



4. LE REQUIN À CORNES est l'un des animaux les plus anciens, chez qui l'on a identifié des lymphocytes T, les agents de l'immunité cellulaire.

Les immunologistes ont longtemps cru que l'immunité cellulaire était apparue avant l'immunité humorale. Toutefois, les greffes de peau ne sont rejetées qu'après plusieurs semaines par l'organisme des requins ; on en a déduit que, chez les requins, l'immunité cellulaire – si elle existe – n'est ni très efficace, ni très spécifique. Certains ont alors pensé que les requins étaient dépourvus de lymphocytes T.

Pour le savoir, nous avons recherché des lymphocytes T chez le requin à cornes. Pour prouver l'existence de ces cellules, il nous fallait identifier leurs récepteurs d'antigènes. Nous avons échoué, jusqu'au jour où nous avons utilisé la méthode d'amplification des gènes, ou PCR, une technique qui produit des millions de copies d'un petit fragment d'ADN. Récemment nous avons isolé, chez la raie, les quatre classes de récepteurs d'antigènes des lymphocytes T de mammifères, et nous pensons qu'elles existent aussi chez le requin.

La caractérisation d'une de ces classes de récepteurs a montré qu'ils sont presque aussi diversifiés que chez l'homme. Autrement dit, contrairement aux gènes codant les anticorps, les gènes codant les récepteurs des lymphocytes T semblent n'avoir quasiment pas évolué depuis le moment où les requins ont divergé de la lignée qui a abouti aux mammifères, il y a envi-

ron 450 millions d'années. L'ensemble des gènes codant les anticorps et celui des récepteurs des lymphocytes T auraient divergé d'un ancêtre commun.

À mesure que nous caractérisons le génome des requins et des animaux apparentés, nous découvrons de nombreux ensembles de gènes. Ainsi, on a découvert un groupe de gènes qui ressemblent à la fois aux gènes qui codent les anticorps et à ceux qui codent les récepteurs des lymphocytes T. Les gènes de ces ensembles subissent des mutations à un rythme accéléré.

Certains gènes de groupes différents se seraient mélangés et réassociés au cours de l'évolution. Ces échanges (chaque individu a des centaines de groupes, chacun contenant d'innombrables gènes) auraient favorisé l'apparition de nouveaux groupes de gènes. Peut-être découvrirons-nous encore de nouveaux récepteurs du système immunitaire du requin.

En raison de ces échanges, certains gènes sont redondants chez le requin : des segments V, D1, D2 et J identiques se regroupent de façon répétitive sur divers chromosomes. Ces recombinaisons, associées à d'autres mécanismes génétiques spécifiques du requin, permettent l'élaboration rapide de nouvelles familles de récepteurs. Chez les mammifères, les segments géniques sont présents sur un seul des chromosomes, et il y a peu de redon-

dance structurelle, de sorte que ce type de recombinaison est rare.

De surcroît, la duplication de segments géniques – l'existence de multiples segments V, D et J, une caractéristique du système immunitaire des mammifères – ne semble être apparue qu'au prix de l'introduction et du maintien de nombreuses séquences d'ADN non fonctionnelles. Au contraire, chez les requins et les raies, les éléments non fonctionnels sont rares et disparaissent sans doute rapidement du génome.

Parce qu'ils sont les représentants vivants d'une lignée ancienne, les requins et les animaux apparentés sont peut-être les seuls vestiges des systèmes immunitaires primitifs. Ces poissons qui ont été les témoins d'un moment clé de l'évolution nous permettront peut-être, un jour, de préciser les éléments qui ont engendré un système aussi efficace, voire plus, que l'armure du placoderme.

Plusieurs questions restent posées : quelles modifications du milieu ont fait apparaître des agents pathogènes qui ont ensuite tant modifié l'organisation des gènes qui codent les anticorps ? Le système immunitaire est-il conçu pour évoluer rapidement ? L'étude des vertébrés préhistoriques et des différences entre les mammifères contemporains le fait penser. Si cette hypothèse se confirme, nous devons revoir nos concepts sur l'adaptation et sur la sélection naturelle.

Gary LITMAN est professeur de biochimie et de biologie moléculaire à la Faculté de médecine de Floride du Sud.

Louis DUPASQUIER, *Evolution of the Immune System*, in *Fundamental Immunology*, troisième édition, sous la direction de William E. Paul, Raven Press, 1993.

Charles JANEWAY, *La détection des intrus*, in *Pour la Science*, n° 193, novembre 1993.

Gary W. LITMAN, Jonathan P. RAST, Michael J. SHAMBLOTT et al., *Phylogenetic Diversification of Immunoglobulin Genes and the Antibody Repertoire*, in *Molecular Biology and Evolution*, vol. 10, n° 1, pp. 60-72, janvier 1993.

Simona BARTL, David BALTIMORE et Irving L. WEISSMAN, *Molecular Evolution of the Vertebrate Immune System*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 91, n° 23, pp. 10769-10770, 8 novembre 1994.

Les véhicules électriques

DANIEL SPERLING

Les véhicules électriques sont aujourd'hui aussi performants que les véhicules à essence. Les consommateurs les adopteront-ils ?

