L'hydrogène : vecteur énergétique du futur ?

Aujourd'hui utilisé dans le raffinage, la chimie ou l'industrie, l'hydrogène est souvent présenté comme un vecteur énergétique d'avenir pour le secteur des transports. Mais, possédant des caractéristiques physiques relativement mal adaptées à cet usage et n'existant pas sous forme pure, l'hydrogène présente, pour l'heure, un bilan encore contrasté. Pouvant offrir de bonnes performances environnementales, les filières hydrogène restent handicapées par des coûts trop élevés pour un développement de masse. Une application dans les transports pour le grand public nécessitera encore de nombreux travaux de recherche.

L'hydrogène aujourd'hui

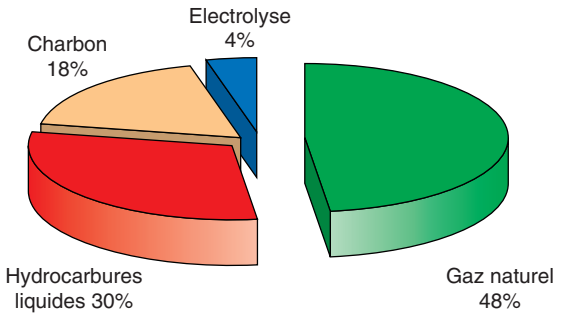
La production

L'hydrogène est l'un des éléments les plus abondants de la planète. Mais, contrairement aux hydrocarbures, il n'existe pas de gisements permettant de l'extraire directement. En effet, cet élément se trouve dans la nature presque systématiquement combiné avec d'autres atomes : l'oxygène dans le cas de l'eau ou le carbone dans le cas du gaz naturel.

Pour le produire, il est donc nécessaire d'avoir une source d'hydrogène à proprement parler (gaz naturel, eau, etc.) et une source d'énergie. La source d'hydrogène et la source d'énergie peuvent se confondre, comme dans le cas d'une production à partir de gaz naturel, ou être complètement distinctes, comme c'est le cas dans la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau (la source d'énergie est l'électricité et la source d'hydrogène est l'eau).

De nos jours, l'hydrogène est produit pour près de 96 % à partir d'énergie fossile (cf. figure 1) et le gaz naturel est, de loin, la matière première la plus utilisée. Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau constitue le procédé le plus économique.

Fig. 1 Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde



L'utilisation d'hydrocarbures plus lourds, comme le charbon, est possible. Cette voie fait appel à des procédés de type oxydation partielle plus coûteux que le reformage en termes d'investissement.

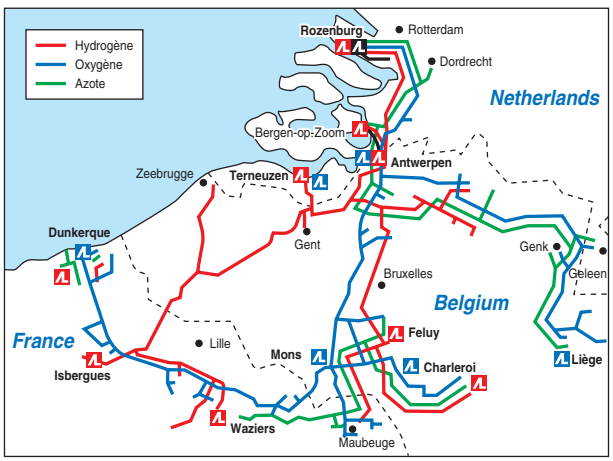
Une grande partie de l'hydrogène est aujourd'hui produit dans les raffineries comme un coproduit du reformage catalytique, étape indispensable dans la formulation des essences (indice d'octane).

La production par électrolyse, qui reste nettement plus coûteuse, n'est utilisée que marginalement.

Le transport et la distribution

L'hydrogène est un gaz très léger, ce qui constitue un handicap pour son stockage et son transport. Il est usuellement transporté sous forme comprimée dans des bouteilles ou des pipelines ou encore sous forme liquide (– 253 °C).

