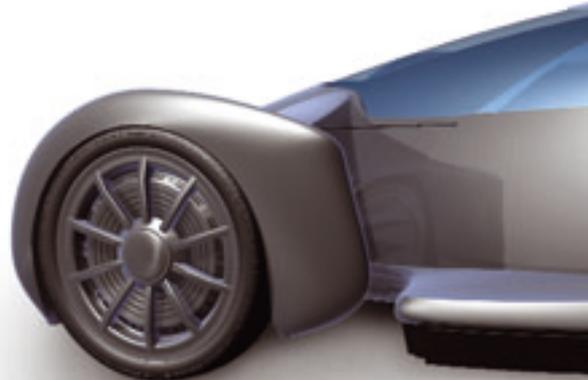




# La voiture à hydrogène



**Benjamin Dessus** est ingénieur et économiste. Il préside actuellement le club Energie prospective et débats du Commissariat général du Plan.

Les véhicules « tout-électrique » seront trop peu rentables

## L'idée est belle, la réalité têtue

**Benjamin Dessus**

**L'enjeu est mondial. Lutter contre l'effet de serre impose de s'attaquer à la voiture. Superbe défi, la pile à hydrogène est présentée comme la solution écologique par excellence. Pourtant, sans même prendre en compte les difficultés technologiques, l'examen de l'ensemble de la filière, « du puits à la roue », n'autorise pas ce bel optimisme.**

Nul ne l'ignore, la croissance très rapide du trafic automobile observée dans les pays riches, son développement dans les dix ou vingt années qui viennent dans les grands pays comme la Chine, l'Inde

ou le Brésil, puis dans les pays moins

avancés, vont créer une situation intenable aussi bien en termes de ressources énergétiques que d'émissions de gaz à effet de serre, en particulier de CO<sub>2</sub><sup>(1)</sup>.

Or, l'hydrogène comme carburant est de plus en plus présenté par les principaux acteurs en présence comme « la » solution. Les constructeurs automobiles y

voient la garantie de leur pérennité, les gouvernements une porte de sortie pour éviter d'imposer des mesures impopulaires destinées à limiter la circulation automobile, les écologistes le carburant propre par excellence. L'hydrogène combinerait toutes les vertus.

Qu'on en juge. Il est partout dans la nature. Pour en disposer à satiété, il « suffit » de casser des molécules d'eau pour le séparer de l'oxygène, ou de l'extraire des matières organiques en le séparant du carbone. En outre, la technologie de la pile à combustible fournit un moteur à hydrogène avec un bon rendement à toutes les allures et pour toutes les puis-

sances. Enfin ce moteur ne fait pas de bruit et ne pollue pas (il ne rejette que de l'eau).

Ceux qui émettent des réserves seraient des attardés effrayés par le progrès, comme nos arrière-grands-parents l'étaient par le train.

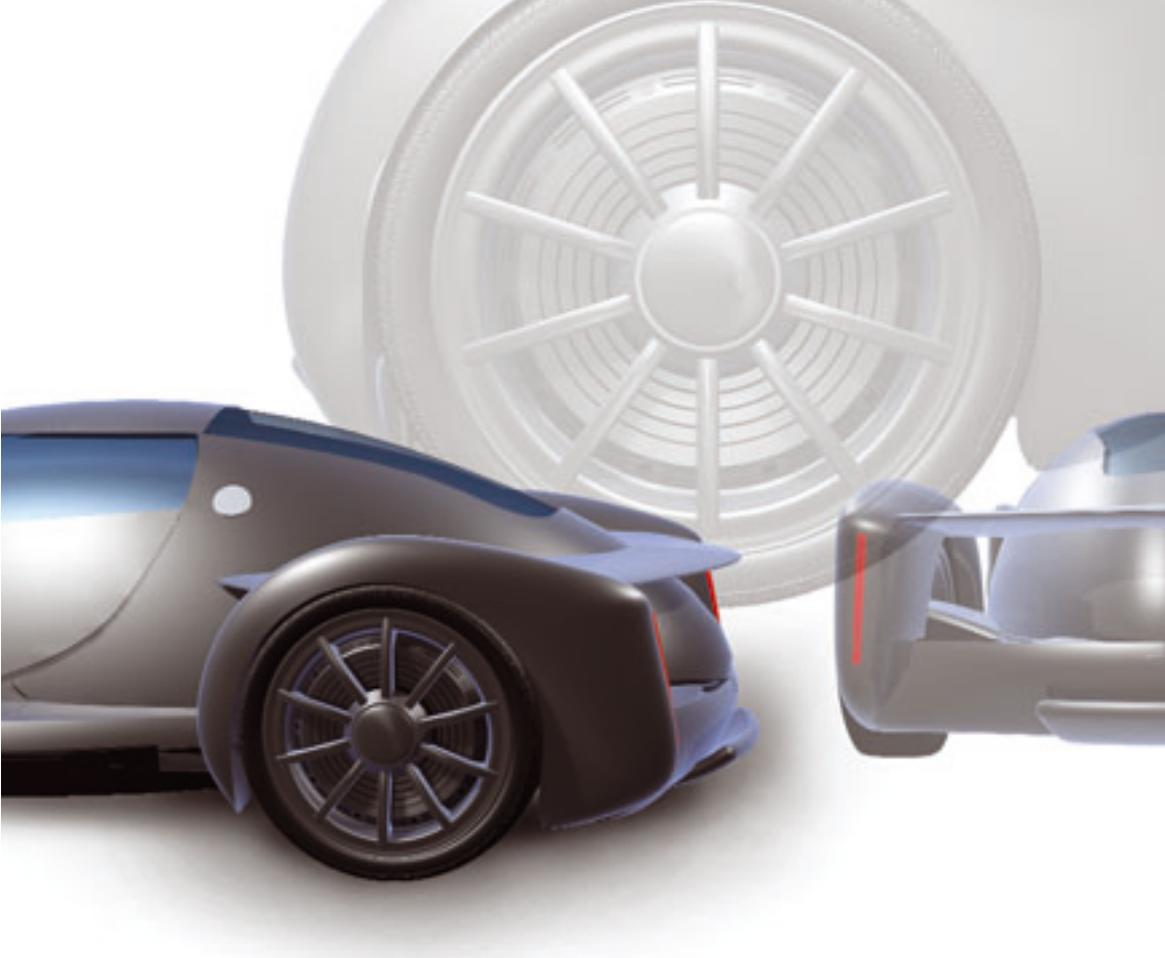
### **Embrouillamini multidisciplinaire.**

Est-il permis d'y regarder d'un peu plus près et d'essayer de faire la part des choses? Le sujet est d'une grande technicité, et fait appel à de multiples disciplines, couvrant plusieurs champs des sciences de l'ingénieur mais aussi des sciences sociales. Le débat est embrouillé, en raison des professions de foi enthousiastes qui masquent la dure réalité, mais

aussi parce que tenter honnêtement d'y voir clair conduit le plus souvent à s'enliser dans l'analyse des chances de succès des recherches et développements conduits sur les divers compartiments de la filière, dates et coûts à l'appui (pile à combustible, production et stockage de l'hydrogène...).

Je choisis ici une démarche différente, qui permet à mon sens de bien prendre la mesure du problème. Faisons crédit aux enthousiastes. Supposons que les performances et les coûts de cette nouvelle filière automobile, annoncés comme accessibles par les chercheurs et les constructeurs dans les dix ou quinze ans qui viennent,

W3 Pour en savoir plus allez sur notre site [www.larecherche.fr](http://www.larecherche.fr)



\* Une batterie tampon est interposée entre la source d'électricité et les moteurs placés sur les roues du véhicule

\* Le reformage est un ensemble de réactions chimiques qui extrait l'hydrogène d'un hydrocarbure.

