

La voiture du futur



Centre de Prospective
et de Veille Scientifique
Direction de la Recherche
et des Affaires Scientifiques
et Techniques
Ministère de l'Équipement,
des Transports et du Logement



Cet ouvrage a été réalisé et édité par l'Agence pour la Diffusion de l'Information Technologique, à la demande du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (Centre de Prospective et de Veille Scientifique, DRAST)

**Ministère de l'Équipement,
des Transports et du Logement**

Direction de la Recherche et des Affaires
Scientifiques et Techniques
Centre de Prospective et de Veille Scientifique
Tour Pascal B
92 055 Paris La Défense cedex 04

ADIT

2, rue brûlée,
67 000 Strasbourg
tél : 03 88 21 42 42
fax : 03 88 21 42 40
e-mail : info@adit.fr
URL : <http://www.adit.fr>

Rédacteur en chef

Patrick Henry

Rédacteurs

Robert Apter, Jean-François Desessard,
Gary Helm, Patrick Henry,
Philippe Larrue, Vicky McConnell,
Marie-Laure Spaak, Françoise Strasser,
correspondant ADIT Japon

Conception graphique / secrétariat de rédaction

Jacques Lombard

Traduction / adaptation

Les articles en langue anglaise ont été traduits
et adaptés par le pool LEA de l'Université
Marc Bloch (Strasbourg) et l'ADIT.

Impression

SICOP – 67 800 Bischheim



édito

Comme le montrent les articles qui suivent, l'automobile peut faire des progrès considérables sur bien des plans y compris celui de la consommation de biens naturels ; ce sera plus difficile pour la perturbation de l'espace.

Pour 2030 – 2040, les hypothèses techniques sont émises surtout à partir des germes observés dans le secteur de la R&D dans le Monde, on n'a en effet pas toujours eu avec des méthodes de prospective lourdes comme les enquêtes Delphi, des ratios {lourdeur de l'étude / vraisemblance} bien rassurants. Les hypothèses techniques peuvent, elles, être assez sûres pour les objectifs pilotés par des exigences sociales comme la protection corporelle, le confort, la préservation de l'environnement.

En revanche, les moyens techniques de la satisfaction de ces objectifs sont mal prévisibles à 20 ans : la fixation de sévères objectifs de qualité de l'air en Californie dans les années 60 remplissait tous les spécialistes de doute quant aux moyens possibles, or ces objectifs ont été parfaitement atteints en 1970 ; autre exemple, les perspectives de la pile à combustible ont été débattues avec beaucoup de scepticisme pendant plusieurs décennies, on voit aujourd'hui des affirmations autorisées quant à l'apparition de ces piles sur véhicules d'ici 4 ans.

Centré sur les techniques, le document n'évoque presque pas les changements qui peuvent être envisagés au niveau de la conception fonctionnelle du véhicule, de son utilisation, de sa gestion. Sera très important le rôle de facteurs socio-économiques comme :

- l'ampleur du développement économique dans le monde et notamment dans les pays en voie de développement comme l'Inde et la Chine, la multimotorisation associée qui peut accentuer la diversification des véhicules (comme l'introduction de véhicules électriques).
- le développement de l'utilisation de transports multimodaux (partenariat de l'automobile et des Transports Publics ou non motorisés avec location ou gestion collective d'automobiles).

Au cours des travaux menés en 1997-98 au ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, il était clairement apparu qu'il est aujourd'hui difficile d'envisager un marché important pour une automobile spécifiquement urbaine. On énonçait les perspectives suivantes à un horizon de dix à vingt ans :

- La continuité : adaptation de la routière à la ville avec comme variante l'usage collectif.
- Les niches de Voitures spécialisées comme la voiture urbaine spécifique ou l'incorporation du véhicule dans des systèmes complexes de produits.
- Les ruptures imaginées portaient sur le Court Courrier : véhicule de proximité ou sur l'apparition d'un Biotope spécifique à un véhicule urbain inapte aux grandes routes.

