

Rouler à l'hydrogène ?

Informations fournies par :

Félix REUTIMANN, section Trafic, division Protection de l'air, OFEFP

Une solution d'avenir, mais encore des problèmes à régler. En revanche, les véhicules hybrides, plus écologiques eux aussi, sont prêts à démarrer.

Avec la multiplication des véhicules privés, le trafic urbain devient un casse-tête. De nombreuses voix réclament des formes de mobilité plus respectueuses de l'environnement. L'industrie automobile, de son côté, incitée notamment par une législation de plus en plus sévère, cherche activement de nouveaux systèmes de propulsion. A part les voitures 100 % électriques, elle met le paquet sur la pile à combustible d'hydrogène et les véhicules hybrides.

Les constructeurs s'intéressent aussi aux systèmes d'accumulation à court terme pour la récupération de l'énergie de freinage, qui promettent une réduction sensible de la pollution tant atmosphérique que sonore.

Les véhicules hybrides

Les *véhicules hybrides* combinent deux systèmes de propulsion distincts, par exemple un moteur à explosion et un moteur électrique. Sont également qualifiés d'hybrides les deux et trois roues qui associent la force musculaire à un moteur d'appoint électrique (voir encadré « *Systèmes de propulsion hybrides* »).

Divers modèles de bus et voitures de tourisme hybrides se trouvent actuellement en phase d'essai. L'objectif que se sont fixés les industriels est double : premièrement, réduire de moitié leur consommation par rapport aux véhicules conventionnels et deuxièmement, des taux d'émission nocives conformes à la norme ULEV. Autrement dit *Ultra Low Emission Vehicle Norm*, norme introduite par l'Etat de Californie en 1998 et équivalente aux valeurs admises par le projet de norme EURO 4 prévu pour 2005. Les taux d'émissions de ce type de véhicules ne devraient pas dépasser 10 à 30 % de ceux autorisés pour les voitures à essence traditionnelles (EURO 1).

Les premiers modèles de série bientôt disponibles

La seule voiture hybride parallèle fabriquée en série aujourd'hui est la Toyota Prius, dotée d'un moteur à essence à injection directe de 1 500 cm³ limité à 4 000 tours par minute, avec

Système de propulsion hybride

On distingue généralement entre *deux grands types* de systèmes de propulsion hybrides :

- *Les hybrides parallèles* : deux systèmes de propulsion complémentaires fonctionnant en parallèle. Dans le cas des vélos de série à deux ou trois roues, la force musculaire est soutenue par un moteur électrique d'appoint. Les véhicules pilotes (voitures de tourisme, bus) ont deux moteurs, l'un électrique et l'autre à explosion. Ce dernier sert aussi bien à la propulsion directe qu'au rechargement des batteries par l'intermédiaire d'un générateur. Le moteur électrique fonctionne dans les plages de puissance basses (démarrage ou trafic urbain) ou comme complément au moteur à explosion dans les plages élevées. L'avantage réside dans la combinaison de deux circuits de propulsion indépendants de puissance modeste. Point faible : le transport de deux systèmes de propulsion distincts, plus lourd et plus coûteux.

- *Les hybrides en série* : les deux systèmes de propulsion sont branchés l'un à l'autre. Exemple typique pour les vélos : le *Flyer*, où le système électrique se met en marche dès que l'on actionne les pédales. Il existe également des prototypes de voiture de tourisme équipés d'un petit moteur à explosion ou d'une turbine à gaz qui, en phase de marche optimale, alimente le moteur électrique et/ou la batterie à travers un générateur. L'avantage de cette variante est le rendement optimal du moteur à explosion, avec une consommation et des taux d'émission sans concurrence ainsi que la propulsion purement électrique du véhicule ; en même temps, on peut renoncer à certaines parties mécaniques comme la transmission et le différentiel. Inconvénient : le moteur électrique doit être dimensionné en fonction de la puissance totale nécessaire.

une puissance de 41 kW. Ce dernier est complété par un moteur électrique de 30 kW utilisé dans les plages de puissance basses, et alimenté par une batterie Nickel-Métalhydride. En cycle d'essai américain, la consommation de la Prius est de 3,6 l aux cent. Elle coûte environ 26 000 F mais n'est pour l'instant disponible qu'au Japon.

L'Allemagne lancera elle aussi bientôt son véhicule hybride parallèle, l'AUDIDUO. Il est équipé d'un moteur turbo-diesel de 1,9 l et 66 kW ainsi que d'un moteur d'appoint électrique de 21 kW en débit continu, alimenté par une série de batteries au plomb pesant 320 kg.

