

# L'hydrogène, cet hallucinogène

Les faits sont têtus et la physique impitoyable.

Michel Gay  
Actualisé le 04 janvier 2021  
N°20

Ce texte comporte deux annexes qui explicitent les résultats (pour les plus motivés...).

Le 1er juin 2018, Nicolas Hulot a rendu public [un plan gouvernemental](#) de 100 millions d'euros d'argent public pour soutenir l'hydrogène en déclarant, « *sur l'hydrogène, ma religion est faite* ». Il s'agit en effet d'une croyance quasi-religieuse plus que d'un raisonnement, et de vendre (cher) du rêve.

Depuis plusieurs décennies des études et des articles nous font régulièrement miroiter que l'hydrogène (H<sub>2</sub>) pourrait être un moyen de stocker l'énergie, notamment, le surplus d'électricité produit par des énergies intermittentes comme les éoliennes et les panneaux photovoltaïques. Il serait alors injecté dans le réseau actuel de gaz naturel ou retransformé en électricité dans une pile à combustible (PAC), par exemple. Il pourrait aussi remplacer l'essence et le diesel dans nos véhicules.

Certains évoquent même une future "*civilisation de l'hydrogène*". Qu'en est-il vraiment ?

L'hydrogène (H<sub>2</sub>) est une énergie qui apparaît merveilleuse. Elle est même euphorisante, voire "stupéfiante"... Avec l'H<sub>2</sub>, certains voient la vie en rose et auraient tendance à prendre leurs rêves pour des réalités. L'avenir énergétique du monde devient simple, radieux. Tout devient possible car cette énergie idyllique et "futuriste" semble avoir tous les atouts pour succéder aux carburants fossiles (pétrole, gaz, charbon).

En effet, ce gaz H<sub>2</sub> peut-être extrait de l'eau. Il faut 11 litres d'eau pour produire 1 kg d'H<sub>2</sub> qui permettent de parcourir 100 km avec une pile à combustible dans une voiture moyenne qui restitue ensuite cette eau ! Et l'eau ne manque pas dans les océans et les fleuves.

Après avoir brûlé l'H<sub>2</sub> pour se chauffer, ou pour actionner directement un moteur à combustion, ou encore après l'avoir transformé en électricité dans une pile à combustible (PAC) pour alimenter un moteur électrique, il se recombine avec l'oxygène de l'air pour redonner... de l'eau. Extraordinaire ! Quoi de plus simple, de plus propre et de plus écologique ?

Ce serait donc une énergie disponible en quantité inépuisable, renouvelable et quasiment non polluante. Pourquoi n'y a-t-on pas pensé plus tôt ? Pourquoi n'a-t-elle pas déjà remplacé le pétrole, le gaz naturel et le charbon depuis plus d'un siècle ?

En effet, [l'H<sub>2</sub> a été découvert](#) par Cavendish en 1766 et nommé par Lavoisier en 1783. Le procédé de la pile à combustible (PAC) a été découvert en 1838 et la première PAC a été construite en 1841...

Y aurait t-il un complot mondial anti-hydrogène manigancé par des lobbies sournois pour défendre la suprématie du pétrole, du gaz et du charbon, voire du nucléaire ?

## **D'où vient l'hydrogène ?**

Bien que l'hydrogène soit l'élément le plus abondant sur la planète, il n'existe pas de puits ni de source d'H<sub>2</sub>. Il est combiné à d'autres éléments, principalement à l'oxygène sous forme d'eau (H<sub>2</sub>O) et au carbone sous forme de méthane (CH<sub>4</sub>). Ce n'est pas une source d'énergie exploitable qui existe à l'état naturel sur terre, Sauf sous forme [diffuse et inexploitable](#). L'H<sub>2</sub>, comme l'électricité, doit être produite et permet de transporter de l'énergie d'un endroit à un autre ou de la stocker avant son utilisation. On dit que c'est un vecteur d'énergie.

La fabrication de l'H<sub>2</sub> est coûteuse en énergie. Pour obtenir ce gaz en grande quantité, il faut le séparer d'autres éléments, soit par électrolyse de l'eau (il faut donc produire de grandes quantités d'électricité), soit par des procédés thermiques (à haute température), ou chimiques, à l'aide d'une autre énergie source... qui doit être abondante et bon marché.

L'énergie nucléaire semble une bonne candidate et probablement la seule lorsqu'on a retiré le pétrole, le gaz et le charbon. Les énergies solaires et éoliennes ne pourront que servir d'appoints marginaux et coûteux (en utilisant les surplus ponctuels de productions électriques) devant l'énormité des besoins d'un pays ou du monde.

Pour remplacer par de l'H<sub>2</sub>, même partiellement, les 7,5 milliards de tonnes équivalent pétrole annuels issus les combustibles fossiles dans le monde (pétrole = 4,5 MdTep, gaz = 3 MdTep), les seules solutions viables actuellement envisagées sont l'électrolyse et la thermolyse<sup>1</sup> de l'eau pour produire les milliards de tonnes d'H<sub>2</sub> nécessaires par an.

**Bien entendu, l'H<sub>2</sub> n'est une énergie potentiellement formidable que si elle est extraite... de l'eau !**

**En effet, pour des raisons de coûts (c'est plus pratique et moins cher), l'H<sub>2</sub> est aujourd'hui extrait du pétrole, du gaz et du charbon qu'il est censé remplacer !...**

### Comment utiliser l'hydrogène ?

Les propriétés physiques de l'H<sub>2</sub> en font un gaz encombrant.

A la pression atmosphérique, un mètre cube (m<sup>3</sup>) d'H<sub>2</sub> (1000 litres) contient l'équivalent en énergie de 3 kWh.

Donc, 3 m<sup>3</sup> d'H<sub>2</sub> (3000 litres) contiennent l'équivalent en énergie "chaleur" d'un seul litre d'essence (9 kWh).

L'H<sub>2</sub> donc généralement comprimé à 200 fois la pression atmosphérique (200 bars<sup>2</sup>), ou jusqu'à 700 bars, ou liquéfié, ce qui consomme de plus en plus d'énergie à chaque étape.

Il ne faut alors plus que **7 litres d'H<sub>2</sub> à 700 bars ou 4 litres d'H<sub>2</sub> liquide (à - 253°C dans un contenant isolant et volumineux)** pour disposer de l'équivalent énergétique "chaleur" **d'un litre d'essence**.

Un kg d'H<sub>2</sub> représente un volume de 25 litres à 700 bars et de 16 litres liquéfiés.

Cependant, l'énergie mécanique que peut fournir l'H<sub>2</sub> entre le réservoir et les roues via l'électricité produite par une PAC est deux fois supérieure à celle de l'essence via la chaleur dans un moteur "à explosion", appelé aussi moteur à combustion interne (MCI). Le rendement d'une PAC dans un véhicule entre le réservoir et les roues est de 50% alors que celui d'un MCI est de 25% à 30% (on retiendra ici 25% pour les calculs).

### Dans les véhicules ?

L'hydrogène liquide est difficile à conserver dans des voitures particulières (fuites).

Pour parcourir 600 km, aujourd'hui le meilleur compromis est le réservoir d'hydrogène sous pression à 700 bars associé à une pile à combustible (PAC avec un rendement de 50% ou 60%) et une batterie "tampon" (incluse dans le terme "réservoir"). Mais ce réservoir est alors près de **cinq fois plus gros que le réservoir d'essence** (200 litres au lieu de 42 litres) **et 3 fois plus lourd** (120 kg au lieu de 40 kg).

On peut cependant encore l'insérer dans une voiture moyenne, même s'il y a forcément **moins de place disponible et de charge utile** restante.

Il en coûterait aujourd'hui au **minimum 11 € TTC** pour faire 100 km avec de l'H<sub>2</sub> issu d'une électrolyse industrielle<sup>3</sup>, alors que 7 litres d'essence à 1,5 € TTC coûtent **10,5 € ...** et que 7 litres d'essence à 2 € coûtent 14 €.

**Remarque : avec des batteries Li-ion, le coût serait de 3 € au 100 km** (15 c€/kWh x 20 kWh / 100 km).

Il faudrait atteindre au minimum 2,5 € le litre d'essence (7 x 2,5 = 17,5 €) pour commencer être financièrement concurrentiel, compte tenu des inconvénients (poids, volume, autonomie, recharges, et... prix d'achat du véhicule).

### En stockage d'électricité ?

A partir de l'électricité initiale, il y a une **perte de 50 % d'énergie** pour obtenir de l'H<sub>2</sub> sous pression à 700 bars (et jusqu'à 60% pour obtenir de l'H<sub>2</sub> liquide).

<sup>1</sup> On chauffe l'eau entre 900°C et 3000 °C pour "casser" la molécule d'eau (H<sub>2</sub>O) en hydrogène et en oxygène.

<sup>2</sup> Par simplification on assimile un bar (b) = une atmosphère = 1013 millibars. 200 b = 200 fois la pression atmosphérique normale.

<sup>3</sup> Voir justifications en annexe 1.

Puis, au minimum, une nouvelle perte de 40% à 50% intervient pour transformer l'H2 en électricité dans une PAC.

Le rendement global "aux roues" en y incluant les pertes diverses (transports, stockage, charges,...) est donc de moins de 25% (il y a plus de **75% de pertes**).

**Pour 100 kWh d'électricité à stocker, le "système hydrogène" n'en restitue que 25 kWh.**

Le coût de l'électricité "sortante" (celle qui a été stockée sous forme d'H2) est donc au minimum quatre fois plus élevé que le prix de l'électricité "entrante" (qui sert à produire l'H2), sans compter... l'amortissement du coût de l'électrolyseur et de la PAC (chère).

Remarque : Pour 100 kWh d'électricité à stocker, le **"système batterie" en restitue 75 kWh.**

De plus, la possibilité d'injecter l'H2 dans le réseau de gaz naturel soulève quelques problèmes techniques :

1) par comparaison avec le gaz naturel, l'énergie dépensée pour son transport est **trois fois plus importante**,

2) les **fuites** (dues à la petite taille de la molécule d'hydrogène) entraînent des pertes importantes dans le réseau. Après quelques centaines de km, que récupère-t-on à l'autre bout du "tuyau" (le gazoduc) ?

3) L'H2 altère et fragilise les parois dans les tuyaux en acier carboné. Il ne peut être transporté que dans certains réseaux en "plastique".

### Conclusion

**L'usage énergétique de l'H2 est actuellement quasiment inexistant** au niveau mondial (1% pour les fusées) parce qu'il est difficile à manier, conditionner, transporter, stocker... ce qui le rend peu pratique à utiliser et très coûteux à exploiter.

Dans ces conditions, en dehors d'opérations publicitaires ciblées et de [projets expérimentaux](#) (parfois "[bidons](#)") subventionnés par les contribuables, l'H2 ne succèdera certainement pas au pétrole ni au gaz naturel (méthane) avant longtemps.

Il faut surtout retenir que **l'économie hydrogène consomme en amont 75 % à 90 % de l'énergie produite par une autre source d'énergie** (nucléaire, vent, soleil, biomasse,...) **pour n'en livrer que 10 à 25 % à l'utilisateur final à un coût durablement élevé.**

Il faudra vraiment en avoir besoin pour gaspiller autant d'énergie et donc ... d'argent.

S'engagera-t-on dans cette gabegie énergétique et financière ?

Nicolas Hulot n'a aucun doute puisque « *sa religion est faite* »...

**En tant qu'énergie pouvant répondre aux besoins de l'humanité, l'H2 « propre » a des propriétés euphorisantes et hallucinogènes, mais c'est une difficile solution d'avenir qui risque malheureusement de le rester longtemps.**

# Annexe 1

Hydrogène cet hallucinogène / n°20

## I) Production de l'H2.

Si beaucoup d'attention est portée sur l'utilisation de l'hydrogène dans diverses applications, beaucoup moins d'attention est portée aux procédés de sa production en amont.

