

un jour en grand nombre des véhicules propulsés uniquement par des piles à combustible à membrane échangeuse de protons.

Les quantités de platine nécessaires sont moindres dans les piles qui fonctionnent sous une pression de plusieurs atmosphères : les vitesses de diffusion et de réaction de l'hydrogène et de l'oxygène sont augmentées. Toutefois, les gains sont faibles, et la pressurisation alourdit les piles, notamment à cause de la nécessité d'un compresseur. En outre, le compresseur, bruyant, réduit le rendement.

Aujourd'hui, tous les constructeurs de piles les pressurisent aux alentours de 1,5 atmosphère. La Société *Ballard Power Systems* fabrique ainsi des piles qui utilisent la pression appliquée pour expulser l'eau qui obstrue les canaux d'arrivée de l'oxygène. En 1989, cette société a mis au point une pile, de

45 kilogrammes pour un volume d'environ 30 litres, qui produisait cinq kilowatts à partir d'hydrogène gazeux et d'air comprimé. Toutefois, ce dispositif contenait pour 3 000 francs de platine. Un nouveau système, présenté en 1995, peut concurrencer le moteur à combustion interne : pour le même poids et le même volume, il produit 32,3 kilowatts, avec un rendement de 54 pour cent, et deux à dix fois moins de platine (la quantité exacte est tenue secrète). Différents modèles de piles de la Société *Ballard* équipent aujourd'hui des autobus qui roulent à Vancouver et à Chicago, ainsi que la plupart des prototypes automobiles à piles à combustible (voir la figure 1).

Les constructeurs automobiles américains qui participent à un projet national d'étude de voiture propre ont retenu la pile à combustible à membrane échangeuse de protons parmi

leurs deux voies de recherche (la seconde est l'association d'un moteur à combustion interne et d'accumulateurs électriques). D'ici à juillet 2000, ils auront dépensé entre cinq et dix milliards de francs pour la mise au point de cette pile.

Selon ces constructeurs, une pile à combustible ne sera compétitive avec le moteur à combustion interne que si elle coûte moins de 300 francs par kilowatt. Comment y parvenir ? On peut associer une pile à combustible de puissance moyenne et un accumulateur électrique, qui fournirait la puissance complémentaire nécessaire aux accélérations. Un tel système aurait un rendement total d'environ 40 pour cent si l'on récupérait l'énergie dans l'accumulateur lors des freinages (le moteur est alors transformé en générateur). L'accumulateur faciliterait aussi le démarrage des véhicules dont les piles à combustible devraient être préchauffées. Cette configuration a été utilisée sur plusieurs véhicules, notamment des autobus alimentés par des prototypes de piles à combustible à l'acide phosphorique. De tels véhicules hybrides pourraient être produits en grand nombre, en particulier avec des piles à combustible alcalines, qui nécessitent cinq fois moins de platine que les piles à membrane échangeuse de protons (mais pour lesquelles il faut enlever le dioxyde de carbone de l'air).

On réduira aussi les coûts en utilisant de nouveaux matériaux composites (graphite et polymères) et des mousses de métal résistant à la corrosion pour les distributeurs des plaques qui relient les électrodes. Le coût des membranes, 570 francs par kilowatt pour une pile classique, reste aussi un obstacle important. Selon la Société *Du Pont*, ce prix serait divisé par dix si la production atteignait 250 000 véhicules par an, mais le gain reste insuffisant, et les ingénieurs continuent à chercher de nouveaux électrolytes, avec des résultats encourageants en laboratoire.

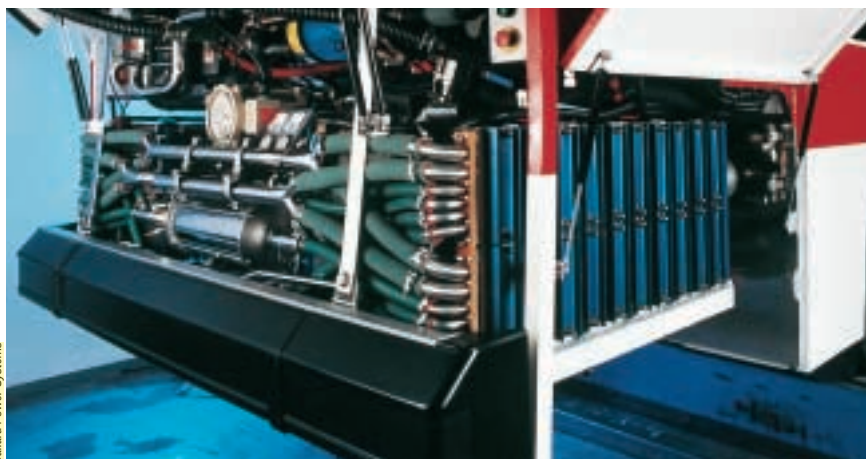
Un plein volumineux

L'oxygène est disponible en grandes quantités dans l'air qui nous entoure, mais comment emporter dans une automobile les trois kilogrammes d'hydrogène nécessaires à un trajet de 500 kilomètres ? À la pression atmosphérique, cette masse occupe un volume de 36 mètres cubes, soit cinq ou six fois le volume de l'habitacle.



