

## **Economie de l'hydrogène. Quelle place pour les énergies renouvelables ?**

Communication pour WIH2 2007  
(2<sup>ème</sup> Workshop International sur l'Hydrogène)  
Ghardaia 19-21 mars 2007

**Auteur:** Jean-Loup Rouyer  
Association Française de l'Hydrogène (AFH2)

### **RESUME**

Aujourd'hui, l'hydrogène le moins cher est celui produit en grande quantité par reformage du gaz naturel, principalement pour des applications chimiques. Une solution moins économique est l'électrolyse, utilisable dès maintenant pour le stockage d'énergies intermittentes et, à plus long terme, pour la production d'hydrogène comme vecteur énergétique, par de l'électricité peu chère produite par le nucléaire ou l'hydraulique ou le solaire à concentration ou photovoltaïque..

Le solaire à concentration peut être utilisé pour divers procédés : vapo-reformage solaire, cycle thermo-chimique à deux étapes, réacteur à membrane par effet photo-catalytique,... Les différentes voies de production d'hydrogène sont appréciées sur le plan économique.

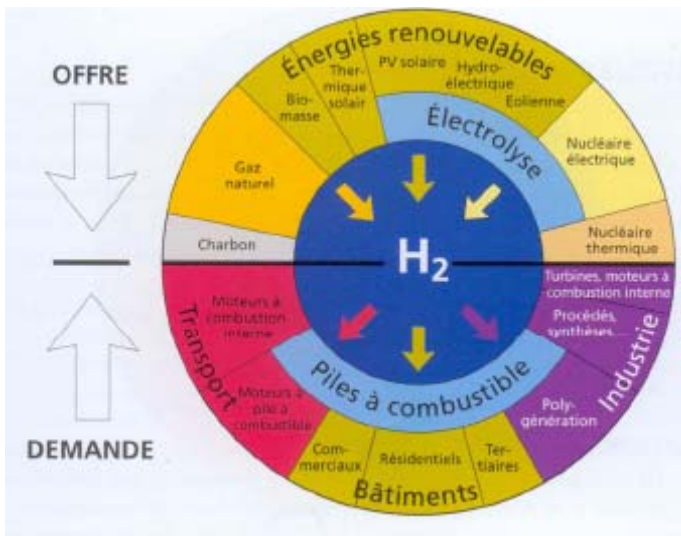
### **TEXTE**

#### **Introduction**

La panoplie des moyens de production et des usages de l'hydrogène est très large. Ce sont les perspectives réalistes de coûts qui permettent de distinguer les voies les plus prometteuses. Le but de cette présentation est de montrer que le solaire à concentration a un avenir économique par rapport à des solutions plus classiques.

## 1. Moyens de production et usages de l'hydrogène

Le schéma ci-dessous montre la grande variété des moyens de production et des utilisations :



Pour déterminer quels sont les couples production-utilisation prometteurs, il faut raisonner sur des ordres de grandeur de coûts.

La situation pour la production est actuellement la suivante :

	€/kg	C€/kWh	\$/GJ
<b>Essence HT</b> (0,375 €/l)		4,12	13,7
<b>Essence TTC</b> (1,14 €/l)		12,5	41,6
<b>Pétrole</b> (60\$/bbl)		2,85	10,5
<b>G.N.</b> (10 \$/million BTU)		2,7	9,48
<b>H<sub>2</sub> pres (gros)</b>	1,54	4,62	15,4
<b>H<sub>2</sub> pres (détail)</b>	4,65	13,95	46,4
<b>H<sub>2</sub> liq (détail)</b>	10,3	30,9	102,7