Dans les pays industrialisés, les automobiles sont responsables de la moitié de la consommation de pétrole. Elles émettent la moitié des polluants urbains et rejettent le quart des gaz à effet de serre. Le nombre de véhicules ne cesse d'augmenter : sans une réaction rapide, les coûts économique et sanitaire seront exorbitants. Le pétrole, par exemple, deviendra inévitablement plus rare et plus coûteux.

Quatre solutions sont envisageables : la restriction de la circulation des véhicules, l'amélioration du rendement et la réduction des émissions des moteurs à essence, la généralisation de carburants plus propres et la mise au point de systèmes de propulsion moins polluants. Les trois premières solutions sont irréalistes ou peu efficaces. Seule la quatrième, avec la mise au point de véhicules électriques, résoudra durablement les difficultés.

La restriction de la circulation automobile, qui réduirait notamment les embouteillages, se heurte à l'hostilité des automobilistes du monde entier. En Europe de l'Ouest, où le prix moyen du carburant est supérieur à cinq francs par litre, où les transports en commun sont bien développés et où la densité de population est élevée, 80 pour cent des déplacements sont effectués à bord de voitures particulières. Aux États-Unis, la part des transports en commun et du covoiturage n'a cessé de reculer depuis la Seconde Guerre mondiale.

L'amélioration des rendements des moteurs n'a pas permis d'économies notables de carburant depuis dix ans. Les carburants de substitution, méthanol, gaz naturel ou gaz de pétrole liquéfié, ne réduisent pas non plus énormément les émissions polluantes : les compagnies pétrolières amélioreraient déjà la formulation de l'essence pour que sa combustion pollue moins.

En revanche, des véhicules à propulsion électrique ne pollueraient presque pas. Les améliorations récentes de leurs performances, de leur rendement et la réduction de leur prix leur permettent aujourd'hui de concurrencer les véhicules à essence. Néanmoins, face à la position bien établie de ces derniers, les industriels et les gouvernements devront unir leurs efforts pour que les consommateurs bénéficient financièrement des avantages environnementaux des véhicules électriques.

Circuler sans polluer... ou presque

On nomme «véhicule électrique» des véhicules alimentés par des batteries que l'on charge à partir du réseau électrique, ou bien des véhicules hybrides, qui produisent eux-mêmes leur électricité. Leurs rendements sont supérieurs à ceux des véhicules à essence, ils polluent moins que ces derniers. Dans un véhicule à moteur thermique, celui-ci tourne en permanence : il entraîne les roues, par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses et d'un embrayage, et un alternateur qui alimente les accessoires électriques. Dans un véhicule électrique, le moteur est relié directement aux roues motrices : la consommation est nulle à l'arrêt et dans les descentes, ce qui accroît le rendement total d'environ un cinquième. En outre, le système de freinage actif, qui transforme

1. LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE Tulip a été conçu par le Groupe PSA Peugeot Citroën pour la circulation urbaine. Sa vitesse maximale de 75 kilomètres à l'heure permet de s'insérer normalement dans la circulation. Il est court grâce à l'absence de coffre à bagages, mais il accueille confortablement deux personnes. Fabriqué en matériaux composites, ce véhicule est léger, ce qui augmente son autonomie.



le moteur en générateur lors des décélérations, récupère jusqu'à la moitié de l'énergie cinétique du véhicule : c'est un avantage important en ville, où les conducteurs doivent sans cesse freiner et accélérer.

Enfin, le rendement de la conversion en énergie motrice de l'énergie stockée à bord du véhicule est supérieur à 90 pour cent, alors qu'il plafonne à 25 pour cent dans les moteurs thermiques. Même si les accumula-

teurs sont chargés à partir de centrales thermiques, dont le rendement n'est que de 30 à 40 pour cent, le gain net d'un moteur électrique sur un moteur à explosion est de cinq pour cent. Il augmentera encore lorsque le rendement des centrales thermiques atteindra 50 pour cent, grâce à de nouvelles techniques, telle la génération par cycles combinés, qui récupère l'énergie aujourd'hui dissipée sous forme de chaleur. Lorsque, comme en

France, la majorité de l'électricité est produite par des centrales nucléaires, la pollution atmosphérique est supprimée (bien qu'éventuellement remplacée par une pollution radioactive). Enfin les piles à combustible qui produisent de l'électricité directement à bord du véhicule en brûlant de l'hydrogène ont un rendement encore supérieur et ne polluent pas (sous réserve que la production d'hydrogène ne pollue pas).



PSA Peugeot Citroën

Les véhicules électriques résoudront les problèmes de pollution urbaine de l'air en déplaçant les zones d'émission des polluants : les véhicules à essence rejettent ces derniers partout où ils circulent, tandis que la pollution associée à la production d'électricité est localisée autour de centrales, généralement construites en dehors des centre urbains. Il est aussi plus facile de réduire la pollution de quelques centrales électriques que celle de plusieurs millions de véhicules. La généralisation des véhicules électriques supprimerait les émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures, et réduirait celles d'oxydes d'azote. Elle accroîtrait peut-être faiblement les émissions d'oxyde de soufre et de particules, autour des centrales thermiques à charbon. La pollution liée à la fabrication des batteries et des moteurs électriques est négligeable.