(1) B. Dessus, « L'automobile: un exercice de prospective mondiale à long terme », *Culture technique*, 25, 1992; B. Dessus « 2020 L'autocondamnation? », *Enerpresse*, 11 avril 1991.

**General Motors a présenté début 2002 son prototype « Autonomy »**, voiture fonctionnant uniquement grâce à une pile à hydrogène alimentant quatre moteurs électriques, chacun intégré à une roue. Dessins d'artiste.

seront effectivement atteints. Et comparons cette solution « hydrogène-pile à combustible » aux autres solutions techniques qui se profilent au même horizon. Pourquoi choisir une telle méthode? Parce que le plus grand défaut des chercheurs et des ingénieurs porteurs d'une nouvelle idée est bien souvent d'oublier que leurs collègues d'autres filières ne restent pas inactifs. La comparaison des mérites potentiels d'une filière à un horizon donné doit donc se faire avec ceux des autres filières au même horizon de temps, et non pas, comme ils le font souvent, avec les filières d'aujourd'hui.

**Permanence automobile.** On peut admettre qu'une automobile sera

toujours constituée de quatre roues, d'un châssis, d'un ou de plusieurs moteurs et d'un certain nombre d'accessoires de conduite (freins, volant...), de confort (vitres, climatisation...), de sécurité (renforts de carrosserie, airbags...). C'est ce véhicule de base qu'il s'agit de propulser.

Examinons une série de solutions de propulsion, en partant de la « queue », l'énergie mécanique fournie aux roues, pour remonter à la « tête », à travers différents types de groupes motopropulseurs, différents carburants, différents procédés de transformation, jusqu'à la source même de ces différents carburants (pétrole, gaz naturel, énergies renouvelables ou nucléaire pour produire l'électricité).

On pourra ainsi reconstituer l'arbre des différentes filières technologiques en compétition, expliciter chaque étape de leur bilan énergétique et environnemental, et parvenir à une comparaison complète et homogène des différentes solutions qui s'offrent ou s'offriront à nous dans les années qui viennent.

### Les performances énergétiques de la traction électrique dépassent de loin celles des moteurs thermiques

Un schéma arborescent donne une illustration simplifiée des filières en présence (fig. 1). Le premier arbre concerne l'ensemble des filières reposant sur un moteur thermique à allumage commandé ou diesel susceptible de fonctionner avec différents types de carburant (essence, gasoil, GPL, gaz naturel...). Le second arbre représente les filières utilisant des moteurs électriques d'entraînement des roues, des transmissions électroniques, une batterie de stockage tampon\* et un système de charge de batteries. En amont, il faut soit alimenter le chargeur de batteries par le réseau électrique, soit installer un dispositif de fabrication d'électricité à bord du véhicule:

pile à combustible, moteur thermique avec alternateur... Les deux systèmes (exploitation du réseau électrique et fabrication d'électricité à bord) ne sont d'ailleurs pas incompatibles. Si l'hydrogène est utilisé, il faut prévoir, plus en amont encore, les systèmes de production et de stockage de ce combustible. Là encore, ces systèmes peuvent être soit extérieurs au véhicule (typiquement l'électrolyse ou le reformage\* centralisé du méthane), soit embarqués (reformage du méthanol).

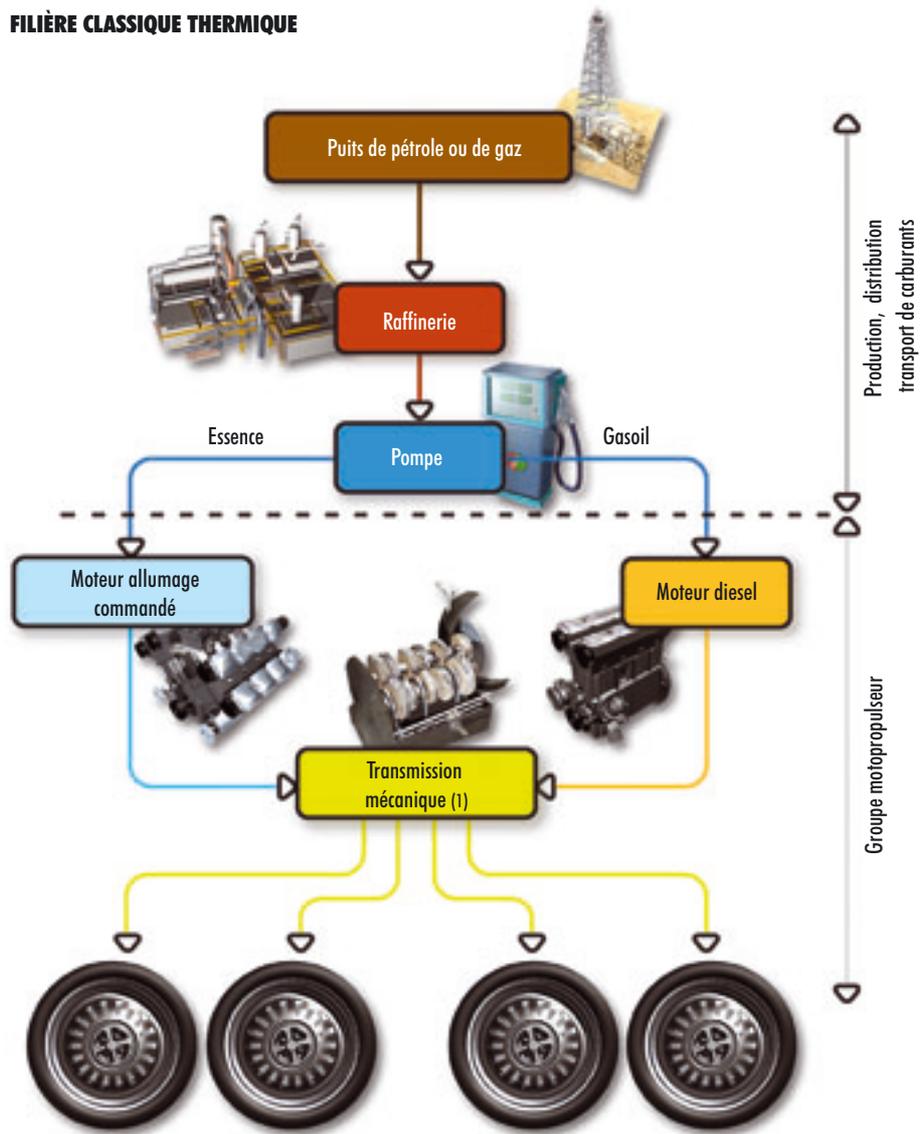
Voyons maintenant le cheminement des dépenses énergétiques tout au long de ces arbres de façon à mettre en évidence les points durs du bilan de fonctionnement de chacun d'entre eux. Comme l'efficacité énergétique d'usage des voitures dépend beaucoup de la nature des trajets effectués (ville ou rase campagne...), il faut choisir un cycle d'usage normalisé. Je retiens ici le cycle couramment employé pour faire la comparaison des performances des automobiles en Europe.