Fig. 2 Exemple de réseau hydrogène : le réseau Air Liquide dans le nord de l'Europe



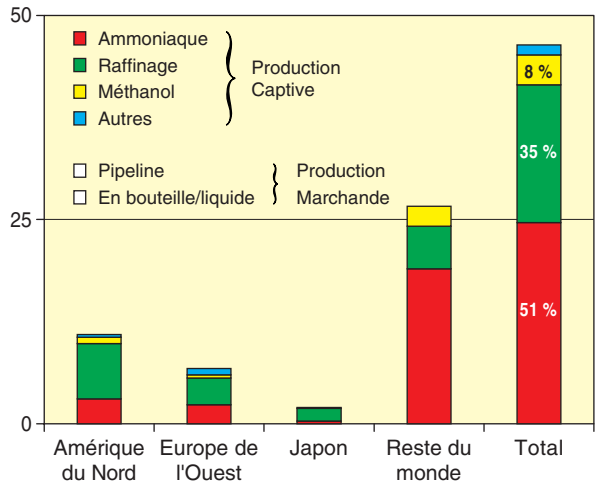
La principale voie utilisée aujourd'hui est le pipeline, qui représente actuellement un réseau de plus de 2500 km à travers le monde. Ces réseaux sont surtout situés en Europe (1500 km) et aux États-Unis (900 km). Un des principaux exploitants de ces réseaux est Air Liquide (cf. figure 2).

L'hydrogène : vecteur énergétique du futur ?

L'utilisation

L'hydrogène est aujourd'hui essentiellement utilisé comme gaz industriel pour la production d'ammoniac, dans le raffinage des produits pétroliers et pour la production de méthanol (cf. figure 3). À ce stade, il convient de remarquer que pour alimenter les sites industriels, des unités de production d'hydrogène dédiées sont souvent construites à proximité de ces sites. Le marché de l'hydrogène est aujourd'hui un marché presque exclusivement « captif ».

Fig. 3 Principaux marchés de l'hydrogène (Mt)



La consommation mondiale d'hydrogène est actuellement d'environ 50 Mt, représentant près de 140 Mtep, soit moins de 2 % de la consommation mondiale d'énergie.

Au-delà de leur valeur absolue, ces chiffres montrent qu'avant que l'hydrogène ne devienne le principal vecteur énergétique de la planète, des investissements colossaux seront nécessaires autant pour sa production que pour sa distribution.

L'hydrogène vecteur énergétique du futur ?

Gaz essentiellement utilisé dans des applications chimiques, l'hydrogène est aujourd'hui propulsé sur le devant de la scène énergétique : associé aux piles à combustible (PAC), l'hydrogène pourrait remplacer l'option classique que représente le couple hydrocarbures/système à combustion (moteur, turbine, etc.).

Les bénéfices d'une telle évolution, pour ne pas dire révolution, sont :
- une diminution de la pollution des centres urbains ;
- une forte réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- et enfin, un renforcement de l'indépendance énergétique des pays consommateurs de pétrole.

Mais, l'hydrogène ne peut être directement comparé aux énergies fossiles car il n'est qu'un vecteur d'énergie et non pas une source d'énergie. En tant que tel, il permet simplement de transporter une certaine quantité d'énergie d'un lieu de production à un lieu d'utilisation.

Deux secteurs sont envisagés pour l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie : les transports et la production d'électricité qui, éventuellement, peut s'accompagner d'une production de chaleur. Seul le secteur des transports sera analysé ici.

Cependant, dans le domaine de la génération d'électricité, la première application du système hydrogène + PAC pourrait être la substitution des batteries dans les appareils « nomades » (ordinateurs, portables, etc.) pour en accroître l'autonomie. Ces marchés ne devraient pas représenter des quantités très importantes d'hydrogène, d'autant plus que la plupart des développements en cours font appel à des PAC alimentées directement par du méthanol.

À plus long terme, la production décentralisée d'électricité, avec ou non chaleur associée, pour des maisons individuelles, des immeubles collectifs ou des zones industrielles (PME, etc.), pourrait également être un débouché significatif, compte tenu des excellents rendements des PAC utilisées (alimentées par de l'hydrogène ou directement par du gaz naturel). Toutefois, de nombreuses technologies sont en concurrence dans ce domaine d'activité : éolien, microturbine, etc.