On peut produire de l'H2 d'au moins une dizaine de façons, par exemple :

- Soit à partir de charbon par chauffage (ce qui a été fait et ça s'appelait le gaz de ville jusque dans les années 60).
- Soit à partir de gaz naturel (composé principalement de méthane) avec de la vapeur d'eau. C'est la méthode industrielle la plus employée dite de reformage. Plus de 90% de la production mondiale d'H2 est issue du gaz naturel par cette méthode. Il est à noter que la quantité de CO2 émise par cette filière est supérieure à celle émise par la combustion directe de ce gaz (dans un moteur par exemple). L'H2 actuel issu du méthane n'est donc pas écologique.
- Soit à partir de biomasse par gazéification. La biomasse pourra représenter un appoint local dans certains pays mais il reste des difficultés techniques de mise en œuvre et surtout d'approvisionnement à très grande échelle.
- Soit à partir de micro-organismes photosynthétiques (production en laboratoire mais jamais à grande échelle).
- Soit à partir d'eau, et il existe trois méthodes :
  - o par électrolyse (c'est aujourd'hui moins de 1% de l'H2 fabriqué dans le monde),
  - o par thermolyse ou craquage thermochimique de la molécule d'eau à très haute température (minimum 900°C jusqu'à 3000°C) envisagé dans certaines futures centrales nucléaires VHTR (Very High Temperature Reactor),
  - o et aussi par photo-électrolyse sur un semi-conducteur.

## II) Chiffres et ordres de grandeur.

Afin d'éviter le travers de ceux qui, par intérêt ou par naïveté, sautent comme des cabris en criant « l'hydrogène, l'hydrogène », il est nécessaire de connaître quelques chiffres pour **avoir à l'esprit des ordres de grandeur** ... qui douchent les ardeurs.

**Un kg de pétrole contient 12 kWh** d'énergie sous forme de chaleur quand on le fait brûler. Le pétrole (ainsi que ses dérivés l'essence, le diesel,...) est un produit miraculeux car c'est un condensé fabuleux d'énergie qui a surtout la bonne idée d'être **liquide à la pression et température ambiante et donc facilement stockable et manipulable** (ce qui n'est pas le cas par exemple du gaz naturel et surtout de l'hydrogène).

**Un litre d'essence pèse environ 0,7 kg** (densité = 0,72) **et contient 9 kWh** (en fait, 8,8 kWh mais on retiendra 9 kWh). Dans la suite du document, le terme "essence" regroupe tous les carburants issus du pétrole (essence, gas-oil, kérosène,...)

Dans la pratique d'une électrolyse industrielle, il faut **11 litres d'eau et 55 kWh d'électricité**<sup>4</sup> pour fabriquer un kg **d'H2 qui contient 33 kWh** d'énergie (rendement de 60% de l'électrolyse).

Mais il faut jusqu'à **70 kWh** d'électricité pour comprimer cet hydrogène à 700 bars et le livrer.

Via une PAC, une voiture moyenne peut parcourir 100 km avec environ 1,2 kg d'H2.

**Rappel** : 1000 litres d'H2 gazeux à la pression atmosphérique à 0°C (1 m3 pèse 0,1 kg) contiennent autant d'énergie que... **0,3 litre d'essence,**  
**et 1 kg H2 est équivalent à 2,75 kg d'équivalent chaleur pétrole.**

La densité d'énergie par volume de l'H2 est faible à la pression atmosphérique (3 kWh / m3).

<sup>4</sup> AFHYAPAC : Mémento de l'hydrogène. Fiche 3-2-1 mai 2013.

Pour diminuer ce grand volume encombrant et contenant peu d'énergie, on comprime ce gaz jusqu'à **700 bars**. On peut aussi le liquéfier à **-253°C**.

Ces deux opérations « coûtent » de l'énergie, et consomment respectivement **15% et 35%** de l'énergie contenue au départ.

Ainsi, comprimé à 700 bars, sur les 3 kWh, il ne reste plus que 2,55 kWh, et après liquéfaction, il ne reste que 2 kWh, à partir des 5 kWh d'électricité.

Si cette H2 liquide est reconverti en électricité dans une PAC avec un rendement de 50 %, alors **il ne reste que 1 kWh d'électricité restituée après stockage des 5 kWh par liquéfaction (20%), ou 1,25 kWh par compression à 700 bars (25%)**.

**En terme d'énergie "contenue" :**

**1 kg d'H2 = 11 Nm3 = 23,3 litres d'H2 à 700 bars** (arrondi à 25 litres) = **13,6 litres d'H2 liquide**.

(Rapport de 1,7 entre 700 bars et liquide)

**1 kg d'H2 contient 33 kWh d'énergie produit par 55 kWh d'électricité** (en pratique industrielle, le rendement est de 63% par électrolyse, **avant compression ou liquéfaction**).

**Un litre d'H2 liquide pèse 73,5 g et contient 2,4 kWh** (donc 4 litres H2 liquide = 9,6 kWh)

**Un litre d'H2 à 700 bars pèse 43 g et contient 1,4 kWh** (donc 7 litres H2 à 700 b = 9,8 kWh)

On en déduit approximativement en terme d'énergie « chaleur » :

**1 litre essence = 9 kWh = 3000 l d'H2 (à P atm) = 7 litres H2 / 700 b = 4 litres H2 liquide / -253°C**

Les arrondis peuvent être intégrés dans les pertes d'H2. Ce gaz a une fâcheuse tendance à s'échapper de ses contenants car la molécule d'H2 est très petite. Elle traverse l'acier et le plastique.

**Il faut environ 4 litres d'H2 à 700 bars pour parcourir (via une PAC) la même distance qu'avec 1 litre d'essence. Soit 28 l (x 43 g = 1,2 kg) pour 7 l d'essence pour parcourir 100 km.**

Par comparaison :

1 litre de <b>Butane</b> liquide (239 litres gazeux à 15°C / 1bar)	= <b>7,4 kWh</b> (13,7 kWh / kg)
1 litre de <b>Propane</b> liquide (311 litres " " " )	= <b>6,6 kWh</b> (13,8 kWh / kg)
1 litre <b>d'hydrogène liquide</b> (810 litres " " " )	= <b>2,4 kWh</b>
1 litre <b>d'hydrogène à 700 bars</b> (470 litres " " " )	= <b>1,4 kWh</b>
1 litre de <b>GPL liquide</b> (280 litres gazeux...)	= <b>7 kWh</b> (0,8 fois un litre d'essence,
environ 50% propane et 50% Butane, soit 13,7 kWh / kg)	
1 litre <b>GNL liquide</b> / - 162°C (réduction <b>GNV</b> x 600 ; 6,3 kWh /l) = <b>6,3 kWh</b>	
(GNL = 95% méthane (10 kWh / Nm3) ; densité liquide 0,42 ; <b>1 kg = 15 kWh</b>	

**En équivalent énergie** : 1 kg de gaz naturel véhicules (**GNV**) = 1,3 litre de SP95 = 1,15 litre de gazole = 1,67 litre de GPL. (1 litre / 200b = 3 kWh)

### III) Utilisation et stockage de l'H2 dans des véhicules.

Il y a deux manières d'utiliser l'H2 dans des véhicules.

1) Soit on utilise directement l'H2 dans un moteur à explosion conventionnel dit encore **Moteur à Combustion Interne (MCI)**. Avec un MCI, le rendement est de **25%** (25% de l'énergie de l'H2 contenu dans le réservoir sont récupérés pour faire avancer le véhicule, comme avec l'essence).

Ce procédé, bien que plus simple, semble aujourd'hui abandonné pour des raisons techniques (givrage, rendement,...)

2) Soit on transforme l'H2 en électricité dans une **Pile à Combustible (PAC)** pour faire tourner un moteur électrique. Avec une PAC, le rendement est de **50% à 60%**.

En fait, ces chiffres peuvent grandement varier suivant les conditions d'utilisation du véhicule (autoroute, ville, route de montagne,...), comme avec un véhicule à essence.

A ce stade du raisonnement, il apparaîtrait plus rentable de transformer l'H2 en électricité dans une PAC. Mais une PAC est chère.

En 2011, une PAC pour alimenter un moteur de 80 kW d'une voiture moyenne coûtait 40.000 € (5000 €/kW<sup>5</sup>). Elle ne coûterait plus que 4000€ à 10.000€<sup>6</sup> (60 \$/kW<sup>7</sup>)... si 500.000 voitures "PAC" étaient produites par an.

Donc, en attendant que le prix d'une PAC soit **divisé au moins par cinq** et que les problèmes de fiabilité (durée de vie de la PAC) soient résolus, **l'H2 a un avenir incertain pour encore de nombreuses années.**

Il y a aussi deux manières de **stocker** l'H2 dans un véhicule.

1) Soit on le **liquéfie à - 253°C** en utilisant au moins **35% de l'énergie stockée**<sup>8</sup>.

2) Soit on le compresse jusqu'à **700 bars** en utilisant **15% de l'énergie stockée pour réaliser cette compression.**

**Un litre d'H2 liquide** (73,5 g) contient seulement **2,4 kWh**. Mais pour l'obtenir, il aura fallu produire 0,8 Nm<sup>3</sup> d'H2 gazeux par électrolyse avec 3,8 kWh d'électricité (rendement = 63%) et ajouter encore 1 kWh juste pour le liquéfier. Soit au total 4,8 kWh pour obtenir un litre d'H2 liquide contenant 2,4 kWh.

Il y a donc une **perte de plus de 50%** à partir de la production d'électricité pour obtenir de l'H2 liquide, sans tenir compte des pertes de transport, de transfert et de stockage.

On pourrait croire qu'il vaudrait mieux utiliser l'H2 liquide qui prend moins de place. Mais, pour une même énergie emportée, l'H2 liquide coûte plus cher à fabriquer.

*"Pour liquéfier l'hydrogène<sup>9</sup>, l'énergie requise est encore plus importante surtout pour les petits liquéfacteurs. Toujours évaluée en perte de pouvoir énergétique cette dépense d'énergie va de **150% de perte (!)** pour les unités produisant quelques kg d'hydrogène liquide par heure à seulement **30% pour celles produisant au moins 1 tonne/heure**".*

Et, surtout, conserver l'H2 liquide à -253° ne s'effectue pas sans pertes. Il faut un réservoir de type « thermos ». Malgré son enveloppe isotherme, il s'évapore continuellement en bouillant. Pour une voiture (le volume et l'isolation du réservoir sont nécessairement réduits), **les pertes vont de 1 à 5% par jour**<sup>10</sup>. **En 15 jours, la moitié du réservoir peut s'être évaporée.** Ce qui diminue encore le rendement et augmente le coût d'utilisation.

**Compte tenu des fuites importantes d'H2 liquide et pour des raisons de coûts et d'utilisation courante, il semble préférable, aujourd'hui et dans un avenir « raisonnable », de choisir l'H2 comprimé à 700 b.**

**Une troisième possibilité "technique" est à mentionner : le stockage dans les hydrures.**

*"Le stockage de l'hydrogène dans les hydrures métalliques<sup>11</sup> est en rapport quantité stockée/volume du réservoir trois fois supérieur à celui du gaz comprimé et offre en cela de l'intérêt pour la voiture particulière. En revanche, en raison du poids élevé des hydrures métalliques, le pourcentage poids stocké/poids du réservoir, quelques 1%, est le plus défavorable de tous les modes de stockage. Concernant la distribution proprement dite, il n'est guère possible d'envisager un transfert direct car l'hydruration qui correspond au remplissage est très exothermique, et donc exige un refroidissement énergique du réservoir et de plus, c'est un processus physico-chimique lent. Un remplacement du réservoir vide par un plein pourrait être une meilleure solution à la condition, là encore, de disposer d'un équipement de manutention adapté au poids, 100 kg ou plus, des réservoirs à hydrures.*

*Le stockage dans les hydrures (peu développé et correspondant à beaucoup de cas particuliers) ne permet pas d'avancer des évaluations chiffrées sur les quantités d'énergie qu'il requiert. Mais sachant que l'hydrogène doit au préalable être comprimé et que pour le récupérer l'hydrure doit être chauffé, la quantité d'énergie à mettre en jeu sera intermédiaire entre celle que demandent la compression et la liquéfaction".*

<sup>5</sup> J.M Tarascon; Collège de France; Chaire de développement durable. "PAC et les différentes filières", 9 mars 2011.

<sup>6</sup> Ca dépend de la charge de platine à l'électrode (0,2 à 0,8 mg / cm<sup>2</sup>) et des cours mondiaux du platine (de 1000 € à 2000€ ces dernières années). Le cours était de 1325\$ / 31 g le 05 juillet 2013).