Par rapport au moteur thermique, le moteur électrique offre un bien meilleur rendement. Trois raisons à cela. D'abord, en le démultipliant (un moteur pour chaque roue), on évite les pertes d'énergie dues à la complexité du sys-

## En deux mots

**Le moteur à hydrogène a toutes les qualités. L'élément est omniprésent, et sa combustion ne produit que de l'eau. Une fois que les dernières difficultés technologiques seront surmontées, la pile à combustible s'imposera naturellement. Mais que vaut ce discours? Donnons crédit aux enthousiastes. Plaçons-nous à l'horizon 2015 ou 2020, et supposons les problèmes techniques résolus. Comparons les différentes filières qui sont alors en compétition. Du point de vue du bilan énergétique global, la filière hydrogène n'est pas la plus efficace. Or, aujourd'hui, les voitures exploitant la pile à combustible ne sont encore que des prototypes. Leurs principales concurrentes en termes de bilan énergétique, des voitures hybrides exploitant à la fois un moteur thermique et un moteur électrique, sont déjà sur le marché. Conclusion...**

FILIERE CLASSIQUE THERMIQUE



(1) Ensemble arbre à câmes, boîte de vitesse, pont, arbre de transmission.

Figure 1. Du puits à la roue, aujourd'hui et demain

Le premier arbre décrit les voitures actuelles. Noter la place prise par le système de transmission mécanique. Le second arbre décrit les filières en devenir ou actuellement concevables. La transmission mécanique disparaît au profit de la transmission électrique. Le moteur thermique traditionnel (rameau de gauche) devient optionnel, mais n'est pas forcément à jeter aux orties...

tème de transmission mécanique (bielles, arbre de transmission, boîte de vitesses, différentiel...). Le rendement de transmission électrique est donc proche de 100 %, contre 90 % pour la transmission mécanique. Ensuite, grâce à une batterie tampon, le moteur électrique permet de récupérer une partie de l'énergie dissipée pendant les périodes de freinage et de la stocker pour un usage ultérieur. L'économie d'énergie ainsi réalisée est aussi de l'ordre de 10 %. Enfin et surtout, le rendement du moteur proprement dit (transformation en énergie mécanique) est très en défaveur du moteur thermique: autour de 35 % pour l'essence et de 40 % pour le diesel, contre 90 % à 95 % en moyenne pour le moteur électrique. Le rendement du moteur thermique dépend aussi beaucoup du régime imposé (départ à froid, fortes accélérations, ralenti...), ce qui n'est pas le cas du moteur électrique.

L'association du thermique et de l'électricité améliorera fortement les rendements avec le même approvisionnement en carburant

Quand on tient compte de la réalité du trafic, le rendement global moyen d'usage du carburant stocké à bord, en considérant l'électricité comme un carburant, est finalement de l'ordre de 85 % à 90 % pour les technologies électriques contre 20 % à 25 % pour les filières thermiques: il n'y a pas photo!

Cet avantage va cependant être sensiblement réduit par la probable généralisation des voitures hybrides. A l'horizon de dix ou quinze ans que je me suis fixé, la bonne comparaison n'est pas à faire avec le moteur thermique, mais avec un dispositif dans lequel le moteur thermique nourrit un moteur électrique par le biais d'un alternateur et d'une batterie tampon (sur notre schéma, c'est la partie gauche du deuxième arbre). Encore chère, cette technologie est

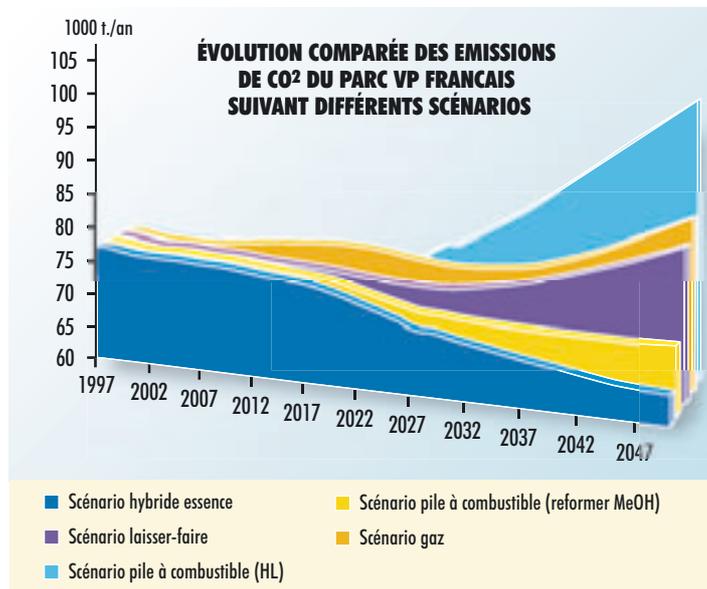
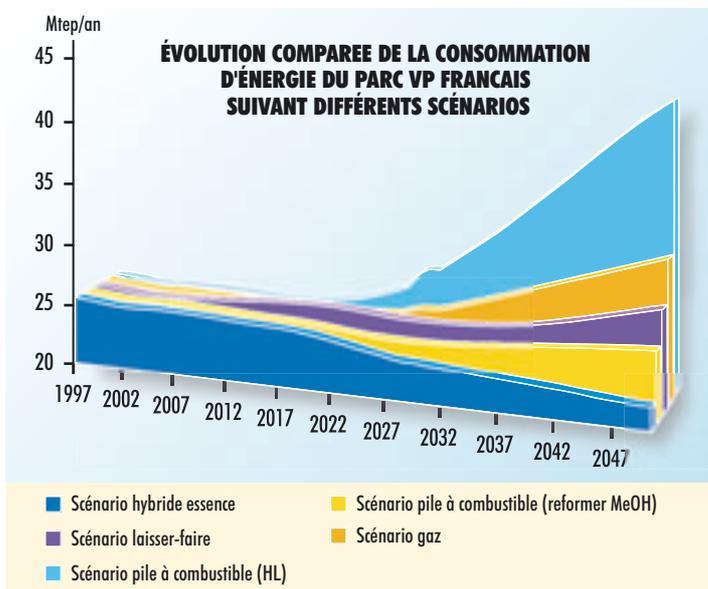
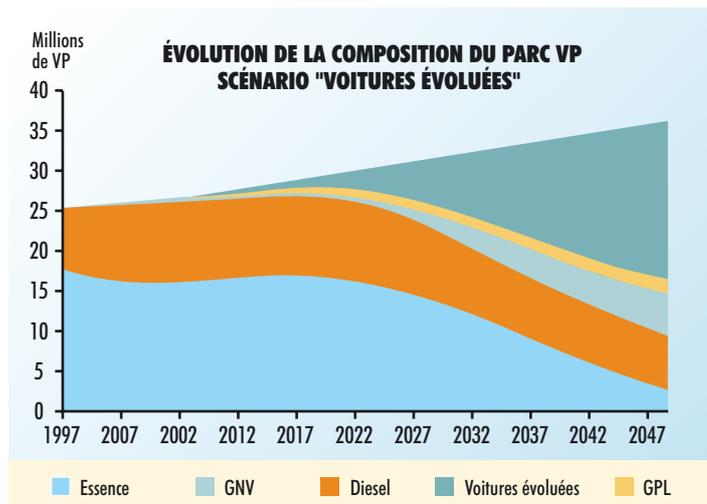
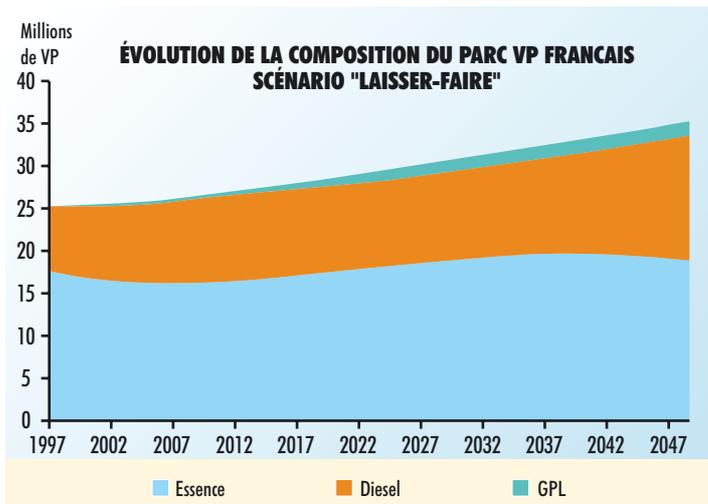
déjà commercialisée auprès des particuliers (la Prius de Toyota, la Civic de Honda) et les coûts devraient baisser rapidement. Si l'on se réfère aux estimations les plus courantes, le moteur thermique hybride a un rendement de 35 % à 42 % et la pile à combustible un rendement de 40 % à 55 %. On voit que la différence entre les deux filières se réduit.