Ces perspectives que l'on peut toujours avoir, ne concernaient pas les fonctions interurbaines de l'automobile ; pour celles-ci, on notera que le principe de l'autoroute automatique soulève déjà de tels problèmes de transition et de cohabitation entre automobiles conventionnelles et automobiles innovantes que, pour l'instant, on s'intéresse plus modestement à un pilotage automatique limité.

Je ferais deux remarques pour terminer :

- les thèmes évoqués dans le document présenté ne donnent pas lieu à se préoccuper outre mesure des périodes de transition, il faudra bien cependant aménager des transitions comme pour la distribution d'énergie aux véhicules,
- des évolutions importantes et visibles par le conducteur comme le passage à la boîte automatique qui semble spécialement lent en France ne sont pas évoqués car il ne s'agit pas là non plus de problème de techniques.

Au total, on peut penser comme le directeur commercial de Mercedes Benz, interrogé sur les véhicules en composites, que « There will be lots of cars of the future ».

Claude Lamure

édito

sommaire

Éditorial

Les tendances de la R&D automobile

Trois types de véhicules automobiles pour le futur	3
Une voiture verte et intelligente	6
La voiture du futur au Japon	9
En bref	11

Le véhicule électrique

Quelle sera l'énergie utilisée par le véhicule du futur ?	
La réponse des oracles de l'industrie automobile	12
En bref	17

Les systèmes de transport intelligents

Les perspectives d'évolution de l'ITS au Japon à l'horizon 2030	19
Entre circulation intelligente et intelligence de la route	24
En bref	27

L'automobile et l'environnement

Véhicule propre : les visions américaine et japonaise	29
En bref	31

Les piles à combustible

Une solution qui tombe pile	33
En bref	37

Motorisation, mécanique, énergie

L'innovation, principal vecteur de développement	40
En bref	43

Les véhicules hybrides

La propulsion électrique : une nécessité pour le futur	45
Considérations sur le coût de l'énergie des techniques hybrides	48
La nouvelle vague de véhicules hybrides au Japon	57
En bref	61

Les nouveaux matériaux pour l'automobile

L'ère des multimatériaux	63
Les voitures de l'avenir prennent forme avec les composites	66
En bref	73

La sécurité automobile

Comment l'Italie freine l'hécatombe routière	75
En bref	79

Bibliographie

Les tendances de la R&D automobile • Le véhicule électrique • Les systèmes de transport intelligents • L'automobile et l'environnement • Les piles à combustible • Motorisation, mécanique, énergie • Les véhicules hybrides • Les nouveaux matériaux pour l'automobile • La sécurité automobile • Autres types de sources	80
--	----

Trois types de véhicules automobiles pour le futur

Le phénomène automobile est apparemment inéluctable et ne semble pas pouvoir être éradiqué. Il évolue vers une autre forme, plus polymorphe, et adaptée à un environnement plus local. À propos de son avenir, les experts en prospective des transports et de l'automobile se partagent en deux écoles : celle du transport en commun généralisé et celle du transport individuel guidé. Au vu de l'évolution de la société, la seconde école devrait l'emporter car l'automobile reste avant un outil de liberté individuelle.

On se dirige ainsi vers une société où coexisteront probablement trois grandes classes de véhicules, adaptées chacune à un besoin spécifique : tout d'abord des petites voitures électriques adaptées à la ville, ensuite des véhicules à l'hydrogène, pour des trajets de liaisons entre les villes et pour les transports lourds, et enfin un véhicule hybride destiné un usage mixte ville – route.

Une adaptation ciblée

Les petites voitures électriques (PVE), qui peuvent être des très petites voitures électriques (TPVE), sont adaptées exclusivement à la ville et totalement électriques (à batteries). Elles ont de faibles besoins d'autonomie, de confort et de puissance, et sont de très petite taille. Leur adaptation est optimale vis-à-vis des espaces des centres urbains ou de loisir - tourisme (parcs, stations de vacances...). Elles seront certainement en location libre-service (voir par exemple le projet Tulip de Peugeot) et seront utilisées pour le shopping, les déplacements de personnes à mobilité réduite (handicapés, personnes âgées), les petits transports à faible distance, les affaires ; bref elles seront à considérer comme un outil. Leur usage nécessite des modifications dans les infrastructures (voies propres ou aménagements pour la cohabitation

avec les piétons et les cycles, stations de service, distribution de l'énergie, lieux de parking...). Cet outil du quotidien se trouve à la limite du concept de voiture et peut dériver vers le tricycle, comme la Sparrow - voir page 70 - ou les motocyclettes, comme le C1 de BMW.