Comme aucun véhicule hybride de série n'est encore disponible en Suisse aujourd'hui, on n'a pu faire aucune comparaison fiable de leur écobilan avec celui de véhicules conventionnels. Les derniers développements techniques à l'étranger laissent cependant présager que l'inconvénient du poids supplémentaire sera largement compensé par un régime optimisé, la petite taille du moteur à explosion et la récupération partielle de l'énergie de freinage. La mise en circulation de ces véhicules permettra à l'avenir de réduire les émissions nocives. Quant à leur bilan écologique global, il devrait lui aussi être positif.

Reste à voir comment les véhicules hybrides se comporteront dans la pratique. Vu leur construction plus complexe, leur prix d'achat restera sans doute longtemps plus élevé que celui des véhicules à essence conventionnels. Leur entretien aussi est plus exigeant. En revanche, les deux et trois roues à moteur d'appoint électrique se distinguent tant par leur rendement que par leur prix modique.

La pile à combustible, une solution d'avenir ?

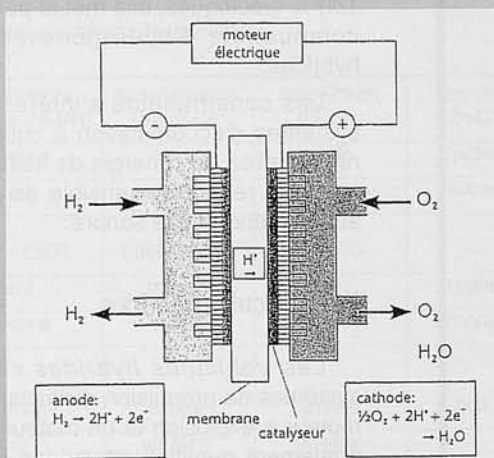
La *pile à combustible* fonctionne en convertissant directement l'énergie chimique en énergie électrique. Ce procédé de combustion froide par oxydation exploite la réaction de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air (électrolyse inversée) pour produire du courant avec un meilleur rendement que celui du moteur à explosion ou du générateur (voir encadré « *Pile à combustible : comment ça marche ?* »). La cellule électrochimique (élément central de la pile à combustible) a de beaux arguments à avancer : haut rendement énergétique, niveau sonore réduit, absence de toute émission polluante. De dimensions modestes, plusieurs unités de combustion peuvent être reliées pour augmenter la puissance.

Le principal problème des piles à combustible pour les véhicules, c'est que l'hydrogène n'est qu'une source d'énergie secondaire : on doit d'abord la « fabriquer » à partir de sources primaires comme l'eau ou le gaz naturel. Or, tant sa fabrication que son transport et son stockage sont très gourmands en énergie.

Plusieurs groupes automobiles se sont efforcés dernièrement de perfectionner ce système en vue d'une production en série. Ils ont testé diverses possibilités, dont la production directe d'hydrogène à bord du véhicule à partir d'essence ou de méthanol au moyen d'un réformeur. Mais très peu de prototypes sont disponibles à ce jour. En mai 1997, le groupe allemand Mercedes-Benz a présenté NEBUS, premier bus à pile à combustible utilisable en service de ligne, fonctionnant aujourd'hui à Mannheim.

Il faudra toutefois attendre quelques années pour voir les véhicules à cellule électrochimique fabriqués en série ; c'est pourquoi leur potentiel d'économies ne peut être que grossièrement estimé. Pour le trafic local tout au moins, l'utilisa-

Pile à combustible : comment ça marche ?



La membrane à échange de protons (PEM, Proton Exchange Membrane), utilisée aujourd'hui avant tout pour les applications mobiles, exploite un procédé purement électrochimique ; de ce fait, elle n'obéit pas aux principes thermodynamiques d'un moteur à explosion. Son élément central est une membrane plastique épaisse de 0,1 mm, conductrice de protons, recouverte d'un catalyseur en platine et d'une électrode de papier de graphite poreux perméable aux gaz. De fins canaux sont ménagés dans les plaques bipolaires placées de chaque côté de la membrane, chaque côté contenant un gaz différent, l'un de l'hydrogène et l'autre de l'air. Le catalyseur ionise l'hydrogène et le décompose en ions positifs d'hydrogène (protons) et en électrons négatifs ; les protons pénètrent la membrane perméable et l'anode se charge négativement. Du côté de la cathode, les molécules d'oxygène excitées par le catalyseur absorbent des électrons pour se transformer en ions d'oxygène, et la cathode se charge positivement. Entre l'anode et la cathode se crée alors une tension électrique exploitable. Outre le courant continu, la réaction ne produit que de la chaleur et de l'eau. La température de fonctionnement est d'environ 80 °C.