**Batteries insuffisantes.** Mais la question du rendement du cycle

allant du moteur aux roues n'est qu'une partie du problème. Si l'on considère maintenant l'alimentation du moteur, le tableau s'inverse. Pour la filière thermique (allumage commandé ou diesel), c'est très simple et rapide, puisque l'on peut aisément stocker le carburant nécessaire à bord du véhicule. Les voitures actuelles ont pour la plupart une autonomie dépassant 500 kilomètres, et le plein se fait en quelques minutes. Avec le moteur électrique, les

choses se compliquent. Une solution à écarter est l'alimentation directe par le réseau. L'autonomie et la disponibilité du véhicule dépendent alors directement de la capacité de stockage des batteries et du temps de recharge nécessaire. Toujours à l'horizon de dix ou quinze ans, tout le monde s'accorde pour estimer que nous serons loin du compte: batteries de plusieurs centaines de kilos pour une centaine de kilomètres d'autonomie, temps de





**Figure 2.** Plusieurs scénarios d'évolution du parc français de véhicules particuliers (en haut) ont été évalués (en bas) du point de vue de la consommation d'énergie (à gauche) et des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) (à droite). Si des « voitures évoluées », propulsées par une pile à méthanol ou, mieux encore, par un système hybride à essence, sont introduites de façon à constituer la moitié du parc d'ici à cinquante ans, la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> seront fortement réduites par rapport au scénario « laisser-faire ». En revanche, ce dernier aurait de meilleurs résultats que si la moitié des véhicules étaient équipés de piles à hydrogène liquide. Le scénario le plus catastrophique serait le simple remplacement des véhicules diesel par des véhicules au gaz naturel.

exploitées pour évaluer le rendement global à moyen terme de chaque filière, « du puits à la roue » (fig. 5)<sup>(2)</sup>. La comparaison donne un léger avantage aux hybrides diesel, suivis par la filière pile alimentée par un reformeur de méthanol. Les résultats trouvés ne sont naturellement pas intangibles, ils évolueront avec la recherche. Ils montrent en tout

cas les gains très importants qui peuvent être attendus des deux catégories de filières hybrides (sauf pour l'électrolyse) par rapport aux filières « classiques », même en tenant compte des progrès encore possibles, de l'ordre de 20 % à 30 % maximum, dont celles-ci pourraient bénéficier. Pour les meilleures des technologies hybrides, à pile ou à moteur

thermique, ce gain par rapport aux véhicules à essence se traduit notamment, pour des véhicules de taille moyenne (du type Golf ou Mégane), par une division par deux de la consommation moyenne d'équivalent pétrole. Mais il est bien difficile d'établir une hiérarchie claire de performance énergétique entre les solutions hybrides avancées. C'est d'autant plus difficile que les véhicules hybrides à essence ont une bonne longueur d'avance sur les véhicules à pile à combustible. Ceux-ci n'existent qu'à titre de prototypes (ainsi l'Autonomy de General Motors) et sont encore loin des performances annoncées pour 2010. Il est en tout cas indispensable d'avoir ces ordres de grandeur en tête si l'on veut apprécier les

chances de la voiture à hydrogène. Il faut maintenant compléter le raisonnement en y intégrant le coût des émissions polluantes. Les données disponibles montrent que vers 2010-2015 les progrès technologiques pressentis sur les différentes filières sont susceptibles, pour un même service rendu, de se traduire pour les véhicules mis sur le marché à cette époque :

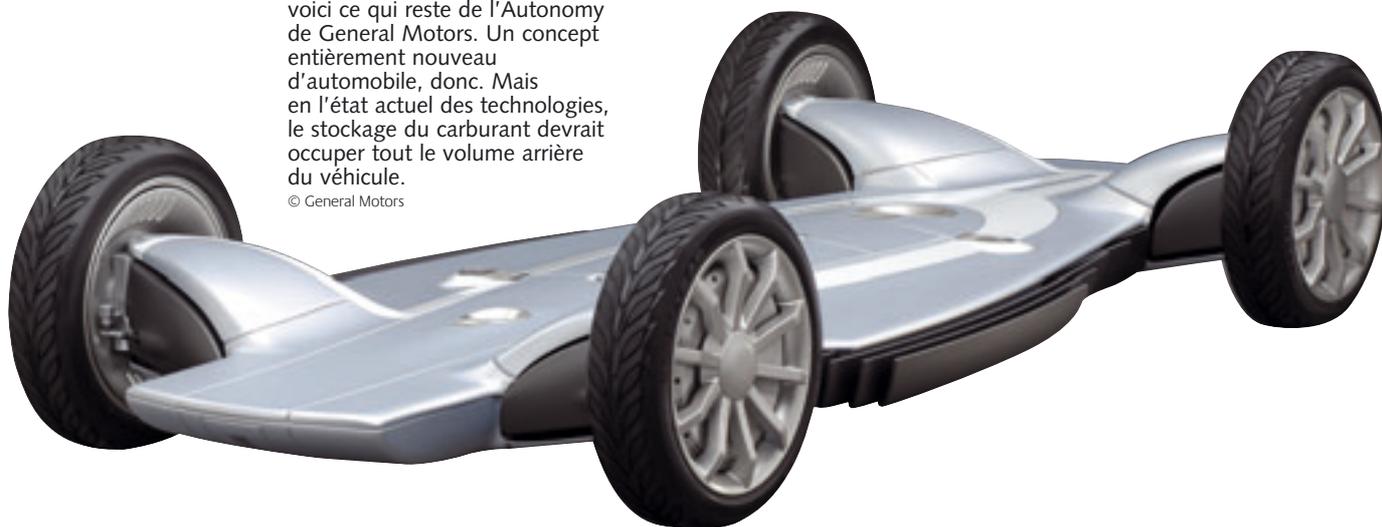
- par une diminution de 20 % à 30 % de la consommation (et donc des émissions de CO<sub>2</sub>) des véhicules à motorisation classique et un progrès important (facteurs de 2 à 4) sur les émissions de polluants locaux ;
- par une division par un facteur 1,5 à 2 de la consommation et donc des émissions de CO<sub>2</sub> des meilleurs véhicules hybrides à

(2) Stéphane His et Jean-François Gruson, « Comparison of fuel cell systems with conventional converters for transport », report 54 022, avril 2000, Institut français du pétrole.

