



François DRAIN

L'hydrogène, mirage ou (vecteur d') énergie du futur ?

1. Introduction

L'hydrogène est souvent présenté dans les médias comme une énergie propre, n'émettant que de l'eau, et pouvant être produite à partir des énergies renouvelables. Est-ce vraiment le cas ? Nous allons tenter de répondre à cette question en nous focalisant essentiellement sur les aspects économiques et écologiques, l'aspect sûreté étant laissé de côté pour le moment. Nicolas Hulot, ministre de la transition écologique et solidaire a présenté en juin 2018 un plan hydrogène ambitieux [1][2]. Ces documents sont assez peu techniques et n'évoquent l'aspect financier que très sommairement.

Rappelons d'abord que l'hydrogène n'est pas une énergie, mais un vecteur d'énergie, c'est-à-dire qu'il est produit à partir d'une source d'énergie, gaz, ou électricité par exemple, et va ensuite fournir de l'énergie via sa combustion ou en produisant à son tour de l'électricité via une pile à combustible.

2. Quelques rappels de physique-chimie [3]

Désolé, mais il faut bien commencer par ça ! L'hydrogène est le plus léger des éléments, c'est aussi l'atome le plus répandu dans l'univers (environ 75 % en masse), et environ le 10^{ème} sur terre où il est présent pratiquement toujours sous forme associée avec d'autres atomes, le plus connu étant l'eau H₂O, et le méthane CH₄.

L'hydrogène est un élément très réactif, il réagit avec l'oxygène soit par combustion, soit par explosion (il faut que la concentration d'hydrogène dans l'air dépasse 4 %).

A masse égale, l'hydrogène produit 3 fois plus d'énergie que l'essence ; mais sa densité est très faible : 1 litre à 700 bar (pression actuelle dans le réservoir des voitures à hydrogène) ne contient que 62g d'hydrogène. Pour avoir l'équivalent en énergie d'un litre d'essence, qui pèse 750 g, il faut 250 g d'hydrogène, soit environ $250/62 = 4$ L d'hydrogène à 700 bar.

3. Comment peut-on le produire ? [3]

Il existe de multiples façons de produire de l'hydrogène, mais nous en retiendrons 5 principales :

- Gazéification du charbon (ou du charbon de bois) : porté à très haute température (1200°C) par sa combustion partielle dans l'air, le charbon se vaporise et le carbone qu'il contient réagit avec de la vapeur d'eau en produisant du « syngas » dont on peut séparer l'hydrogène après avoir éliminé les impuretés et le CO₂. Ce procédé a beaucoup été utilisé pendant la seconde guerre mondiale, en particulier en Allemagne pour servir de première étape à la production de carburant. Il est évidemment générateur de CO₂, et pratiquement plus utilisé aujourd'hui. Il pourrait être envisagé, associé à un captage du CO₂.
- Vaporeformage du méthane : il assure environ 95 % de la production d'hydrogène à ce jour. Il émet de l'ordre de 10 kg de CO₂ par kg d'hydrogène produit ; le coût est de l'ordre de 1,5 € à 2,5 €/kg hydrogène.

- Electrolyse alcaline : elle est aujourd'hui employée pour produire de l'hydrogène ultrapur, à un coût d'environ 6 €/kg. Son rendement est de l'ordre de 60 à 70 %. L'inertie du procédé ne permet pas de variation rapide de la production, donc ne convient à des sources d'énergie intermittente. D'autres types d'électrolyse sont en développement :
 - o Électrolyse PEM (Proton Exchange Membrane) avec un rendement amélioré et une meilleure réactivité, permettant de s'adapter à des sources intermittentes. Air Liquide réalise une unité de 8 t/H₂ par jour au Canada, démarrage prévu fin 2020 [4]
 - o Électrolyse haute température (150°C) développée en particulier par le CEA, avec un rendement très élevé (90%). [5]
- Biomasse : la gazéification à haute température de la biomasse (déchets agricoles, sylvicoles ou autres) permet d'obtenir par thermolyse de l'hydrogène. Un pilote visant une production de 120 kg/H₂ par jour est en cours de démarrage à Vitry le François, pour un coût inférieur à 8 €/kg. Cependant, il est difficile d'obtenir des informations sur l'état d'avancement de ce procédé HYNCOCA, qui devait démarrer en 2019. [6] [7]
- Dissociation thermochimique de l'eau : la dissociation thermique de l'eau à pression atmosphérique a lieu à 3000 °C environ. Cependant le cycle thermique I/S (Iode/Soufre) permet d'abaisser cette température. Les deux sources de chaleur décarbonée possibles sont le nucléaire à haute température et le solaire à concentration qui permettent d'atteindre la température de 900 à 1 000°C requise. Cependant ces technologies sont loin d'être matures, et le prix de revient de l'hydrogène par ces voies est inconnu à ce jour.

