

Hydrogène et piles à combustible

La filière hydrogène

Vers un système énergétique durable

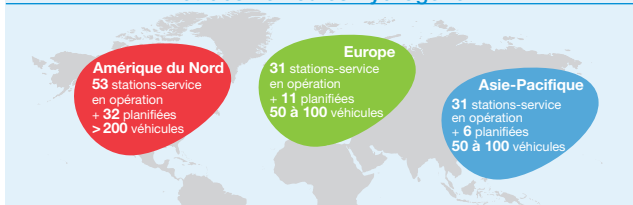
Les combustibles fossiles ont fourni et fourniront encore pendant de nombreuses années une contribution essentielle au développement économique. Cependant, pour étendre l'accès à la mobilité à une plus grande partie de l'humanité, tout en minimisant les émissions de gaz à effet de serre. Il deviendra nécessaire d'élargir et de diversifier les sources de carburants pour les transports. L'hydrogène, en association ou non avec une pile à combustible, est l'une des alternatives envisagées pour répondre à cette équation.

L'hydrogène peut être utilisé aussi bien comme combustible pour la production de chaleur et/ou d'électricité qu'en tant que carburant dans des véhicules. Dans ce dernier cas, l'hydrogène peut-être utilisé soit en combustion directe dans le véhicule soit en alimentant une pile à hydrogène. Il existe aujourd'hui dans le monde environ 500 véhicules fonctionnant à l'hydrogène et 115 stations-service en exploitation.

Pourquoi associer "hydrogène" et "pile à combustible" ? La pile à combustible, en transformant le véhicule en un véhicule électrique, apporte deux intérêts majeurs :

1. améliorer notablement le rendement énergétique global du moteur
2. en fournissant de l'électricité et en n'émettant que de l'eau, contribuer non seulement à réduire les émissions de CO₂ mais également tout autre type de polluant local (NOx, CO, HC, par exemple).

Répartition géographique des stations et des véhicules hydrogène



La chaîne hydrogène

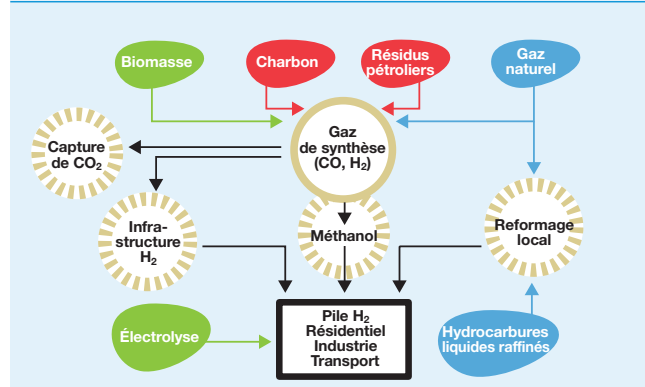
N'étant pas lui-même une source d'énergie primaire, l'hydrogène doit d'abord être fabriqué avant d'être stocké et distribué. Chacune de ces étapes représente encore aujourd'hui un véritable défi technique, social (acceptation) et surtout économique.

La production d'hydrogène peut s'effectuer de deux façons :

1. par reformage ou gazéification de produits fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon...) ou de produits issus de la biomasse (éthanol, par exemple)
2. par voie électrolytique (à partir d'électricité d'origine nucléaire, éolienne, photovoltaïque, etc.).

L'hydrogène peut également être produit sur site (au sein des stations-service) ou dans des installations centralisées à partir de la gazéification de la biomasse (résidus forestiers, pailles, etc.), du charbon ou par reformage d'énergies fossiles.

La chaîne d'approvisionnement en hydrogène



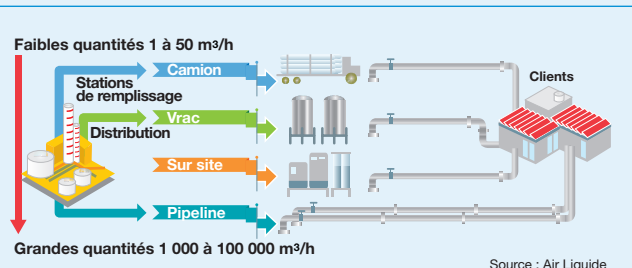
Distribution et stockage de l'hydrogène

Aujourd'hui, l'hydrogène est essentiellement utilisé comme matière première pour la chimie (synthèse de l'ammoniac) et pour le raffinage pétrolier, dans la désulfuration de l'essence et du gazole.