Le deuxième type de véhicules, au moteur fonctionnant à l'hydrogène, est adapté à des trajets intercity ou plus, ainsi qu'aux transports lourds (fret, bus de transport en commun...) qui nécessitent vitesse, confort, puissance et grande autonomie. Dans le cas d'un usage individuel, ces véhicules permettront la pratique du tourisme, des sports, des loisirs, voire du repos (en cas de guidage automatique sur de longues distances). C'est un lieu de loisir avant tout. Il bénéficie d'un grand confort : silence, climatisation, désembuage immédiat, intégration des nouvelles technologies de l'information (NTIC). L'électronique de bord permet le suivi des itinéraires, le suivi permanent de l'ensemble des informations nécessaires aux passagers et à leur confort : météo, santé (cf par exemple le contrat proposé par Renault, qui permet d'alerter les centres de secours à l'aide d'un bouton unique sur le tableau de bord), état du véhicule et de la chaussée... Il sera probablement guidé sur une majeure partie du parcours afin d'augmenter les flux et la sécurité.



Enfin il existera certainement un véhicule hybride destiné un usage mixte ville - route. Toutes les cités n'autoriseront probablement pas ce type de véhicule dans leurs murs, pour des raisons de taille notamment. En effet, les flux ne peuvent pas être améliorés avec ce type de véhicules. La ville dense doit en effet être impérativement parcourue par des véhicules de très petite taille si l'on veut y augmenter la vitesse de déplacement et y décongestionner le trafic.

Ces trois classes masquent en réalité une grande diversité de choix de motorisations, de taille, d'usages adaptés à des configurations spatiales et environnementales particulières et fonction des besoins locaux (culturels, climatiques... comme : centres-villes anciens, faubourgs à maisons individuelles, tunnels lorsque la configuration géologique le permet, etc.) et du type de trajet (loisir, shopping, affaires, fret, déplacement vers le lieu de travail, vacances, tourisme, etc.).

Les infrastructures routières seront actives

Pour les technologies et les systèmes de transports de demain, la R&D effectuée dans les pays avancés est unanime : les véhicules seront plus propres, ils offriront plus de sécurité, les technologies électroniques seront présentes à tous les niveaux du véhicule et de son environnement, et les infrastructures routières seront plus efficaces, car plus actives.

Autour de 2030, selon Claude Lamure, les autoroutes seront automatiques. L'infrastructure (la route et son environnement spatial) détiendra le plus fort capital « intelligence » : gestion des données et capacités de prises de décision lui donneront ainsi le rôle de superviseur. L'intelligence sera donc moindre pour les véhicules. Pour assurer ces fonctions d'échanges, l'électronique sera partout présente : information au conducteur et aux passagers, contrôle global en temps réel du véhicule, gestion du trafic et des flux, identification, localisation, contrôle local des organes du véhicules (motorisation, confort, sécurité), prévention / sécurité (contrôle et échange avec l'environnement : route, autres véhicules, bornes de guidage,...). La sécurité se trouvera elle aussi dans les

infrastructures : meilleurs revêtements afin de diminuer l'entretien et augmenter la sécurité (tenue de route), capteurs intégrés afin d'informer de l'état de la chaussée (gel, vibrations anormales, fissures,...). Ces données seront exploitées par les organismes de gestion des routes et les automobilistes eux-mêmes, en synergie.

Les véhicules : des morphologies inchangées

Il n'y aura pas de modifications profondes dans la morphologie d'un véhicule : les cellules seront proches de celles que l'on connaît déjà aujourd'hui : taille, structure, espace occupé, usage des infrastructures... Seules les composants internes seront modifiés, par l'emploi de nouvelles technologies comme les motorisations thermique à base d'hydrogène, les volants d'inertie ou les supercapacités permettant de récupérer l'énergie. Les motorisations seront très diversifiées (thermiques -céramiques, turbines, deux temps-, hybrides, électrique, moteur-roue).