4. Comment l'utiliser ?

Deux usages principaux sont mis en avant dans le plan hydrogène : la mobilité et la stabilité des réseaux électriques.

4.1. Mobilité

Nous n'évoquons que pour mémoire l'usage, déjà courant, pour les fusées, où le facteur coût n'est pas prépondérant !

Il est possible d'utiliser l'hydrogène directement comme combustible dans un moteur à combustion interne, mais le classique moteur à pistons est mal adapté à l'hydrogène, et son rendement reste faible (inférieur à 30 %). De ce fait, en pratique la solution unanimement retenue est l'association pile à combustible (PAC) et moteur électrique. La pile à combustible est un dispositif permettant de générer de l'électricité à partir d'hydrogène et d'air. Le rendement des PAC peut atteindre, voire dépasser 50 %.

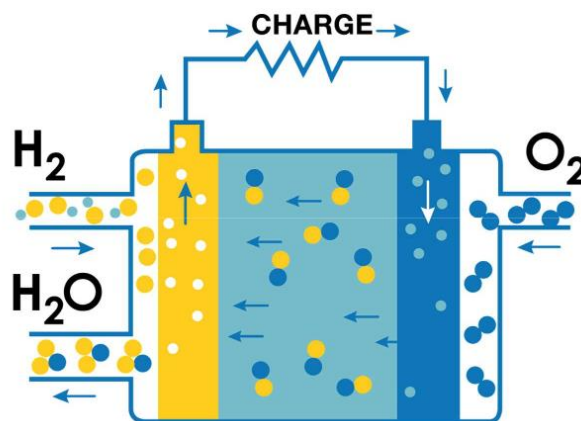


Figure 1 : principe d'une pile à combustible

Train : Alstom a mis en service en 2018 le premier train à hydrogène en Allemagne, où il remplace un train diesel [8]. Il s'agit cependant d'un marché limité, puisqu'une grande partie du trafic ferroviaire est réalisé par des motrices électriques, pour lesquelles les émissions directes sont nulles, et les émissions induites négligeables si l'électricité est majoritairement d'origine nucléaire comme en France.

La route : plusieurs constructeurs se sont lancés dans des projets tant de poids lourds que de voitures. Actuellement plusieurs modèles sont déjà commercialisés, et on pourra consulter sur le site de l'AFHYPAC [9] les nombreux projets ou réalisations. On retiendra simplement que techniquement des solutions existent, avec une bonne autonomie (plus de 500 km), mais à un prix élevé, supérieur en général à 50 000 €. Plusieurs milliers de ces voitures roulent aujourd'hui, en particulier des Toyota Mirai et des Hyundai Nexu. A ce jour l'intérêt principal de ces voitures réside dans l'absence d'émissions de particules ou de polluants, au même titre que les voitures électriques.



