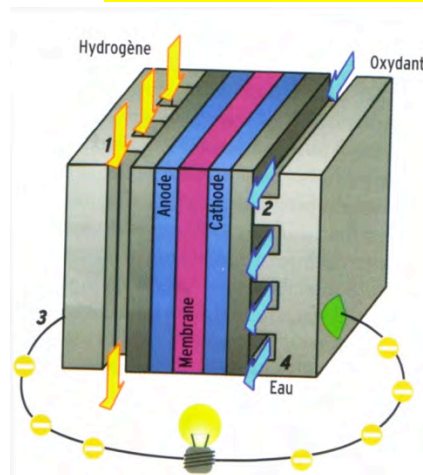
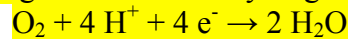
### Principe

Il s'agit en fait d'une pile à combustion, composée d'une anode et d'une cathode. Le fonctionnement de cette pile nécessite l'apport de dihydrogène qui joue le rôle de combustible et de dioxygène jouant le rôle de comburant.

Le dihydrogène passant par l'anode est oxydé, il se forme des ions  $H^+$  :



Le dioxygène de l'air se mélange avec les ions hydrogène en formant de l'eau :



### Points positifs et négatifs

Le point très positif est que ce moteur ne rejette que de l'eau et un peu de  $NO_x$ , de plus le rendement du moteur couplé à un moteur électrique est meilleur qu'un moteur traditionnel (50% contre 25% pour un moteur traditionnel).

Les points négatifs, premièrement pour la fabrication du combustible du dihydrogène, il y a besoin de l'utilisation de centrale électrique, mais la solution serait de développer les centrales hydroélectriques, photovoltaïques et les éoliennes (qui ne serviraient pas forcément qu'à la fabrication de cet hydrogène) et qui, elles, utilisent l'énergie renouvelable de la nature.

Deuxièmement le stockage de l'hydrogène, gaz fortement explosif, mais de nombreuses solutions ont été trouvées, comme ne pas stocker de l'hydrogène pur.

Troisièmement ce moteur produit beaucoup de chaleur, là encore cette chaleur peut être utilisée, comme pour chauffer l'habitacle, c'est le principe de la cogénération.



#### 4,1-Aspect environnemental

Souvent improprement nommé « moteur à eau », ce moteur est souvent présenté comme moins polluant en termes de gaz à effet de serre qu'un moteur à hydrocarbures. Cela n'est pas forcément vrai car la production d'hydrogène nécessite dans la plupart des cas une source d'énergie électrique, elle même très largement produite par la combustion d'énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole. L'utilisation d'un moteur à hydrogène n'évitera l'émission de polluant (à effet de serre en particulier) que lorsqu'on disposera de méthodes de fabrication de l'hydrogène non polluantes. De plus, la fabrication du moteur elle-même est une importante source d'émission de gaz à effets de serre.

	Esence diesel	Batteries lithium-ions	Gaz naturel	Hydrogène
Énergie réservoir pour 100 kWh mécaniques (en kWh)	360	115	300	200
Volume nécessaire (en litres)	40	de 500 à 700	de 130 à 200	de 200 à 250
Perte de place passager	NON	OUI	NON	NON
Poids nécessaire (en kilogrammes)	de 35 à 40	600 à 1 000	250	100 à 150
Durée remplissage (en minutes)	5	3 000 à 7 000	5	5

Comparaison des différentes sources d'énergie pour un véhicule automobile



#### 4,2-Combustion de l'hydrogène

Le moteur à hydrogène permet de générer une puissance de rotation à partir d'hydrogène (de la même façon qu'un groupe électrogène ou un moteur à combustion interne). Les applications peuvent être stationnaires ou embarquées (véhicules). *Dans la mesure où l'hydrogène est produit à partir d'une source d'énergie non polluante*, le fonctionnement du moteur à hydrogène n'entraîne des émissions polluantes que sous la forme de vapeur d'eau et de NO<sub>x</sub>, qui sont des gaz à effet de serre.



Le classique moteur à piston est peu adapté à la combustion de l'hydrogène. La faible densité du gaz nécessite des conduits d'admission et des soupapes de grand diamètre, et la course sinusoïdale du piston crée un pic de pression trop long au point mort haut pour permettre un fonctionnement en détonation. Il existe toutefois des alternatives comme la Quasi turbine ou le moteur Wankel.

### **4,3-Contexte technique**

L'utilisation productive d'une motorisation à l'hydrogène se confronte au problème du stockage et à celui de la production. En premier lieu, c'est un gaz très explosif.