Le véhicule électrique, qui semble le plus prometteur pour un usage local (la ville au sens large, avec ses banlieues proches), restera confiné dans cet espace. Il se pose en effet le problème de l'électricité qui peut être produite à partir de carburant fossile, donc polluante elle aussi. Il s'y ajoute divers désavantages, comme le confort qui n'est pas optimal, notamment en ce qui concerne le chauffage, la faible autonomie, la faible vitesse, le prix. Ce dernier est compensé aujourd'hui par des incitations fiscales. On note toutefois une excellente évolution des batteries, qui sont directement à l'origine du coût élevé de l'entretien de ces véhicules.

Pour les véhicules à moteur thermique, l'hydrogène semble aujourd'hui la solution la plus élégante, malgré quelques défauts (bruit, émissions...). Le projet Eco-City au Japon prend en compte cet élément dans la future production d'énergie industrielle. Des projets du même type sont en cours d'élaboration dans la plupart des pays producteurs d'énergie.

En ce qui concerne les transports publics, il n'y a pas de nouveautés notoires dans le concept ou la morphologie. On note un retour au tramway dans les

centres -pour une cohabitation plus conviviale-, les bus étant plutôt relégués en périphérie pour leur autonomie d'action et les besoins moindres en qualité de l'environnement (bruit, émissions). Il y a aussi des nouveautés dans l'usage de l'électronique. Elle permet une meilleure organisation par une meilleure gestion des flux et une meilleure information des passagers. Dans les mégapoles des pays en développement, on verra le développement de microbus à mobilité optimale.

Les évolutions de la société seront prépondérantes

Toutes les mutations technologiques, économiques et sociales de l'automobile et des transports seront des conséquences des nouveaux comportements du prochain siècle et de l'apparition de nouveaux marchés. Le XXI^e siècle sera celui de l'individualisme, des arts, de la culture, des nationalismes culturels, de l'avènement des femmes et des personnes âgées, ainsi que du retour de la religion.

Les plus grands marchés de demain pour l'automobile sont la Chine, l'Asie du Sud-Est, l'Amérique Latine et l'Afrique. Ils adapteront la technologie actuelle en la simplifiant pour des raisons économiques. Les pays de l'Est sont dans une phase intermédiaire.

Dans les pays développés, les parcs d'infrastructures sont gigantesques et peu modulables aujourd'hui. Il faut faire avec : le concept profond de l'automobile et des transports ne changera pas, sauf en ce qui concerne les automatismes. On va assister à une modification dans la prise en charge du véhicule, par une gestion automatisée au lieu d'une gestion assurée par le conducteur. Mais il n'y aura pas de modification dans les concepts, et les technologies évolueront en douceur. Sauf peut-être dans les comportements et la sécurité, nous ne verrons donc pas de rupture, mais plutôt une évolution continue.

La transformation et l'évolution technologique des véhicules et des modes de transport sont liées aujourd'hui à l'emploi, la sécurité, l'environnement, thèmes « comportementaux » qui pourront migrer vers d'autres thèmes sociologiques dans le futur, avec des contraintes liées à la diminution de l'espace disponible et à celle de l'énergie fossile, l'ensemble étant modulé par les grandes mutations de la société. Aujourd'hui ce sont les problèmes environnementaux qui « tirent » les technologies du transport en avant. Les pays qui financent le mieux ces recherches sont ceux où se trouvent les constructeurs historiques (États-Unis, Europe), auxquels il faut rajouter le Japon, le Canada ou l'Australie.

Patrick Henry

Quelques sources (voir aussi p. 80)

- LAMURE (C). *Quelle automobile dans la ville ? Presses de l'ENPC : Paris, 1995. 333 p.*
- QUILEY (R). *Alternative cars in the 21st century, a new personal transportation paradigm. Society of Automotive Engineers (SAE) : Warrendale (Pennsylvanie, États-Unis), 1994. 396 p.*
- MOUSTACCHI (A.), PAYAN (J.-J.). *L'automobile, avenir d'une centenaire. Flammarion : Paris, 1999. 126 p.*

Une voiture verte et intelligente

Pour les plus grands constructeurs automobiles mondiaux, deux secteurs modèlent la voiture de demain, et entraînent des développements technologiques d'importance : l'environnement et l'électronique. Les véhicules qui nous transporteront dans moins de dix ans seront « propres » et leurs fonctions seront fortement asservies. Il sera ainsi possible de circuler avec une plus grande sécurité tout en respectant mieux l'environnement.