(3) Stéphane His, Nathalie Martinez, Carine Barbier, « Automobile et développement durable », Les Cahiers du CLIP, 9, décembre 1998.

**Quand on enlève la carrosserie, le poste de pilotage et les sièges,** voici ce qui reste de l'Autonomy de General Motors. Un concept entièrement nouveau d'automobile, donc. Mais en l'état actuel des technologies, le stockage du carburant devrait occuper tout le volume arrière du véhicule.

© General Motors



carburants fossiles ou à pile à combustible, en même temps qu'une forte réduction (facteur 10 ou plus) des émissions de la plupart des polluants locaux (facteur 3 seulement pour le SO<sub>2</sub>).

**Hydrogène polluant.** Bien que seule à pouvoir prétendre à la « pollution zéro » au niveau local, la filière hydrogène obtenue par électrolyse n'apparaît pas comme une solution efficace du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, à moins que la production d'électricité ne soit très majoritairement d'origine nucléaire ou renouvelable.

Mais le raisonnement ne s'arrête pas là car, pour apprécier l'effet réel des progrès analysés, encore faut-il être capable de modéliser le parc actuel et son évolution dans les décennies qui viennent. Même si le progrès est au rendez-vous, il va mettre un certain temps à pénétrer dans le parc et donc à faire sentir ses effets. Il faut donc pouvoir se représenter l'évolution du trafic en tenant compte de la pénétration des technologies nouvelles. L'exercice a été fait par exemple pour le parc automobile français par le Club d'ingénierie prospective énergie environnement (CLIP). Deux scénarios principaux sont à comparer<sup>(5)</sup>. D'abord un scé-

nario de base dans lequel le parc reste très majoritairement composé de véhicules à essence et diesel, en y incorporant peu à peu à partir de 2005 le progrès technique qu'on peut encore attendre sur ces technologies (fig. 2). Puis un scénario « voitures évoluées » où l'on fait pénétrer les hybrides de toute catégorie à partir de 2015 à un rythme très soutenu, pour atteindre la moitié du parc en 2050.

On peut modéliser l'évolution de

la consommation d'énergie du parc automobile sur toute la période pour quatre solutions nouvelles et pour le scénario de base (essence, diesel).

**Pour la consommation énergétique comme pour les émissions de dioxyde de carbone, l'hybride essence est le mieux placé**

Première constatation : dans ce scénario de base, en raison du

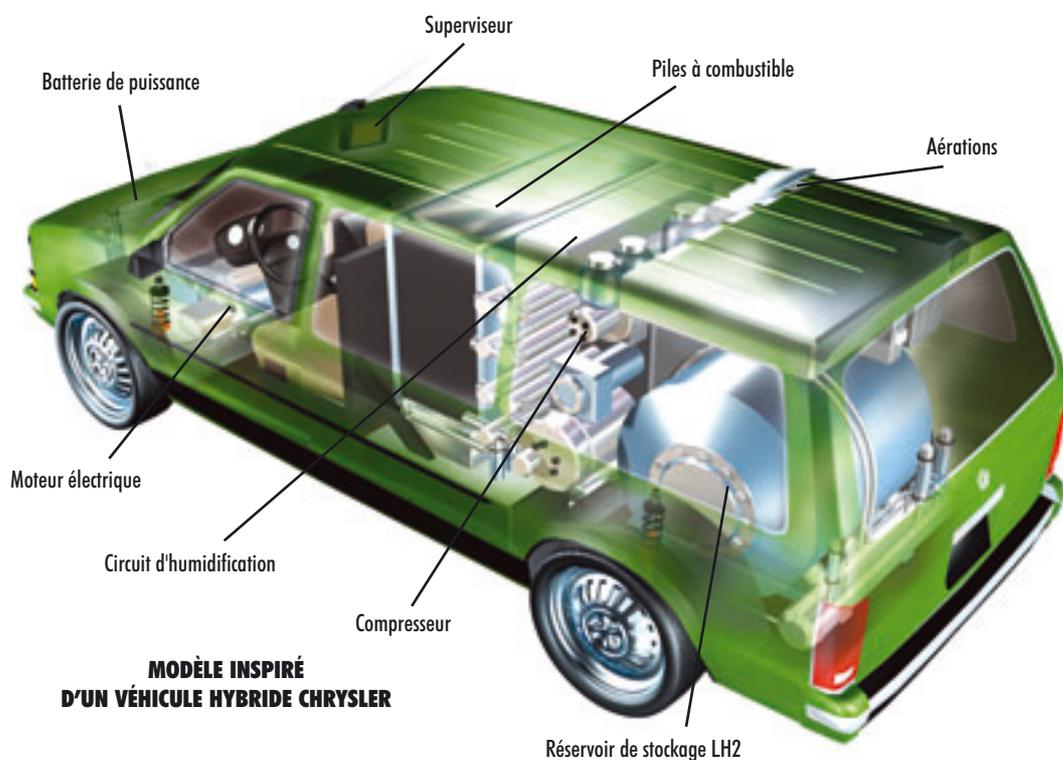
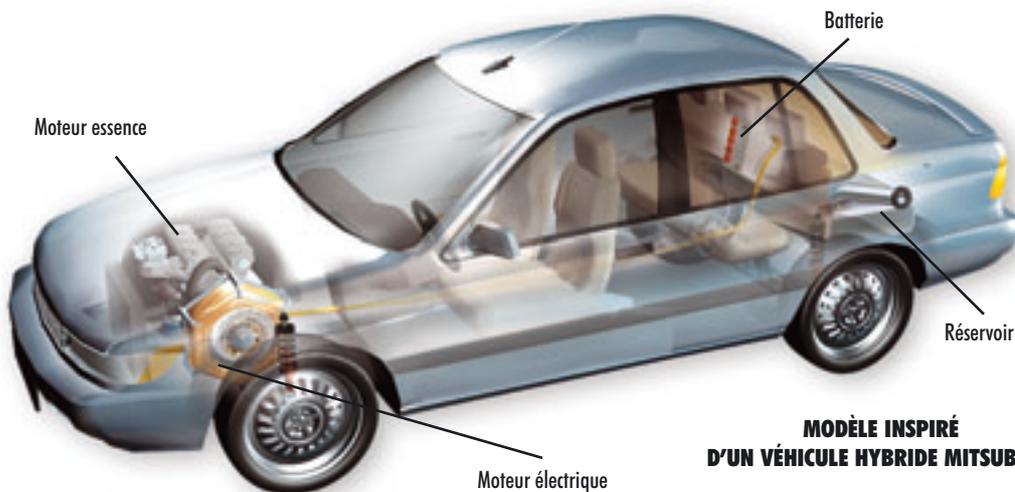
progrès technique sur les filières classiques, la consommation du parc se stabilise entre 2020 et 2040, pour remonter en fin de période de l'ordre de 10 %, alors que le trafic augmente de 40 %. C'est dire que le progrès technique sur le moteur thermique n'est nullement à négliger. Seconde constatation : la meilleure performance à l'horizon 2050 est celle du scénario hybride essence, dans lequel on obtient une diminution de 20 % de la consommation du parc, malgré l'augmentation du trafic. Ce scénario est suivi par la filière pile à combustible avec reformeur de méthanol, puis de beaucoup plus loin par la filière pile où l'hydrogène est obtenu par électrolyse. Le graphique illustre aussi, accessoirement, le peu d'intérêt d'un scénario « gaz » où l'on imagine le remplacement de tous les véhicules diesel par des véhicules au gaz naturel (non compris dans le scénario « voitures évoluées »).