## **INFORMATION : Le coût des piles à combustible pourrait être réduit de 80%<sup>9</sup>**

Une équipe de chercheurs de l'Université technique de Berlin, dirigée par Peter Strasser, a décrit le mécanisme d'action d'un nouveau catalyseur permettant de réduire la quantité de platine nécessaire dans les piles à combustible, et donc, par là même, leur coût, de l'ordre de 80%. La méthode employée consiste à synthétiser des catalyseurs sphériques d'un diamètre de quelques nanomètres à partir de particules de platine et de cuivre. Les scientifiques sont également parvenus à prouver que l'activité du catalyseur peut être régulée en continu, ce qui devrait permettre de l'optimiser. De manière plus générale, M. Strasser affirme que ce procédé est également applicable à d'autres métaux, ce qui entraînerait une nette réduction des coûts de tous les procédés chimiques impliquant des métaux précieux. Un exemple d'un tel procédé est la synthèse d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Ces nouveaux catalyseurs sont actuellement testés à grande échelle dans des laboratoires de l'industrie automobile et chimique en conditions réelles.

## **INFORMATION : des véhicules existants**

### **La Honda FCX Clarify à Francfort.<sup>10</sup>**

Après sa visite à Alès, en juillet à l'occasion des journées internationales des voitures écologiques, la FCX Clarify s'est rendue à Francfort pour le 64<sup>ème</sup> Congrès du Parlement Européen des jeunes. Après l'essai de la voiture, les membres du comité des transports et du Tourisme ont suivi une conférence.

La Honda FCX Clarify est un véhicule hybride avec une pile à combustible alliant hydrogène embarqué et oxygène qui alimente un moteur de 136 CV. Un réservoir de 17 litres d'Hydrogène et un système de récupération d'énergie au freinage donne une autonomie de 460 km. La FCX Clarify est commercialisée en leasing au Japon et aux USA.

<sup>9</sup> Sébastien RITTER bulletins-electroniques.com, 5/05/2010

<sup>10</sup> <http://news.autojournal.fr/news.06/08/2010>



Honda



Toyota

## Toyota : une voiture à hydrogène pour 50 000 \$ en 2015.

Toyota espère refaire le coup de la Prius avec sa première voiture à hydrogène rapporte Automotive News aujourd'hui. La marque souhaite en effet vendre sa première berline à pile à combustible, fonctionnant donc à l'hydrogène, pour 50 000\$ dès 2015.

Un tarif d'appel aussi bas pour une technologie aussi avancée permettrait au géant japonais de prendre une avance considérable sur le marché de l'hydrogène, comme il l'avait fait sur les hybrides avec la Prius en 1997.

Toyota aurait déjà réussi à réduire de 90% le coût de fabrication d'une telle technologie par rapport au milieu des années 2000. D'environ 1 million de dollars par voiture, la fabrication d'un véhicule à pile à combustible ne serait plus que de 100 000 \$. Reste encore à réduire ce tarif de moitié pour que la commercialisation soit viable.

C'est principalement en travaillant sur la quantité de platine composant la pile à combustible (d'un tiers environ) que la marque a réussi à abaisser ces coûts. Une pile à combustible est en effet composée de couches très fines de plastique enduit de platine et mises en sandwich entre des plaques de métal. L'assemblage est ensuite alimenté d'un côté en hydrogène et de l'autre en oxygène, provoquant une réaction chimique créant de l'électricité et de l'eau.

A l'heure actuelle, seul GM (avec le Chevrolet Equinox Fuel Cell), Honda (avec la FCX Clarity) et Mercedes (Classe B) ont une véritable avance dans le domaine de la pile à combustible, mais d'autres constructeurs travaillent le sujet.



LOTUS



CHANG'AN

*L'intérêt de l'utilisation de l'hydrogène comme combustible réside dans la diversité des sources d'approvisionnement ainsi que dans l'impact possible sur l'environnement. La production locale par voie électrolytique sur des systèmes de petite capacité est une voie qui doit être examinée, car il ne faut pas oublier qu'un litre d'eau contient suffisamment d'hydrogène pour produire 2 kWh d'électricité, via une pile à combustible présentant un rendement de 45 %.*

**Il restera à résoudre le problème de l'approvisionnement.** Car si ce genre de véhicules a aujourd'hui la capacité de parcourir autant de kilomètres avec un plein qu'une voiture à

essence, les coûts de création et d'alimentation en hydrogène des stations services reste particulièrement élevé. Si le travail des constructeurs permet d'envisager prochainement l'hydrogène, ce carburant entièrement propre ne sera donc viable que lorsque les pétroliers feront les efforts nécessaires.