L'hydrogène est caractérisé par une forte volatilité et il existe quatre façons de le transporter : par pipeline, en bouteille ou en réservoir tubulaire, sous pression, ou enfin sous forme liquide (transport cryogénique).

En ce qui concerne le stockage, l'hydrogène peut être comprimé ou liquéfié. C'est sous forme liquide (à - 253 °C) que l'hydrogène présente une densité énergétique par unité de volume la plus élevée, mais la liquéfaction utilise environ 35 % de sa propre énergie et coûte environ quatre fois plus cher que le stockage de l'hydrogène comprimé.

Les différents modes de distribution



La problématique

L'hydrogène : carburant pour les transports

La production mondiale annuelle d'hydrogène est de 535 milliards de Nm³, soit l'équivalent de 138 millions de tonnes de pétrole (Mtep). Les besoins actuels en transport terrestre sont de l'ordre de 1 550 Mtep par an.

Lorsque l'hydrogène est produit à partir d'hydrocarbures, il serait nécessaire de capter et de stocker le CO₂ issu du processus de production afin d'obtenir un carburant net de gaz à effet de serre. Or, produire l'hydrogène à partir de gaz naturel coûte de 285 à 410 €/tep* en fonction du prix du gaz, auquel il convient d'ajouter environ 85 €/tep pour la capture et le stockage du CO₂, soit un total de 370 à 495 €/tep. Produire l'hydrogène par électrolyse à partir d'hydroélectricité ou d'électricité d'origine nucléaire conduirait à un coût d'environ 1225 €/tep. Sur le marché international, l'essence est cotée environ 350 €/tep.

L'industrie automobile étudie la possibilité d'une introduction de l'hydrogène comme carburant du futur. Cependant, bien que des techniques telles que le stockage sur hydrures paraissent prometteuses, il subsiste de nombreuses barrières avant un large développement de l'hydrogène carburant. Parmi celles-ci, on peut citer l'infrastructure de distribution, le stockage embarqué, l'absence de réglementation et de normes adaptées à ce sujet.

Les barrières actuelles à l'introduction de l'hydrogène sont les suivantes :

- contraintes physiques, technologiques et réglementaires liées à la production, au stockage, à la distribution et à l'utilisation de l'hydrogène en complète sécurité
- perception des risques associés à l'hydrogène.

Stockage d'hydrogène comprimé



* Tonne équivalent pétrole

Piles à combustible - principe de fonctionnement

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement et en continu l'énergie d'un combustible en électricité par réactions électrochimiques. Le système le plus simple permet, à partir d'hydrogène et d'oxygène, de fournir de l'eau et de l'électricité.

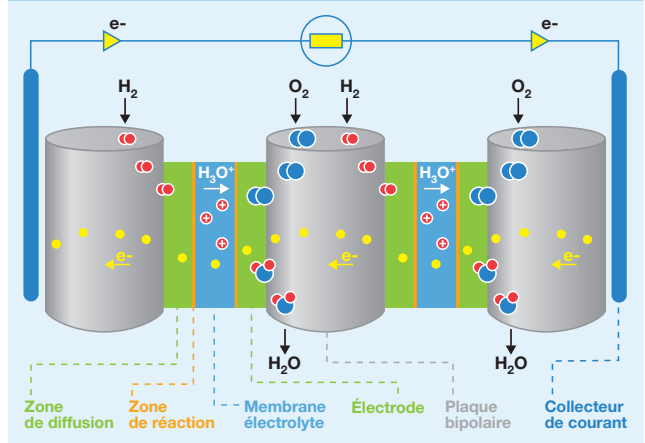
Les principaux avantages des piles à combustible sont leur

- haut rendement électrique
- fiabilité
- absence d'émissions
- faible niveau sonore.