Dans les régions où les centrales électriques ne polluent pas l'atmosphère (qu'elles soient hydroélectriques, solaires, éoliennes ou nucléaires), les véhicules électriques apporteront une amélioration certaine. La France et la Californie sont les deux principaux exemples, la première car son électricité est surtout d'origine nucléaire, la seconde car son électricité provient en majeure partie de centrales au gaz naturel sévèrement contrôlées, et de centrales hydroélectriques et nucléaires.

L'autonomie, un obstacle ?

L'une des principales limitations à l'adoption des véhicules électriques provient des batteries. Celles qui sont

aujourd'hui disponibles sont coûteuses et elles ne permettent qu'une autonomie maximum de 150 kilomètres en vitesse stabilisée. Cet obstacle n'est toutefois pas insurmontable : un marché existe pour des véhicules de faible autonomie, et des modèles de batteries plus performants apparaissent.

Selon une enquête que nous avons réalisée en Californie, la moitié des foyers qui possèdent plus d'une voiture (la majorité des foyers des États-Unis, et qui achètent 70 pour cent des voitures neuves) modifieraient aisément leurs habitudes de conduite de manière à utiliser une seconde voiture dont l'autonomie serait inférieure à 180 kilomètres. De nombreuses personnes interrogées accepteraient même une autonomie plus faible, compensée par les effets bénéfiques sur l'environnement et par les avantages de la recharge à domicile (beaucoup de personnes détestent fréquenter les stations-service). En France, 90 pour cent des conducteurs se déplacent quotidiennement d'une distance inférieure à l'autonomie d'un véhicule électrique.

De toute façon, les accumulateurs seront bientôt remplacés, au moins en partie, par d'autres composants : supercapacités, volants d'inertie et piles à combustible. Les supercapacités ont été mises au point dans le cadre de programmes de recherche militaires. On les obtient en éliminant les petites imperfections du film isolant qui sépare les électrodes des condensateurs classiques, responsables de fuites de charges. De nouveaux matériaux permettent aussi

d'empiler des feuilles de carbone et des électrolytes liquides. Les supercapacités stockent ainsi plus de 50 000 joules dans un volume d'un litre et délivrent une puissance de trois kilowatts par litre. De petits modèles équipent déjà des calculatrices, des montres et des rasoirs électriques.

Les volants d'inertie stockent l'énergie sous forme d'énergie cinétique de rotation d'un rotor. Ils ont été utilisés pour la première fois dans les transports dans les années 1950 : des autobus qui en étaient équipés desservaient la ville d'Yverdon, en Suisse ; ils relançaient leurs rotors à chaque arrêt. Les volants d'inertie ont considérablement évolué depuis : des rotors en matériaux composites tournent aujourd'hui à près de 100 000 tours par seconde dans le vide ; leur vitesse n'est limitée que par la tension de rupture de leur jante. Les frottements sont atténués par des paliers magnétiques, qui ne dissipent que dix pour cent de l'énergie en quatre jours.

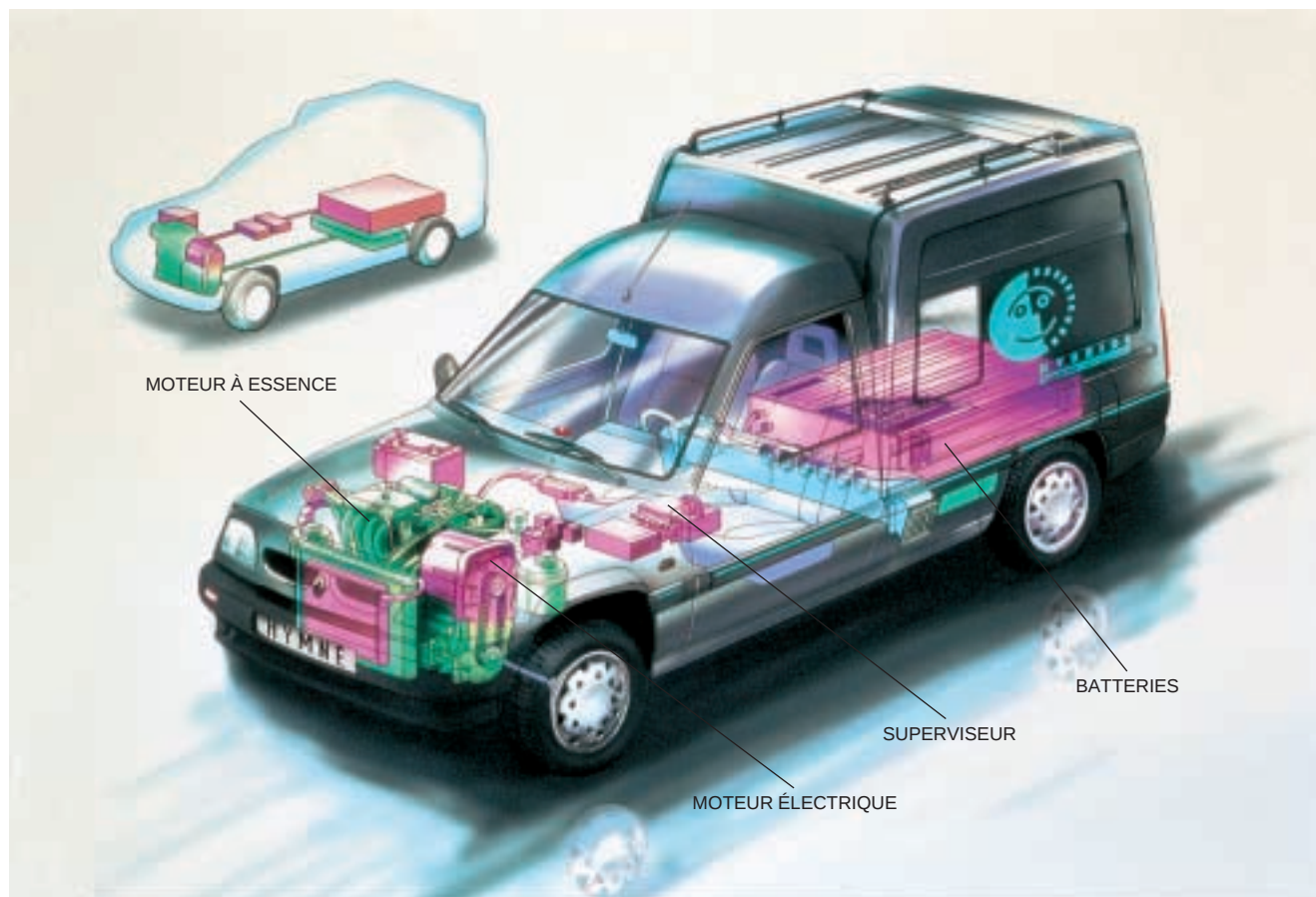
Les premiers véhicules commerciaux équipés de volants d'inertie et de supercapacités devraient apparaître vers l'an 2000. Ces dispositifs, qui peuvent fournir de l'énergie rapidement, seront utilisés pour les pointes de puissance, lors des accélérations ou des ascensions ; des batteries assureront le fonctionnement régulier du véhicule. Cette association permettra l'utilisation d'accumulateurs moins encombrants, moins puissants et dont la durée de vie sera augmentée.

