

## Et voilà l'hydrogène

Coucou ! À l'occasion de la « transition énergétique », voilà l'élément le plus simple du tableau périodique. Chouchouté lors de la décennie 70 après les succès des piles à hydrogène des capsules spatiales de la NASA et du moteur à hydrogène du 2<sup>e</sup> étage de la fusée Ariane, il quitte l'Espace pour revenir sur Terre quand surviennent les deux crises pétrolières de 1973 et 1977 et la recherche de nouvelles sources énergétiques. Jamais plus qu'au cours de cette période, autant de chimistes ne s'investirent dans la décomposition de l'eau et le stockage par chimisorption de l'hydrogène. La baisse dès la décennie 80 du prix de l'or noir remisait au placard qui les photocatalyseurs, qui les poudres d'hydrures.

Mais heureusement, la recherche et le développement sur les piles à combustible PEMFC ou SOFC<sup>(1)</sup> ne furent pas mis en sommeil. Avec la prise de conscience de la fin inexorable des ressources fossiles, de la hausse continue du prix du pétrole et des avertissements du GIEC sur les gaz à effet de serre, la recherche de systèmes énergétiques diversifiés, renouvelables et propres, redonne une nouvelle jeunesse à l'hydrogène.

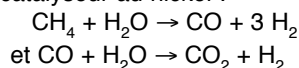
Rappelons d'abord que H<sub>2</sub> n'est pas une ressource énergétique, mais un vecteur d'énergie. Il n'est en effet pas très présent sous forme diatomique sauf sur quelques dorsales médio-océaniques, dans des roches périodiques<sup>(2)</sup> ou quelques plaques continentales de Russie, dont l'exploitation reste très acrobatique. Il est par contre très abondant sous forme combinée, principalement dans l'eau (H<sub>2</sub>O), dans la matière vivante, et associé au carbone dans des hydrocarbures (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>). Il nécessite donc des procédés chimiques ou électrochimiques d'extraction. Ses propriétés sont intéressantes (voir *tableau*). Gaz très léger, il a un pouvoir énergétique massique presque quatre fois plus élevé que l'essence. Sa combustion est très propre puisqu'elle ne génère que de la vapeur d'eau, et il est

aussi renouvelable par le cycle de l'eau. Son utilisation actuelle est à 98 % pour la synthèse de l'ammoniac et le raffinage en pétrochimie, et seuls 2 % sont consacrés à l'énergie.

La production mondiale d'hydrogène atteint 60 millions de tonnes par an dont 900 000 t en France.

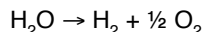
Deux procédés principaux sont utilisés :

- Le « steam reforming » (à 95 %), qui s'effectue à 850-900° sous 20 à 30 bars sur catalyseur au nickel :



Le rendement est de l'ordre de 80 % et le prix à la production se chiffre à 2 €/kg. On notera que la production de 1 kg de H<sub>2</sub> s'accompagne de l'émission de 10 kg de CO<sub>2</sub>.

- L'électrolyse par décomposition (4 %) :



Elle se fait en milieu alcalin avec un rendement de 60 % ; les nouveaux électrolyseurs PEM à membrane font monter le rendement à 75 %. L'électrolyse à haute température (650 °C/100 bars) est encore au stade de développement. La consommation est de l'ordre de 5 à 6 kWh/m<sup>3</sup> et le prix de revient est d'environ 4 €/kg, pour un prix d'électricité industrielle de 60 €/le MWh.

- D'autres moyens de production par les algues, des hydrogénases, le vapo-reformage du biogaz, sont pour l'instant encore confidentiels.

### Comment se présentent le transport et le stockage ?

L'hydrogène peut être transporté sous forme liquéfiée dans des citernes ou sous forme gazeuse comme le gaz naturel par réseaux de pipelines dédiés ; il en existe déjà 1 500 km en Europe pour le transport nord-sud. Son stockage pose plus de problèmes car il est sept fois plus léger que le gaz naturel et il jouit d'une réputation de dangerosité due au syndrome « Zeppelin Hidenburg ».