Les différents types de piles à combustible

	Type	Electrolyte	T (°C)	Rdt (%)
AFC	Liquide	Solutions de KOH	80 - 90	55 - 60
PAFC	Liquide	Acide phosphorique	180 - 210	36 - 45
MCFC	Liquide	Carbonate fondu	600 - 700	50 - 60
DMFC	Liquide	Membrane polymère	80 - 90	~ 34
PEMFC	Solide	Membrane polymère	80 - 90	30 - 50
SOFC	Solide	Oxydes solides	800 - 1 000	50 - 70

Schéma de fonctionnement d'une PEMFC



Les piles à combustible se différencient selon leur électrolyte et leur température de fonctionnement même s'il existe deux grandes familles : liquide et solide.

Les piles à combustible de type liquide posent le problème du volume et de l'étanchéité et conviennent donc mieux à un usage stationnaire. Plus de 200 PAFC* sont ainsi utilisées dans le monde pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité.

Les piles à membranes solides telles que les PEMFC** et les SOFC*** ont l'avantage d'être plus compactes, donc mieux adaptées aux véhicules.

Les piles à membrane polymère (PEMFC), qui fonctionnent à environ 80° C, et les piles à oxydes solides (SOFC), opérées à plus de 700 ° C, sont les principales filières de fonctionnement.

* PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell

** PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell

*** SOFC : Solid Oxide Fuel Cell

Les enjeux

Les principaux défis pour les véhicules

Les cinq principaux défis à relever pour les véhicules dans les années à venir :

1. La réduction des coûts de production : pour être compétitif, le coût d'un système PAC va devoir se rapprocher de celui d'un moteur à combustion, soit environ 30\$/kWh.
2. La disponibilité et le coût du platine : le platine est déjà utilisé dans les pots catalytiques des véhicules mais il est également indispensable en tant que catalyseur au niveau des membranes de la pile. Aujourd'hui, la production mondiale de platine est estimée à environ 200 tonnes dont 75 % issues d'Afrique du Sud et un peu plus de 10 % de Russie. Sachant qu'il faut actuellement en moyenne 100 g de platine par voiture et que le marché français représente environ 2 millions de voitures/an, la production mondiale de platine serait tout juste suffisante pour satisfaire le marché français. L'un des principaux défis est donc de réduire d'un facteur cinq la quantité de platine utilisé dans les voitures.
3. L'autonomie des véhicules : aujourd'hui de 200 à 300 km selon les prototypes, l'autonomie est directement liée au stockage embarqué de l'hydrogène et, dans une moindre mesure, au rendement énergétique de conversion de la pile (que les contraintes d'intégration aux véhicules doivent dégrader le moins possible). Une autonomie équivalente à celle des véhicules actuels, soit environ 600 km, doit être visée.
4. Le démarrage à froid : parce qu'une pile à combustible produit de l'eau, son démarrage par des températures proches ou inférieures à 0 °C doit être amélioré.
5. La durée de vie de la pile : à ce jour, les constructeurs de pile à combustible les plus avancés annoncent une durabilité des piles d'environ 2 100 heures (ou 100 000 km) ; une durée de vie de 4 000 heures minimum est requise pour la pile.

La barrière principale : le coût

Les coûts d'infrastructure se chiffreront à terme en milliards de \$ tandis que le coût d'une station-service est actuellement compris entre 1,2 et 3 millions de \$.

A titre d'exemple, les autoroutes de l'hydrogène suivantes sont prévues :

- en Californie (50 à 100 stations-service en 2010 et 50 m\$ de dépenses publiques)
- au Canada (7 stations-service en 2010 et 9 m\$ de dépenses publiques)
- en Norvège (7 stations-service en 2008 et 3,5 m\$ de dépenses publiques).

En 2005, la totalité des véhicules hydrogène-pile à combustible sont des prototypes et, de la même façon qu'en ce qui concerne les stations-service, leur coût s'exprime en million(s) de dollars. C'est la raison principale pour laquelle le développement de cette filière à un stade commercial n'est pas prévu avant les années 2015 - 2020.

Parmi les principaux postes de coût du véhicule hydrogène-pile à combustible les deux plus importants sont la pile et le stockage d'hydrogène.