Du carburant pour l'électricité

Toutefois, même selon les prévisions les plus optimistes, les nouveaux systèmes ne stockeront jamais les 1 800 000 kilojoules que contient un réservoir de 50 litres d'essence. C'est pourquoi de nombreux ingénieurs ont prévu que le véhicule électrique du futur serait hybride : il avancerait grâce à des moteurs électriques, mais l'électricité serait produite à bord par un petit moteur à combustion interne. La puissance moyenne nécessaire sur autoroute n'étant que de dix kilowatts, un moteur thermique relativement petit suffirait. En outre, les dispositifs de stockage se rechargeraient pendant que le véhicule roulerait à vitesse constante et se déchargeraient rapidement lors des

Les véhicules électriques réduisent la pollution (variations des émissions en pourcentage)					
	HYDROCARBURES	MONOXYDE DE CARBONE	OXYDES D'AZOTE	OXYDES DE SOUFRE	PARTICULES
FRANCE	-99	-99	-91	-58	-59
ALLEMAGNE	-98	-99	-66	+96	-96
JAPON	-99	-99	-66	-40	+10
ROYAUME-UNI	-98	-99	-34	+407	+165
ÉTATS-UNIS	-96	-99	-67	+203	+122
CALIFORNIE	-96	-97	-75	-24	+15

2. LA GÉNÉRALISATION DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES à accumulateurs réduirait la pollution urbaine. La pollution produite par les centrales électriques augmenterait toutefois légèrement, surtout dans les pays qui sont principalement alimentés par du charbon et du pétrole, tels les États-Unis et le Royaume-Uni.



3. LE VÉHICULE HYBRIDE *Hymne*, de la Société Renault, associe la propulsion électrique (en rose) et un moteur thermique (en vert) qui peuvent être utilisées indépendamment ou simultanément.

Un superviseur électronique commande l'utilisation des batteries, pour fournir un surcroît de puissance au moteur thermique, par exemple, ou leur recharge par celui-ci.

accélération. Comme les moteurs à combustion interne ont un rendement qui atteint 40 pour cent, lorsqu'ils tournent à régime constant, le rendement total d'un véhicule hybride serait même supérieur à celui d'un véhicule purement électrique.

Le mode de production d'électricité embarqué le plus prometteur est toutefois la pile à combustible qui, dans le meilleur des cas, consomme de l'hydrogène et ne rejette que de la vapeur d'eau (des piles à combustible qui consomment d'autres carburants, tels le gaz naturel, le méthane ou l'essence, ont des rendements inférieurs et rejettent des gaz polluants). Couramment utilisées pour propulser les engins spatiaux, les piles à combustible ont été testées sur un tracteur expérimental dès 1959. Au milieu des années 1990, des prototypes d'autobus à piles à combustible ont prouvé que cette technique est utilisable pour les transports terrestres.

Les piles à combustible ont l'inconvénient d'être encombrantes et coûteuses. Les mieux adaptées à la

propulsion automobile, celles qui sont équipées de membranes échangeuses de protons, coûtaient 500 000 francs par kilowatt il y a quelques années. Ce coût devrait descendre à quelques dizaines de milliers de francs au début du siècle prochain, et peut-être jusqu'à moins de 1 000 francs lorsque les piles à combustible seront produites en série. Elles seraient alors compétitives face aux moteurs à combustion interne. La Société *Daimler-Benz* a annoncé, en juillet 1996, son intention de produire des véhicules *Mercedes* à piles à combustible dès 2006.