<sup>7</sup> F.A De Bruijn. "PEM fuel cell durability and cost" présenté en novembre 2009 à Oslo / Norvège.

<sup>8</sup> AFHYPAC : Etude technico-économique prospective sur le coût de l'hydrogène. Fiche 10 - avril 2006.

<sup>9</sup> Extrait de AFHYPAC, Fiche 4.5.1 juillet 2008; Chapitre IV: "Bilan de la distribution d'H2".

<sup>10</sup> Fiche 4.5.1 "Distribution pour les réservoirs à H2 liquide".

<sup>11</sup> Idem note 12

**La suite de ce document se concentre donc principalement sur la filière à 700 bars avec PAC.**

#### **IV) Le cas d'une voiture "moyenne".**

Pour une voiture moyenne avec "moteur à combustion interne" (MCI) consommant **7 litres d'essence par 100 km** (7 litres x 9 kWh = 63 kWh) avec un rendement de 27%, il reste 17 kWh d'énergie mécanique « aux roues ».

**1 kg d'H<sub>2</sub>** (contenant 33 kWh, ce qui représente un volume de 25 litres d'H<sub>2</sub> à 700 bars) **pour parcourir 100 km**, il reste aussi 17 kWh fournis "aux roues" avec un rendement global de 50% de la PAC et de la transmission.

En prenant en compte les **20% (minimum) de pertes de compression, transport, stockage**, en amont du véhicule, il faut donc produire **1,3 kg d'H<sub>2</sub>** nécessitant environ **70 kWh d'électricité** (1,3 x 55 kWh = 67,8 kWh) pour parcourir 100 km "à l'H<sub>2</sub>".

**Le rendement de la centrale électrique "jusqu'aux roues" est donc au final de 25 % pour un moteur électrique alimenté par un réservoir à 700 bars et une PAC** (17 kWh « aux roues » / 70 kWh d'électricité produits à l'origine = 24%).

Un calcul à partir des rendements successifs amène bien sûr globalement au même résultat : Electrolyse 63% x transport 90% x stockage (compression,..) 85% x PAC 55% x pertes électriques (batterie,...) 90% = 24%

#### **Long trajet de 600 km :**

Pour parcourir **600 km** sans ravitailler avec un véhicule "essence" moyen consommant "**7 litres au 100**", il faut un **réservoir d'essence de 42 l pesant 40 kg**<sup>12</sup>, quand il est plein.

Avec l'H<sub>2</sub>, c'est une autre histoire...

#### **En terme de poids.**

Ce qui pèse lourd, c'est l'enveloppe du réservoir d'H<sub>2</sub> à 700 b.

**Le réservoir complet de 6 kg d'H<sub>2</sub> à 700 b pèse 120 kg**<sup>13</sup> (3 bouteilles de 40 kg et structures incluant la batterie tampon) ce qui représente un surpoids de 80 kg par rapport à « l'essence » et ce surpoids ne diminue quasiment pas avec la consommation en cours de route puisque la **masse d'H<sub>2</sub>** ne représente que 6 kg, soit **5% du poids total** du réservoir.

#### **En terme de volume.**

6 kg H<sub>2</sub> x 23,3 l/kg = **150 l d'H<sub>2</sub> à 700 b**

Remarque : Les deux réservoirs de 6 kg d'H<sub>2</sub> (à 700 b ou H<sub>2</sub> liquide) ont un volume identique<sup>14</sup> d'environ **200 litres**<sup>15</sup> à cause de l'isolation pour l'H<sub>2</sub> liquide à - 253°C.

Le rendement d'une PAC (50% à 60%) étant deux fois meilleure que le rendement d'un MCI (25% à 30%), l'énergie contenue dans le réservoir peut être diminuée par deux, mais il faut tenir compte du poids et du volume propre au "contenant" pour obtenir le poids et le volume total...

#### **En résumé:**

**Par rapport à l'essence, pour parcourir 600 km, le réservoir d'hydrogène à 700 bars est près de cinq fois plus gros** (200 litres / 42 litres) **et trois fois plus lourd** (120 kg / 40 kg) **qu'un réservoir d'essence.**

On peut cependant encore l'insérer dans une voiture moyenne, même s'il y a forcément **moins de place disponible et de charge utile possible.**

#### **V) Conditionnement, transport et distribution de l'H<sub>2</sub>.**

<sup>12</sup> Densité de l'essence = 0,72 42 l x 0,72 = 31 kg, plus 9 kg de réservoir = 40 kg

<sup>13</sup> Fiche 9.1 "Stockage gazeux sous pression" : 30 g H<sub>2</sub> / litre de réservoir et 55 g H<sub>2</sub> / kg de réservoir.

<sup>14</sup> AFHYPAC, Mémento de l'H<sub>2</sub>, fiche 4, décembre 2011, Chapitre IV: Les performances

<sup>15</sup> Fiche 9.1 "Stockage gazeux sous pression" : 30 g H<sub>2</sub> / litre de réservoir à 700 b, et 55 g H<sub>2</sub> / kg de réservoir à 700 b.

L'hydrogène doit, comme tout autre produit, être conditionné, transporté, stocké et distribué. Tous ces procédés requièrent de l'énergie.

Dans l'économie **hydrocarbure** d'aujourd'hui **l'énergie perdue entre la source et le consommateur final est de 12% pour le pétrole, et 5% pour le gaz naturel.**

### Conditionnement.

Rappel : L'énergie requise pour la compression de l'hydrogène de la pression ambiante à une pression de **200 bars est de l'ordre de 7%** de l'énergie contenue dans le réservoir, elle est de **15% pour atteindre 700 bars et de 35% pour la liquéfaction.**

### Transport.

Le facteur actuel qui limite le transport de l'essence par camion-citerne est le poids du combustible transporté.

Cependant, pour l'hydrogène, **le facteur limitant est le volume.**

Pour obtenir l'équivalent énergétique « aux roues » livré par un camion-citerne d'essence, il faudrait 6 camions identiques d'hydrogène à 700 bars ou 3 camions citernes d'hydrogène liquéfié (un camion de 40 tonnes transporte 3,5 t d'H2 liquide maximum<sup>16</sup>).

En effet, si un litre d'essence (0,8 kg / 9 kWh) livré fourni 3 kWh « aux roues » des véhicules, alors il faut livrer 6 kWh d'H2 (180 g) contenus dans 6 litres de réservoir H2 à 700 bars pesant 3 kg.

De plus, il est commun de transporter les gaz à une pression de **200 bars (ce qui signifierait 22 camions) et de les livrer jusqu'à une pression de seulement 40 bars**, ce qui implique de **livrer seulement 80%** du contenu de la citerne.

Délivrer de l'hydrogène (transport, transfert, stockage, distribution) implique donc une consommation plus importante que le transport d'essence pour une même quantité d'énergie délivrée.

La quantité d'énergie nécessaire pour transporter de **l'essence** par camion est raisonnable (**2,5% du contenu énergétique livré à 600 km**).

En revanche, cette quantité d'énergie dépensée est très élevée pour le transport d'**hydrogène gazeux et liquide par camion** (respectivement **80% et 11% du contenu énergétique livré à 600 km**).

Le transport de l'hydrogène par camion-citerne est une proposition très douteuse.

Il reste la possibilité d'insertion d'H2 dans le réseau de gaz naturel ou de constructions de gazoducs dédiés qui requièrent des investissements élevés et soulèvent certains problèmes techniques tels que **les fuites dues à la plus petite taille de la molécule d'hydrogène** en comparaison du gaz naturel. **L'énergie dépensée pour son transport est aussi trois fois plus importante.**

*"La physique indique en effet que l'énergie nécessaire pour comprimer un gaz ne dépend pas du gaz, mais juste de la pression de départ et celle d'arrivée. Comprimer 1 m3 de méthane de 1 à 200 bars ou comprimer 1 m3 d'hydrogène de 1 à 200 bars demande exactement la même quantité d'énergie. Comme faire passer un gaz dans un tuyau c'est essentiellement le comprimer à intervalles réguliers, il en résulte que la dépense d'énergie pour le transport et le stockage sont essentiellement proportionnels au volume de gaz. Mais brûler 1 m3 de méthane et 1 m3 d'hydrogène ne donnent pas la même énergie !*

*Un m3 de méthane (gaz naturel) libère une énergie de 9,89 kWh (35,6 MJ) en brûlant, alors qu'un m3 d'hydrogène ne libère que 3 kWh (environ 10 MJ). A cause de cette caractéristique, intangible, **la dépense de transport sera donc au moins 3 fois plus importante, en proportion de l'énergie restituée, pour l'hydrogène que pour le méthane**, et pour ce dernier la dépense en transport, ramenée à l'énergie transportée, est déjà bien supérieure à ce qu'elle est pour le pétrole". (Site de J.M Jancovici; Que peut-on espérer des PAC; Août 2006).*

Cependant, l'AFHYPAC annonce que le transport par gazoduc serait **seulement 1,5 à 1,8 fois plus cher que le gaz naturel**<sup>17</sup> et que "l'hydrogène est considéré comme un vecteur d'énergie plus économique que l'électricité quand les distances sont supérieures à 1000 km<sup>18</sup>".

Pourquoi cette différence ? Où est l'erreur ?

<sup>16</sup> AFHYPAC mémento de l'H2, fiche 4.3, juillet 2011, page 7

<sup>17</sup> Mémento de l'H2 "Pourquoi l'H2 ?" Octobre 2006, page 8

<sup>18</sup> Idem, page 13



L'AFHYAPAC indique également que la dépense d'énergie d'H<sub>2</sub> par gazoduc est de 1,4% de l'énergie transporté chaque 150 km, pour alimenter les pompes hautes pression le long du réseau<sup>19</sup>

## Distribution.

Si un liquide peut être transféré d'une citerne pleine vers un réservoir vide sous l'action de la gravité, ce n'est pas le cas pour les gaz. Le transfert de l'hydrogène d'un réservoir vers une application (une voiture par exemple) nécessite 3% du contenu énergétique transféré. (Voir annexe 2 : Distribution pour les réservoirs à air comprimé).

### Distribution de l'H<sub>2</sub> à 700 bars

Il y a principalement deux manières d'envisager la production par électrolyse de l'H<sub>2</sub> et sa distribution vers les véhicules :

#### 1) Centralisé :

Quelques grosses usines d'électrolyse industrielle implantées près de centrales électriques produisent de l'H<sub>2</sub> qui est transporté par canalisations (pipe-lines) vers les stations-services (comme le gaz naturel). Construire un réseau dédié serait très coûteux mais s'il s'agit de remplacer le gaz naturel dans le futur, alors on peut envisager d'utiliser ce réseau devenu inutile pour distribuer l'H<sub>2</sub> sous quelques bars. La station comprimerait ce gaz à 700 b (ou plus) sur place avant distribution à la « pompe » (qui serait un « connecteur - distributeur - détendeur).

On peut mélanger de l'H<sub>2</sub> au gaz naturel et utiliser directement ce mélange ou procéder à sa séparation à l'arrivée, mais ce procédé est coûteux et se rajoute à un prix de l'H<sub>2</sub> déjà élevé. On peut raisonnablement estimer que 5 à 10% de l'H<sub>2</sub> est perdu à la livraison dans les canalisations et dans les fuites du stockage de la centrale de production et de la station-service. La dépense d'énergie est de 15% lors de la compression à 700 b sur le lieu de distribution.

Des solutions centralisées de productions massives plus économiques, comme le craquage thermo-chimique à haute température de l'eau couplé à une centrale nucléaire dédiée (Very High Temperature Reactor : VHTR), pourront certainement être mises en œuvre à plus longue échéance (50 ans et plus) lorsque le réseau de gaz naturel sera partiellement disponible pour distribuer l'H<sub>2</sub>.

#### 2) Décentralisé :

L'électricité est transportée jusqu'aux stations-services (plus facile à transporter que le gaz) et l'électrolyse s'effectue sur place.

Des électrolyseurs récents fournissent l'H<sub>2</sub> directement à 700 bars mais le nombre de stations-service risque d'être limité.