Le prix global d'un tel véhicule, dans l'hypothèse d'une production future de 500 000 piles/an, est ainsi estimé, selon les sources, de 2 000 à 10 000 € de plus qu'une voiture classique à essence ou gazole.

Les autres applications

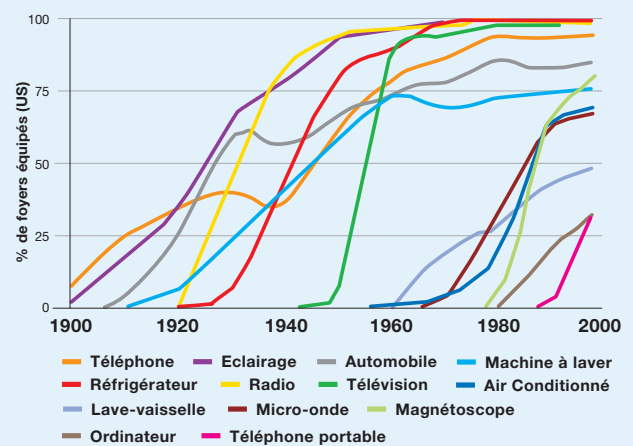
Compte tenu du rendement électrique attendu des piles à combustible, de la fiabilité et de la qualité du courant obtenu, de l'absence d'émissions et du faible niveau sonore, les applications envisagées sont les suivantes :

- applications dans les téléphones et ordinateurs portables en substitution aux batteries conventionnelles
- télécommunications, centres informatiques et de traitement de données
- génération électrique, co-génération ou tri-génération décentralisée pour applications résidentielle et commerciale
- marché automobile incluant les auxiliaires de puissance embarqués.

Autoroute de l'hydrogène et véhicule PAC



Le développement au stade commercial prend du temps



Sources : Federal Reserve Bank, Dallas

L'engagement de Total

Les acteurs

Au côté de sociétés, principalement nord-américaines, dédiées spécifiquement aux piles à combustible, se positionnent également les acteurs traditionnels du marché de l'énergie et de la chimie :

- **l'industrie chimique** développe des matériaux pour les composants du cœur de la pile à combustible comme la membrane et les plaques bipolaires
- **les constructeurs automobiles et leurs équipementiers** tentent d'optimiser et de miniaturiser le système pile avec ses auxiliaires et d'en réduire les coûts
- **l'industrie pétrolière** développe et teste des filières combustibles (développement de la technologie des réservoirs, infrastructures, sécurité)
- **les instituts de recherche** s'attachent à mettre au point les technologies des futures piles à combustible.

Bus à hydrogène



Le positionnement de Total en 2006

- Contribuer avec les autres acteurs du secteur à l'orientation de la transition vers le système hydrogène-pile à combustible.
- Participer activement aux études et travaux européens menés par la Plateforme Technologique Européenne Hydrogène et Piles à combustible, notamment en partenariat avec les autres acteurs majeurs industriels et la Commission européenne.
- Connaître le potentiel des piles à combustible PEMFC et SOFC pour des applications stationnaires et automobiles.
- Elargir notre offre combustible pour les applications stationnaires, puis à terme pour le marché automobile et pour les flottes captives.
- Participer à la mise en place de l'infrastructure de distribution de l'hydrogène carburant nécessaire à l'alimentation des véhicules développés pour ce carburant.

Les actions du Groupe

Total engage des actions concertées et développe une vision globale sur le système complet en considérant, d'une part, les aspects liés au combustible et à sa chaîne de transformation en hydrogène, d'autre part, les matériaux et les différents systèmes pour la pile à combustible.

Parmi ces actions :

- en partenariat avec la société de transports publics BVG, mise en circulation du premier bus à hydrogène à Berlin
- ouverture de la seconde station-service hydrogène publique à Berlin
- première expérience d'approvisionnement d'une flotte de véhicules avec de l'hydrogène
- test d'une pile à combustible stationnaire alimentée par réformeur de gaz liquéfié (GPL) à Le Roeux en Belgique
- installation d'un réformeur de GPL de 100 Nm³/h dans la station-service hydrogène de Berlin.

Nouvelle station à hydrogène de Total à Berlin