Nous l'avons vu, l'hydrogène serait le combustible le moins polluant. On peut l'obtenir de différentes manières, mais la raréfaction des carburants fossiles et l'augmentation de leur prix favoriseront sans doute la synthèse de l'hydrogène par électrolyse de l'eau à l'aide d'énergie solaire. La généralisation de cet hydrogène solaire assainirait toute la chaîne de production de l'énergie. L'équivalent d'un litre d'essence ne devrait pas coûter plus de cinq francs.

De l'électricité à l'électronique

La partie énergétique des véhicules électriques n'est pas la seule qui ait été perfectionnée. Les progrès en électronique de puissance ont réduit de 40 pour cent en dix ans le poids et le prix des ensembles de transmission. Du côté de l'électronique de commande, des dispositifs de gestion de la batterie et du moteur, disponibles aujourd'hui, permettraient de gagner jusqu'à 50 pour cent d'énergie.

Jusqu'au début des années 1990, presque tous les véhicules électriques étaient équipés de moteurs à courant continu, plus faciles à alimenter à partir d'accumulateurs. La mise au point de petits dispositifs qui convertissent le courant continu en courant alternatif permet aujourd'hui d'utiliser des moteurs à courant alternatif, plus fiables, d'une maintenance plus simple, de rendement supérieur et plus faciles à coupler au système de freinage actif. L'ensemble formé par le moteur et l'électronique de puissance

d'un véhicule électrique a aujourd'hui des dimensions, un poids et un coût de fabrication inférieurs à ceux d'un moteur à combustion interne de caractéristiques équivalentes.

Tous les grands constructeurs automobiles se sont lancés dans la mise au point de véhicules électriques, mais les quelques milliards de francs investis à cette fin dans le monde, au cours des années 1990, sont bien inférieurs aux autres investissements du secteur : l'industrie automobile américaine

dépense à elle seule plus de 25 milliards de francs chaque année dans la publicité, et encore plus en recherche et développement. Les compagnies pétrolières prévoient un investissement de plus de 50 milliards de francs dans les dix prochaines années, aux États-Unis, pour produire de nouvelles essences moins polluantes.

Ce sont surtout les pressions politiques qui incitent les constructeurs à mettre au point les véhicules électriques. La Californie a ainsi adopté

une convention qui stipulait que les véhicules «zéro émission» devaient représenter deux pour cent des ventes en 1998, cinq pour cent en 2001 et dix pour cent en 2003. Les constructeurs devaient payer 25 000 francs d'amende par véhicule zéro émission non vendu. En mars 1996, sous la pression des compagnies pétrolières et des constructeurs automobiles, les échéances de 1998 et de 2001 ont été supprimées : les constructeurs refusaient d'investir pour fabriquer des

Les constructeurs français et les véhicules électriques

Dès les années 1950, des ingénieurs du Groupe *PSA Peugeot Citroën* plaidaient pour la mise au point de véhicules électriques. Le renforcement des normes anti-pollution, la menace d'une pénurie des carburants fossiles et la mode écologiste favorisent l'essor de ce mode de propulsion. La mise sur le marché de véhicules électriques a été possible grâce à des améliorations des performances des batteries, des systèmes de contrôle et des moteurs, mais, surtout, grâce à la baisse de leurs prix, qui sont aujourd'hui du même ordre de grandeur que celui des autres automobiles.

Le principal problème reste l'autonomie : en ville une *Peugeot 106 Electric* ou une *Citroën Saxo* électrique ne parcourent pas plus de 80 kilomètres sans recharge. La solution ne viendra que d'une amélioration des batteries : l'augmentation du rendement des moteurs, qui est déjà supérieur à 85 pour cent, n'apporterait qu'un faible gain.

Nous espérons au moins doubler cette autonomie dans moins de dix ans : une voiture parcourra alors 200 kilomètres environ sans recharge. Le nickel et le cadmium des batteries actuelles seront remplacés par des couples électrochimiques qui équipent aujourd'hui des téléphones ou des calculatrices (nickel/hydrures métalliques ou lithium/carbone). Nous travaillons aujourd'hui, avec les fabricants d'accumulateurs, à l'adaptation de ces systèmes à la propulsion automobile.

L'amélioration des performances des batteries permettra-t-elle un jour aux véhicules électriques d'égaliser en autonomie les véhicules actuels à essence ? En attendant la réponse à cette question, nous travaillons (en particulier avec la Société *Renault*) à un projet qui combine les avantages des deux modes de propulsion : une turbine à gaz, alimentée par du gazole, est reliée à un turbo alternateur qui alimente un moteur électrique et une batterie. En ville, le véhicule sera purement électrique. Sur route, la turbine à gaz alimentera directement le moteur et rechargera les batteries.

Ce véhicule sera globalement peu polluant : la combustion catalytique à basse température, sans flamme, ne produit pas d'oxydes d'azote. Quand le système est bien réglé, seul du dioxyde de carbone est émis. La commercialisation commencerait dans une dizaine

d'années ; d'ici là, nous devons trouver le moyen de fabriquer les véhicules de ce type à des coûts compatibles avec les prix des automobiles.