- D'une part, leur prix d'achat élevé (plusieurs centaines de milliers d'euros) nécessite une production importante pour amortir l'investissement. Ce prix empêchera la production / compression à domicile qui est pourtant techniquement possible mais pas économiquement viable.

- D'autre part, si on veut une production compatible avec les besoins d'une station-service, leur volume est important. **Chaque électrolyseur est une "petite usine" et il en faudrait plusieurs.**

Dans le cas d'un électrolyseur ELT, par exemple, (760 Nm<sup>3</sup> / heure à 30 bars), il en faudrait cinq pour alimenter une station-service livrant 7 kg d'H<sub>2</sub> par véhicules (autonomie de 600 km) à 1000 véhicules par jour<sup>20</sup>.

Pour produire ces 7.000 kg d'H<sub>2</sub> comprimés à 700 bars par jour avec un rendement de 50% (il faut 66 kWh d'électricité pour produire 1 kg d'H<sub>2</sub> à 700 bars), il faut rien moins que 460 MWh, soit une alimentation d'une puissance de 20 MW (pour une seule station-service) fonctionnant 24 heures par jour.

<sup>19</sup> Fiche 4.5.1 "Bilan énergétique de la distribution de l'H<sub>2</sub>."

<sup>20</sup> 760 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> => 69 kg H<sub>2</sub> x 24 heures / jour => 1656 kg / jour x 5 électrolyseurs = 8280 kg (soit une moyenne de 7.000 kg / jour livrées en tenant compte des pertes, maintenances et réparations)

ELT - Elektrolyse Technik GmbH, (Allemagne) : électrolyseurs de 330 à 760 Nm<sup>3</sup>/h, de 1 à 30 bars. <http://www.elektrolyse.de>

Il y a actuellement plus de 10.000 stations-services « pétrole » en France.

Le fonctionnement de seulement 1000 stations-services hydrogène (20.000 MW) absorberait la puissance d'une douzaine de réacteurs nucléaires de nouvelle génération EPR<sup>21</sup> d'une puissance de 1600 MW.

**En résumé** : Malgré toutes ces difficultés, si l'économie H2 voit le jour dans quelques dizaines d'années, elle commencera probablement par emprunter la filière **700 bars (ou plus) par électrolyse décentralisée** sur les lieux de vente aux particuliers car **il est plus facile de transporter l'électricité que l'H2**.

## VI) Coûts

En France, un kWh d'origine nucléaire coûte entre 4 et 5 c€ à la production. Il est vendu 7 c€ HT après transport et distribution aux industriels, et 15 c€ avec les taxes (TTC) aux particuliers.

Hypothèse : la production de l'H2 par électrolyse est principalement décentralisée. Le prix de l'électricité hors taxes après transport, soit 7 c€ est donc la base de référence pour la production d'H2 dans les stations-services.

Selon le Mémento de l'H2 de l'AFHYPAC<sup>22</sup>, le prix de revient de l'H2 (PH2) produit par électrolyse de l'eau (en 2004) est de :

$$PH2 = 1,25 \times \text{prix de l'électricité} + 5,5 \text{ (€/GJ)} \quad (1 \text{ GJ} = 278 \text{ kWh})$$

On en déduit :

$$PH2 = 1,25 \times 0,07 \text{ (c€/kWh)} \times 278 \text{ (kWh)} + 5,5 \text{ (€/GJ)}$$

D'où :

$$PH2 = 30 \text{ € /GJ} = 10,8 \text{ c€/kWh} = 3,6 \text{ €/kg}$$

Des unités industrielles d'électrolyse alcaline de grandes dimensions permettent de produire l'H2 à "environ 3 €/kg<sup>23</sup>".

En estimant à 6,1 c€ /kWh<sup>24</sup> en 2013, le coût de la distribution d'H2 comprimé à la station service, on aboutit à un prix à la "pompe" de 10,8 + 6,1 = 16,9 c€/kWh d'H2.

Pour parcourir **100 km**, avec une voiture "moyenne" (7 litres d'essence au 100 km, soit avec un rendement moteur de 30%), 9 kWh x 7 litres x 30% = 20 kWh « aux roues ») il faut 1,2 kg d'H2 (40 kWh avec un rendement PAC de 50%).

Il en coûtera donc : 40 kWh x 16,9 c€/kWh = 6,8 € HT de coût d'H2 livrée dans le réservoir de la voiture.

**A ce coût d'environ 7 €, il faut rajouter les taxes<sup>25</sup> en vigueur actuellement (5,6 € pour 7 litres d'essence).** Sinon, qui paie les recettes fiscales de l'état dont a besoin la collectivité ?

Il en coûterait donc aujourd'hui au **minimum (7 + 5,6) 12,6 € TTC** pour faire 100 km avec de l'H2 issu d'une électrolyse industrielle, alors que **7 litres d'essence à 1,5 € TTC coûtent 10,5 € ... (et 14 € à 2 € le litre)**. Il faudrait atteindre au minimum 2,5 € le litre (7 x 2,5 = 17,5 €) pour commencer être financièrement concurrentiel, compte tenu des inconvénients (poids, volume, autonomie, recharges, prix du véhicule,...).

En revanche, **avec une station locale** (comme la station de la Motte-Servolex, 1 million d'euros pour 40 kg d'H2 par jour comprimés à 700 bars), le coût de l'H2 peut notablement grimper si on veut rentabiliser l'investissement.

En supposant un coût total de 1,2 M€ sur 10 ans (maintenance, fonctionnement, intérêts,...) et une production de 12 tonnes d'H2 (40 kg/jour x 300 jours x 10 ans), **il faut encore ajouter 10 € par kg d'H2 pour amortir l'investissement financier !**

**Le kg d'H2 passerait alors à près de 23 €/kg (12,6 + 10), soit environ 27 € pour 1,2 kg d'H2 pour 100 km (au lieu de 11€ pour l'essence), sans tenir compte des bénéfices qu'escomptent peut-être les intervenants...**

<sup>21</sup> European Pressurized reactor

<sup>22</sup> Fiche 10, page 4 : PH2 = 1,25 x P électricité + 7,10 (\$/GJ)

<sup>23</sup> AFHYPAC Mémento de l'H2, fiche 3.2.2, janvier 2012; page 6.

<sup>24</sup> Les tableaux 3, 4 et 5 de la fiche 10 donnent 19,4 \$/GJ en 2005.

<sup>25</sup> Taxes actuelles maintenues : 0,8€/ litre d'essence (33\$/GJ)

## L'économie H2 dans l'avenir :

Au mieux, l'H2 pourrait entrer financièrement en concurrence avec le pétrole si la spéculation (ou la rareté) sur ce produit l'amenait à dépasser **300 \$ / baril**.

Avec un baril à 100\$, le litre d'essence est vendu 1,6 € à la pompe. Les "frais fixes" (taxes, transport, raffinage,...) représentent 1 € et la "matière première" ne représente que 0,6 € le litre<sup>26</sup>.

Si le baril venait à tripler (300\$), le prix à la pompe serait alors de 2,8 € le litre (1 € + 1,8 €), toutes choses égales par ailleurs. Le montant des taxes peut être stabilisé et il n'est pas plus coûteux de raffiner et de transporter un pétrole à 100\$ le baril qu'à 300\$.

### **Production massive d'H2 ?**

Il resterait encore cependant les inconvénients de la **production massive d'H2 par électrolyse** qui nécessiterait une **production supplémentaire importante d'électricité** non encore envisagée.

**Il faudrait en effet plus que doubler la production d'électricité nationale actuelle (500 TWh) pour alimenter en H2 le parc de 30 millions de véhicules** (voitures, camions, utilitaires, bus,...).

Ce dernier consomme **50 millions de tep (600 TWh)** par an en France, soit **150 TWh d'énergie mécanique appliquée "aux roues"** (600 TWh x 25%).

Avec un rendement de 25% entre la production d'électricité et l'application de sa puissance "aux roues" par l'intermédiaire de l'H2 (vu précédemment au paragraphe "En stockage de l'électricité ?"), il faudrait donc produire **600 TWh supplémentaires d'électricité en France pour fabriquer l'H2 nécessaire à la mobilité** en France, soit plus que doubler le parc nucléaire actuel dont la production annuelle est de « seulement » 400 TWh.

La production annuelle d'électricité en France devrait donc passer de 500 TWh aujourd'hui à plus de **1100 TWh** (500 + 600).

Aux USA (350 millions de véhicules), il faudrait multiplier par neuf le parc actuel de 100 réacteurs nucléaires pour produire 7000 TWh d'électricité supplémentaire avec 900 réacteurs (8 TWh par an par réacteur).

Quant à alimenter le milliard de véhicules qui circulent dans le monde,....

Cependant, à 200 \$ ou 300 \$ le baril, des réserves de pétrole moins accessibles ou abandonnées vont devenir rentables. Les investissements dans la recherche vont augmenter et les découvertes de nouveaux gisements de pétrole et de gaz aussi.

**Remarque :** avec des VE à batteries, la production d'électricité serait divisée par trois puisque le rendement entre la production d'électricité à la sortie de la centrale électrique et l'application de l'énergie mécanique "aux roues" est de 75% dans ce cas.

## Conclusion

Le vecteur d'énergie idéal pour effectuer le transfert d'énergie de sa source de production vers son lieu d'utilisation doit rester liquide à la pression atmosphérique, ou sous faible pression (quelques bars). L'essence et les GPL (gaz de pétrole liquéfié) tels que le Butane, le Propane ou le GPL carburant (mélange de Butane et de Propane) sont de bons exemples.

Leur usage énergétique est très répandu non seulement parce qu'ils sont abondants pour encore quelques dizaines d'années (60 à 100 ans) mais aussi parce que leurs propriétés physiques les rendent faciles à manier, conditionner, transporter, stocker...

Leur remplacement ne sera pas simple dans les véhicules...

L'usage énergétique de l'H2 est quasiment inexistant (1% pour les fusées) parce qu'il est difficile à manier, conditionner, transporter, stocker... ce qui le rend peu pratique et très coûteux à exploiter.

Dans ces conditions, l'H2 ne concurrencera pas le pétrole jusqu'à sa disparition, à moins que son prix élevé le rende inabordable (au-dessus de 300\$ le baril).

<sup>26</sup> <http://tempsreel.nouvelobs.com/economie/20120828.OBS0599/carburants-sur-1-litre-d-essence-qui-touche-quoi.html>.  
Raffinage 0,10 c€/L ; Distribution 0,10 c€/L ; Taxes 0,80 c€/L (Chiffres arrondis).

Bien que n'émettant pas ou peu de pollution et de CO<sub>2</sub>, le marché de l'H<sub>2</sub> ne se développera pas avant plusieurs dizaines d'années (50 ans ou plus), en dehors d'opérations "publicitaires" ou "financières", plus ou moins bidons, subventionnées par les contribuables.

L'H<sub>2</sub> utilisable par les particuliers restera très difficile à mettre en œuvre et probablement très cher aussi. De plus, il n'apporte pratiquement aucun confort supplémentaire puisque les derniers VE à batteries permettent une autonomie d'environ 400 km avec une possibilité de recharge rapide (ce qui reste exceptionnel et anecdotique) et surtout qui permet de recharger à domicile.

**Mais surtout, l'économie hydrogène consommera en amont 75% à 90 % de l'énergie produite (électricité ou chaleur) pour n'en livrer que 10% à 25% à l'utilisateur final à un coût prohibitif, et pour longtemps.**

**Il faudra vraiment en avoir besoin pour se payer une telle perte d'énergie et donc ... d'argent.**

Produire une telle quantité d'électricité (ou de chaleur à 1000 °C pour le craquage de l'H<sub>2</sub>) afin de remplacer les usages du pétrole et du gaz pour la mobilité semble hors de portée du monde pour le siècle en cours, même pour les pays les plus industrialisés, alors que les VE "batteries" demandent une production d'électricité trois fois inférieure.