## **5-Le transport et la mise à disposition**

Le transport de gaz hautement inflammable a déjà été étudié pour le GPL. Pour l'hydrogène, la solution retenue semble être le réservoir à 750 bars. D'autres solutions sont à l'étude.

Plutôt que de transporter de l'hydrogène vers des dépôts de distribution, compte tenu des difficultés de transport, il sera plus utile de produire directement sur les lieux de consommation.

## **6- CONCLUSIONS**

En prenant le temps de consulter sur internet toutes les actions entreprises pour mettre en œuvre la production d'hydrogène, on peut constater que ces actions sont faites par tous les pays développés.

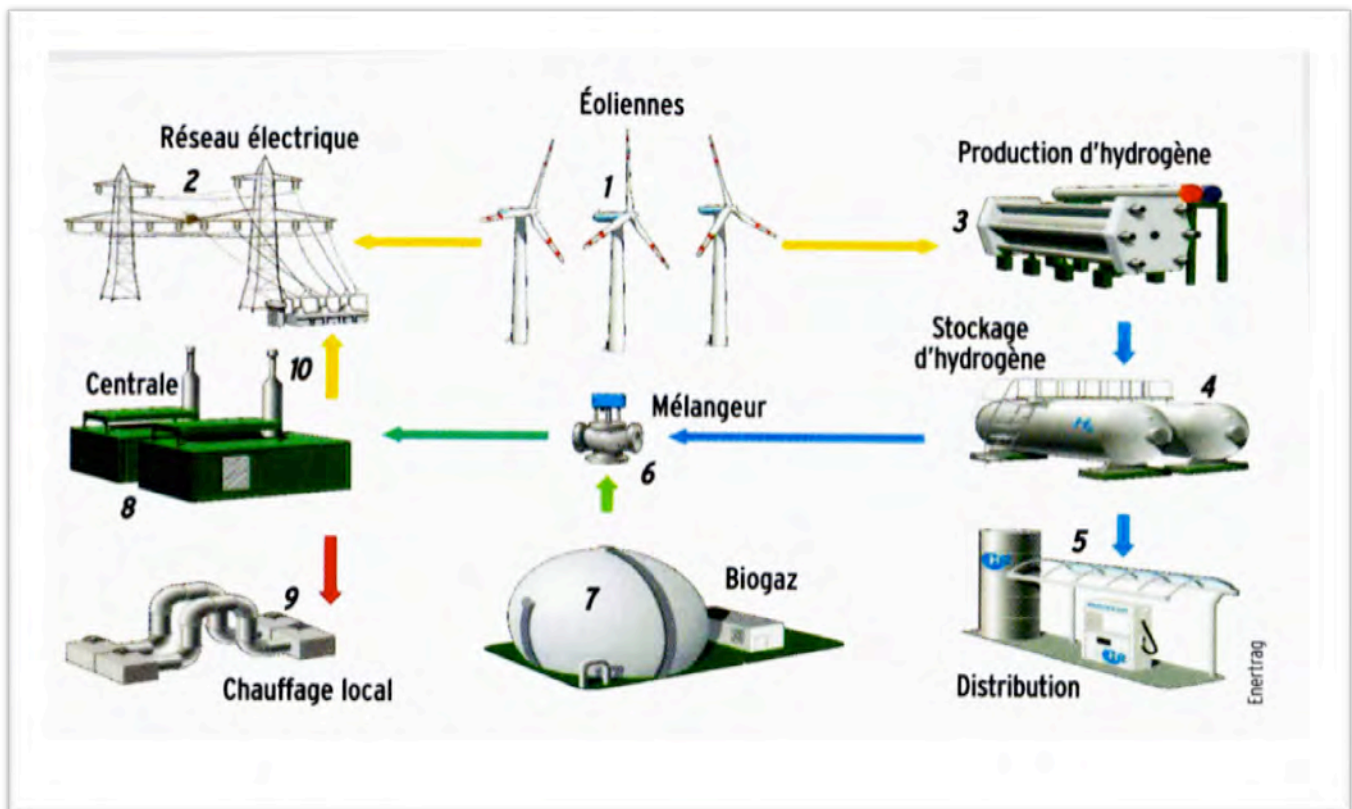
Ceci veut dire que malgré toutes les difficultés recensées dans ce document, la production d'énergie à base d'hydrogène, et l'utilisation par piles à combustible est arrivée à un stade préindustriel.