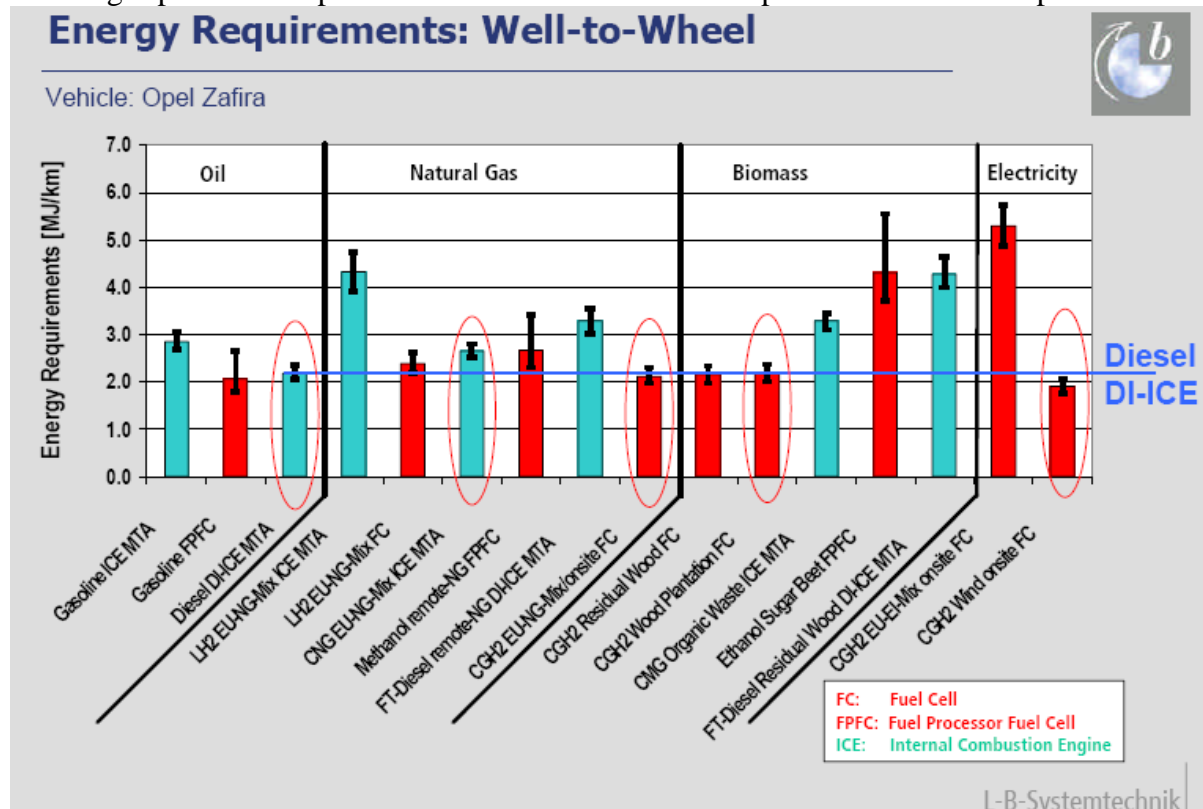
Retenons, pour la discussion sur l'avenir des coûts de l'hydrogène, le chiffre de 15.4 \$/GJ pour la production à la source d'hydrogène par le procédé le moins cher (vaporeformage de gaz naturel). Le tableau ci-après montre en effet la différence des prix de revient de l'hydrogène comprimé à la pompe en fonction de la matière première et du procédé de production. Les données de ce tableau sont plus anciennes que celles du tableau précédent, donc moins à jour, mais expriment bien les écarts relatifs entre les diverses options.

Matière première	Gaz naturel (vaporeformage)		Charbon (gazéification)	Biomasse (gazéification)	Electricité (électrolyse)
Prix de la matière première (\$/GJ)	9,3		2,6	2,4	17,8
• Coût de la technologie de production (\$/GJ)	Avant cap.CO <sub>2</sub> *	Après cap. CO <sub>2</sub> *	Avant cap. CO <sub>2</sub> *	19,50	29,4
	15,3	17,6	16,8		
• Stockage (\$ GJ)	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70
• Transport (\$/GJ)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
• Distribution (\$/GJ)	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7
Prix de revient H <sub>2</sub> (\$ / GJ)	34,7	37,0	36,2	38,9	48,8

Tout compris (production, stockage, transport, distribution), si l'infrastructure existait, l'hydrogène à la pompe aujourd'hui serait, hors taxes, un peu moins cher que l'essence TTC. Concernant les utilisations, il faut distinguer les usages stationnaires et les usages pour le transport terrestre.

Les usages stationnaires pour la consommation d'électricité n'ont un avenir économique que pour des sources locales ou des petits réseaux, notamment pour une fonction de stockage d'énergies renouvelables. En effet, les grandes centrales de production d'électricité couplées à un réseau étendu et maillé garderont un avantage décisif en termes de rendement et de coût. Par contre, les usages stationnaires pour la consommation d'hydrogène ont plus d'avenir, comme on le verra plus loin.

Les usages pour le transport terrestre ne sont actuellement pas si loin d'être compétitifs.



Les comparaisons ci-dessus en MJ/km reflètent l'efficacité énergétique de l'ensemble des étapes de l'utilisation d'un carburant, du puits aux roues.

Elles montrent que certaines options sont aussi efficaces que la voiture à essence ou diesel : Cela signifie que les moteurs des technologies nouvelles sont très efficaces car les véhicules conventionnels ont une consommation énergétique importante du réservoir aux roues et faible du puits au réservoir.

Mais les consommations énergétiques ne sont pas proportionnelles aux coûts, pour deux raisons principales :

- le pétrole et le gaz ont été transformés « gratuitement » par la nature, alors que l'hydrogène nécessite une élaboration coûteuse ;
- les PAC (Pile à combustible) ont une efficacité énergétique redoutable, mais leur coût est élevé.

Le tableau qui suit donne une idée des écarts de coûts, très différents des écarts de consommation énergétique précédents (il s'agit bien de coûts liés aux carburants, car la partie attribuable à la motorisation et à la structure du véhicule est du même ordre de grandeur).