Dans le secteur des transports, par rapport aux carburants conventionnels, l'hydrogène possède l'avantage de se combiner aisément à l'oxygène de l'air pour donner de l'énergie et, dans les conditions les plus favorables, un seul sous-produit : l'eau.

Son utilisation dans un moteur à combustion interne offre peu d'avantages en termes de consommation d'énergie ou de rejets de polluants (les émissions d'oxydes d'azote restent un problème). Les choses changent dès que l'on envisage de s'en servir pour alimenter une pile à combustible (PAC). De fait, l'avenir de l'hydrogène dans les transports apparaît très lié à celui des PAC.

Filière relancée dans le début des années 1990 par la société canadienne Ballard et relayée par la suite par Daimler Chrysler, les piles PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) ont, ces dernières années, largement attiré l'attention des médias. Basés sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, ces systèmes membranaires permettent la production d'électricité à partir d'une alimentation en hydrogène et en air. Cette conversion se réalise sans autre émission que celle de vapeur d'eau. L'électricité produite sert ensuite à alimenter le moteur électrique du véhicule : on dispose ainsi d'une solution

L'hydrogène : vecteur énergétique du futur ?

équivalente au véhicule électrique avec batteries en tant que voiture « zéro émission ».

À ce titre, il est intéressant de noter que le relatif échec des automobiles électriques durant les années 1990 comme solution crédible au problème de pollution urbaine a, en partie, remis et propulsé la PAC sur le devant de la scène. En effet, tout en possédant le même avantage à l'échappement que son concurrent à batterie, le véhicule PAC permet, *a priori*, de s'affranchir des temps de ravitaillement longs et d'une autonomie trop faible des solutions purement électriques.

Les principales barrières au développement de ces filières aujourd'hui, outre le coût, sont l'absence d'infrastructures de production, de réseaux de distribution et les difficultés rencontrées pour le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule.

Dans ce domaine, deux voies sont aujourd'hui envisagées :
– un stockage sous forme comprimée à 350 ou 700 bar ;
– un stockage sous forme liquéfiée (– 253 °C).

Aucune de ces solutions n'est aujourd'hui pleinement satisfaisante, même si la majorité des constructeurs automobiles s'orientent vers le stockage sous haute pression pour leurs opérations de démonstration. Le stockage sous forme comprimée offre une autonomie plus limitée. Le stockage sous forme liquide (– 253 °C) se heurte à des difficultés de mise en œuvre pour le grand public et est fortement consommateur d'énergie, puisque l'opération utilise, dans le meilleur des cas, 35 % de l'énergie disponible dans le réservoir (ceci sans prendre en compte la dépense d'énergie nécessaire à la production d'électricité qui alimente l'unité de liquéfaction).

Remise en cause de l'option « reformeur embarqué »

Pour contourner ces contraintes de stockage/distribution de l'hydrogène, plusieurs équipes de recherche ont essayé d'adapter les systèmes à base de PAC aux carburants liquides, plus faciles à stocker à bord du véhicule en y associant une unité de production d'hydrogène (reformeur) fonctionnant avec ces combustibles (par exemple le méthanol, mais aussi l'essence).

Le méthanol est la solution la plus facile à mettre en œuvre, la génération d'hydrogène à partir de cet alcool s'effectuant vers 300 °C. Mais, ce carburant n'est pas largement distribué et sa toxicité pose problème pour une application grand public. D'autres programmes de recherche se sont alors orientés vers le développement de petits « reformeurs » fonctionnant à partir de carburants pétroliers. Ces travaux se sont heurtés à d'importantes difficultés de mise au point : le temps de démarrage reste long (plusieurs minutes) ; la consommation d'énergie est importante au démarrage ; la gestion des régimes transitoires reste difficile et le problème des rejets de CO_2 et de polluants (NOx, etc.) n'est pas résolu.

En 2004, aux États-Unis, les programmes de recherche sur ces derniers thèmes financés par le DOE (Department of Energy) auront un important jalon à passer, et il se pourrait qu'ils soient purement et simplement arrêtés ; General Motors a annoncé cet été l'abandon de ses activités de recherche dans cette voie.