Il ne s'agit donc pas d'un emballement vers une nouvelle technologie, mais bien d'une mesure de remplacement des énergies fossiles par autre chose.

Ceci signifie aussi que l'utilisation du photovoltaïque et de l'éolien se justifient pleinement par la déconnexion entre la production d'hydrogène aux heures de soleil et/ou de vent et les utilisations.

Dans quel délai l'utilisation à grande échelle de l'hydrogène doit-elle être mise en place ? La réponse n'est pas seulement technique, mais aussi géopolitique, vis-à-vis des pays producteurs de pétrole par exemple. Il est certain que les investissements à mettre en place vont freiner la volonté d'aboutir rapidement à la protection de la planète.

**On ne peut que regretter que la France ne soit pas plus engagée dans cette voie et qu'elle prenne du retard sur les autres pays.**



On voit sur ce schéma, la complémentarité des diverses sources d'énergies, et ce que peut-être demain, le paysage énergétique d'une région.

## ANNEXES : des exemples de réalisation

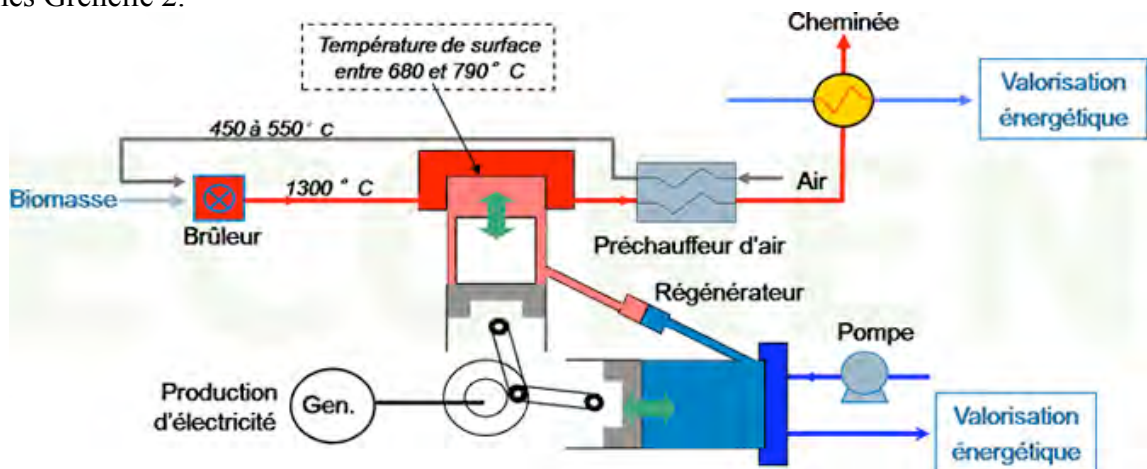
*Des idées non exhaustives, dans tous les domaines, qui montrent les possibilités ouvertes par le vecteur énergétique qu'est l'hydrogène*

### **1-La région Pays de Loire :**

S'est dotée d'une cellule « Hydrogène » **Mission Hydrogène** Tél.: 02 44 76 03 12,  
 c.bazire@missionh2.org - <http://www.missionh2.org/>  
 43 rue Bobby Sands – BP 80095 – 44814 Saint Herblain cedex

## 2-Projet STIRLING :

Un ensemble : composé d'une parabole de 2 mètres de rayon et un moteur STIRLING permettrait de produire pour 2700 h de soleil, les 3 kW nécessaire pour une famille habitant un logement aux normes Grenelle 2.



## 3-Réseau de bus de DUNKERQUE<sup>11</sup> :

Les bus de l'agglomération fonctionnent avec des piles à combustibles alimentés en hydrogène par une installation sur site produit en énergie renouvelable.



## 4-MX 24, le sous-marin avec des ailes

Dans sa revue Naval Experts, la société DCNS revient sur son concept de sous-marin du futur, le SMX 24. Ce sous-marin de 3.500 tonnes n'existe pour l'instant qu'au stade de projet et cherche encore son premier client. Il présente la particularité d'être modulaire et adaptable à toutes sortes de missions. Selon Xavier Itard, Ingénieur de l'Armement et directeur de la ligne sous-marins de DCNS, l'une des innovations de ce projet est son absence de moteur diesel, remplacé par des piles à combustible révolutionnaires SOFC (Solid Oxyd Fuel Cells). L'architecte naval Émilie Regul, conceptrice du SMX 24, pense que le concept ship doit encourager la réflexion : "C'est une base pour nos recherches technologiques qui permet d'engager la discussion avec les clients". (Jean GUISEL Le Point.fr, 18/05/2010)