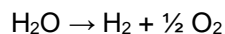
**L'H<sub>2</sub> énergie est une solution d'avenir qui risque malheureusement de le rester longtemps !**

## Annexe 2

### 1) Obtenir de l'hydrogène par craquage de l'eau<sup>27</sup>

Le **craquage de l'eau** est un procédé permettant l'obtention d'hydrogène et d'oxygène, par électrolyse ou en dissociant par la chaleur les atomes composant la molécule d'eau H<sub>2</sub>O. C'est une réaction thermochimique se produisant à haute température (entre 850 °C et 900 °C), ou en phase gazeuse à 2,500 °C - 3,000 °C<sup>1</sup>

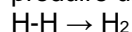
#### Bilan de la décomposition d'une molécule d'eau :



La molécule d'eau H<sub>2</sub>O est constituée de 2 liaisons O-H et chaque liaison a une énergie molaire de 460 kJ, ce qui représente 2 x 460 = 920 kJ pour une mole d'eau.

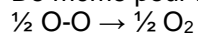
D'où la rupture des liaisons O-H des molécules d'eau pour une mole d'eau nécessite l'apport de 920 kJ (côté gauche de l'équation).

Cependant la recombinaison des atomes d'hydrogène H en H<sub>2</sub> (hydrogène gazeux) va produire un apport d'énergie :



Cette recombinaison apporte 432 kJ.

De même pour la recombinaison des atomes d'oxygène :



Cette réaction va libérer 1/2 x 494 kJ soit 247 kJ.

Solde de l'opération :

$$920 - 432 - 247 = 241 \text{ kJ}$$

Ainsi la fabrication de 2 grammes d'hydrogène par craquage d'une mole d'eau (sans tenir compte des pertes) nécessite l'apport de 241 kJ, soit 120 500 kJ pour fabriquer 1 kg d'hydrogène ou encore 33,5 kWh/kg<sup>28</sup> d'hydrogène. C'est cette énergie fournie par une autre source d'énergie qui est restituée lorsque l'H<sub>2</sub> se recombine à l'oxygène de l'air pour reformer de l'eau. La boucle est bouclée.

### **2) Distribution pour les réservoirs à hydrogène comprimé**

(Extrait du site AFHYPAC / Mémento de l'hydrogène/ Fiche 4.5.1 juillet 2008).

<sup>27</sup> [http://fr.wikipedia.org/wiki/Craquage\\_de\\_l'eau](http://fr.wikipedia.org/wiki/Craquage_de_l'eau)

<sup>28</sup> Cette valeur ne tient pas compte de l'énergie supplémentaire, nécessaire pour amener l'eau à la température de craquage, dont une partie est forcément gaspillée.

Si la manipulation du gaz sous pression est à ce jour parfaitement maîtrisée, son transfert à répétition dans une station-service demande des aménagements particuliers. Alors qu'un liquide s'écoule aisément d'un récipient à l'autre par gravité ou par l'action d'une pompe volumétrique, un gaz ne se déplace en grande quantité que lorsqu'une différence de pression notable – plusieurs dizaine de bars – est maintenue entre l'amont et l'aval.

Pour remplir un réservoir il existe deux possibilités :

- effectuer directement le transfert à l'aide d'un compresseur, cela exige un minimum de continuité et de stabilité de fonctionnement en particulier de débit, une situation peu compatible avec les nombreux remplissages successifs à réaliser,

- effectuer le transfert à partir d'une réserve en surpression. A priori, une meilleure solution. Mais elle est limitée car elle exige que la pression du gaz dans la réserve reste toujours supérieure à la pression finale de remplissage des véhicules, c'est à dire une réserve à haute pression ayant un grand volume.

C'est en fait la superposition des deux opérations qui convient le mieux : l'hydrogène de la réserve est maintenu en permanence à une pression supérieure à la pression de remplissage grâce à un compresseur commandé par un automatisme régulateur de pression. Le compresseur est lui alimenté par une autre réserve qui pourra être vidée (c. à d. sa pression diminuée jusqu'à la limite inférieure de la pression d'aspiration du compresseur, de l'ordre d'une dizaine de bars).

Lors de son remplissage, le réservoir s'échauffe car la pression de l'hydrogène y augmente suffisamment rapidement pour que cette compression soit quasi-adiabatique (les échanges de chaleur n'ayant pas le temps de se produire). L'élévation de température correspondante dépend surtout de la durée du remplissage. Elle peut être de plusieurs dizaines de degrés voire plus. C'est pourquoi la maîtrise et le contrôle rigoureux du transfert sont nécessaires pour éviter la détérioration du réservoir composite et garantir la quantité de gaz délivrée.

En effet, lorsque la température sera revenue à l'ambiante, la pression du gaz aura diminué et pourrait être nettement inférieure à celle initialement prévue. C'est une gêne pour un mode de stockage déjà limité, notamment pour les voitures particulières qui ont peu de grands volumes disponibles.

### **Complément du 13 octobre 2019 :**

#### **Caractéristiques de la voiture à hydrogène Nexo de Hyundai :**

- moteur électrique d'une puissance de 120 kW (163 ch),
- 1,8 tonne,
- batterie de **1,5 kWh** (15 kg ?) d'une puissance de 40 kW,
- PAC de rendement 60% (déclaré) de 95 kW (masse  $95 \times 3\text{kg} / \text{kW} = 285 \text{ kg}$ ) qui s'additionnent temporairement (environ 2 minutes) aux 40 kW de la batterie pour les pointes d'accélération (40 kW / 60 mn = 0,66 kWh/mn), d'où une puissance totale déclarée de 135 kW,
- garantie PAC (qui recouvre quoi ?) est de 10 ans et 160.000 km,
- le plein H2 est censé se faire en 5 mn sur une borne à 700 bars (?),
- réservoir de **156,6 litres d'H2 (6,33 kg)** répartis en 3 réservoirs de 52 litres (total environ 220 litres et 120 kg),
- consomme 1 kg H2 / 100 km,
- coffre de 460 litres.

C'est une belle vitrine technologique du savoir-faire Hyundai et un outil marketing publicitaire pour verdir son image.

# L'hydrogène, cet hallucinogène

Uniquement annexes 1 et 2 actualisées le 04 janvier 2021

## Annexe 1

Hydrogène cet hallucinogène / n°20

### I) Production de l'H<sub>2</sub>.

Si beaucoup d'attention est portée sur l'utilisation de l'hydrogène dans diverses applications, beaucoup moins d'attention est portée aux procédés de sa production en amont.

On peut produire de l'H<sub>2</sub> d'au moins une dizaine de façons, par exemple :

- Soit à partir de charbon par chauffage (ce qui a été fait et ça s'appelait le gaz de ville jusque dans les années 60).
- Soit à partir de gaz naturel (composé principalement de méthane) avec de la vapeur d'eau. C'est la méthode industrielle la plus employée dite de reformage. Plus de 90% de la production mondiale d'H<sub>2</sub> est issue du gaz naturel par cette méthode. Il est à noter que la quantité de CO<sub>2</sub> émise par cette filière est supérieure à celle émise par la combustion directe de ce gaz (dans un moteur par exemple). L'H<sub>2</sub> actuel issu du méthane n'est donc pas écologique.
- Soit à partir de biomasse par gazéification. La biomasse pourra représenter un appoint local dans certains pays mais il reste des difficultés techniques de mise en œuvre et surtout d'approvisionnement à très grande échelle.
- Soit à partir de micro-organismes photosynthétiques (production en laboratoire mais jamais à grande échelle).
- Soit à partir d'eau, et il existe trois méthodes :
  - o par électrolyse (c'est aujourd'hui moins de 1% de l'H<sub>2</sub> fabriqué dans le monde),
  - o par thermolyse ou craquage thermochimique de la molécule d'eau à très haute température (minimum 900°C jusqu'à 3000°C) envisagé dans certaines futures centrales nucléaires VHTR (Very High Temperature Reactor),
  - o et aussi par photo-électrolyse sur un semi-conducteur.

### II) Chiffres et ordres de grandeur.

Afin d'éviter le travers de ceux qui, par intérêt ou par naïveté, sautent comme des cabris en criant « l'hydrogène, l'hydrogène », il est nécessaire de connaître quelques chiffres pour **avoir à l'esprit des ordres de grandeur** ... qui doucent les ardeurs.

**Un kg de pétrole contient 12 kWh** d'énergie sous forme de chaleur quand on le fait brûler. Le pétrole (ainsi que ses dérivés l'essence, le diesel,...) est un produit miraculeux car c'est un condensé fabuleux d'énergie qui a surtout la bonne idée d'être **liquide à la pression et température ambiante et donc facilement stockable et manipulable** (ce qui n'est pas le cas par exemple du gaz naturel et surtout de l'hydrogène).

**Un litre d'essence pèse environ 0,7 kg** (densité = 0,72) **et contient 9 kWh** (en fait, 8,8 kWh mais on retiendra 9 kWh). Dans la suite du document, le terme "essence" regroupe tous les carburants issus du pétrole (essence, gas-oil, kérosène,...)

Dans la pratique d'une électrolyse industrielle, il faut **11 litre d'eau et 55 kWh d'électricité**<sup>1</sup> pour fabriquer un kg d'**H<sub>2</sub> qui contient 33 kWh** d'énergie (rendement de 60% de l'électrolyse).

Mais il faut jusqu'à **70 kWh** d'électricité pour comprimer cette hydrogène à 700 bars et le livrer.

Via une PAC, une voiture moyenne peut parcourir 100 km avec environ 1,2 kg d'H<sub>2</sub>.

<sup>1</sup> AFHYPAC : Mémento de l'hydrogène. Fiche 3-2-1 mai 2013.

Rappel : 1000 litres d'H2 gazeux à la pression atmosphérique à 0°C (1 m3 pèse 0,1 kg) contiennent autant d'énergie que... **0,3 litre d'essence,**  
**et 1 kg H2 est équivalent à 2,75 kg d'équivalent chaleur pétrole.**

La densité d'énergie par volume de l'H2 est faible à la pression atmosphérique (3 kWh / m3).  
Pour diminuer ce grand volume encombrant et contenant peu d'énergie, on comprime ce gaz jusqu'à **700 bars**. On peut aussi le liquéfier à **-253°C**.

Ces deux opérations « coûtent » de l'énergie, et consomment respectivement **15% et 35%** de l'énergie contenue au départ.

Ainsi, comprimé à 700 bars, sur les 3 kWh, il ne reste plus que 2,55 kWh, et après liquéfaction, il ne reste que 2 kWh, à partir des 5 kWh d'électricité.

Si cette H2 liquide est reconverti en électricité dans une PAC avec un rendement de 50 %, alors **il ne reste que 1 kWh d'électricité restituée après stockage des 5 kWh par liquéfaction (20%), ou 1,25 kWh par compression à 700 bars (25%).**

**En terme d'énergie "contenue" :**

**1 kg d'H2 = 11 Nm3 = 23,3 litres d'H2 à 700 bars** (arrondi à 25 litres) = **13,6 litres d'H2 liquide.**

(Rapport de 1,7 entre 700 bars et liquide)

**1 kg d'H2 contient 33 kWh d'énergie produit par 55 kWh d'électricité** (en pratique industrielle, le rendement est de 63% par électrolyse, **avant compression ou liquéfaction**).

**Un litre d'H2 liquide pèse 73,5 g et contient 2,4 kWh** (donc 4 litres H2 liquide = 9,6 kWh)

**Un litre d'H2 à 700 bars pèse 43 g et contient 1,4 kWh** (donc 7 litres H2 à 700 b = 9,8 kWh)

On en déduit approximativement en terme d'énergie « chaleur » :

**1 litre essence = 9 kWh = 3000 l d'H2 (à P atm) = 7 litres H2 / 700 b = 4 litres H2 liquide / -253°C**

Les arrondis peuvent être intégrés dans les pertes d'H2. Ce gaz a une fâcheuse tendance à s'échapper de ses contenants car la molécule d'H2 est très petite. Elle traverse l'acier et le plastique.