Patrick BLAIN, Groupe *PSA Peugeot Citroën*

Les Sociétés *Renault* et *Peugeot* ont été, en 1995, les premiers constructeurs au monde à fabriquer en série des véhicules électriques. La Société *Renault* vend, avec des moteurs à courant continu, la *Clio* et l'*Express* équipées de batteries nickel/cadmium, et le *Master* équipé de batteries au plomb. Il existe un petit marché, pour ces véhicules non polluants, silencieux et faciles à conduire : nous en fabriquons quelques centaines par an.

La Société *Renault* est associée à d'autres partenaires (dont le Groupe *PSA Peugeot Citroën*) sur plusieurs projets de véhicules hybrides qui pourraient être commercialisés d'ici dix ans ; à beaucoup plus long terme, des voitures seront peut-être propulsées par des piles à combustible.

La pile à combustible, qui combine de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité, fonctionne bien aujourd'hui. L'hydrogène n'est pas un carburant plus dangereux que les autres, même s'il faudra résoudre les problèmes de distribution et de stockage. Toutefois, l'utilisation de piles à combustible dans l'automobile rencontre un problème... de taille. La Société *Balard*, au Canada, avait présenté, en 1990, un autobus électrique dont un tiers environ du volume était occupé par une pile à combustible et par ses accessoires. En 1995, l'ensemble n'occupait que l'arrière d'un autobus conventionnel. Nous cherchons aujourd'hui à faire entrer le dispositif à l'arrière d'un break familial. Avant d'en envisager la commercialisation, il faudra encore réduire l'encombrement : nous ignorons quand nous y parviendrons.

Dans les prochaines années, l'automobile se diversifiera. Déjà, à travers le monde, de nombreux carburants sont utilisés : essence, gazole, gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié, méthanol. Les véhicules électriques, commercialisés en France depuis un an, et les véhicules hybrides s'ajouteront sans doute à la liste.

Claude SUTREN, Société *Renault*

véhicules dont la technique serait, selon eux, rapidement obsolète.

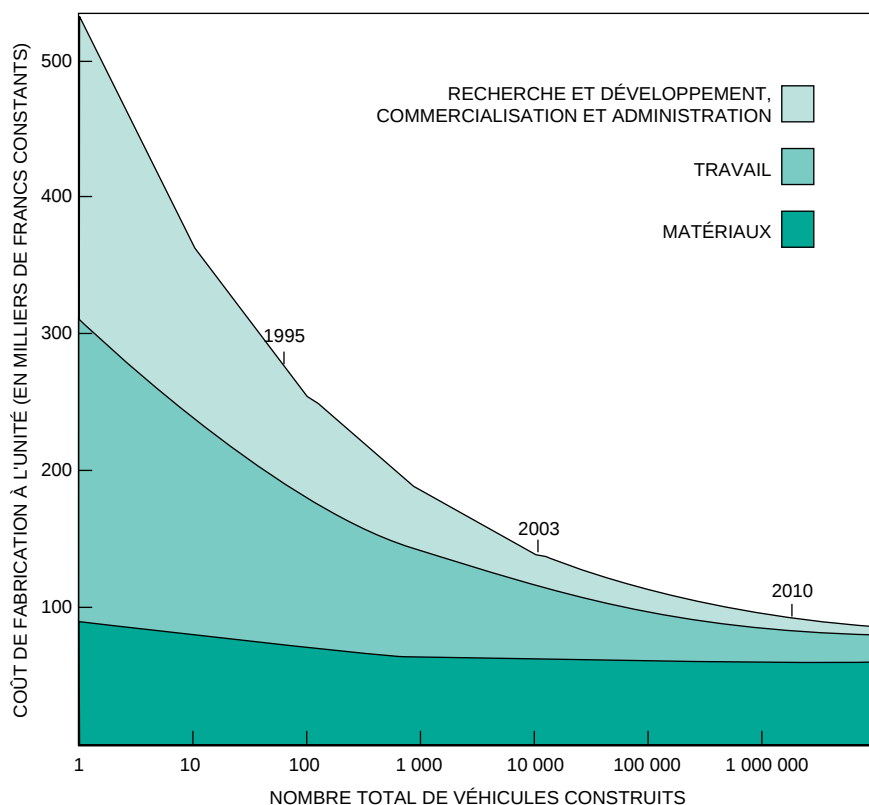
Des choix industriels

Un facteur déterminant du succès des véhicules électriques sera leur prix. Une *Peugeot 106 Electric* coûte 93 600 francs ; une *Renault Clio électrique*, 93 200 francs. Ces prix n'incluent pas les batteries, qui sont louées, pour environ 500 francs par mois, avec un dépôt de garantie de 2 500 francs, qui assure la récupération de la batterie usagée. Il est impossible d'annoncer des prix concurrentiels tant que les véhicules ne seront pas produits en grande série. L'examen de l'évolution des prix d'autres biens manufacturés, dont les automobiles classiques, suggère toutefois que le passage à une production en grande série diviserait par deux les prix actuels.

Comme ils ne peuvent ignorer complètement les véhicules électriques, les constructeurs minimisent les coûts de production. Beaucoup se contentent de remplacer le moteur thermique et la transmission de véhicules existants par un groupe propulseur électrique. D'autres sous-traitent cette adaptation à de petites entreprises spécialisées. D'autres enfin imaginent des véhicules de taille réduite adaptés à la circulation urbaine, telles la *Zoom*, des Sociétés *Renault* et *Matra*, ou la *Tulip*, du Groupe *PSA Peugeot Citroën*, pour la circulation urbaine. De tous les grands constructeurs, seule la Société *General Motors* a aujourd'hui lancé la production en série d'un véhicule électrique spécifique, nommé *EV-1*.