<sup>11</sup> Site : [www.transbus.org](http://www.transbus.org)

## **5-Des voiliers pourraient produire de l'hydrogène à partir des énergies marines <sup>12</sup>**

Deux scientifiques de l'Université de Californie à Davis, Max Platzer et Nesrin Sarigul-Klijn, travaillent au développement d'une technologie qui permettra à des flottes de voiliers de plaisance de générer de l'électricité dans et à partir de l'océan, alors qu'ils sont loin des côtes. Ces voiliers transformeraient l'énergie éolienne et l'énergie des courants en hydrogène pour le stocker à bord et l'utiliser ou le distribuer ultérieurement. Les voiliers producteurs d'énergie seraient équipés de générateurs hydroélectriques munis de deux hélices mues par la force du courant marin pour produire de l'énergie. L'énergie ainsi produite sera utilisée pour produire de l'hydrogène. Selon les chercheurs, les voiliers sont en mesure d'atteindre des vitesses pouvant aller jusqu'à 46 km/h (25 nœuds) et les bateaux, qui possèdent 400 mètres carrés de voile, pourraient produire jusqu'à 100 kW d'électricité. Les scientifiques ont déclaré, que dans l'avenir, il sera possible de construire de plus grands navires capables de générer jusqu'à un mégawatt. En termes de quantité d'énergie extraite, cette méthode serait rentable si l'on considère que l'eau qui peut transiter dans un générateur sous-marin a une puissance de 36 kW par mètre carré, soit bien plus que les 1,2 kW par mètre carré produits par une éolienne en rotation. Les experts consultés par New Scientist estiment que cette solution est réalisable.

## **6-2ème station à hydrogène au Royaume-Uni installée sur un campus <sup>13</sup>**

Selon le Professeur, Rob Thring, professeur en ingénierie des cellules de carburant à l'université de Loughborough, dans les Midlands, placer une station de ravitaillement pour véhicules à hydrogène sur le campus d'une université est un moyen pour faciliter les recherches sur la technologie de ces voitures, sur leur homologation, sur leur usage futur et leur pénétration du marché.

A ce jour, il n'existe que deux stations de ravitaillement en hydrogène au Royaume-Uni dont celle de Loughborough. Leur système de ravitaillement est fourni par Air Products mais l'université étudie actuellement des moyens de produire son propre hydrogène en utilisant des technologies vertes sur son campus. Cette structure est disposée à accueillir toute personne qui voudrait utiliser la station de ravitaillement, et à coopérer avec elle. La nouvelle station de l'université fait partie d'un ensemble de stations de réapprovisionnement en hydrogène qui sera mis en place dans la région par le British Midlands Hydrogen Forum. Ces stations seront au cœur du déploiement de l'infrastructure de réapprovisionnement en hydrogène prévu sur l'ensemble du Royaume-Uni.

## **7-Système de production d'hydrogène combustible pour chaudière <sup>14</sup>**

Giacomini, spécialiste italien de la distribution hydraulique, a développé un système global comprenant la production d'hydrogène, combustible pour sa chaudière à hydrogène. L'objectif est de baisser les coûts et d'obtenir une plus grande capacité de stockage de l'hydrogène pour développer des chaudières pouvant répondre aux besoins énergétiques de bâtiments collectifs. Pour préparer les installateurs à la mise en place de cette nouvelle offre globale, Giacomini France organisera des formations. La marque exploite actuellement deux chaudières à hydrogène : l'une dans l'hôtel San Rocco à Orta San Giulio, et l'autre dans l'usine de production de pièces et tubes en matériaux de synthèse à San Maurizio d'Opaglio. Les deux prototypes opérationnels se composent de six tubes à combustion d'une puissance d'environ 6 kW chacun, soit une puissance totale de 36 kW. La chaudière peut être également complétée par une pile à combustible de 1 kW, qui permet, selon les besoins, de produire du chauffage ou de l'électricité.