L'événement automobile du dernier trimestre 1997 a été sans conteste la mise sur le marché de la Prius par Toyota. Ce constructeur devenait ainsi le premier au monde à produire en masse un véhicule de type hybride. Les émissions de CO₂ de la Prius sont réduites de moitié et les autres types d'émissions de 90 %. Le total des émissions atteint à peine 10 % du maximum autorisé au Japon. De plus, en terme de consommation, le kilométrage est doublé par rapport aux véhicules concurrents : cette voiture parcourt en effet 28 km par litre (normes japonaises 10-15). Quant à sa conduite et à son design, ils ne diffèrent en rien d'un véhicule traditionnel. Cette voiture a donc été immédiatement un réel concurrent aux véhicules électriques en termes de facilité d'emploi et de prix. Néanmoins, le conducteur moyen devrait attendre 10 ans avant de rentabiliser sa Prius.

Les prémices de la voiture de demain

Ce véhicule, qui a connu des concurrents de même conception depuis, est un bonne image de ce que sera la voiture de demain : il respecte l'environnement grâce à de faibles émissions, à une basse consommation et à la récupération de l'énergie, et il est en partie piloté électroniquement -pour la motorisation au moins-. Le principe du véhicule hybride, qui n'était pas attendu si tôt sur le marché, est devenu aujourd'hui le cheval de bataille d'autres constructeurs japonais, américains ou européens. Preuve de l'intérêt de cette technologie et de l'existence réelle d'un marché.

Une autre technologie, qui est, elle aussi, liée à la motorisation électrique, a été à l'origine de divers accords ces deux dernières années : la pile à combustible. Leader mondial et pionnier de l'un de ces types de piles particulièrement bien adapté à l'automobile grâce à son volume restreint, Ballard Power System s'est trouvé soudain courtisé par les plus grands.

Le Japon en avance

Quoiqu'il en soit, les Japonais semblent en avance pour l'ensemble des développements technologiques automobiles. Très présents sur les marchés, leur pragmatisme et leurs investissements en R&D leur permettent de mettre à disposition des consommateurs, depuis 1997, des véhicules très différents, que les autres constructeurs mondiaux commencent à peine à commercialiser. L'horizon de production en masse des véhicules propres est proche grâce aux 4 milliards de yen (200 MF) que l'État a attribué, fin 1997, au Japanese Automobile Research Institute (JARI), ainsi qu'aux constructeurs, afin qu'ils développent en commun un véhicule « vert ». Ce véhicule devra respecter les normes d'émissions très basses proposées par l'Agence de l'Environnement. La commercialisation est prévue pour 2003. D'autres budgets ont été alloués à des projets de véhicules permettant d'économiser des carburants, dont notamment 100 MF au MITI pour le stockage d'énergie par batteries (projet New Sunshine), ou 12,5 MF pour



Le PNGV

Il détermine l'ensemble de la politique américaine de R&D dans l'automobile depuis septembre 1993. C'est un partenariat public / privé entre 7 agences fédérales, 20 laboratoires fédéraux et les trois grands constructeurs (Ford, Chrysler et GM). Plus de 350 équipementiers, universités et PME/PMI y participent. Son but est la création d'une « supervoiture » (Supercar) qui soit respectueuse de l'environnement et qui triple son efficacité énergétique par rapport aux modèles de la fin des années 90.

la Luciole, voiture électrique conçue au National Institute for Environmental Studies (NIRE). Enfin des incitations légales devraient pousser le consommateur vers les voitures propres : diminution des taxes, achats subventionnés de véhicules électriques et hybrides.