Le prix des batteries (et des piles à combustible) maintiendra probablement toujours les prix d'achat des véhicules électriques au-dessus de ceux des véhicules à essence de même catégorie. Toutefois, le prix au kilomètre devrait être finalement égal. Le carburant des véhicules électriques est bon marché, la maintenance est minime et les moteurs électriques ont une durée de vie supérieure à celle des moteurs à essence. Si l'on tient compte des conséquences sur la pollution atmosphérique, de l'effet de serre et d'autres facteurs externes (que la société doit supporter), les véhicules électriques sont beaucoup plus intéressants que les véhicules à essence.

Comment faire comprendre aux consommateurs qu'ils ont intérêt à abandonner l'essence ? Le passage des



4. LA PRODUCTION EN GRANDE SÉRIE permettrait aux constructeurs de baisser le prix des véhicules électriques. Le coût des matières premières deviendrait l'élément principal du prix de revient (ces estimations sont fondées sur les données de l'industrie automobile actuelle, où une usine produit au moins 100 000 véhicules par an).

moteurs à combustion interne aux véhicules électriques semble inéluctable, même s'il est lent et incomplet. Quand et sous quelle forme la transition interviendra-t-elle ? Comment la mener à bien ? Les États doivent remplir leur rôle en accordant des subventions qui conduisent les consommateurs et les entreprises à intégrer les coûts externes, tels ceux de la pollution, dans leur raisonnement économique, et en ne finançant que des projets innovants qui mettent en jeu des techniques de pointe, et non ceux

que le secteur privé entreprendrait de toute façon.

Le premier constructeur qui commercialisera un véhicule électrique à un prix compétitif bénéficiera de marchés considérables, dans le monde entier. Les véhicules électriques auront du succès dans les régions où la pollution est un problème majeur, où l'on privilégie la fiabilité et une maintenance réduite aux dépens des performances, où l'électricité est peu coûteuse et où les investissements pétroliers sont modérés.

Daniel SPERLING dirige l'Institut d'études sur les transports de l'Université de Californie.

D. SPERLING, *New Transportation Fuels : A Strategic Approach to Technological Change*, University of California Press, 1988.

Choosing an Alternative Transportation Fuel : Air Pollution and Greenhouse Gas Impacts, OCDE, Paris 1993.

James J. MACKENZIE, *The Keys to the Car*, World Resources Institute, 1994.

Michael Brian SCHIFFER, *Taking Charge : The Electric Automobile in America*,

Smithsonian Institution Press, 1994.

D. SPERLING, *Future Drive : Electric Vehicles and Sustainable Transportation*, Island Press, 1995.

Kenneth KURANI, Thomas TURRENTINE et Daniel SPERLING, *Testing Electric Vehicle Demand in «Hybrid Households» Using a Reflexive Survey*, in *Transportation Research*, partie D, vol. 1, n° 2 (à paraître).

MobilE, magazine de l'AVERE (Association européenne des véhicules électriques routiers), AVERE France, Paris-La Défense.

L'énergie des véhicules électriques

CORD-HENRICH DUSTMANN

Grâce à de nouveaux types d'accumulateurs, les performances des véhicules électriques urbains vont s'améliorer.

Lorsque Carl Friedrich Benz et Gottlieb Wilhelm Daimler présentèrent, indépendamment, leurs fiacres motorisés, en 1885 et en 1886, des voitures électriques circulaient déjà dans Paris depuis quelques années. Puis, en 1899, la *Jamais Contente* du Belge Camille Jenatzy, avec son moteur électrique, fut le premier véhicule autopropulsé à dépasser la vitesse de 100 kilomètres à l'heure.

Au tournant du siècle, aux États-Unis, le nombre des voitures à essence était inférieur (22 pour cent du parc automobile) au nombre des voitures électriques et à vapeur (respectivement, 38 et 40 pour cent). On appréciait l'électricité pour sa facilité d'utilisation, sa fiabilité et sa propreté ; l'autonomie et la puissance n'étaient pas encore des critères importants.

La découverte du démarreur électrique pour le moteur à explosion a donné à celui-ci un avantage décisif. En 1995, les véhicules électriques représentaient à peine 0,01 pour cent des 47,5 millions d'automobiles du parc allemand, dont la moitié étaient des voitures particulières.

Des bricoleurs, des bureaux d'études et des constructeurs automobiles présentent régulièrement des concepts nouveaux et intéressants de véhicules totalement ou partiellement électriques. En France, par exemple, à la fin de 1996, plus de 3 000 véhicules électriques sont immatriculés, dont plus de 1 000 l'ont été dans l'année. Certains sont fabriqués industriellement et vendus : le marché progresse. Toutefois, les moteurs à combustion interne ont encore de beaux jours devant eux : à moyen terme, les véhicules qu'ils équiperont

resteront moins coûteux et leur utilisation restera plus souple.

