

pas et ne coulent pas, sont d'utilisation plus simple que les électrolytes liquides. Depuis les années 1960, les chimistes ont ainsi fabriqué et testé de nombreux électrolytes polymères. Par exemple, le Nafion®, de la Société Du Pont, contient des groupes acide sulfonique $-SO_3H$ qui assurent la circulation des ions hydrogène (ou protons) : on fabrique une pile à membrane échangeuse de protons, qui fonctionne à environ 80 °C, en séparant les électrodes par une membrane de Nafion®. L'épaisseur d'une cellule, formée de deux électrodes et d'une membrane, atteint à peine 2,5 millimètres. En pratique, on en empile plusieurs afin d'obtenir la puissance nécessaire à la propulsion d'un véhicule. La cathode d'une cellule et l'anode de la cellule adjacente sont séparées par une plaque étanche qui assure aussi leur connexion électrique en série. Chaque face de cette plaque est munie de distributeurs qui amènent l'hydrogène et l'oxygène vers

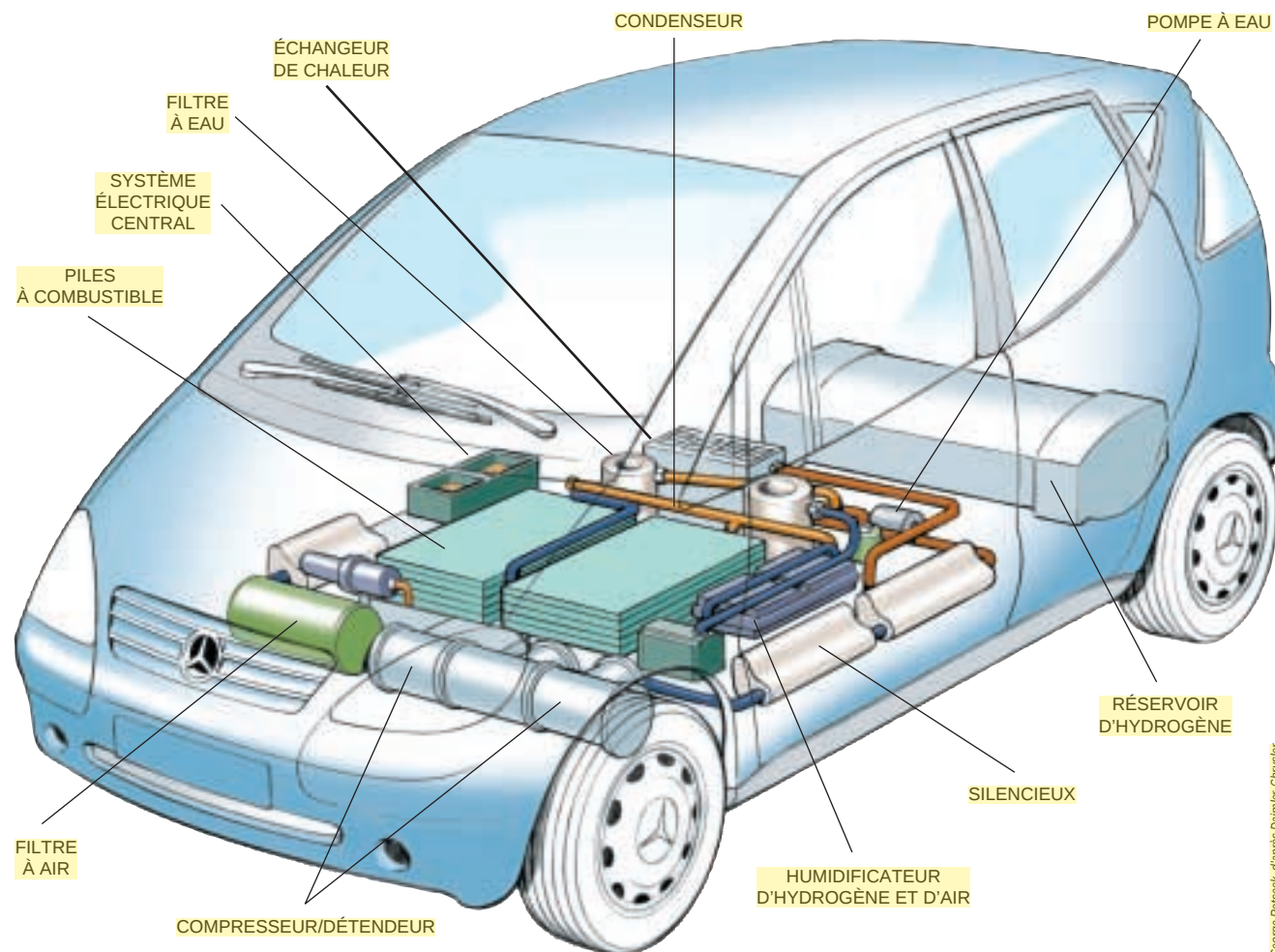
les électrodes : des canaux ou des matériaux poreux. Les plaques peuvent aussi contenir des canaux de circulation d'eau de refroidissement. Ces piles à membrane échangeuse de protons sont aujourd'hui utilisées dans tous les véhicules à piles à combustible.

Indispensable platine

Les piles à membrane échangeuse de protons ont toutefois un grave inconvénient : elles ne fonctionnent qu'avec un coûteux catalyseur à base de platine. Aujourd'hui, on dépose ce métal sous la forme de particules de cinq à dix nanomètres de diamètre (les plus petites que l'on sache fabriquer) à la surface de fines particules de carbone. En 1986, les piles à combustible utilisaient 16 grammes de platine par kilowatt de puissance produite. Le coût du platine, supérieur à 1 000 francs par kilowatt, était rédhibitoire, car les automobiles ont besoin de 50 kilowatts au

maximum de leur puissance. Depuis, des chercheurs du Laboratoire de Los Alamos, de l'Université A&M et de plusieurs entreprises ont divisé par 30 cette quantité, et d'autres améliorations de la structure des électrodes et de la façon dont le platine est utilisé la diviseront peut-être encore par deux. On ne gagnera guère davantage, sauf découverte imprévue, par exemple si l'on remplaçait le platine par un autre matériau, ce qui a été tenté, sans succès jusqu'à présent.

L'utilisation du platine pose un problème d'approvisionnement : si l'on équipait chaque année deux millions de voitures, soit environ cinq pour cent de la production automobile mondiale, avec des piles à combustible de 50 kilowatts, on consommerait 50 tonnes de platine, soit un tiers de la production mondiale actuelle. On récupérera bien sûr le platine à la fin de la vie des piles à combustible, mais il est malgré tout peu probable que l'on produise



1. DES PILES À COMBUSTIBLE installées sous le plancher produisent l'électricité nécessaire à la propulsion de ce véhicule, la Necar 4 de la Société DaimlerChrysler. Un compresseur maintient les piles sous pression. L'air et l'hydrogène servant de carburant traversent

un humidificateur et un échangeur thermique avant d'arriver à la pile. Un condenseur récupère l'eau produite par la pile. L'hydrogène liquide est stocké dans un réservoir cryogénique. Un radiateur à air (qui n'est pas dessiné) évacue la chaleur excessive.

George Retsek, d'après DaimlerChrysler

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 Kordesch

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.