Figure 2 : véhicule à hydrogène Toyota Mirai

4.2 Stabilité des réseaux électriques

Le concept du « Power-to-Gas » n'est pas nouveau puisqu'il était déjà apparu en France dans les années 70, au moment du lancement du programme nucléaire français où l'on pensait utiliser l'électricité nucléaire en heures creuses pour produire de l'hydrogène. Cette idée est reprise aujourd'hui pour utiliser les excédents de production éolienne, ou même solaire, aux heures creuses. L'hydrogène peut ensuite être utilisé :

- Pour produire de l'électricité avec une pile à combustible et la distribuer dans le réseau électrique,
- Combiné à des atomes de carbone issus du CO₂ pour obtenir des molécules de méthane injectables dans le réseau de distribution de gaz naturel
- Injecté directement dans le réseau de gaz naturel jusqu'à hauteur de 20 %
- Pour des applications industrielles pour remplacer l'hydrogène actuellement issu majoritairement du vaporeformage du méthane

D'après le site de l'AFHYPAC, une dizaine d'installations sont en service en Europe, principalement en Allemagne, et dans la plupart des cas, l'hydrogène produit est injecté dans le réseau de gaz. La plus puissante installation, EnergieParkMainz, dispose d'une capacité d'électrolyse de 6 MW, alimentée par un champ d'éoliennes. Il est cependant difficile de trouver

des informations sur l'état réel et le retour d'expérience de fonctionnement. Ces installations bénéficient de subventions des pouvoirs publics, et ne sont à ce jour pas compétitives.

5. Aspect économique

Pour la stabilité des réseaux électriques, il est difficile d'évaluer le coût acceptable, car cela dépend de multiples facteurs.

Nous nous limiterons donc à l'usage pour la mobilité. Aujourd'hui un litre d'essence (sans plomb 95), coûte environ 1,50 € à la pompe, dont 0,86 € de taxes, et environ 0,10 € pour le transport et la distribution [10]. Le prix de base pour la comparaison avec l'hydrogène est donc d'environ 0,54 €/L, soit environ 0,72 €/kg.

Les rendements du réservoir d'hydrogène aux roues et du réservoir d'essence ou gazole aux roues sont comparables : le rendement de la pile à combustible est de l'ordre de 50 % et celui du moteur électrique d'environ 90 %, soit un rendement global de 45 % à comparer au rendement d'un moteur thermique qui va de 35% (essence) à 45 % (gazole).

Un kg d'hydrogène ayant une densité énergétique 3 fois plus élevée, son prix doit donc être d'environ $0,72 * 3 = 2,16$ € pour être compétitif par rapport à l'essence. Si on compare avec le gazole, le résultat est similaire.

On notera cependant que le coût de transport et distribution de l'hydrogène sera sans doute plus élevé que pour l'essence, en raison de la pression très élevée (au moins 700 bars) et des précautions qui en résultent.

Aujourd'hui le coût de l'hydrogène obtenu par vaporeformage du méthane est d'environ 1,5 € à 2,5 €/kg, avant compression à 700 bars ; il est donc compétitif par rapport au gazole et à l'essence, mais dégage beaucoup de CO₂.

Cependant dans le cas de production par électrolyse ou à partir de biomasse, les coûts sont de l'ordre de 6 et 8 €/kg respectivement, au minimum. Il faudrait donc améliorer les performances économiques d'un facteur 3 à 4 pour être compétitif vis-à-vis des carburants actuels.

Note : L'argument qui consiste à dire que l'hydrogène produit avec de l'électricité en surplus ne coûterait rien occulte les coûts des installations à mettre en œuvre. De plus, la faisabilité n'est pas acquise à ce jour

6. Aspect écologique

L'hydrogène ne présente d'intérêt écologique que s'il est produit à partir de sources d'énergies décarbonées. Il y en a quatre principales :

- Le nucléaire
- L'hydraulique
- L'éolien
- Le solaire

Nous ne retiendrons pas à ce jour le nucléaire, car les réacteurs haute température bien adaptés à la production d'hydrogène par dissociation thermo-chimique de l'eau sont seulement en cours de développement. Éliminons également l'hydraulique dont le potentiel de développement est limité, au moins en France.

Restent le solaire et l'éolien ; les puissances installées au 1^{er} mars 2020 sont de [11] 16647 MWe pour l'éolien (terrestre uniquement à ce jour) et 9339 MWe pour le solaire. Ces capacités

sont-elles suffisantes pour couvrir les besoins du parc automobile actuel ? Nous allons prendre l'exemple de l'énergie éolienne terrestre. Son rendement annuel moyen est de l'ordre de 20 à 25 %.