**Figure 3.** Les roues de tous les hybrides considérés sont mues par un moteur électrique. Dans l'hybride série diesel, celui-ci est alimenté par un moteur thermique et un alternateur. On voit que cette dernière solution a le meilleur rendement global.

Source : Stéphane His et Jean-François Gruson, Institut français du pétrole.

LE MEILLEUR RENDEMENT			
Filières thermiques	Rendement de la filière de production du combustible	Rendement moyen du groupe moto-propulseur	Rendement global
Essence injection*	80 - 85 %	20 %	17 - 16 %
Diesel common rail*	85 - 90 %	25 %	21 - 23 %
Filières hybrides			
Pile à hydrogène (électrolyse)	15 - 25 %	37 - 52 %	5,5 - 13 %
Pile à hydrogène (méthanol)	48 - 60 %	37 - 52 %	18 - 31 %
Pile à hydrogène (méthane)	40 - 60 %	37 - 52 %	15 - 31 %
Hybride série diesel*	85 - 90 %	32 - 39 %	27 - 34 %

\* Normes 2005 : normes de teneur en soufre des carburants retenus au niveau européen en 2005.



Dans l'état actuel de la technique, les constructeurs automobiles peuvent commercialiser des véhicules hybrides (en haut) : un moteur à essence classique charge une batterie, qui alimente elle-même un moteur électrique. En revanche, les piles à combustible sont encore beaucoup trop encombrantes, et pas assez fiables, pour équiper les véhicules particuliers (en bas).

**Essence propre.** La modélisation des émissions de CO<sub>2</sub> du parc automobile français à l'horizon 2050 donne logiquement la meilleure performance au scénario « hybride à essence », suivi par le scénario « pile à combustible avec reformeur ». En revanche, le scénario de base donne un très mauvais résultat. Il est cependant meilleur que le scénario pile à hydrogène électrolytique. Cela

tient au fait que le parc de production d'électricité retenu dans l'exercice était le parc européen et non le parc français, qui fait beaucoup moins appel aux énergies fossiles. Avec le parc français, constitué à plus de 90 % de nucléaire et d'hydraulique, les émissions de CO<sub>2</sub> auraient évidemment été très réduites. Mais les auteurs ont considéré avec raison que, si l'hydrogène devenait

un carburant automobile majeur, sa production aurait très peu de chance de rester limitée à la France.

D'autres exercices de modélisation non reproduits ici décrivent les émissions de polluants tels que l'oxyde de carbone, les hydrocarbures et les oxydes d'azote. Elles diminuent d'un facteur 4 ou 5 dans tous les scénarios. Aucune filière ne présente donc d'avan-

tage décisif. Seule exception, le dioxyde de soufre, dont les émissions se maintiennent dans le scénario de base, et sont divisées par 1,4 pour le scénario hybride essence et par presque 3 dans le scénario pile à combustible avec reformeur de méthanol.

**Les principaux gains de consommation viendront de la réduction du trafic et des progrès des moteurs thermiques**

Quels enseignements tirer de tout cela? Tout d'abord, au regard du problème posé par les gaz à effet de serre, on voit bien que, si la croissance du trafic se poursuit au rythme actuel, le progrès technique ne suffira pas à faire baisser les émissions dans les proportions requises par la convention sur le climat, dont la première échéance vient en 2010. Il faut donc aussi réfléchir aux moyens de limiter la croissance des besoins de mobilité des personnes et s'engager dans une politique volontariste de transfert vers des modes de déplacement plus économiques (les transports collectifs, et en particulier les transports guidés).

**Moteurs durables.** Le second point à souligner est que les progrès attendus sur les filières classiques essence et diesel ne doivent en aucun cas être négligés. Pour une bonne vingtaine d'années, ces filières représenteront encore l'essentiel du parc automobile : sa performance globale en dépendra donc très fortement. Quant aux solutions hydrogène, on voit bien qu'elles risquent fort, à échéance prévisible, de n'apporter aucun avantage significatif par rapport aux hybrides à moteur thermique, ni en termes de ponction sur les ressources fossiles, ni en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Cette absence d'avantage global se conjugue avec le fait que les solutions hybrides thermiques ont pris une solide longueur d'avance chez les constructeurs. Les premières

## La bonne stratégie

Compte tenu des handicaps de la filière hydrogène, la bonne stratégie consisterait à :

- Poursuivre vigoureusement l'effort actuel d'amélioration de l'efficacité des filières classiques (essence et diesel) qui n'ont manifestement pas dit leur dernier mot, du point de vue de la consommation d'énergie, des émissions de CO<sub>2</sub> et, plus encore, de la pollution locale. Rappelons à ce sujet que l'introduction de véhicules aux performances environnementales améliorées est aussi efficace que l'introduction d'un faible pourcentage de véhicules alternatifs « zéro pollution ».
- Suivre de près les progrès techniques et la pénétration sur le marché des hybrides à moteur thermique.
- Développer prioritairement tout ce qui est commun aux deux filières hybrides (thermique et hydrogène) en termes d'efficacité énergétique : moteurs et transmission électriques, allègement des batteries...
- Accorder autant d'intérêt aux recherches sur l'amont de la filière hydrogène, en particulier sur l'amélioration des reformeurs, que sur les piles, d'autant que ces progrès se répercuteront directement sur les applications dans l'habitat.

\* Une tonne équivalent pétrole (tep) d'un carburant quelconque est la quantité qui fournit autant d'énergie que la combustion d'une tonne de pétrole.

(4) André Marquet, « L'hydrogène, un vecteur de rêve? », présentation à la réunion du 6 novembre 2001 du Club énergie prospective et débats du Commissariat général du Plan; P. Stevens *et al.*, *Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference*, Stuttgart, 23-28 juin 1996, p. 143, vol. I.



© Martin Bond / Cosmos

Un prototype de BMW 735i fait le plein d'hydrogène liquide dans une station-service expérimentale allemande. Son carburant est produit par l'électrolyse de l'eau, décomposée en oxygène et en hydrogène sous l'effet du courant produit par des piles photovoltaïques. Très respectueux de l'environnement, le procédé reste hors de prix.

de subir un fort effet d'éviction. D'autant que le coût de l'hydrogène reste prohibitif.

Aujourd'hui, dans les meilleures conditions industrielles et techniques (grands électrolyseurs industriels à haute pression, haute température et très forte densité de courant), l'électrolyse fournit de l'hydrogène avec un rendement inférieur à 60 %. Selon EDF le coût de la tonne équivalent pétrole (tep)\* d'hydrogène ainsi fabriqué avec du nucléaire heures creuses, particulièrement bon marché, atteint 600 euros à la sortie d'usine, soit déjà deux fois plus qu'un carburant pétrolier (hors taxe) rendu à la pompe (pour un baril de pétrole à 20 dollar)<sup>(4)</sup>. Le reformage des hydrocarbures conduit de son côté à un coût presque aussi élevé, de l'ordre de 500 à 600 euros la tep. Le gain de rendement du moteur à hydrogène (52 % maximum comparé à 38 %) ne suffit donc pas à compenser le surcoût du carburant.

**Hydrogène coûteux.** Cette situation peut-elle évoluer sensiblement? Il faut prendre en compte deux éventualités, qui pourraient d'ailleurs se cumuler: une forte croissance des prix pétroliers et la

*suite page 69*

petites séries (quelques milliers de véhicules) sont déjà en circulation et permettent un retour d'expérience. Tous les progrès enregistrés sur la bonne vieille technologie du moteur thermique leur sont immédiatement applicables. Les coûts sont connus. Enfin, cette filière peut pénétrer sans rupture d'organisation dans le parc en utilisant les infrastructures de distribution existantes.