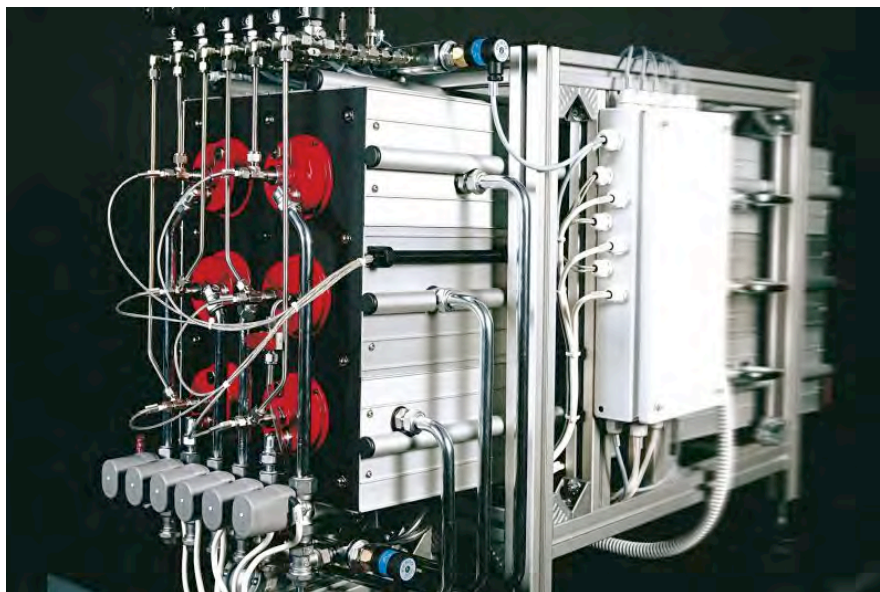
---

<sup>12</sup> Francis ROUSSEAU <http://energiesdelamer.blogspot.com>, 01/06/2010

<sup>13</sup> Techniques-ingenieur.fr, 7/05/2010

<sup>14</sup> Laurent PERRIN [batiweb.com](http://batiweb.com), 28/05/2010





## 8-Glucose - de l'énergie pour les organes artificiels <sup>15</sup>

L'invention du cœur artificiel a incité les scientifiques à développer d'autres organes artificiels comme les reins et le pancréas. Cependant, l'un des obstacles à la réalisation de tels dispositifs reste leur mise sous tension après avoir été implantés. Au lieu d'avoir constamment à recharger ces appareils, les chercheurs veulent que ces machines s'autoalimentent directement sur leur hôte. Des scientifiques de l'Université Joseph Fourier, à Grenoble, ont montré que des piles à combustible implantées avec succès chez le rat pouvaient produire de l'électricité à partir de sucres disponibles dans le corps des rongeurs. La pile va s'appuyer sur des enzymes qui génèrent de l'électricité à partir des réactions chimiques engendrées, en combinant du glucose avec de l'oxygène, tous deux disponibles dans le corps de l'homme (et du rat). Les composés agissent alors comme des fils, transportant les charges électriques de ces enzymes vers des électrodes reliées à la pile à combustible, elle-même reliée à un appareil. Il devient possible d'envisager le développement de robots implantables capables de compenser les fonctions des êtres humains. Le prototype de la pile à combustible génère un niveau de puissance crête de 6,5 microwatts. Toutefois, un stimulateur cardiaque nécessite 10 microwatts et un rein artificiel en exige 20. Ces créateurs restent cependant optimistes et indiquent que les futures versions pourraient produire davantage de puissance.

## 9-Les piles à combustible boivent du petit-lait <sup>16</sup>

Des chercheurs de l'université de Patras (Grèce) travaillent sur une technologie de bio-piles utilisant le « petit-lait » comme combustible. Déchet de l'industrie fromagère, ce liquide s'avère en effet très riche en lactose. L'idée consiste donc à implanter des cultures microbiennes consommatrices de ce sucre à l'intérieur des piles, cette mise en relation provoquant la production d'électricité. Ce processus est doublement écologique car le petit-lait, qui représente près de 70% du volume de lait utilisé lors de la fabrication, est considéré comme nuisible pour l'environnement. Le procédé grec pourrait également trouver des applications dans des secteurs comme l'élevage porcin, la transformation des aliments ou la brasserie. Cependant la production d'électricité de ces piles fromagères se limite pour l'instant à quelques milliwatts, une faiblesse qui pourrait être corrigée par l'augmentation prochaine de la surface de leurs électrodes.