Par l'intermédiaire de la JAMA (Japan Automobile Manufacturers Association), les constructeurs japonais font savoir que le gain de consommation de carburant atteindra 15 % d'ici 2010. Les automobiles vont devenir plus petites et plus légères. Les performances mécaniques seront améliorées par l'emploi de la transmission variable continue. Ainsi l'efficacité énergétique devrait doubler, et les émissions de dioxyde de carbone diminuer de moitié.

Enfin, sur le plan de l'électronique, les Japonais ont pris une avance considérable dans les systèmes de guidage, notamment à cause des difficultés à trouver une adresse en ville dans ce pays. Le nombre de véhicules comportant une telle installation est très élevé et les coûts sont faibles. Les études dans ce domaine sont animées par la JSK (Association of Electronic Technology for Automobile Traffic Driving, liée au MITI) qui regroupe des chercheurs venant de l'industrie. Cette association a été créée en 1979, bien avant la naissance des différents projets d'ITS (Intelligent Transport System, systèmes de guidage automatique de véhicules) de par le monde, et avait pour but de concevoir les nouvelles applications de l'électronique embarquée dans les véhicules, pour l'amélioration du trafic. Les objectifs sont aujourd'hui de réduire par deux le nombre d'accidents mortels, éliminer les

embouteillages et réduire les émissions de CO₂ et de NOx respectivement de 15 et 30 %, notamment par la fluidité du trafic et celle de la transmission des véhicules.

Consensus aux États-Unis avec le PNGV

Les Américains ne sont bien sûr pas en reste. Ils mènent, avec leur programme PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicle), une réflexion à moyen terme qui consiste à créer la voiture propre en dérivant la production d'aujourd'hui pour aller, petit à petit, vers un véhicule qui restera proche des besoins du consommateur. Leur horizon de production en masse de ce véhicule est 2004. Les lignes générales des voitures particulières devront être radicalement modifiées afin de faire fortement évoluer les Cx, ce qui semble aller à l'encontre des choix commerciaux actuels puisque les constructeurs continuent à développer des véhicules à double usage utilitaire et sportif (appelés SUV, Sport Utility Vehicle), peu probants à ce sujet car encore gros consommateurs et pollueurs. Faisant un important profit avec cette frange de marché, ils ne sont pas près de l'abandonner, même s'ils en améliorent les capacités « vertes ».

À travers le PNGV (voir encadré), les autorités et les constructeurs (entre autres les « Trois Grands » : GM, Ford et Chrysler) veulent augmenter significativement la compétitivité nationale et réaliser des applications technologiques viables sur les véhicules conventionnels. Les technologies de production devront être améliorées et la sécurité des occupants reste primordiale. Les matériaux nouveaux sont l'aluminium, les composites et les aciers spéciaux. La conversion d'énergie met en œuvre l'injection directe et les piles à combustible. Le stockage de l'énergie passe par les volants d'inertie, les ultracapacités et les batteries d'un nouveau type (nickel-métal hydride, lithium-polymère et lithium-ion).

Selon un consultant automobile américain, Toyota et les autres constructeurs japonais ont jeté un pavé dans la mare avec leurs véhicules propres ; ils forcent ainsi la main des Américains dans cette direction, par leurs exportations. Mais le prix de l'essence reste



malgré tout si faible aux États-Unis qu'il sera difficile de faire admettre des différences de coûts élevées aux consommateurs.

L'Europe en léger retard

On ne rencontre pas en Europe un consensus Communauté - constructeurs comparable à celui du Japon ou des États-Unis. Malgré un constat de nécessité d'interdépendance entre les divers acteurs, il ne semble pas y avoir de véritable volonté fédérative, mais plutôt des travaux dans chaque État, où les constructeurs sont autant concernés que les pouvoirs publics nationaux. Des directives européennes existent, mais elles semblent encore insuffisantes en ce domaine. La voiture propre de demain n'est pas aussi clairement définie que chez les Américains et les Japonais, et son horizon de production se situe plus loin, vers 2010.