Karl Korésch

2. CETTE AUSTIN A40, construite en 1966, était équipée de piles à combustible alcalines fabriquées par la Société *Union Carbide*. Ce véhicule n'a qu'un intérêt historique : les piles occupaient presque tout l'intérieur de la voiture, de sorte que les réservoirs d'hydrogène comprimé devaient être installés sur le toit.



Ballard Power Systems

3. UN AUTOBUS construit par la Société *Ballard Power Systems*, au Canada, fonctionne avec des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (visibles à droite). Il consomme de l'hydrogène gazeux comprimé et ne pollue pas.

La pressurisation du gaz à 700 atmosphères réduit son volume à 180 litres, trois fois plus qu'un réservoir d'essence actuel. La Société Ford prévoit de fabriquer un tel réservoir en matériaux composites, qui ne pèserait alors que 25 kilogrammes. La liquéfaction apporte un gain sup-

plémentaire : un réservoir cryogénique de 100 litres, pesant 45 kilogrammes, suffirait pour stocker les trois kilogrammes d'hydrogène. Toutefois, la liquéfaction de l'hydrogène consomme 40 pour cent de l'énergie contenue dans le gaz, et l'hydrogène liquide s'évapore rapide-

ment : après une semaine de stationnement, le réservoir serait vidé.

Le stockage le plus compact de l'hydrogène est aujourd'hui réalisé grâce à des composés nommés hydrures métalliques, qui absorbent jusqu'à deux pour cent de gaz en poids : 50 litres d'hydrure suffiraient à contenir les trois

DATE	PROMOTEUR	VÉHICULE	PILES	COMBUSTIBLE, RAYON D'ACTION
1966	Karl Kordesch	Austin A40	Alcalines, 6 kilowatts	Hydrogène comprimé, 320 kilomètres
1990 (opérationnel en avril 1994)	H Power, Université de Georgetown, Gouvernement des États-Unis	Trois autobus de 9,1 mètres	Acide phosphorique, 50 kilowatts	Méthanol reformé
1991 (opérationnel en février 1993)	Ballard Power Systems	Autobus de 9,8 mètres	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 120 kilowatts	Hydrogène comprimé
octobre 1993	Energy Partners	Voiture de sport «verte»	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 15 kilowatts	Hydrogène comprimé, 100 kilomètres
avril 1994	Daimler-Benz	Necar (utilitaire Mercedes-Benz 180)	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 60 kilowatts	Hydrogène comprimé
1994-1997	Ballard	Six autobus de 12,2 mètres	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 205 kilowatts	Hydrogène comprimé
mai 1996	Daimler-Benz	Necar 2 (Mercedes-Benz classe V)	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 50 kilowatts	Hydrogène comprimé, 250 kilomètres
novembre 1996	Toyota	Véhicule de sport RAV4	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 10 kilowatts, hybride	Hydrures métalliques, 250 kilomètres
mai 1997	Daimler-Benz	Nebus (autobus de 12 mètres)	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 190 kilowatts	Hydrogène comprimé, 250 kilomètres
août 1997	Renault	Laguna break	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 30 kilowatts	Hydrogène liquide, 500 kilomètres
septembre 1997	Toyota	Véhicule de sport RAV4	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 25 kilowatts, hybride	Méthanol reformé, 500 kilomètres
septembre 1997	Daimler-Benz	Necar 3 (Mercedes-Benz classe A)	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 50 kilowatts	Méthanol reformé, 400 kilomètres
décembre 1997	Mazda	Demlo FCEV break	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 25 kilowatts, hybride	Hydrures métalliques 170 kilomètres
mai 1998	Université de Georgetown, Nova BUS, Ministère américain des Transports	Autobus de 12 mètres	Acide phosphorique, 100 kilowatts, hybride	Méthanol reformé, 550 kilomètres
juillet 1998	DaimlerChrysler	Necar 4 (Mercedes-Benz classe A)	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 50 kilowatts	Hydrogène liquide, 400 kilomètres
juillet 1998	Zevco	Taxi londonien Millenium	Alcaline, 5 kilowatts, hybride	Hydrogène comprimé, 150 kilomètres
octobre 1998	Opel	Zafira	Membrane échangeuse de protons, sous pression, 50 kilowatts, hybride	Méthanol reformé

4. DE NOMBREUX VÉHICULES À PILES À COMBUSTIBLE ont été construits ces dernières années. Le tableau ci-dessus présente les plus notables de ceux qui ont été homologués pour la circulation sur les autoroutes.