<sup>15</sup> <http://www.enerzine.com/>, 26/05/2010

<sup>16</sup> Baptiste ROUX Dit RICHE <http://www.cleantechrepublic.com>, 30/06/2010

## 10-Wal-Mart : une flotte de chariots élévateurs à hydrogène <sup>17</sup>

Les chariots élévateurs à pile à combustible rencontrent un certain succès car, non seulement ces véhicules ne produisent aucun gaz à effet de serre, mais ils offrent en plus un gain de productivité supérieur à celui des chariots électriques. Au Canada, les applications commerciales voient désormais le jour. Dans ce contexte, Air Liquide a récemment signé un contrat pour l'approvisionnement en hydrogène (produit à 98% à partir de sources d'énergies renouvelables) et la mise en place d'une station de remplissage afin d'alimenter la nouvelle flotte de chariots élévateurs "verts" dans son nouveau centre canadien d'approvisionnement situé dans la province d'Alberta. Cette flotte représente le plus grand parc de chariots élévateurs à pile à combustible du Canada, et le premier contrat commercial dans l'hydrogène énergie dans ce pays. Il s'agit également de la première flotte de chariots élévateurs alimentée par le groupe Air Liquide. La société développera une solution dédiée qui intégrera des postes de distribution d'hydrogène compacts répartis sur l'ensemble de la plateforme de Wal-Mart. Ces postes de distribution fourniront au total plus de 100 kg d'hydrogène par jour et le plein des véhicules s'effectuera en moins de deux minutes. Ce mode de remplissage rapide génère un gain de productivité important comparé aux opérations de changement de batterie sur les chariots élévateurs électriques traditionnels.



LINDE

## 11- Airbus dévoile un futur avion éco-efficace. <sup>18</sup>

A l'occasion du salon aéronautique de Farnborough, les visiteurs ont pu découvrir les premières images du futur concept d'avion du constructeur européen.

Des experts spécialisés ont travaillé sur ce Concept Plane dans les domaines des matériaux, de l'aérodynamique, de la cabine et de la motorisation, dans l'objectif de réduire la consommation de carburant, d'obtenir une diminution des émissions et du bruit et d'avoir un meilleur confort.

Le résultat : un vaisseau aérien à la voilure extra-longue et fine, des moteurs semi-intégrés, un empennage en U et une cellule intelligente et légère.

Des piles à combustible et des panneaux solaires pourraient alimenter certains systèmes auxiliaires.

<sup>17</sup> <http://www.enerzine.com/>, 24/06/2010

<sup>18</sup> [http://www.enerzine.com /](http://www.enerzine.com/), 21/07/2010





## 12- Le drone à l'hydrogène ! <sup>19 20</sup>

1- A Saint-Louis, Boeing a dévoilé son prototype de drone fonctionnant à l'hydrogène. Selon le constructeur, le Phantom Eye est en mesure de voler à une altitude de 20 000 mètres pendant 4 jours. Le Phantom Eye préfigure ce que pourrait être, à l'avenir, une nouvelle génération de drone non polluant pouvant être utile dans les domaines civils et militaires en ce qui concerne la reconnaissance, la surveillance et les transmissions. Le Phantom Eye sera transféré au Centre d'Essais en vol de la NASA sur la base d'Edwards AFB en Californie, pour y débiter une série d'essais au sol. Le drone est alimenté par 2 moteurs 4 cylindres de 2,3 litres fournissant chacun 150 chevaux vapeur, qui ne rejettent que de la vapeur d'eau. L'appareil devrait atteindre une vitesse horaire de croisière d'environ 150 nœuds et pourra transporter une charge utile de 200 kilos. Le programme Phantom Eye est le fruit d'un partenariat entre plusieurs grandes entreprises dont Ford Motor Company (motorisation), Aurora Flight Sciences (aile), Ball Aerospace (réservoirs de carburant) ainsi que la Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA) et la NASA.



BOEING - GLOBAL OBSERVER



2- The Global Observer (GO-1) un avion sans pilote de la firme Aerovironnement a réalisé son premier vol. L'avion a décollé de la base d'Edwards AFB en Californie, il a volé à 1.220 mètres et exécuté diverses manœuvres durant 1 heure. Il est prévu pour voler à 16.000 mètres pendant 7 jours avec une charge de 180kg. Il est équipé d'un moteur hybride, alimenté soit par des batteries, soit par une propulsion à hydrogène liquide. L'avion pourra voler au dessus des phénomènes météorologiques et embarquer des systèmes de communications et autres couvrant une surface du globe de 450.000 km<sup>2</sup>.