La consommation annuelle de carburant en France est d'environ 50 millions de m³, à 80 % gazole [12].

La densité de l'essence est d'environ 0,7 à 0,75, celle du gazole de 0,82 à 0,84 [13]. On retiendra 0.8 soit 40 millions de tonnes/an en France.

La densité énergétique/kg de l'hydrogène étant environ trois fois plus élevée que celle de l'essence ou du gazole, il faudrait donc produire environ **13 millions de tonnes d'hydrogène**.

Pour produire ces 13 millions de tonnes d'hydrogène, de quelle puissance électrique avons-nous besoin ?

- D'après [3], en électrolyse haute température, celle dont le rendement est le plus élevé, il faut 3.5 kWh pour obtenir 1 Nm³ (*) d'H₂; 1 Nm³ d'H₂ pèse environ 89 g, donc pour obtenir 1 kg d'hydrogène il faut $1000/89 \times 3.5 =$ environ 40 kWh/kg H₂, soit **40 MWh pour produire une tonne** de H₂ (ou une puissance de 40MWe pour produire 1 tonne/heure).
(*) Nm³ : mètre cube dans les conditions « normales » (pression atmosphérique, 20°C)

- Pour 13 millions de tonnes H₂, il faut donc en moyenne sur l'année $13\,000\,000 / 365 / 24 =$ environ 1500 t/h d'H₂, soit une puissance électrique de $40 \times 1500 = 60$ GWe, soit à peu près la puissance de notre parc nucléaire. Si on veut produire cela à partir des éoliennes terrestres, dont le rendement annuel est de l'ordre de 20 à 25 %, il faut environ **240 GWe installés, soit 15 fois la puissance éolienne installée actuellement en France**, (et en supposant que le parc soit entièrement dédié à cet usage) ! A titre de comparaison, les 3 parcs mondiaux les plus puissants en 2019 sont la Chine (211 GWe), les Etats-Unis (96 MWe) et l'Allemagne (61 GWe).

Remarque : nous n'avons pas pris en compte le solaire qui ne peut constituer qu'un appoint, son rendement annuel en France est de l'ordre de 10 % ; la capacité installée à ce jour (9339 MWe) ne représente donc qu'environ 930 MWe de puissance moyenne, soit environ 1,5 % des 60 GWe nécessaires.

7. Conclusion

A la lumière de ce qui précède, il est difficile d'imaginer, dans les conditions actuelles, que l'hydrogène soit une solution viable pour la mobilité :

- Le coût, pour de l'hydrogène issu d'énergie renouvelable, est trop élevé, d'un facteur au moins 3.
- L'idée, souvent mise en avant, d'utiliser les surplus de l'énergie éolienne, ne tient pas la route, sans jeu de mots, car le parc éolien, même s'il est considérablement augmenté dans les années à venir, ne pourra répondre que de façon très partielle aux besoins. Le parc solaire ne peut constituer qu'un appoint minime à ce jour.
- Si l'hydrogène ne provient pas de sources décarbonées, il ne présente quasiment aucun intérêt écologique, si ce n'est d'éviter la pollution en ville par les gaz d'échappement ; mais la voiture électrique remplit le même rôle sans problème (son autonomie est largement suffisante pour un usage urbain). De plus le rendement global d'une voiture électrique est bien meilleur, elle nécessite environ trois fois de génération d'énergie électrique par distance parcourue, comme le montre la figure 3 :