Si on le compare à d'autres vecteurs énergétiques comme l'essence, le gasoil ou le gaz naturel (voir *tableau*), on voit que sa très faible densité lui donne une énergie spécifique au litre sept fois plus faible que le gaz naturel. Il est donc indispensable de le comprimer car 1 kg d'hydrogène dans les conditions normales représente 11 m<sup>3</sup>. Sa compression (350 bars) consomme environ un quart de son énergie délivrable, et sa liquéfaction à - 353 °C, un tiers.

### Quel rôle dans la transition énergétique ?

Les propriétés thermo-chimiques de l'hydrogène, hors de son utilisation en chimie et en raffinage, le destinent à un rôle croissant comme vecteur d'énergie.

- Sur zone fixe : son stockage peut être associé aux énergies renouvelables intermittentes, pour les fermes éoliennes et les centrales photovoltaïques. En période d'excès de production, l'électrolyse de l'eau permet d'obtenir une réserve d'hydrogène, par exemple sur hydrures solides ou absorption sur MOF, qui peut ensuite être brûlée pour actionner des turbines ou alimenter une pile à hydrogène pour fournir de l'électricité la nuit ou en l'absence de vent. C'est un créneau prometteur qui va booster le raccordement au réseau des fermes éoliennes ou photovoltaïques en lissant leurs productions. On peut citer la réalisation du CEA, à Myrte en Corse-du-Sud, qui alimente le réseau électrique. Quelques sociétés françaises, en collaboration avec Axane, filiale d'Air Liquide, fournissent déjà les systèmes d'alimentation pour balises ou relais de télécommunications ou des réseaux isolés. Cela remplace avec avantage les groupes électrogènes bruyants et émetteurs de CO<sub>2</sub>.

- Pour les véhicules et les objets nomades : si pour des installations fixes, le stockage en volume ou en poids ne pose pas de problèmes, il n'en est pas de même pour l'automobile ou l'électronique nomade. La pile PEMFC couplée à une batterie va donner à la voiture électrique une vraie autonomie. On sait qu'avec un rendement à 75 % du moteur électrique et recharge lors du ralentissement ou freinage, 15 kWh suffisent pour faire parcourir 100 km à une vitesse moyenne (consommation thermique : 6 L pour 100 km) [1]. Avec 1 kg de H<sub>2</sub> et un rendement à 50 % de la pile à hydrogène, 1 kg de H<sub>2</sub> correspond à 100 km. Pour

Produit	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	MJ/kg	kWh/kg	kWh/litre
H <sub>2</sub> gaz	0,09	142	32,4	3,5 x 10 <sup>-3</sup>
H <sub>2</sub> liquide	70	"	"	2,8
H <sub>2</sub> 700 bars	62	"	"	2,42
Essence	750	42,7	11,82	9,4
Diesel	850	41,9	11,64	10
Gaz naturel	0,65	50,4	14	32,5 x 10 <sup>-3</sup>
GPL	500	"	"	7,5

Tableau comparatif des pouvoirs énergétiques spécifiques.

une autonomie de 500 km, il faut alors 5 kg de H<sub>2</sub> et donc un réservoir de 80 L à 700 bars, ou 150 L à 350 bars. La seule automobile de série, non encore commercialisée en France, est coréenne : la ix35 Hyundai « Fuel Cell ». C'est un véhicule électrique de 136 CV (100 kW), équipé de deux réservoirs en composite de 104 L sous le coffre et de 40 L sous la banquette arrière, capables d'embarquer 5,6 kg d'hydrogène, et d'une batterie lithium-polymère de 24 kWh. Le surplus de 370 kg par rapport au véhicule version diesel donne cependant une autonomie supérieure à 500 km et une vitesse maximum de 160 km/h, dans une ambiance de « tapis volant », pour 70 000 €. Livrées en leasing, deux ix35 sont disponibles pour essais entre Lyon et Sassenage où Air Liquide dispose d'une station de remplissage d'hydrogène. Le marché des chariots élévateurs pour les entrepôts, les aéroports, les entreprises est en train d'être capté par HyPulsion qui équipe en piles à hydrogène IKEA en France et d'autres usines en Californie et au Canada. Pour l'électronique nomade sont développées des piles miniatures avec des sources d'hydrogène de type aérosol à 12 bars et hydrures métalliques.

