



LES ENJEUX DE L'HYDROGÈNE

La transition vers une économie bas carbone se heurte au défi du stockage de l'énergie, en particulier électrique, car il est difficile et coûteux. Seul le stockage d'énergie par les stations de pompage (STEP) est économiquement pertinent, mais son développement est géographiquement contraint.

Un autre vecteur énergétique potentiellement non carboné doit être examiné : l'hydrogène. Il présente en effet le double intérêt de pouvoir être produit par électrolyse de l'eau, offrant ainsi un débouché à la production d'électricité et notamment à la production renouvelable intermittente en excès, et de pouvoir être utilisé directement ou indirectement pour répondre aux besoins d'énergie.

C'est ainsi qu'un intérêt croissant se porte sur l'hydrogène depuis plusieurs années, aussi bien pour la recherche visant la mise au point d'électrolyseurs plus performants, que pour les modes d'utilisation par combustion et par production d'électricité ou de chaleur au moyen de piles à combustible. Le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) étudie cette technologie depuis la fin des années 1990 pour en renforcer l'intérêt économique.

Si ces travaux aboutissent, l'hydrogène pourra se substituer aux énergies fossiles dans plusieurs usages de l'énergie, contribuant à la décarbonation de l'économie : dans le transport en substitution au pétrole, dans la chaleur par utilisation directe (mélange avec le gaz naturel) et indirecte (méthanation) ; et le tout avec l'avantage, comme tout gaz, d'être stockable.

L'ENJEU DE LA PRODUCTION DÉCARBONÉE D'HYDROGÈNE

L'usage de l'hydrogène dans le transport et dans le réseau de gaz naturel est conditionné par le procédé de la production d'hydrogène (il ne doit pas émettre de gaz à effet de serre) et par le coût de son utilisation (qui doit être compétitif par rapport aux autres énergies pour les mêmes usages).

A l'heure actuelle, l'hydrogène est déjà utilisé dans la chimie, essentiellement pour produire de l'ammoniaque. Ce sont 900 000 tonnes d'hydrogène qui sont produites chaque année en France pour les besoins de l'industrie chimique. N'existant pas à l'état naturel, il doit être fabriqué à partir d'une source d'énergie primaire. Le procédé de production le moins coûteux aujourd'hui consiste à « craquer » du méthane, ce qui libère du CO₂¹. Dans le cadre d'une logique de stockage d'énergie, il est fondamental de s'affranchir des émissions de CO₂ dans la production d'hydrogène, et donc de favoriser le procédé de l'électrolyse.

Celui-ci consiste à séparer l'eau en dioxygène et en dihydrogène² au moyen d'une circulation d'électricité. Ce procédé n'émet pas de gaz à effet de serre dès lors que l'électricité nécessaire est décarbonée et il peut se reproduire à l'infini puisqu'il n'exige que de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. Ce procédé est connu, mais ne représente qu'une très faible proportion de l'hydrogène produit en France³ et dans le monde. Par ailleurs, la contrainte économique est majeure. Le coût de la production d'hydrogène par électrolyse peut s'élever aujourd'hui jusqu'à 800 €/MWh⁴. Les électrolyseurs sont onéreux car ils ne sont pas fabriqués en grande série et ont une durée de vie relativement faible. De plus, la quantité d'électricité nécessaire à la réaction est importante⁵.

L'enjeu majeur de R&D pour faire de l'hydrogène un facteur performant de décarbonation de l'économie consiste donc à faire baisser les coûts de l'électrolyse.

¹ La production d'hydrogène est responsable de 1 à 2 % des émissions de CO₂ en France. L'enjeu de la production décarbonée de l'hydrogène concerne donc aussi le secteur industriel.

² Si on parle toujours d'hydrogène par abus de langage, il s'agit bien du dihydrogène.

³ Ce procédé est utilisé pour produire de l'hydrogène pur et représente entre 1 et 4 % de la production totale d'hydrogène selon le CEA et l'IFP.

⁴ Source : « Les technologies de l'hydrogène au CEA », CEA, 2012

⁵ Pour des électrolyses à basse température, l'électricité représente 80 % du coût de production de l'hydrogène selon le CEA.

L'HYDROGÈNE DANS LE TRANSPORT

Dans le cas de la France, où 38 % des émissions de CO₂ proviennent de la combustion d'énergies fossiles dans le transport, l'impératif climatique implique de s'intéresser à l'alternative que constitue l'hydrogène⁶ comme carburant.