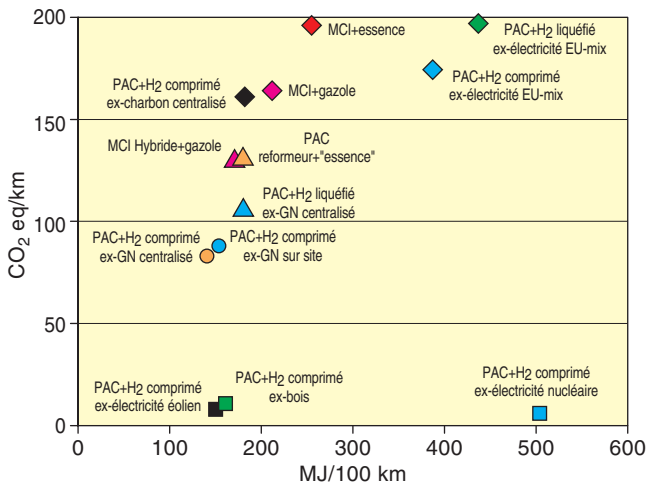
L'impact sur l'environnement

Pour juger de l'intérêt des filières hydrogène dans l'absolu, en termes de rendement énergétique, de coût, mais aussi d'impact sur l'environnement, il est indispensable de réaliser un bilan global : de la production du gaz à son utilisation finale, en passant par son transport et son stockage.

À titre d'exemple, dans le cas où l'hydrogène est produit à partir d'électricité et d'eau (électrolyse), seule une partie de l'énergie initiale nécessaire à la production de l'électricité se retrouve au final sous forme d'hydrogène. On comprend alors que l'intérêt de la filière électrolytique varie avec le mode de production de l'électricité utilisé au départ.

Plusieurs études ont été réalisées dans le but d'établir de façon plus précise l'intérêt des filières hydrogène en matière d'émission de gaz à effet de serre (GES) et de consommation d'énergie. La figure 4 reprend les principaux résultats d'une étude réalisée dans le cadre d'une collaboration au niveau européen entre le Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne (JRC), le CONCAWE (qui est l'association européenne des compagnies pétrolières traitant des questions liées à l'environnement) et l'EUCAR (bras R&D de l'Association Européenne des Constructeurs d'Automobiles).

Fig. 4 Résultats « du puits à la roue » des principales filières hydrogène



MCI : moteur à combustion interne ; PAC: pile à combustible.

Source : « Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context », EUCAR, JRC, CONCAWE, November 2003

L'hydrogène : vecteur énergétique du futur ?

Dans ce graphique, sont positionnées les performances des différentes filières dans leur globalité, « du puits à la roue », pour effectuer 100 km, tant en termes de consommation d'énergie que d'équivalent CO_2 émis.

Plusieurs résultats significatifs ressortent de cette analyse :

– Le véhicule PAC alimenté par de l'hydrogène comprimé ex-éolien(1) ou ex-biomasse(2) présente les meilleurs résultats en termes de rejet de gaz à effet de serre. En termes de consommation énergétique, ces solutions s'avèrent parmi les plus performantes même si le gain reste faible, en particulier, par rapport aux véhicules hybrides (véhicule associant un moteur à combustion interne et un moteur électrique). Ces deux options présentent cependant le même inconvénient : le volume potentiel de production d'hydrogène par ces voies reste limité.

– Le véhicule PAC alimenté par de l'hydrogène ex-électricité (via l'électrolyse) présente des bilans contrastés. Si l'origine de cette électricité est le nucléaire, le résultat est excellent en termes de rejet de gaz à effet de serre, mais beaucoup plus médiocre en termes de consommation globale d'énergie. Si l'électricité est produite à partir de la répartition moyenne actuelle européenne des différents modes de production, alors la filière ne présente aucun avantage ni vis-à-vis des émissions de GES, ni en termes de consommation d'énergie. Il faudrait donc une modification profonde des systèmes de production d'électricité en Europe avec un développement massif des énergies renouvelables (ENR) ou une large diffusion des technologies de capture et du stockage géologique du CO_2.