tion directe d'hydrogène donnera à ces véhicules un avantage décisif sur les voitures conventionnelles, qu'il s'agisse du bruit ou de la pollution. Quant aux répercussions écologiques globales, le bilan est moins net. On ne maîtrise pas encore les difficultés posées par la production, le stockage et le transport de l'hydrogène. Le jour où l'on parviendra à produire efficacement de l'hydrogène à partir de gaz naturel ou de biogaz, cette technique pourra véritablement contribuer à réduire les nuisances du trafic motorisé privé. Mais d'après les expériences actuelles, on peut déjà prévoir que c'est surtout pour les applications stationnaires – couplage chaleur-force – que les divers types de cellules électrochimiques s'imposeront à l'avenir.

Le tableau montre la quantité d'énergie considérable que nécessite la production et le stockage de l'hydrogène. En admettant que la cellule électrochimique et le moteur électrique ont un rendement énergétique deux fois supérieur à celui des moteurs à combustion conventionnels, le rendement énergétique de l'hydrogène produit par électrolyse ne dépasse pas celui des systèmes actuels. Même si l'on met au point des procédés d'électrolyse utilisant des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne ou hydraulique), on peut se demander si cela vaut la peine : n'est-il pas plus rationnel d'utiliser les cellules électrochimiques dans des installations fixes pour la production combinée de chaleur et d'électricité, en remplacement des centrales électriques à mazout et à charbon ? Leur utilisation pour les applications mobiles pourrait cependant se justifier dès que l'on sera parvenu à produire l'hy-

drogène directement à bord du véhicule, à partir de gaz naturel, de biogaz ou de méthanol.

Récupération de l'énergie de freinage

Pour récupérer l'énergie de freinage de véhicules à moteur électrique, on cherche actuellement à mettre au point des *accumulateurs à court terme* efficaces. Parmi les moyens déjà à disposition, les volants d'inertie sont certes efficaces mais augmentent considérablement le poids des véhicules. Une autre possibilité consiste à renvoyer l'énergie de freinage vers la batterie, mais son rendement relativement médiocre (10 à 20 %) rend cette technique peu praticable. C'est donc vers des solutions à plus haut rendement que se tournent actuellement les recherches. Comme les *surcapaciteurs*, sorte de supercondensateurs capables de stocker pour un bref instant de l'énergie mécanique de haute densité de puissance. On procède actuellement aux tests en vue d'une production en série. Pour les véhicules lourds comme les trolleybus, on envisage également des systèmes magnétiques dynamiques (systèmes MDS).

L'accumulation intermédiaire à court terme de l'énergie de freinage peut se montrer fort utile en cas de conduite dynamique, comme pour un bus de ligne ou le trafic urbain : elle permet de réaliser des économies d'énergie considérables et constitue une réserve de puissance à court terme pour la réaccélération. Enfin, elle contribue à réduire les polluants et les nuisances sonores.

(Environnement 3/98)

Comparaison des rendements énergétiques respectifs de divers modes de propulsion pour les véhicules à moteur (valeurs de consommation y compris la production du carburant)

	Rendement de la production du carburant	Rendement d'un moteur à explosion	Rendement d'une cellule PEM	Rendement du système de propulsion
Essence* : extraction, raffinage et transport	85 %	20 %		17 %
Diesel* : extraction, raffinage et transport	89 %	23 %		21 %
Gaz naturel : utilisation directe	89 %	20 %		18 %
Méthanol de gaz naturel : utilisation directe	67 %	20 %		13 %
Propulsion hybride **	85 %	35 %		30 %
Hydrogène : électrolyse + compression	46 %		43 %	20 %
Hydrogène : gaz naturel + compression	67 %		43 %	29 %
Hydrogène : électrolyse + liquéfaction	34 %		43 %	15 %
Hydrogène : gaz naturel + liquéfaction	45 %		43 %	19 %
Méthanol : reformage vapeur + cellule PEM	72 %		33 %	24 %

* Véhicule de petite taille 730 kg. ** Véhicule de petite taille 1 000 kg.