<b>Evaluation économique de différents scénarios d'introduction GIE PSA/ Renault avec Air Liquide et TotalFinaElf (2000)</b>		
<b>Hypothèses :</b>	<b>Asymptotes, à l'horizon 2020</b>	<b>Coût kilométrique, hors marges, hors taxes</b>
<p>* Les prix du brut et du gaz naturel sont liés, l'hydrogène est obtenu à partir du gaz naturel.</p> <p>* Scénario de distribution analogue à celui de la pénétration du GPL en France.</p> <p>* Deux scénarios d'introduction des véhicules.</p>	<b>GPL</b>	<b>1,6 à 1,8</b>
	<b>Naphta</b>	<b>1,25</b>
	<b>Essence (référence)</b>	<b>1</b>
	<b>Kérosène</b>	<b>1,35</b>
	<b>Gazole</b>	<b>0,95</b>
	<b>Méthanol</b>	<b>1,35</b>
	<b>H2 liquide</b>	<b>5,5 à 6,5</b>
	<b>H2 comp. réseau</b>	<b>5,5 à 11</b>
	<b>H2 comp. station</b>	<b>4 à 6,5</b>

**TOTAL FINA ELF**

Avec l'augmentation des prix des carburants depuis l'an 2000, le facteur de coût kilométrique entre hydrogène et essence se rapproche aujourd'hui de 2 et 3 à l'horizon 2020.

## **2. Options de production et d'utilisation d'hydrogène produit par l'énergie solaire**

Cette deuxième partie est focalisée sur la production d'hydrogène par énergie solaire. Elle peut passer par l'intermédiaire de l'énergie électrique ou par la production directe d'hydrogène solaire.

### **Production d'hydrogène par l'intermédiaire de l'énergie électrique**

L'électricité peut être obtenue par le solaire à concentration thermodynamique, qui chauffe un liquide ou un gaz transformant la chaleur en électricité ou directement par solaire photovoltaïque concentré ou non.

Si cette électricité est destinée à un réseau, il lui faudra se rapprocher du coût moyen de l'électricité dans la région visée. Si elle est utilisée localement, elle devra avoir un coût équivalent aux alternatives locales.

La production d'hydrogène à partir de l'électricité se justifie pour le stockage d'énergie en secours en cas de défaillance du réseau ou pour des applications spécifiques, ou pour remplacer l'électricité de pointe lorsqu'elle est très chère.

### **Production directe d'hydrogène solaire**

Deux voies principales sont développées :

- Voie photothermique

C'est l'apport de chaleur qui accélère des réactions de dissociation de l'eau ou des processus biologiques.

- Voie photonique

Les technologies en développement font intervenir directement les photons solaires pour produire de l'hydrogène à partir de l'eau. Ils n'utilisent pas l'énergie thermique comme moteur de la dissociation de l'eau (qui est la forme la plus dégradée de l'énergie solaire), mais font intervenir directement les photons solaires pour induire des réactions photocatalytiques. Les perspectives de cette voie sont très intéressantes et divers procédés seront testés dans le cadre du projet Maghreb-Europe.

Le marché visé est l'utilisation de l'hydrogène pour l'industrie et le remplacement partiel du gaz naturel dans les usages où l'hydrogène devient compétitif.

### **3. Le projet Magreb-Europe et le projet TREC**

Le projet Maghreb-Europe est semblable dans son ambition et sa localisation géographique, à un autre projet utilisant le solaire à concentration : TREC (Trans Mediterranean Renewable Energy Cooperation), qui consiste à produire de l'électricité dans le désert maghrébin par solaire à concentration et exporter cette électricité vers l'Europe par des lignes THT à courant continu (ce qui limite les pertes en ligne à environ 10 %).

Les deux projets ont leur logique économique, et ne visent pas les mêmes marchés, donc peuvent être réalisés tous les deux.

Le projet TREC est destiné à fournir de l'électricité au Maghreb et à l'Europe. Il ne passera économiquement que si le coût de l'électricité fournie à l'Europe se rapproche des coûts moyens européens. Pour l'instant, ce n'est pas le cas, mais les promoteurs du projet comptent sur l'effet de série pour diminuer suffisamment les coûts.

Le Projet Maghreb-Europe est destiné à fournir de l'hydrogène à l'industrie maghrébine et européenne. Il ne passera économiquement que si le coût de l'hydrogène livré en Europe est équivalent au coût de l'hydrogène produit par réformage du gaz naturel, qui se situe à 1.5 €/kg. Les coûts industriels entrevus par les promoteurs des procédés du Projet Maghreb-Europe se situent aux environs de 3 €/kg d'hydrogène.

Les perspectives sont donc très intéressante car on peut raisonnablement penser que le coût du gaz naturel augmentera et que le besoin de le remplacer par un gaz plus propre comme l'hydrogène sera de plus en plus opportun.