– Les solutions PAC utilisant de l'hydrogène ex-gaz naturel présentent un bon bilan, puisqu'elles permettent une réduction de 30 % en consommation d'énergie et de près de 50 % en rejet de gaz à effet de serre par rapport à la référence gazole. Ce gain est bien évidemment moindre si on le compare à la solution hybride puisqu'il n'est plus que de 35 % pour les rejets de gaz à effet de serre et de 15 % environ pour ce qui est de la consommation d'énergie. Par ailleurs, on notera l'effet négatif de la liquéfaction qui pénalise de près de 30 % cette option par rapport à la solution « hydrogène comprimé », aussi bien en termes de consommation d'énergie que d'émissions de gaz à effet de serre. Il faut également souligner que le bilan « effet de serre » de ces options à base de gaz naturel pourrait être amélioré, si elles sont envisagées avec capture et stockage géologique du CO_2 généré.

– Les solutions PAC avec reformeur embarqué n'offrent que très peu d'avantages par rapport aux solutions à moteur à combustion interne.

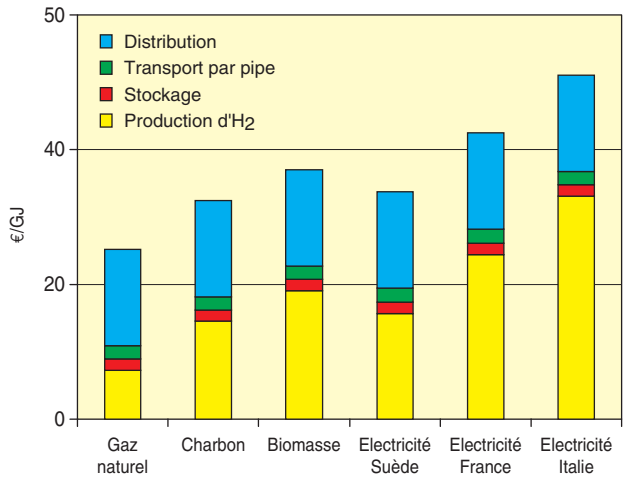
– L'option où l'hydrogène est généré à partir de charbon n'offre que peu ou pas d'avantages par rapport aux références essence ou gazole. Pour être envisagées sur le long terme, ces options devront recourir à la capture et au stockage géologique du CO_2 produit.

Aspects économiques

Si certaines des options hydrogène avec piles à combustible permettent un gain environnemental net par rapport aux solutions conventionnelles, d'un point de vue rejet de gaz à effet de serre, elles sont aussi de loin les plus coûteuses (cf. figure 5).

D'un point de vue purement économique, le choix du mode de stockage de l'hydrogène (comprimé ou liquéfié) à bord du véhicule est difficile à faire. En effet, les résultats obtenus sur ces deux filières restent très proches : les consommations énergétiques importantes du stockage d'hydrogène sous forme liquide sont compensées par des coûts moindres comparés à ceux sous pression (350 ou 700 bar). Les constructeurs ayant principalement orienté leurs démonstrateurs vers l'option stockage sous haute pression, seule cette option sera présentée ici.

Fig. 5 Estimation des coûts des filières hydrogène comprimé « du puits au réservoir » en fonction du prix de la matière première en €/GJ (dans le cas de l'électrolyse, le prix de l'électricité constaté en juillet 2002 a été retenu)



De l'analyse de la figure 5, il ressort que la fourchette des valeurs de coût « du puits au réservoir » pour les filières hydrogène comprimé se situe entre 20 et 50 €/GJ. L'option la plus économique est celle utilisant le gaz naturel comme matière première, les solutions à base de charbon et de biomasse (ici le bois) sont respectivement de 30 et 50 % plus onéreuses. Par ailleurs, l'électrolyse de l'eau présente les coûts les plus élevés (de 35 à 50 €/GJ). Bien évidemment,

(1) Électrolyse de l'eau avec de l'électricité d'origine éolienne.
(2) Production d'hydrogène par gazéification du bois.