**Il faut environ 4 litres d'H2 à 700 bars pour parcourir (via une PAC) la même distance qu'avec 1 litre d'essence. Soit 28 l (x 43 g = 1,2 kg) pour 7 l d'essence pour parcourir 100 km.**

Par comparaison :

1 litre de <b>Butane</b> liquide (239 litres gazeux à 15°C / 1bar)	= <b>7,4 kWh</b> (13,7 kWh / kg)
1 litre de <b>Propane</b> liquide (311 litres " " " )	= <b>6,6 kWh</b> (13,8 kWh / kg)
1 litre <b>d'hydrogène liquide</b> (810 litres " " " )	= <b>2,4 kWh</b>
1 litre <b>d'hydrogène à 700 bars</b> (470 litres " " " )	= <b>1,4 kWh</b>
1 litre de <b>GPL liquide</b> (280 litres gazeux...)	= <b>7 kWh</b> (0,8 fois un litre d'essence,
environ 50% propane et 50% Butane, soit 13,7 kWh / kg)	
1 litre <b>GNL liquide</b> / - <b>162°C</b> (réduction <b>GNV</b> x 600 ; 6,3 kWh / l) =	<b>6,3 kWh</b>
(GNL = 95% méthane (10 kWh / Nm3) ; densité liquide 0,42 ; <b>1 kg = 15 kWh</b>	

**En équivalent énergie** : 1 kg de gaz naturel véhicules (**GNV**) = 1,3 litre de SP95 = 1,15 litre de gazole = 1,67 litre de GPL. (1 litre / 200b = 3 kWh)

### **III) Utilisation et stockage de l'H2 dans des véhicules.**

Il y a deux manières d'utiliser l'H2 dans des véhicules.

1) Soit on utilise directement l'H2 dans un moteur à explosion conventionnel dit encore **Moteur à Combustion Interne (MCI)**. Avec un MCI, le rendement est de **25%** (25% de l'énergie de l'H2 contenu dans le réservoir sont récupérés pour faire avancer le véhicule, comme avec l'essence).  
Ce procédé, bien que plus simple, semble aujourd'hui abandonné pour des raisons techniques (givrage, rendement,...)

2) Soit on transforme l'H2 en électricité dans une **Pile à Combustible (PAC)** pour faire tourner un moteur électrique. Avec une PAC, le rendement est de **50% à 60%**.

En fait, ces chiffres peuvent grandement varier suivant les conditions d'utilisation du véhicule (autoroute, ville, route de montagne,...), comme avec un véhicule à essence.

A ce stade du raisonnement, il apparaîtrait plus rentable de transformer l'H2 en électricité dans une PAC. Mais une PAC est chère.

En 2011, une PAC pour alimenter un moteur de 80 kW d'une voiture moyenne coûtait 40.000 € (5000 €/kW<sup>2</sup>). Elle ne coûterait plus que 4000€ à 10.000€<sup>3</sup> (60 \$/kW<sup>4</sup>)... si 500.000 voitures "PAC" étaient produites par an.

Donc, en attendant que le prix d'une PAC soit **divisé au moins par cinq** et que les problèmes de fiabilité (durée de vie de la PAC) soient résolus, **l'H2 a un avenir incertain pour encore de nombreuses années.**

Il y a aussi deux manières de **stocker** l'H2 dans un véhicule.

1) Soit on le **liquéfie à - 253°C** en utilisant au moins **35% de l'énergie stockée**<sup>5</sup>.

2) Soit on le compresse jusqu'à **700 bars** en utilisant **15% de l'énergie stockée pour réaliser cette compression.**

Un litre d'**H2 liquide** (73,5 g) contient seulement **2,4 kWh**. Mais pour l'obtenir, il aura fallu produire 0,8 Nm<sup>3</sup> d'H2 gazeux par électrolyse avec 3,8 kWh d'électricité (rendement = 63%) et ajouter encore 1 kWh juste pour le liquéfier. Soit au total 4,8 kWh pour obtenir un litre d'H2 liquide contenant 2,4 kWh.

Il y a donc une **perte de plus de 50%** à partir de la production d'électricité pour obtenir de l'H2 liquide, sans tenir compte des pertes de transport, de transfert et de stockage.

On pourrait croire qu'il vaudrait mieux utiliser l'H2 liquide qui prend moins de place. Mais, pour une même énergie emportée, l'H2 liquide coûte plus cher à fabriquer.

*"Pour liquéfier l'hydrogène<sup>6</sup>, l'énergie requise est encore plus importante surtout pour les petits liquéfacteurs. Toujours évaluée en perte de pouvoir énergétique cette dépense d'énergie va de **150% de perte (!)** pour les unités produisant quelques kg d'hydrogène liquide par heure à seulement **30% pour celles produisant au moins 1 tonne/heure**".*

Et, surtout, conserver l'H2 liquide à -253° ne s'effectue pas sans pertes. Il faut un réservoir de type « thermos ». Malgré son enveloppe isotherme, il s'évapore continuellement en bouillant. Pour une voiture (le volume et l'isolation du réservoir sont nécessairement réduits), **les pertes vont de 1 à 5% par jour**<sup>7</sup>. **En 15 jours, la moitié du réservoir peut s'être évaporée.** Ce qui diminue encore le rendement et augmente le coût d'utilisation.

**Compte tenu des fuites importantes d'H2 liquide et pour des raisons de coûts et d'utilisation courante, il semble préférable, aujourd'hui et dans un avenir « raisonnable », de choisir l'H2 comprimé à 700 b.**

**Une troisième possibilité "technique" est à mentionner: le stockage dans les hydrures.**

*"Le stockage de l'hydrogène dans les hydrures métalliques<sup>8</sup> est en rapport quantité stockée/volume du réservoir trois fois supérieur à celui du gaz comprimé et offre en cela de l'intérêt pour la voiture particulière. En revanche, en raison du poids élevé des hydrures métalliques, le pourcentage poids stocké/poids du réservoir, quelques 1%, est le plus défavorable de tous les modes de stockage.*

*Concernant la distribution proprement dite, il n'est guère possible d'envisager un transfert direct car l'hydruration qui correspond au remplissage est très exothermique, et donc exige un refroidissement énergétique du réservoir et de plus, c'est un processus physico-chimique lent. Un remplacement du réservoir vide par un plein pourrait être une meilleure solution à la condition, là encore, de disposer d'un équipement de manutention adapté au poids, 100 kg ou plus, des réservoirs à hydrures.*

<sup>2</sup> J.M Tarascon; Collège de France; Chaire de développement durable. "PAC et les différentes filières", 9 mars 2011.

<sup>3</sup> Ca dépend de la charge de platine à l'électrode (0,2 à 0,8 mg / cm<sup>2</sup>) et des cours mondiaux du platine (de 1000 € à 2000€ ces dernières années). Le cours était de 1325\$ / 31 g le 05 juillet 2013).

<sup>4</sup> F.A De Bruijn. "PEM fuel cell durability and cost" présenté en novembre 2009 à Oslo / Norvège.

<sup>5</sup> AFHYPAC : Etude technico-économique prospective sur le coût de l'hydrogène. Fiche 10 - avril 2006.

<sup>6</sup> Extrait de AFHYPAC, Fiche 4.5.1 juillet 2008; Chapitre IV: "Bilan de la distribution d'H2".

<sup>7</sup> Fiche 4.5.1 "Distribution pour les réservoirs à H2 liquide".

<sup>8</sup> Idem note 12



*Le stockage dans les hydrures (peu développé et correspondant à beaucoup de cas particuliers) ne permet pas d'avancer des évaluations chiffrées sur les quantités d'énergie qu'il requiert. Mais sachant que l'hydrogène doit au préalable être comprimé et que pour le récupérer l'hydrure doit être chauffé, la quantité d'énergie à mettre en jeu sera intermédiaire entre celle que demandent la compression et la liquéfaction".*

**La suite de ce document se concentre donc principalement sur la filière à 700 bars avec PAC.**

#### **IV) Le cas d'une voiture "moyenne".**

Pour une voiture moyenne avec "moteur à combustion interne" (MCI) consommant **7 litres d'essence par 100 km** (7 litres x 9 kWh = 63 kWh) avec un rendement de 27%, il reste 17 kWh d'énergie mécanique « aux roues ».

**1 kg d'H<sub>2</sub>** (contenant 33 kWh, ce qui représente un volume de 25 litres d'H<sub>2</sub> à 700 bars) **pour parcourir 100 km**, il reste aussi 17 kWh fournis "aux roues" avec un rendement global de 50% de la PAC et de la transmission.

En prenant en compte les **20% (minimum) de pertes de compression, transport, stockage**, en amont du véhicule, il faut donc produire **1,3 kg d'H<sub>2</sub>** nécessitant environ **70 kWh d'électricité** (1,3 x 55 kWh = 67,8 kWh) pour parcourir 100 km "à l'H<sub>2</sub>".

**Le rendement de la centrale électrique "jusqu'aux roues" est donc au final de 25 % pour un moteur électrique alimenté par un réservoir à 700 bars et une PAC** (17 kWh « aux roues » / 70 kWh d'électricité produits à l'origine = 24%).

Un calcul à partir des rendements successifs amène bien sûr globalement au même résultat : Electrolyse 63% x transport 90% x stockage (compression,...) 85% x PAC 55% x pertes électriques (batterie,...) 90% = 24%

#### **Long trajet de 600 km :**

Pour parcourir **600 km** sans ravitailler avec un véhicule "essence" moyen consommant " **7 litres au 100"**, il faut un **réservoir d'essence de 42 l pesant 40 kg<sup>9</sup>**, quand il est plein.

Avec l'H<sub>2</sub>, c'est une autre histoire...

#### **En terme de poids.**

Ce qui pèse lourd, c'est l'enveloppe du réservoir d'H<sub>2</sub> à 700 b.

**Le réservoir complet de 6 kg d'H<sub>2</sub> à 700 b pèse 120 kg<sup>10</sup>** (3 bouteilles de 40 kg et structures incluant la batterie tampon) ce qui représente un surpoids de 80 kg par rapport à « l'essence » et ce surpoids ne diminue quasiment pas avec la consommation en cours de route puisque la **masse d'H<sub>2</sub>** ne représente que 6 kg, soit **5% du poids total** du réservoir.

#### **En terme de volume.**

6 kg H<sub>2</sub> x 23,3 l/kg = **150 l d'H<sub>2</sub> à 700 b**

Remarque : Les deux réservoirs de 6 kg d'H<sub>2</sub> (à 700 b ou H<sub>2</sub> liquide) ont un volume identique<sup>11</sup> d'environ **200 litres<sup>12</sup>** à cause de l'isolation pour l'H<sub>2</sub> liquide à - 253°C.

Le rendement d'une PAC (50% à 60%) étant deux fois meilleure que le rendement d'un MCI (25% à 30%), l'énergie contenue dans le réservoir peut être diminuée par deux, mais il faut tenir compte du poids et du volume propre au "contenant" pour obtenir le poids et le volume total...

#### **En résumé:**

**Par rapport à l'essence, pour parcourir 600 km, le réservoir d'hydrogène à 700 bars est près de cinq fois plus gros (200 litres / 42 litres) et trois fois plus lourd (120 kg / 40 kg) qu'un réservoir d'essence.**

<sup>9</sup> Densité de l'essence = 0,72 42 l x 0,72 = 31 kg, plus 9 kg de réservoir = 40 kg

<sup>10</sup> Fiche 9.1 "Stockage gazeux sous pression" : 30 g H<sub>2</sub> / litre de réservoir et 55 g H<sub>2</sub> / kg de réservoir.

<sup>11</sup> AFHYPAC, Mémento de l'H<sub>2</sub>, fiche 4, décembre 2011, Chapitre IV: Les performances

<sup>12</sup> Fiche 9.1 "Stockage gazeux sous pression" : 30 g H<sub>2</sub> / litre de réservoir à 700 b, et 55 g H<sub>2</sub> / kg de réservoir à 700 b.

On peut cependant encore l'insérer dans une voiture moyenne, même s'il y a forcément **moins de place disponible et de charge utile** possible.

## **V) Conditionnement, transport et distribution de l'H2.**

L'hydrogène doit, comme tout autre produit, être conditionné, transporté, stocké et distribué. Tous ces procédés requièrent de l'énergie.

Dans l'économie **hydrocarbure** d'aujourd'hui **l'énergie perdue entre la source et le consommateur final est de 12% pour le pétrole, et 5% pour le gaz naturel.**

### **Conditionnement.**

Rappel : L'énergie requise pour la compression de l'hydrogène de la pression ambiante à une pression de **200 bars est de l'ordre de 7%** de l'énergie contenue dans le réservoir, elle est de **15% pour atteindre 700 bars et de 35% pour la liquéfaction.**

### **Transport.**

Le facteur actuel qui limite le transport de l'essence par camion-citerne est le poids du combustible transporté.