A l'inverse, les voitures pile à hydrogène n'existent encore qu'à l'état de prototypes. Certains composants des piles font encore l'objet de recherches (lire p. ). Un réseau de distribution est à concevoir et à installer. La voiture à hydrogène a donc au minimum huit à dix ans de retard sur l'hybride thermique. Comme son bilan écologique ne lui est pas nettement favorable, elle risque

On l'améliore depuis 160 ans

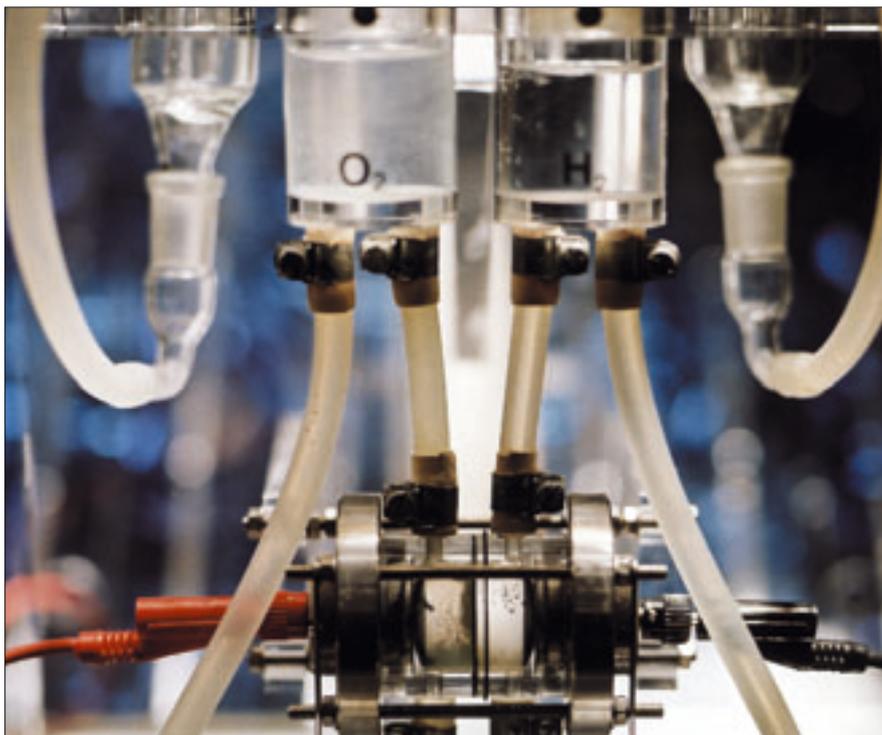
# La pile à hydrogène

La technologie de la pile à hydrogène est, en gros, maîtrisée.

Reste à résoudre de sérieux problèmes de coût et, surtout, d'encombrement.

La pile à combustible est un convertisseur d'énergie, dont le principe a été démontré en 1839 par l'Anglais William Grove. Elle transforme directement l'hydrogène en électricité, avec des rendements bien supérieurs aux moteurs thermiques. Une pile est formée de plusieurs dizaines de cellules élémentaires mesurant chacune moins d'un millimètre d'épaisseur, assemblées en série pour obtenir suffisamment de puissance et de tension. Chaque cellule est composée de deux électrodes, une anode et une cathode, séparées par un électrolyte, qui est un polymère ou un liquide laissant passer les ions, mais pas les électrons. Plusieurs types de pile à combustible existent, qui diffèrent surtout par la nature de l'électrolyte et la température de fonctionnement. La pile à hydrogène la plus prometteuse pour les applications en transport renferme un électrolyte solide polymère, et l'ion échangé est le proton ( $H^+$ ), d'où son nom de pile à membrane échangeuse de protons (*proton exchange membrane fuel cell* ou PEMFC). L'électrolyte solide présente plusieurs avantages : grande fiabilité, et facilité d'industrialisation en grande série. Par ailleurs, cette pile fonctionne à relativement basse température (environ  $80\text{ }^\circ\text{C}$ ) et ne nécessite donc pas de période de chauffage longue et compliquée. En revanche, cette faible température d'utilisation n'autorise pas des rendements aussi élevés que lorsque la température atteint plusieurs centaines de degrés.

**Réactions électriques.** C'est au niveau des électrodes que la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique a lieu. L'anode



Une pile à combustible est formée de nombreuses cellules fines assemblées en série et recouvertes de plaques bipolaires permettant la collecte du courant et la distribution des gaz (hydrogène et oxygène), ainsi que l'élimination de l'eau et de la chaleur.

©H. Henglein-Klover / REA

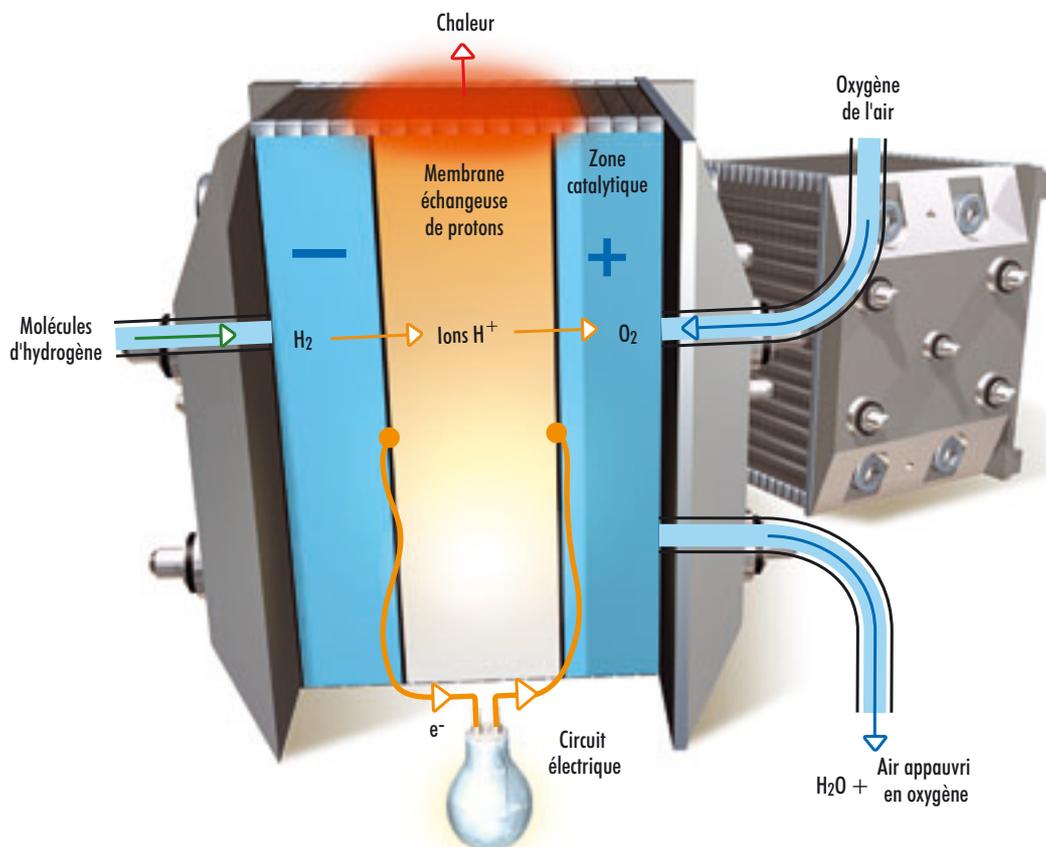
décompose l'hydrogène en électrons et protons. Ces derniers traversent la membrane et rejoignent la cathode, où ils s'associent à de l'oxygène et des électrons pour former de l'eau. Les électrons se meuvent à l'extérieur de la pile, de l'anode vers la cathode, en alimentant un moteur électrique. L'ensemble électrode-membrane conductrice forme la cellule.