L'hydrogène : vecteur énergétique du futur ?

cette hiérarchie pourrait évoluer notamment en cas de tension sur le prix du gaz naturel. À titre de comparaison, les filières traditionnelles des carburants pétroliers offrent un coût « du puits au réservoir » de 8 €/GJ (pour un prix du brut de référence de 25 $/b).

Dans le futur, des gains restent possibles sur l'ensemble de la chaîne hydrogène et tout particulièrement sur l'étape de distribution qui, contrairement aux carburants liquides pétroliers, est un poste de dépenses important. Certains travaux de recherche réalisés aux États-Unis montrent en particulier que le développement de petites unités de production d'hydrogène montées à la station-service pourraient permettre d'atteindre des gains non négligeables et d'éviter, au moins dans un premier temps, le lourd investissement d'un réseau dense de pipelines d'hydrogène. Un objectif de 12,5 $/GJ en 2010 a ainsi été fixé pour de tels systèmes par le DOE aux États-Unis.

Mais le coût de l'hydrogène « du puits au réservoir » n'est pas tout. En effet, il convient d'évaluer si la consommation du véhicule ne compense pas le coût élevé de l'hydrogène. Du fait de l'incertitude majeure actuelle sur l'évaluation des coûts des PAC et de leur évolution à long terme, l'hypothèse la plus favorable que le véhicule équipé de PAC possède le même prix d'achat et d'entretien que le véhicule conventionnel est prise. Le coût de revient aux 100 km est alors donné dans le tableau 1.

Tableau 1
Coût de revient au kilomètre parcouru des filières hydrogène

	Consommation (MJ/100 km)	Coût du carburant (€/GJ)	Coût (€/100 km)
MCI + essence	224	8	1,8
MCI + gazole	184	8	1,5
MCI Hybride + gazole	141	8	1,1
PAC + H_2 comprimé ex-gaz naturel	84	25	2,1
PAC + H_2 comprimé ex-charbon	84	32	2,7
PAC + H_2 comprimé ex-biomasse	84	37	3,1
PAC + H_2 comprimé ex-électricité France	84	42	3,5

MCI : moteur à combustion.
PAC : pile à combustible.

Source : IFP d'après « Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context », EUCAR, JRC, CONCAWE, November 2003

Cette analyse montre que le coût aux 100 km reste supérieur de 15 à plus de 100 % pour les options hydrogène/pile à combustible à celui des solutions conventionnelles et de leurs évolutions.

Cette conclusion a été obtenue selon l'hypothèse forte que la PAC est proposée à un coût équivalent à celui des moteurs à combustion interne. On sait aujourd'hui que cela est loin d'être le cas : le coût des piles fabriquées à quelques exemplaires est supérieur à 3000 €/kW, comparé aux 30 à 50 €/kW pour les moteurs à combustion interne conventionnels, produits, il est vrai, en masse. Mais, même en émettant l'hypothèse d'une production des piles à grande échelle (plusieurs centaines de milliers d'exemplaires), l'avantage reste au moteur à combustion interne. En effet, le coût de production des PAC resterait compris entre 100 et 200 €/kW[3], soit trois à quatre fois plus qu'un moteur conventionnel (et ceci sans prendre en compte les moteurs électriques nécessaires à faire avancer le véhicule).

Parmi les éléments qui constituent la PAC, la membrane de la pile mais également le platine (Pt) (catalyseur indispensable pour faire fonctionner ce type de convertisseur d'énergie) sont les éléments les plus onéreux. Entre 50 et 100 g de Pt sont nécessaires pour faire fonctionner une PAC membranaire à basse température dans de bonnes conditions de durabilité, de rendement et de performance. Cette valeur est considérée par beaucoup comme trop élevée. En effet, la simple généralisation de la PAC au marché français (soit environ 2 millions de voitures par an) suffirait à générer une demande de l'ordre de 100 et 200 tonnes/an de platine, soit à peu près la consommation mondiale annuelle de ce métal précieux.

Au-delà de la question des réserves de platine disponibles, un succès mal maîtrisé des piles à combustible dans le secteur des transports, particulièrement à court terme (2010), pourrait générer des tensions sur le marché de ce métal, dont la production est particulièrement concentrée : l'Afrique du Sud assure près de 75 % de la production mondiale ; la Russie est le second producteur mondial avec une part de l'ordre de 15 %. À terme, pour que la PAC devienne le convertisseur énergétique du futur, il apparaît indispensable de réduire son contenu en Pt (un facteur 10 est un bon objectif) et de prévoir dès aujourd'hui la mise en place de filières de recyclage.