## 13-Riversimple Urban Car : une voiture électrique à hydrogène, grand public <sup>21</sup>

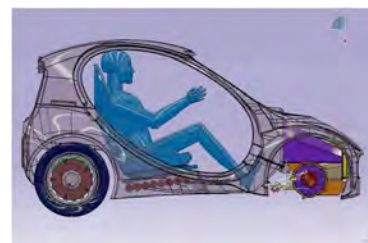
La Riversimple Urban Car est une citadine biplace électrique de 350 kg, alimentée par une pile à combustible utilisant de l'hydrogène liquide. Avec un réservoir d'hydrogène de seulement un litre et une pile fournissant une puissance de 6 kilowatts, la voiture disposerait d'une autonomie de 390 kilomètres et assurerait une vitesse de 80 km/h. Cette Urban Car passe de 0 à 50 km/h en moins de six secondes. « Les constructeurs gagnent de l'argent en vendant des voitures » explique Hugo

<sup>19</sup> <http://psk.blog.24heures.ch>, 15/07/2010

<sup>20</sup> [www.enerzine.com](http://www.enerzine.com), 19/06/2010

<sup>21</sup> Jean-Luc GOUDET <http://www.futura-sciences.com/>, 17/06/2010

Spowers, fondateur de Riversimple. « Nous voulons changer cela. Les gens veulent seulement un moyen de transport qui ne leur coûte pas trop cher et la location est un bon moyen, avec un prix, 230 euros, comprenant tout, y compris le carburant. » Le véhicule vient d'être présenté dans les rues de Londres et ses concepteurs attendent de récolter les aides financières suffisantes pour réaliser une dizaine de prototypes qui seront testés dans plusieurs villes britanniques avant une commercialisation en 2013.



#### **14-Dix scooters électriques à piles à combustible pour 350.000 \$<sup>22</sup>**

La société taïwanaise Asia Pacific Fuel Cell Technologies propose un forfait de 10 scooters à pile à combustibles pour 350.000 dollars. Ce forfait comprend 10 scooters, 40 bouteilles d'hydrogène, une station de ravitaillement en hydrogène et un chargeur à hydrogène mobile. Il inclut également dix heures de formation et deux entretiens semestriels ; l'ensemble est garanti un an ou 10 000 km. La société a effectué des essais de 1 000 km sur une durée de quatre jours, du 10 au 13 mai 2010, ce qui constitue un record pour un véhicule de ce type. Pendant ces essais, le véhicule a enduré d'importants changements climatiques. Le scooter a été alimenté en hydrogène stocké dans des bouteilles d'hydrures métalliques qui étaient échangées en moins d'une minute pour une autonomie de 85 km.

#### **15-Le vélo électrique à pile à combustible existe !<sup>23</sup>**

La société japonaise Iwatani propose un vélo électrique alimenté par une pile à combustible, que l'on recharge avec une cartouche fournissant de quoi rouler 45 kilomètres. L'idée n'est pas (encore) de le commercialiser mais de démontrer que la pile à combustible PEMFC fonctionne bien et qu'elle est suffisamment légère pour s'adapter à toutes sortes d'utilisations



#### **16-Avenir brillant pour Arcola Energy<sup>24</sup>**

Le théâtre Arcola de Londres annonce le lancement de son premier générateur à pile à combustible 'HyLight' et la création d'une nouvelle entreprise « Arcola Energy » qui développera cette nouvelle technologie. 'HyLight' est un générateur portable permettant l'éclairage et l'alimentation électrique dans des endroits éloignés du réseau électrique. Il est silencieux et ne produit aucune émission polluante caractéristique des génératrices diesel. HyLight est équipé de deux roues facilitant

<sup>22</sup> <http://www.h2journal.com/> 09/06/2010

<sup>23</sup> Futurascences/, 09/03/2010

<sup>24</sup> <http://www.fuelcelltoday.com/>12/07/2010

tant le transport ; il est robuste et facile à déployer. Le système comprend le nouveau générateur d'hydrogène Hymera, deux bouteilles d'hydrogène et un système d'éclairage LED. Il affiche une puissance nominale de 150 W (200 W crête). L'autonomie est de 30 heures pour une charge de 100 W par bouteille d'hydrogène.

## **17-Bouygues lance l'antenne relais écolo<sup>25</sup>**

Cette antenne est alimentée par une pile à combustible (Roller Pac d'une puissance de 2 kW). Elle fonctionne à l'hydrogène et l'oxygène afin de créer de l'électricité. Cette prouesse a été réalisée avec le concours d'Air Liquide et sa filiale Axane. L'antenne est installée à Menville, près de Toulouse, et 5 autres devraient suivre. Cette solution serait destinée à alimenter des antennes relais dans des endroits isolés.

## BIBLIOGRAPHIE

*En dehors des sites ou documents cités pour chaque exemple, il faut lire les documents HYDROGEN de la mission des Pays de LOIRE (voir annexe1) et la revue « Dossier pour la science- Energies à volonté ! » numéro d'octobre 2010*

---

<sup>25</sup> [www.onlineradio.fr/nouvelles-technologies](http://www.onlineradio.fr/nouvelles-technologies). 13/08/20110