Si l'usage de l'hydrogène dans le transport terrestre est encore freiné par de nombreuses contraintes technico-économiques, ce vecteur énergétique est utilisé depuis de nombreuses années comme combustible pour la propulsion des fusées. Aujourd'hui, de grands constructeurs automobiles (Daimler, Hyundai, Nissan, Ford, ...) sont sur le point de proposer des automobiles à hydrogène sur le segment haut de gamme avant peut-être de descendre sur l'échelle des segments ; ils tirent ainsi parti des travaux réalisés depuis plusieurs années et du retour d'expérience des premières réalisations (utilitaires légers, autobus). Ces constructeurs ont fait le choix de la propulsion électrique utilisant l'électricité produite par une pile à combustible embarquée alimentée par l'hydrogène contenu dans un réservoir haute pression. L'hypothèse du moteur à combustion utilisant l'hydrogène comme carburant a, semble-t-il, été abandonnée par les constructeurs qui l'avaient un moment envisagée, tels que BMW. D'autres segments d'utilisation ont également le vent en poupe, par exemple les chariots élévateurs ; les aéroports de Montréal et de Vancouver se sont dotés de technologies alimentées à l'hydrogène (les navettes, les véhicules de transport de passagers et les véhicules utilitaires).

L'hydrogène peut être utilisé comme combustible dans le transport grâce à deux technologies distinctes : le moteur à combustion interne et la pile à combustible.

Le principe du moteur à combustion interne est le même que celui des moteurs à essence. La pile à combustible permet quant à elle de créer de l'électricité, de la chaleur et de l'eau à partir du dihydrogène et du dioxygène. Selon l'IFPEN⁷, l'avantage de l'utilisation de l'hydrogène est qu'il libère 2,8 fois plus d'énergie que l'essence, à poids équivalent. L'hydrogène peut ainsi contribuer à la décarbonation de la mobilité avec l'avan-



tage non négligeable d'une autonomie comparable à celle des véhicules à essence. Encore faut-il pouvoir disposer de piles à combustible à un coût abordable car c'est la pile à combustible qui constitue la plus grande partie du surcoût du véhicule à hydrogène par rapport au véhicule à pétrole : le prix d'un véhicule à hydrogène commercialisé est annoncé aux environs de 50 000 €, dont la moitié correspond à la pile à combustible. Il est primordial de poursuivre la R&D sur la pile à combustible et sur la substitution de ses composants les plus chers pour atteindre un niveau de prix rivalisant avec celui des véhicules à essence. Cela nécessite de diviser par dix le coût de la pile à combustible.

Par ailleurs, quel que soit le choix technologique envisagé, l'usage de l'hydrogène dans le transport routier devra s'affranchir de deux contraintes majeures. En premier lieu, la densité de l'hydrogène est si faible qu'il est nécessaire de le compresser à de très hauts niveaux de pression. Cela entraîne à la fois des pertes de rendement dans la production d'hydrogène, puisque la compression est un procédé énergivore, et l'installation de réservoirs imposants et coûteux. La deuxième contrainte, de taille également, est l'installation d'un réseau de distribution d'hydrogène qui devra accompagner le développement des technologies hydrogène.

La substitution des produits fossiles par l'hydrogène dans le transport est donc coûteuse, et elle ne se fera pas sans les innovations technologiques nécessaires à une viabilisation de son modèle économique. Il est donc urgent de favoriser la R&D dans les technologies de stockage mobile et fixe de l'hydrogène.

L'HYDROGÈNE DANS LE GAZ NATUREL : L'HYTHANE

L'hydrogène peut également être mélangé au méthane dans le réseau de gaz naturel. Le mélange de l'hydrogène et du gaz naturel forme l'hythane⁸. Ce gaz peut être utilisé pour le chauffage, mais aussi pour les véhicules fonctionnant avec des moteurs au gaz, dès lors que les adaptations nécessaires ont été faites sur les installations.

L'intégration de l'hydrogène dans le gaz naturel offre une solution flexible de stockage d'énergie permettant de valoriser l'électricité. Cela permet non seulement de sécuriser le système électrique lors des situations d'excès de production des EnR fatales, mais l'hythane émet moins de CO₂ que le

gaz naturel. Le développement de la production d'hythane est aujourd'hui confronté au coût de production élevé de l'hydrogène par électrolyse.

Une autre transformation de l'hydrogène est possible, la combustion grâce à la méthanation. Ce procédé consiste à obtenir du méthane et de l'eau par co-électrolyse de CO₂ et d'eau. Là aussi, l'équation économique est clé : même avec un coût de production de l'hydrogène optimiste, le coût du méthane ainsi produit est plusieurs fois supérieur à celui du prix sur le marché du gaz.

⁶ Il faut cependant garder à l'esprit que substituer la totalité des hydrocarbures consommés par le secteur du transport par de l'hydrogène implique de produire environ 16 millions de tonnes d'hydrogène, soit environ vingt fois plus qu'aujourd'hui.

⁷ Institut Français du Pétrole et des Energies Nouvelles

⁸ L'Hythane est formé à 80% de gaz naturel et 20% d'hydrogène. Au niveau de consommation actuel, il est donc possible de mélanger environ deux millions de tonnes d'hydrogène au gaz naturel, soit deux à trois fois le niveau de production d'hydrogène actuel.