

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.

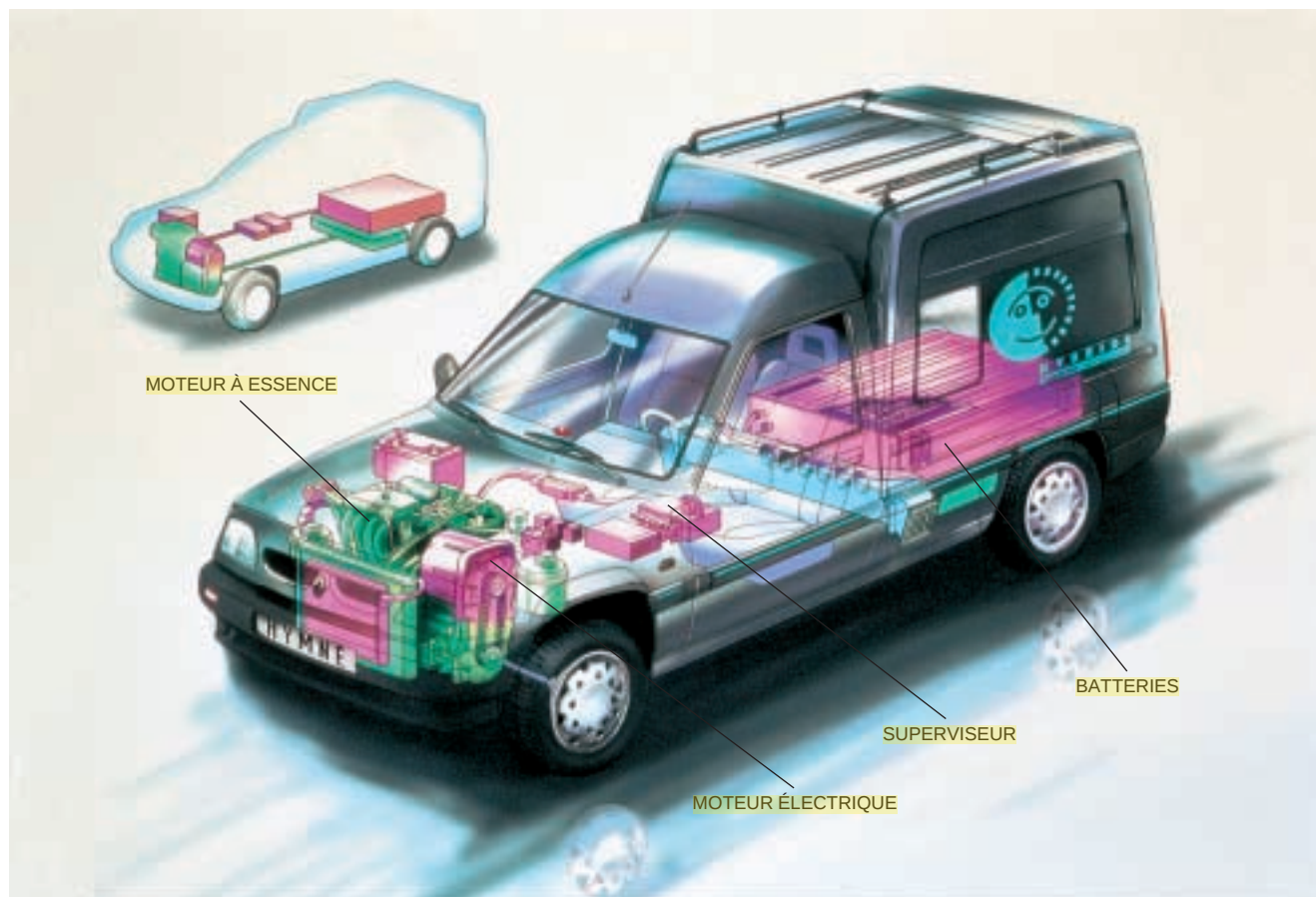
Les premiers véhicules commerciaux équipés de volants d'inertie et de supercapacités devraient apparaître vers l'an 2000. Ces dispositifs, qui peuvent fournir de l'énergie rapidement, seront utilisés pour les pointes de puissance, lors des accélérations ou des ascensions ; des batteries assureront le 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.

accélérations. 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*