Mais la pile n'est pas tout. Le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule reste également coûteux. Aujourd'hui, dans les meilleurs cas, des coûts de l'ordre de 1000 €/kg[4] d'hydrogène stocké sont annoncés, certaines sources prévoyant même des valeurs quatre fois plus élevées. Or, ce sont 4 à 5 kg d'hydrogène qui sont nécessaires pour assurer au véhicule une autonomie suffisante (400 à 500 km), ce qui signifie qu'il faut aujourd'hui débourser, au minimum, de l'ordre de 4000 à 5000 € pour le stockage à bord du véhicule. Ce chiffre est à comparer aux 125 € que coûte un réservoir d'environ 40 litres pour un véhicule classique.

(3) Source : DOE et DTI, « DFMA Cost Estimates of Fuel-Cell/Reformer Systems at Low/Medium/High Production Rates », Brian D. James, Greg D. Ariff, Reed C. Kuhn Future Car Congress 2002, 4 June 2002.

(4) Source : S. Rau, Dynetek, Deutscher Wasserstoff Energietag 2002, Essen 13th November 2002.

L'hydrogène : vecteur énergétique du futur ?

La production à grande échelle permettrait, certes, de réduire le coût du réservoir mais seulement dans la fourchette de 200 à 500 €/kg d'hydrogène selon le DOE, qui indique que des progrès importants restent à faire dans ce domaine. Ainsi, si techniquement le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule est maîtrisé, il reste encore de nombreux travaux de recherche à réaliser, notamment pour en abaisser le coût. Le DOE a d'ailleurs fixé des objectifs très ambitieux dans ce domaine, puisqu'en 2015 le coût du stockage de l'hydrogène devra être de l'ordre de 66 €/kg, soit une réduction d'un facteur 5.

Conclusion

Depuis près d'un siècle, les filières pétrolières dominent le secteur des transports et bénéficient aussi bien des effets d'échelle que d'une amélioration et d'une optimisation continues des technologies sur toute la période. Face à cette situation de monopole, le développement de solutions alternatives beaucoup moins matures est, aujourd'hui, difficile. Ceci est particulièrement vrai pour les filières hydrogène, qui, bien que bénéficiant d'indéniables avantages environnementaux, restent lourdement handicapées par des coûts trop élevés.

Dans ce contexte, à court terme, l'utilisation de l'hydrogène dans les transports devrait rester relativement limitée. La production d'électricité (pile à combustible stationnaire) et plus encore le stockage d'énergie pour appareil nomade (téléphones et ordinateurs portables, etc.) devraient être les premiers domaines d'application de ces technologies dans les années à venir.

Sur le plus long terme, les qualités de l'hydrogène du point de vue environnemental (notamment en termes d'effet de serre pour certaines des filières) et les enjeux de la diversification énergétique pourraient lui assurer un rôle majeur concernant les défis auxquels les transports auront à faire face au cours du XXIe siècle. Néanmoins, il convient de bien rappeler que l'hydrogène ne saurait être la réponse unique à la question de l'avenir énergétique du secteur des transports. Ces filières, qui nécessitent encore de nombreux travaux de recherche notamment pour réduire les coûts, ne demeurent que des options parmi d'autres. En particulier, une rupture technologique sur le stockage de l'électricité serait à même de réduire fortement l'intérêt pour cette filière.

Stéphane His
stephane.his@ifp.fr

Manuscrit définitif remis le 4 décembre 2003

www.ifp.fr

IFP - Diffusion des Connaissances

IFP (Siège social)
1 et 4, avenue de Bois-Préau - 92852 Rueil-Malmaison Cedex - France
Tél. : +33 1 47 52 59 18 - Fax : +33 1 47 52 53 04

IFP-Lyon
BP 3 - 69390 Vernaison - France
Tél. : +33 4 78 02 20 20 - Fax : +33 4 78 02 20 15