### Alors quel avenir et quels freins ?

Ceux-ci ont très bien été mis en exergue par le récent rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) [2].

Il faut d'abord dire que l'hydrogène n'est qu'un vecteur qui, pour l'instant, déporte ses émissions, car si dans son utilisation énergétique il n'émet localement que de la vapeur d'eau, tant qu'il ne sera majoritairement issu que du « steam reforming » du gaz, il émet aussi 10 kg de CO<sub>2</sub> par kilo. Ainsi, le véhicule qui consomme 1 kg d'H<sub>2</sub> par 100 km correspond à 100 g de CO<sub>2</sub>/km, c'est-à-dire autant qu'un bon diesel.

Un deuxième obstacle est le coût ; les experts pensent que l'hydrogène sera compétitif si son prix à la distribution ne dépasse pas 10 €/kg, et si les équipements de production et de stockage d'hydrogène sont fabriqués en grandes séries. Pour les PEMFC, la quantité de métal précieux, le platine, a nettement diminué depuis vingt ans – on est en dessous de 0,1 mg/cm<sup>2</sup> sur la membrane – ; cela représente cependant en coût 50 % du cœur de la pile et 25 % du système PAC.

Enfin, le développement de la mobilité ne pourra se faire que si les infrastructures se mettent en place, et donc que si les stations distribuant l'hydrogène sont capables de délivrer 40 à 100 kg de H<sub>2</sub> par jour. Nous avons un champion européen en France : Air Liquide, qui a déjà implanté des stations en Allemagne, au Japon et aux États-Unis. L'Allemagne a un programme d'implantation de quinze stations d'ici 2015 et 400 pour 2025 ; les Japonais projettent l'implantation de cent stations en 2015, de

même pour la Corée du Sud. En France, à part une station de démonstration, la réglementation est un frein extrême au développement de cette infrastructure, car dès production et stockage d'une mole d'hydrogène s'applique la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), avec un dossier dont l'instruction par la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) et la Préfecture dure entre 12 et 18 mois ! Alors qu'en Allemagne, la réglementation est la même que pour les autres gaz énergétiques, il n'est pas possible en France pour une station service d'autoroute par exemple de proposer de l'hydrogène sous pression à côté du GPL. Il est donc urgent de légiférer sur ce point car nous avons des technologies de pointe développées par le CEA, le CNRS et des PME performantes – McPhy Energy, PaxiTech, HyPulsion, Symbio Fcell, Axane... – et un leader international, Air Liquide, qui attaquent des marchés à l'étranger faute de le pouvoir en France !

Les recommandations de l'OPECST sur ce point, sur le regroupement des diverses forces nationales, l'encouragement de stations de production locales, la multiplication des pactes régionaux, les investissements de structure de distribution, sont frappées au coin du bon sens.

Les organismes de recherche, les sociétés savantes [3] et les associations telles que l'AFHYPAC (Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible, ex AFH2) œuvrent pour une vraie gouvernance de cette filière d'avenir afin de faire sauter les verrous techniques, réglementaires et économiques qui brident encore son développement.



Jean-Claude Bernier,  
le 8 mai 2014



Station de remplissage d'hydrogène sur le site Air Liquide à Sassenage (Isère). © Air Liquide.

(1) PEMFC : « proton exchange membrane fuel cell » ; SOFC : « solid oxide fuel cell ».

(2) Les roches périoditiques sont des résidus magmatiques d'origine volcanique que l'on trouve affleurant souvent près de ressources pétrolières en sous-sol ou au fond des mers.

[1] Bernier J.-C., La voiture électrique : virage ou mirage ?, *L'Act. Chim.*, 2010, 337, p. 3.

[2] L'hydrogène vecteur de la transition énergétique, Rapport de l'OPECST, déc. 2013.

[3] N° spécial « L'hydrogène, carburant de demain ? », *L'Act. Chim.*, déc. 2001.