Cependant, pour l'hydrogène, **le facteur limitant est le volume.**

Pour obtenir l'équivalent énergétique « aux roues » livré par un camion-citerne d'essence, il faudrait 6 camions identiques d'hydrogène à 700 bars ou 3 camions citernes d'hydrogène liquéfié (un camion de 40 tonnes transporte 3,5 t d'H2 liquide maximum<sup>13</sup>).

En effet, si un litre d'essence (0,8 kg / 9 kWh) livré fournit 3 kWh « aux roues » des véhicules, alors il faut livrer 6 kWh d'H2 (180 g) contenus dans 6 litres de réservoir H2 à 700 bars pesant 3 kg.

De plus, il est commun de transporter les gaz à une pression de **200 bars (ce qui signifierait 22 camions) et de les livrer jusqu'à une pression de seulement 40 bars**, ce qui implique de **livrer seulement 80%** du contenu de la citerne.

Délivrer de l'hydrogène (transport, transfert, stockage, distribution) implique donc une consommation plus importante que le transport d'essence pour une même quantité d'énergie délivrée.

La quantité d'énergie nécessaire pour transporter de **l'essence** par camion est raisonnable (**2,5% du contenu énergétique livré à 600 km**).

En revanche, cette quantité d'énergie dépensée est très élevée pour le transport d'**hydrogène gazeux et liquide par camion** (respectivement **80% et 11% du contenu énergétique livré à 600 km**).

Le transport de l'hydrogène par camion-citerne est une proposition très douteuse.

Il reste la possibilité d'insertion d'H2 dans le réseau de gaz naturel ou de constructions de gazoducs dédiés qui requièrent des investissements élevés et soulèvent certains problèmes techniques tels que les **fuites dues à la plus petite taille de la molécule d'hydrogène** en comparaison du gaz naturel. **L'énergie dépensée** pour son transport est aussi **trois fois plus importante**.

*"La physique indique en effet que l'énergie nécessaire pour comprimer un gaz ne dépend pas du gaz, mais juste de la pression de départ et celle d'arrivée. Comprimer 1 m3 de méthane de 1 à 200 bars ou comprimer 1 m3 d'hydrogène de 1 à 200 bars demande exactement la même quantité d'énergie. Comme faire passer un gaz dans un tuyau c'est essentiellement le comprimer à intervalles réguliers, il en résulte que la dépense d'énergie pour le transport et le stockage sont essentiellement proportionnels au volume de gaz. Mais brûler 1 m3 de méthane et 1 m3 d'hydrogène ne donnent pas la même énergie !*

*Un m3 de méthane (gaz naturel) libère une énergie de 9,89 kWh (35,6 MJ) en brûlant, alors qu'un m3 d'hydrogène ne libère que 3 kWh (environ 10 MJ). A cause de cette caractéristique, intangible, **la dépense de transport sera donc au moins 3 fois plus importante, en proportion de l'énergie restituée, pour l'hydrogène que pour le méthane**, et pour ce dernier la dépense en transport, ramenée à l'énergie transportée, est déjà bien supérieure à ce qu'elle est pour le pétrole".* (Site de J.M Jancovici; Que peut-on espérer des PAC; Août 2006).

Cependant, l'AFHYPAC annonce que le transport par gazoduc serait **seulement 1,5 à 1,8 fois plus cher que le gaz naturel**<sup>14</sup> et que "l'hydrogène est considéré comme un vecteur d'énergie plus économique que l'électricité quand les distances sont supérieures à 1000 km<sup>15</sup>".

<sup>13</sup> AFHYPAC mémento de l'H2, fiche 4.3, juillet 2011, page 7

Pourquoi cette différence ? Où est l'erreur ?

L'AFHYPAC indique également que la dépense d'énergie d'H<sub>2</sub> par gazoduc est de 1,4% de l'énergie transporté chaque 150 km, pour alimenter les pompes hautes pression le long du réseau<sup>16</sup>

### Distribution.

Si un liquide peut être transféré d'une citerne pleine vers un réservoir vide sous l'action de la gravité, ce n'est pas le cas pour les gaz. Le transfert de l'hydrogène d'un réservoir vers une application (une voiture par exemple) nécessite 3% du contenu énergétique transféré. (Voir annexe 2 : Distribution pour les réservoirs à air comprimé).

#### Distribution de l'H<sub>2</sub> à 700 bars

Il y a principalement deux manières d'envisager la production par électrolyse de l'H<sub>2</sub> et sa distribution vers les véhicules :

##### 1) Centralisé :

Quelques grosses usines d'électrolyse industrielle implantées près de centrales électriques produisent de l'H<sub>2</sub> qui est transporté par canalisations (pipe-lines) vers les stations-services (comme le gaz naturel). Construire un réseau dédié serait très coûteux mais s'il s'agit de remplacer le gaz naturel dans le futur, alors on peut envisager d'utiliser ce réseau devenu inutile pour distribuer l'H<sub>2</sub> sous quelques bars. La station comprimerait ce gaz à 700 b (ou plus) sur place avant distribution à la « pompe » (qui serait un « connecteur - distributeur - détendeur).

On peut mélanger de l'H<sub>2</sub> au gaz naturel et utiliser directement ce mélange ou procéder à sa séparation à l'arrivée, mais ce procédé est coûteux et se rajoute à un prix de l'H<sub>2</sub> déjà élevé. On peut raisonnablement estimer que 5 à 10% de l'H<sub>2</sub> est perdu à la livraison dans les canalisations et dans les fuites du stockage de la centrale de production et de la station-service. La dépense d'énergie est de 15% lors de la compression à 700 b sur le lieu de distribution.

Des solutions centralisées de productions massives plus économiques, comme le craquage thermo-chimique à haute température de l'eau couplé à une centrale nucléaire dédiée (Very High Temperature Reactor : VHTR), pourront certainement être mises en œuvre à plus longue échéance (50 ans et plus) lorsque le réseau de gaz naturel sera partiellement disponible pour distribuer l'H<sub>2</sub>.

##### 2) Décentralisé :

L'électricité est transportée jusqu'aux stations-services (plus facile à transporter que le gaz) et l'électrolyse s'effectue sur place.

Des électrolyseurs récents fournissent l'H<sub>2</sub> directement à 700 bars mais le nombre de stations-service risque d'être limité.

- D'une part, leur prix d'achat élevé (plusieurs centaines de milliers d'euros) nécessite une production importante pour amortir l'investissement. Ce prix empêchera la production / compression à domicile qui est pourtant techniquement possible mais pas économiquement viable.

- D'autre part, si on veut une production compatible avec les besoins d'une station-service, leur volume est important. **Chaque électrolyseur est une "petite usine" et il en faudrait plusieurs.**

Dans le cas d'un électrolyseur ELT, par exemple, (760 Nm<sup>3</sup> / heure à 30 bars), il en faudrait cinq pour alimenter une station-service livrant 7 kg d'H<sub>2</sub> par véhicules (autonomie de 600 km) à 1000 véhicules par jour<sup>17</sup>.

---

<sup>14</sup> Mémento de l'H<sub>2</sub> "Pourquoi l'H<sub>2</sub> ?" Octobre 2006, page 8

<sup>15</sup> Idem, page 13

<sup>16</sup> Fiche 4.5.1 "Bilan énergétique de la distribution de l'H<sub>2</sub>."

<sup>17</sup> 760 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> => 69 kg H<sub>2</sub> x 24 heures / jour => 1656 kg / jour x 5 électrolyseurs = 8280 kg (soit une moyenne de 7.000 kg / jour livrées en tenant compte des pertes, maintenances et réparations)

ELT - Elektrolyse Technik GmbH, (Allemagne) : électrolyseurs de 330 à 760 Nm<sup>3</sup>/h, de 1 à 30 bars. <http://www.elektrolyse.de>

Pour produire ces 7.000 kg d'H2 comprimés à 700 bars par jour avec un rendement de 50% (il faut 66 kWh d'électricité pour produire 1 kg d'H2 à 700 bars), il faut rien moins que 460 MWh, soit une alimentation d'une puissance de 20 MW (pour une seule station-service) fonctionnant 24 heures par jour.

Il y a actuellement plus de 10.000 stations-services « pétrole » en France. Le fonctionnement de seulement 1000 stations-services hydrogène (20.000 MW) absorberait la puissance d'une douzaine de réacteurs nucléaires de nouvelle génération EPR<sup>18</sup> d'une puissance de 1600 MW.

**En résumé :** Malgré toutes ces difficultés, si l'économie H2 voit le jour dans quelques dizaines d'années, elle commencera probablement par emprunter la filière **700 bars (ou plus) par électrolyse décentralisée** sur les lieux de vente aux particuliers car **il est plus facile de transporter l'électricité que l'H2.**

## VI) Coûts

En France, un kWh d'origine nucléaire coûte entre 4 et 5 c€ à la production. Il est vendu 7 c€ HT après transport et distribution aux industriels, et 15 c€ avec les taxes (TTC) aux particuliers.

Hypothèse : la production de l'H2 par électrolyse est principalement décentralisée. Le prix de l'électricité hors taxes après transport, soit 7 c€ est donc la base de référence pour la production d'H2 dans les stations-services.

Selon le Mémento de l'H2 de l'AFHYPAC<sup>19</sup>, le prix de revient de l'H2 (PH2) produit par électrolyse de l'eau (en 2004) est de :

$PH2 = 1,25 \times \text{prix de l'électricité} + 5,5 \text{ (€/GJ)}$  (1 GJ = 278 kWh)

On en déduit :

$PH2 = 1,25 \times 0,07 \text{ (c€/kWh)} \times 278 \text{ (kWh)} + 5,5 \text{ (€/GJ)}$

D'où :

$PH2 = 30 \text{ € /GJ} = 10,8 \text{ c€/kWh} = 3,6 \text{ €/kg}$

Des unités industrielles d'électrolyse alcaline de grandes dimensions permettent de produire l'H2 à "environ 3 €/kg<sup>20</sup>".

En estimant à 6,1 c€/kWh<sup>21</sup> en 2013, le coût de la distribution d'H2 comprimé à la station service, on aboutit à un prix à la "pompe" de  $10,8 + 6,1 = 16,9 \text{ c€/kWh d'H2}$ .

Pour parcourir **100 km**, avec une voiture "moyenne" (7 litres d'essence au 100 km, soit avec un rendement moteur de 30%),  $9 \text{ kWh} \times 7 \text{ litres} \times 30\% = 20 \text{ kWh}$  « aux roues ») il faut 1,2 kg d'H2 (40 kWh avec un rendement PAC de 50%).

Il en coûtera donc :  $40 \text{ kWh} \times 16,9 \text{ c€/kWh} = 6,8 \text{ € HT}$  de coût d'H2 livrée dans le réservoir de la voiture.

**A ce coût d'environ 7 €, il faut rajouter les taxes<sup>22</sup> en vigueur actuellement (5,6 € pour 7 litres d'essence).** Sinon, qui paie les recettes fiscales de l'état dont a besoin la collectivité ?

Il en coûterait donc aujourd'hui au **minimum (7 + 5,6) 12,6 € TTC** pour faire 100 km avec de l'H2 issu d'une électrolyse industrielle, alors que **7 litres d'essence à 1,5 € TTC coûtent 10,5 € ... (et 14 € à 2 € le litre)**. Il faudrait atteindre au minimum 2,5 € le litre ( $7 \times 2,5 = 17,5 \text{ €}$ ) pour commencer être financièrement concurrentiel, compte tenu des inconvénients (poids, volume, autonomie, recharges, prix du véhicule,...).

En revanche, **avec une station locale** (comme la station de la Motte-Servolex, 1 million d'euros pour 40 kg d'H2 par jour comprimés à 700 bars), le coût de l'H2 peut notablement grimper si on veut rentabiliser l'investissement.

<sup>18</sup> European Pressurized reactor

<sup>19</sup> Fiche 10, page 4 :  $PH2 = 1,25 \times P \text{ électricité} + 7,10 \text{ (\$/GJ)}$

<sup>20</sup> AFHYPAC Mémento de l'H2, fiche 3.2.2, janvier 2012; page 6.

<sup>21</sup> Les tableaux 3, 4 et 5 de la fiche 10 donnent 19,4 \$/GJ en 2005.