**Le coût de la membrane qui sépare les électrodes reste trop élevé pour une commercialisation à grande échelle**

Les cellules de la pile sont séparées par des plaques bipolaires, permettant la collecte du courant et la distribution des gaz (hydro-

gène et oxygène), ainsi que l'élimination de l'eau et de la chaleur. Le principal problème des piles à combustible reste leur coût. La quantité de métaux précieux (platine) qui recouvre les électrodes a été divisée par 100 ces vingt dernières années, et ne constitue plus le poste de dépense le plus important. Les chercheurs prévoient encore de diviser cette quantité par deux. La membrane conductrice protonique la plus utilisée, le Nafion® de la société américaine Du Pont de Nemours, coûte environ 700 euros par mètre carré (mais ce coût serait réduit si le marché se développait). Or, une pile de voiture – pour un véhicule moyen, comptant une puissance de 60 kW, occupant un volume

de 90 l et pesant 60 kg – nécessite une dizaine de mètres carrés de ce polymère. D'où des recherches approfondies pour mettre au point des membranes conductrices plus économiques, mais aussi facilement recyclables, et fonctionnant à plus haute température ( $150\text{ }^\circ\text{C}$  à  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ). En France, des chercheurs du CEA ont ainsi obtenu des polymères renforcés par des tissus de fibre de verre, dont les propriétés de conduction sont comparables à celles du Nafion®. Par ailleurs, les plaques bipolaires qui recouvrent les piles sont composées de graphite, dont l'usinage est difficile à automatiser. Or, l'automatisation de la fabrication des piles est une des conditions de la baisse des coûts. Certains chercheurs



**Le cœur d'une cellule de pile à combustible** (1 mm environ) est constitué de deux électrodes (une anode et une cathode) séparées par un électrolyte, perméable aux ions mais pas aux électrons. A l'anode, les molécules d'hydrogène ( $H_2$ ) sont décomposées en protons ( $H^+$ ) et en électrons ( $e^-$ ). Les protons traversent l'électrolyte et s'associent à des électrons et à de l'oxygène ( $O_2$ ) pour former de l'eau ( $H_2O$ ). La pile elle-même est représentée à droite.

tentent donc de remplacer le graphite par des composés organiques et métalliques, sans perdre leurs propriétés de conduction. Enfin, de nombreuses recherches portent sur l'optimisation des systèmes annexes – mais non accessoires –, comme les techniques d'écoulement de gaz alimentant la pile, de refroidissement, etc.

**Gaz ou liquide.** L'un des obstacles à l'utilisation des piles à hydrogène est le stockage de ce gaz très inflammable, dont les molécules sont si petites qu'elles diffusent dans de nombreux matériaux. Il peut être stocké sous haute pression, dans des réservoirs à enveloppe métallique ou polymère, et renforcés de fibres de carbone. C'est la solution choisie pour la quasi-totalité des véhicules existants. Mais ces réservoirs sont coûteux, encombrants et lourds (ils représentent plus de 90% de la masse du réservoir rempli). Leur coût devrait cependant bien diminuer avec l'augmentation de la production, car ils ne mettent en jeu que des techniques maîtrisées et des matériaux peu oné-

reux. Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide ne peut se faire, lui, qu'à très basse température ( $-253^\circ C$ ), ce qui ne permet pas d'éviter des pertes par évaporation.

### Plutôt que de stocker de l'hydrogène à bord du véhicule, il sera peut-être plus facile de le produire à partir de méthanol

D'autres possibilités sont à l'étude, comme l'absorption de l'hydrogène sur différentes molécules. Ainsi, les hydrures métalliques, composées de métaux et d'hydrogène, peuvent libérer des molécules d'hydrogène sous certaines conditions de température et de pression. Mais leur capacité de stockage à température ambiante est encore trop faible, et leur vitesse d'absorption/désorption trop lente. De nombreuses recherches tendent à optimiser ces hydrures, en modifiant les alliages métalliques, ou en divisant finement les hydrures pour augmenter la surface de réaction. De leur côté, les nanotubes de carbone, ces longs tubes de

quelques nanomètres de diamètre formés uniquement de carbone, peuvent piéger de l'hydrogène. Mais leur fabrication n'est pas encore maîtrisée, et leur coût reste excessif. Certaines recherches portent sur le stockage de l'hydrogène dans des microballons de verre qui, du fait de leur petite taille, supportent des pressions élevées. Une autre solution déjà utilisée consiste à produire l'hydrogène *in situ* au moment de l'utilisation, à partir de méthanol. Cet alcool est liquide à température ambiante, donc moins dangereux que l'hydrogène, mais l'on perd alors une partie des avantages de la pile à hydrogène, notamment l'aspect non polluant. En effet, la formation d'hydrogène à partir de méthanol dégage du dioxyde de carbone.

Cécile Michaut

#### Pour en savoir plus

- *Clefs du CEA n° 44*, « Nouvelles technologies de l'énergie ».
- *L'Actualité chimique n° 12*, « L'hydrogène, carburant de demain ? », décembre 2001.
- [www.cea.fr](http://www.cea.fr)
- [www.hfletter.com](http://www.hfletter.com) (en anglais)

*suite de la page 67*

fixation d'une lourde taxe sur les émissions de  $CO_2$ . On voit tout de suite que, dans cette perspective, la filière de l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles, qu'il s'agisse du méthanol ou du méthane, serait autant affectée que la filière des moteurs thermiques hybrides. Il en irait autrement pour l'hydrogène obtenu par électrolyse, mais seulement dans le cas, improbable pour l'instant au plan mondial, où l'électricité servant à produire l'hydrogène serait majoritairement d'origine nucléaire ou fondée sur des énergies renouvelables (vent, solaire, etc.). Encore faudrait-il que le coût de revient des carburants fossiles soit multiplié au moins par un facteur 2,5 à 3 (plus de 55 dollars le baril). Souvent mise en avant par les tenants de la voiture à hydrogène, l'idée qu'une augmentation soutenue et inéluctable des prix du pétrole justifierait une pénétration massive de cette technologie résiste donc mal à une analyse comparative avec d'autres solutions qui commencent à apparaître dès maintenant sur le marché.

**Solution improbable.** Au total, il ne se dégage pas d'avantage assez significatif dans aucun des domaines cités (ressources énergétiques, environnement global, économie) pour justifier un discours résolument optimiste sur l'émergence d'une « civilisation de la voiture à hydrogène » capable de résoudre à la fois les problèmes de ressources énergétiques et d'environnement global dans des conditions économiques particulièrement favorables à moyen terme (une vingtaine d'années). Il ne faudrait pas que le discours à la mode, qui cache parfois des intérêts corporatifs bien compris, amène subrepticement à une monoculture scientifique, technique et industrielle au service d'une solution qui n'apparaît aujourd'hui que comme l'une des solutions possibles mais très probablement partielle à nos problèmes de demain. B.D. ■