Le principal handicap des véhicules électrique est la difficulté du stockage de l'énergie électrique. Tandis que 40 litres d'essence fournissent une énergie de 1 400 mégajoules, dont 8 à 15 pour cent (selon le mode de conduite) sont convertis par le moteur en énergie de propulsion, une batterie de volume équivalent ne contient qu'une énergie d'environ 100 mégajoules, que le moteur utilise à 80 ou 90 pour cent.

En outre, les véhicules électriques ne s'imposeront que si leur conduite est aussi confortable que celle des véhicules à moteur thermique : la batterie doit fournir de l'énergie à la demande, uniquement en fonction des besoins du véhicule et quelles que soient les conditions extérieures. Que la voiture soit en stationnement ou qu'elle roule sur une route accidentée, par temps chaud, froid, sec ou humide, elle doit répondre aux commandes du conducteur.

Les constructeurs visent, pour un avenir proche, la commercialisation de batteries qui permettront à des véhicules d'atteindre une vitesse de 120 kilomètres à l'heure, de rouler une centaine de kilomètres sans recharge, et qui résisteront à un millier de cycles de charge et de décharge (soit environ 150 000 kilomètres parcourus en dix ans). Ces caractéristiques constituent un compromis entre l'énergie et la puissance de la batterie : avec certaines batteries, des véhicules prototypes ont une autonomie de 200 kilomètres et, sur les véhicules électriques actuels, la vitesse de pointe n'est pas limitée par la batterie mais par le moteur.

Une bonne batterie

Comment les fabricants de batteries atteindront-ils ces objectifs ? Un accumulateur est caractérisé par sa densité d'énergie et par sa densité de puissance. La densité d'énergie, tout d'abord, est la quantité d'énergie stockée dans un kilogramme (ou dans un litre) d'accumulateur ; elle détermine l'autonomie du véhicule. On essaie aujourd'hui d'atteindre 360 kilojoules par kilogramme. D'autre part, la densité de puissance est la puissance électrique maximale par kilogramme, qui détermine la vitesse maximale et l'accélération ; la densité de puissance d'un accumulateur satisfaisant serait de 150 watts par kilogramme (200 watts par litre).

Les réactions électrochimiques de charge et de décharge doivent être totalement réversibles. Le système de freinage actif relié aux roues, qui transforme le moteur en générateur, recharge en effet la batterie à chaque décélération, quel que soit son état de charge. Le système doit aussi fonctionner sans entretien et ne présenter aucun danger supplémentaire par rapport à un véhicule classique, même en cas d'accident grave. Enfin le prix de la batterie ne doit pas trop grever celui de la voiture électrique. Le coût associé dépend, entre autres paramètres, des matériaux utilisés et de la durée de vie de la batterie. Pour qu'une batterie soit commercialisable, il faut que les électrodes et les électrolytes utilisés soient chimiquement stables pendant toute sa durée de vie.

Des laboratoires universitaires et industriels testent aujourd'hui plusieurs systèmes électrochimiques. Peu

répondront à l'ensemble des critères que nous venons d'énumérer, de sorte que les constructeurs devront trouver des compromis. La batterie au plomb à électrolyte gélifié, par exemple, est la plus utilisée aujourd'hui, parce qu'elle est la moins coûteuse et que c'est celle dont on connaît le mieux le fonctionnement. Sa den-

sité d'énergie est toutefois trop faible. La batterie Zebra (l'acronyme anglais d'un projet de recherche sur les batteries sans émissions), dont la Société AEG Anglo Batteries prépare la production en série, est beaucoup plus performante : elle stocke l'énergie sous forme de sodium et de chlorure de nickel.

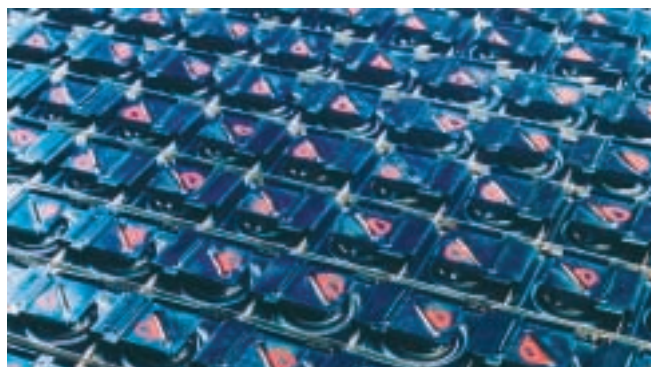
La batterie sodium/chlorure de nickel

On fabrique un élément de la batterie Zebra en plaçant, dans un tube d'alumine, du chlorure de sodium et du nickel, en poudre, une électrode de nickel et du chlorure d'aluminium et de sodium. Le tube est ensuite



Romualda Holak, Avere France

1. LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES, équipés de batteries, sont rechargés par un branchement électrique standard. Les utilisateurs profitent des arrêts, à domicile ou dans des parcs de stationnement, pour «faire le plein».



2. UNE BATTERIE ZEBRA, composée de 200 à 500 cellules, délivre une tension d'environ 300 volts (à gauche). Le boîtier métallique à double paroi isole thermiquement la batterie, qui fonctionne à 300 °C,



AEG Anglo Batteries/Spektrum der Wissenschaft

de l'environnement extérieur. Ce boîtier protège aussi contre d'éventuelles fuites lors de chocs violents, tel celui qu'a subi une batterie lors d'un essai de chute (à droite).