<sup>22</sup> Taxes actuelles maintenues : 0,8€/ litre d'essence (33\$/GJ)

En supposant un coût total de 1,2 M€ sur 10 ans (maintenance, fonctionnement, intérêts,...) et une production de 12 tonnes d'H2 (40 kg/jour x 300 jours x 10 ans), **il faut encore ajouter 10 € par kg d'H2 pour amortir l'investissement financier !**

**Le kg d'H2 passerait alors à près de 23 €/kg (12,6 + 10), soit environ 27 € pour 1,2 kg d'H2 pour 100 km (au lieu de 11€ pour l'essence), sans tenir compte des bénéfices qu'escomptent peut-être les intervenants...**

### **L'économie H2 dans l'avenir :**

Au mieux, l'H2 pourrait entrer financièrement en concurrence avec le pétrole si la spéculation (ou la rareté) sur ce produit l'amenait à dépasser **300 \$ / baril**.

Avec un baril à 100\$, le litre d'essence est vendu 1,6 € à la pompe. Les "frais fixes" (taxes, transport, raffinage,...) représentent 1 € et la "matière première" ne représente que 0,6 € le litre<sup>23</sup>.

Si le baril venait à tripler (300\$), le prix à la pompe serait alors de 2,8 € le litre (1 € + 1,8 €), toutes choses égales par ailleurs. Le montant des taxes peut être stabilisé et il n'est pas plus coûteux de raffiner et de transporter un pétrole à 100\$ le baril qu'à 300\$.

### **Production massive d'H2 ?**

Il resterait encore cependant les inconvénients de la **production massive d'H2 par électrolyse** qui nécessiterait une **production supplémentaire importante d'électricité** non encore envisagée.

**Il faudrait en effet plus que doubler la production d'électricité nationale actuelle (500 Twh) pour alimenter en H2 le parc de 30 millions de véhicules** (voitures, camions, utilitaires, bus,...).

Ce dernier consomme **50 millions de tep (600 TWh)** par an en France, soit **150 TWh d'énergie mécanique appliquée "aux roues"** (600 TWh x 25%).

Avec un rendement de 25% entre la production d'électricité et l'application de sa puissance "aux roues" par l'intermédiaire de l'H2 (vu précédemment au paragraphe "En stockage de l'électricité ?"), il faudrait donc produire **600 TWh supplémentaires d'électricité en France pour fabriquer l'H2 nécessaire à la mobilité** en France, soit plus que doubler le parc nucléaire actuel dont la production annuelle est de « seulement » 400 TWh.

La production annuelle d'électricité en France devrait donc passer de 500 TWh aujourd'hui à plus de **1100 TWh** (500 + 600).

Aux USA (350 millions de véhicules), il faudrait multiplier par neuf le parc actuel de 100 réacteurs nucléaires pour produire 7000 TWh d'électricité supplémentaire avec 900 réacteurs (8 TWh par an par réacteur).

Quant à alimenter le milliard de véhicules qui circulent dans le monde,....

Cependant, à 200 \$ ou 300 \$ le baril, des réserves de pétrole moins accessibles ou abandonnées vont devenir rentables. Les investissements dans la recherche vont augmenter et les découvertes de nouveaux gisements de pétrole et de gaz aussi.

**Remarque :** avec des VE à batteries, la production d'électricité serait divisée par trois puisque le rendement entre la production d'électricité à la sortie de la centrale électrique et l'application de l'énergie mécanique "aux roues" est de 75% dans ce cas.

### **Conclusion**

Le vecteur d'énergie idéal pour effectuer le transfert d'énergie de sa source de production vers son lieu d'utilisation doit rester liquide à la pression atmosphérique, ou sous faible pression (quelques bars). L'essence et les GPL (gaz de pétrole liquéfié) tels que le Butane, le Propane ou le GPL carburant (mélange de Butane et de Propane) sont de bons exemples.

Leur usage énergétique est très répandu non seulement parce qu'ils sont abondants pour encore quelques dizaines d'années (60 à 100 ans) mais aussi parce que leurs propriétés physiques les rendent faciles à manier, conditionner, transporter, stocker...

Leur remplacement ne sera pas simple dans les véhicules...

<sup>23</sup> <http://tempsreel.nouvelobs.com/economie/20120828.OBS0599/carburants-sur-1-litre-d-essence-qui-touche-quoi.html>.  
Raffinage 0,10 c€/L ; Distribution 0,10 c€/L ; Taxes 0,80 c€/L (Chiffres arrondis).

L'usage énergétique de l'H2 est quasiment inexistant (1% pour les fusées) parce qu'il est difficile à manier, conditionner, transporter, stocker... ce qui le rend peu pratique et très coûteux à exploiter. Dans ces conditions, l'H2 ne concurrencera pas le pétrole jusqu'à sa disparition, à moins que son prix élevé le rende inabordable (au-dessus de 300\$ le baril).

Bien que n'émettant pas ou peu de pollution et de CO2, le marché de l'H2 ne se développera pas avant plusieurs dizaines d'années (50 ans ou plus), en dehors d'opérations "publicitaires" ou "financières", plus ou moins bidons, subventionnées par les contribuables.

L'H2 utilisable par les particuliers restera très difficile à mettre en œuvre et probablement très cher aussi. De plus, il n'apporte pratiquement aucun confort supplémentaire puisque les derniers VE à batteries permettent une autonomie d'environ 400 km avec une possibilité de recharge rapide (ce qui reste exceptionnel et anecdotique) et surtout qui permet de recharger à domicile.

**Mais surtout, l'économie hydrogène consommerait en amont 75% à 90 % de l'énergie produite (électricité ou chaleur) pour n'en livrer que 10% à 25% à l'utilisateur final à un coût prohibitif, et pour longtemps.**

**Il faudra vraiment en avoir besoin pour se payer une telle perte d'énergie et donc ... d'argent.**

Produire une telle quantité d'électricité (ou de chaleur à 1000 °C pour le craquage de l'H2) afin de remplacer les usages du pétrole et du gaz pour la mobilité semble hors de portée du monde pour le siècle en cours, même pour les pays les plus industrialisés, alors que les VE "batteries" demandent une production d'électricité trois fois inférieure.

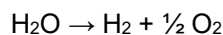
**L'H2 énergie est une solution d'avenir qui risque malheureusement de le rester longtemps !**

## Annexe 2

### 1) Obtenir de l'hydrogène par craquage de l'eau<sup>24</sup>

Le **craquage de l'eau** est un procédé permettant l'obtention d'hydrogène et d'oxygène, par électrolyse ou en dissociant par la chaleur les atomes composant la molécule d'eau H<sub>2</sub>O. C'est une réaction thermochimique se produisant à haute température (entre 850 °C et 900 °C), ou en phase gazeuse à 2,500 °C - 3,000 °C <sup>1</sup>

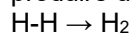
#### Bilan de la décomposition d'une molécule d'eau :



La molécule d'eau H<sub>2</sub>O est constituée de 2 liaisons O-H et chaque liaison a une énergie molaire de 460 kJ, ce qui représente 2 x 460 = 920 kJ pour une mole d'eau.

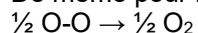
D'où la rupture des liaisons O-H des molécules d'eau pour une mole d'eau nécessite l'apport de 920 kJ (côté gauche de l'équation).

Cependant la recombinaison des atomes d'hydrogène H en H<sub>2</sub> (hydrogène gazeux) va produire un apport d'énergie :



Cette recombinaison apporte 432 kJ.

De même pour la recombinaison des atomes d'oxygène :



Cette réaction va libérer  $\frac{1}{2} \times 494$  kJ soit 247 kJ.

Solde de l'opération :

$$920 - 432 - 247 = 241 \text{ kJ}$$

Ainsi la fabrication de 2 grammes d'hydrogène par craquage d'une mole d'eau (sans tenir compte des pertes) nécessite l'apport de 241 kJ, soit 120 500 kJ pour fabriquer 1 kg d'hydrogène ou encore 33,5

<sup>24</sup> [http://fr.wikipedia.org/wiki/Craquage\\_de\\_l'eau](http://fr.wikipedia.org/wiki/Craquage_de_l'eau)

kWh/kg<sup>25</sup> d'hydrogène. C'est cette énergie fournie par une autre source d'énergie qui est restituée lorsque l'H<sub>2</sub> se recombine à l'oxygène de l'air pour reformer de l'eau. La boucle est bouclée.

## 2) Distribution pour les réservoirs à hydrogène comprimé

(Extrait du site AFHYPAC / Mémento de l'hydrogène/ Fiche 4.5.1 juillet 2008).

Si la manipulation du gaz sous pression est à ce jour parfaitement maîtrisée, son transfert à répétition dans une station-service demande des aménagements particuliers. Alors qu'un liquide s'écoule aisément d'un récipient à l'autre par gravité ou par l'action d'une pompe volumétrique, un gaz ne se déplace en grande quantité que lorsqu'une différence de pression notable – plusieurs dizaine de bars – est maintenue entre l'amont et l'aval.

Pour remplir un réservoir il existe deux possibilités :

- effectuer directement le transfert à l'aide d'un compresseur, cela exige un minimum de continuité et de stabilité de fonctionnement en particulier de débit, une situation peu compatible avec les nombreux remplissages successifs à réaliser,

- effectuer le transfert à partir d'une réserve en surpression. A priori, une meilleure solution. Mais elle est limitée car elle exige que la pression du gaz dans la réserve reste toujours supérieure à la pression finale de remplissage des véhicules, c'est à dire une réserve à haute pression ayant un grand volume.

C'est en fait la superposition des deux opérations qui convient le mieux : l'hydrogène de la réserve est maintenu en permanence à une pression supérieure à la pression de remplissage grâce à un compresseur commandé par un automatisme régulateur de pression. Le compresseur est lui alimenté par une autre réserve qui pourra être vidée (c. à d. sa pression diminuée jusqu'à la limite inférieure de la pression d'aspiration du compresseur, de l'ordre d'une dizaine de bars).

Lors de son remplissage, le réservoir s'échauffe car la pression de l'hydrogène y augmente suffisamment rapidement pour que cette compression soit quasi-adiabatique (les échanges de chaleur n'ayant pas le temps de se produire). L'élévation de température correspondante dépend surtout de la durée du remplissage. Elle peut être de plusieurs dizaines de degrés voire plus. C'est pourquoi la maîtrise et le contrôle rigoureux du transfert sont nécessaires pour éviter la détérioration du réservoir composite et garantir la quantité de gaz délivrée.

En effet, lorsque la température sera revenue à l'ambiante, la pression du gaz aura diminué et pourrait être nettement inférieure à celle initialement prévue. C'est une gêne pour un mode de stockage déjà limité, notamment pour les voitures particulières qui ont peu de grands volumes disponibles.

### Complément du 13 octobre 2019 :

#### Caractéristiques de la voiture à hydrogène Nexo de Hyundai :

- moteur électrique d'une puissance de 120 kW (163 ch),
- 1,8 tonne,
- batterie de **1,5 kWh** (15 kg ?) d'une puissance de 40 kW,
- PAC de rendement 60% (déclaré) de 95 kW (masse  $95 \times \frac{3\text{kg}}{\text{kW}} = 285 \text{ kg}$ ) qui s'additionnent temporairement (environ 2 minutes) aux 40 kW de la batterie pour les pointes d'accélération (40 kW / 60 mn = 0,66 kWh/mn), d'où une puissance totale déclarée de 135 kW,
- garantie PAC (qui recouvre quoi ?) est de 10 ans et 160.000 km,
- le plein H<sub>2</sub> est censé se faire en 5 mn sur une borne à 700 bars (?),
- réservoir de **156,6 litres d'H<sub>2</sub> (6,33 kg)** répartis en 3 réservoirs de 52 litres (total environ 220 litres et 120 kg),
- consomme 1 kg H<sub>2</sub> / 100 km,
- coffre de 460 litres.

C'est une belle vitrine technologique du savoir-faire Hyundai et un outil marketing publicitaire pour verdir son image.

---

<sup>25</sup> Cette valeur ne tient pas compte de l'énergie supplémentaire, nécessaire pour amener l'eau à la température de craquage, dont une partie est forcément gaspillée.