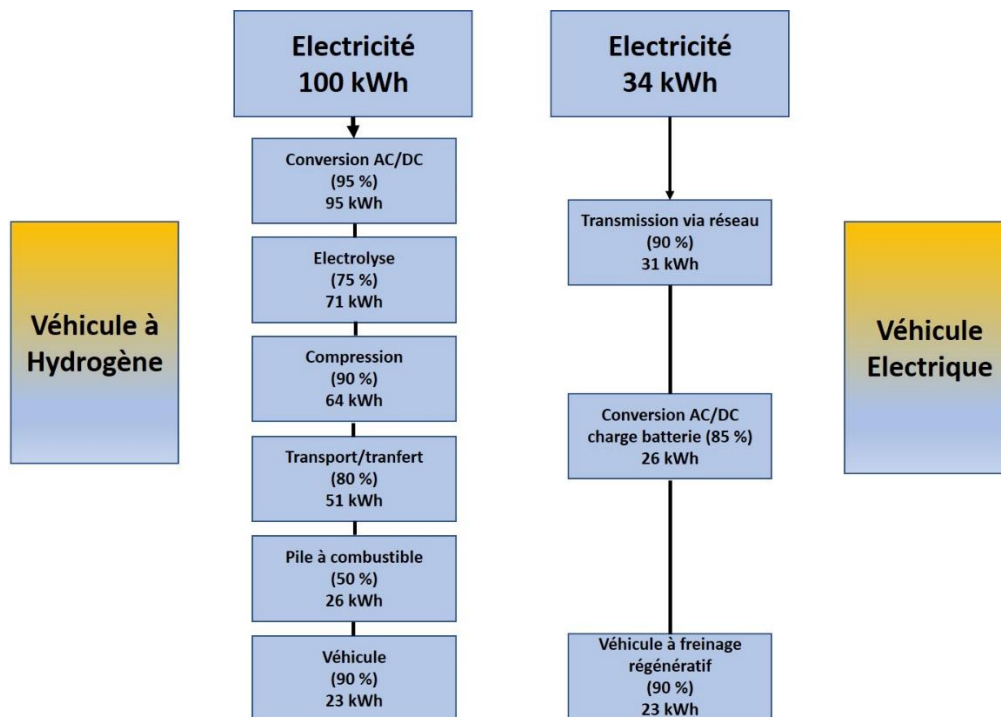


Figure 3 : rendements comparés des voitures à hydrogène et électrique

- Même si le sujet n'a pas été abordé, la sûreté des véhicules et du réseau de distribution est un aspect à ne pas négliger. Les véhicules déjà en circulation ne semblent pas avoir provoqué d'accident, cependant en juin 2019, une station de distribution d'hydrogène a explosé en Norvège, heureusement sans faire de victimes.

L'utilisation pour la stabilisation des réseaux électriques est peut-être possible, mais les quelques projets en cours sont de trop faibles dimensions, et trop peu avancés, pour pouvoir statuer.

En résumé, il faudra encore beaucoup de progrès tant techniques qu'économiques avant que l'hydrogène puisse jouer un rôle majeur. Les objectifs affichés dans le plan hydrogène présenté par Nicolas Hulot paraissent extrêmement ambitieux, voire irréalistes pour ceux prévus à l'horizon 2023.

Références :

- [1] https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf
- [2] https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2018.06.01_dp_plan_deploiement_hydrogene_0.pdf
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-de-lhydrogene>
- [4] <http://www.afhypac.org/documents/divers/Hydrogene-en-France-2019.pdf> (page 6, électrolyse PEM)
- [5] <https://www.pv-magazine.fr/2020/03/10/le-premier-projet-delectrolyse-a-haute-temperature-de-plusieurs-mw-sera-construit-a-rotterdam/>
- [6] <https://www.haffner-energy.com/hydrogene> procédé Hynoca hydrogène à partir biomasse

- [7] <https://actions.maisondelachimie.com/wp-content/uploads/sites/2/2019/03/HAFFNER-Philippe-P.pdf> présentation détaillée procédé Hynoca
- [8] <https://www.alstom.com/fr/press-releases-news/2018/9/premiere-mondiale-les-trains-hydrogene-dalstom-entrent-en-service>
- [9] <https://www.afhypac.org/documentation/tout-savoir/> Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible
- [10] <https://www.economie.gouv.fr/facileco/prix-lessence>
- [11] <https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/chiffres-cles>
- [12] <https://fr.statista.com/statistiques/487186/consommation-routiere-carburant-france/>
- [13] <https://poulaterre.forumactif.com/t54-densite-energetique-de-divers-carburants-document>