

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.

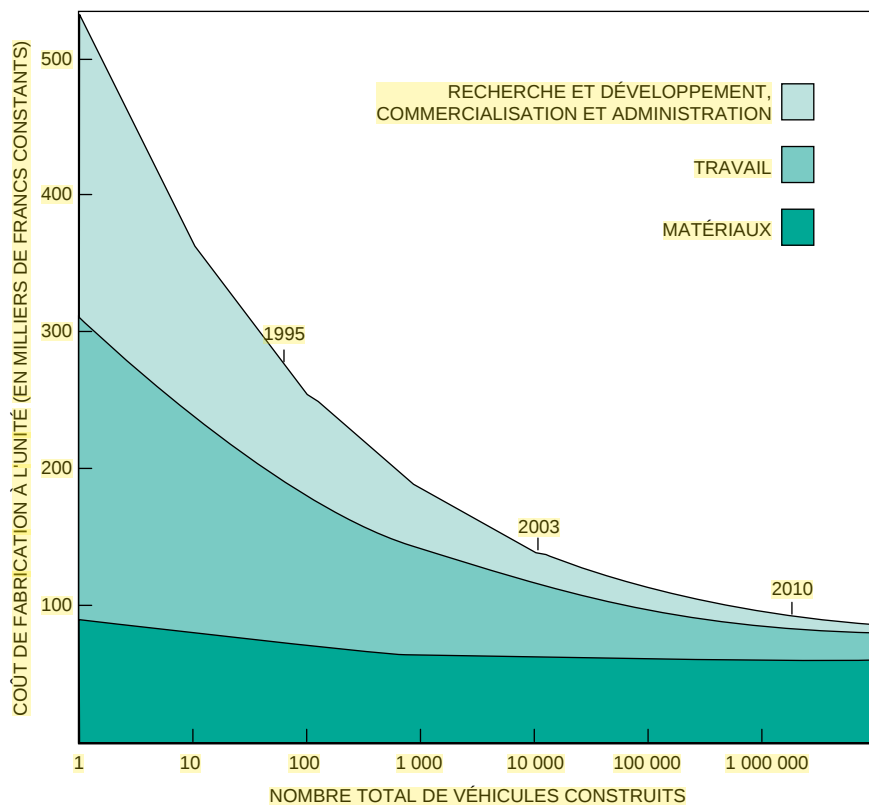
Des choix industriels

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 équipent

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