Le défi des politiciens européens est celui de la mobilité durable. Pour eux, les facteurs déterminants qu'il est nécessaire de prendre en compte pour un développement durable des moyens de transports sont la consommation de carburants, l'impact environnemental, les besoins en infrastructures, les coûts et, enfin, les besoins du marché et l'accueil du public. Les technologies à développer concernent le véhicule électrique, la très petite voiture, les nouveaux carburants, la réduction des émissions, le recyclage en fin de vie, la sécurité, les nouveaux matériaux, les systèmes de propulsion, la télématique, le transport virtuel, la mobilité urbaine et l'intermodalité.

En ce qui concerne le guidage automatique, le programme européen est jugé, par les auteurs du pro-

gramme américain, comme peu ambitieux et surtout normatif. Le congrès ITS de Berlin, en octobre 1997, a confirmé cette vision et la faible dynamique du marché européen, malgré les recherches effectuées chez les équipementiers et les constructeurs. Celles-ci portent sur l'utilisation du GPS, du GSM et du RDS pour la réception des informations, au lieu de CD-ROM. Quant aux infrastructures nécessaires, elles semblent encore à décider.

De lourds investissements, afin de développer des nouveaux moteurs thermiques moins gourmands, moins polluants, avec de meilleurs rendements et performances, sont consentis chez tous les constructeurs européens : 3 à 4 milliards de francs par moteur, pour des études sur 4 à 5 ans. Les technologies qui permettent ces gains sont nombreuses : reconception en CAO des blocs et de la mécanique du moteur (culasses, soupapes, arbres à cames, culbuteurs, ...), suralimentation par turbo-compression, contrôle électronique (les processeurs passent de 16 à 32 bits), calage de distribution variable (Volkswagen, BMW, Jaguar) et injection directe, notamment dans le diesel. L'application de cette technologie est en cours sur les moteurs à essence, avec l'incontournable équipementier allemand Bosch.

Ainsi, dans toutes les régions productrices du monde, les États et les constructeurs s'accordent à développer des véhicules plus confortables, plus sûrs et respectant mieux l'environnement. Quant à la présence de l'électronique dans tous les organes de la voiture, c'est une nécessité pour lui garantir ces qualités.

Patrick Henry

Cet article est paru dans Technologies Internationales n° 47 de septembre 1998

Centres de compétences :

- Programme PNGV, <http://www.ta.doc.gov/pngv>
- Rocky Mountain Institute, <http://www.rmi.org/>
- The Motor Industry Research Association, <http://www.mira.co.uk/>

À lire également :

- France, Ambassade de France au Japon, *Le Japon et les systèmes de transport intelligents*, mai 1997, 10 p.
- France, MELT-DRAST-CPVS, *Les avancées du programme américain PNGV* / Yves Tugayé, janvier 1998, 17 p.
- France, Secrétariat français Euréka, *La voiture intelligente et respectueuse de l'environnement*, rapport annuel 1997-1998, p.26 à 28.

La voiture du futur au Japon

Loin des visions futuristes, parfois poétiques, exprimées par les mangas ou les dessins animés nippons, la version officielle japonaise de l'automobile du futur est beaucoup plus pragmatique.

D'une voiture intelligente, c'est à dire informatisée, et équipée de systèmes de sécurité perfectionnés à base de capteurs et d'automatismes, eux-mêmes héritiers de l'informatique et de la robotique triomphante des années 80, la vision japonaise de la voiture du futur est passée tout naturellement à celle d'une voiture verte et versatile, qui sont des mots clés de notre fin de siècle.

Point de voiture volante ou ultra rapide, ou de concept d'usage révolutionnaire, mais, d'abord, un véhicule définitivement non nuisant et parfaitement adapté à ses nouveaux utilisateurs : télétravailleur, personnes âgées et femmes.

Pour les Japonais, la nouvelle ère automobile, c'est-à-dire une ère où les technologies les plus avancées seront banalisées, où les problèmes liés à l'énergie et à la sécurité auront été résolus et où surtout, les infrastructures de transport auront radicalement évoluées, ne débutera pas avant les années 2070.

À cette échelle, l'horizon 2020-2040 est un moyen terme qui devrait voir l'intégration des concepts évoqués sans véritable révolution en matière de transport et d'usages. Jusqu'à cette échéance, le véritable enjeu de la voiture du futur est, pour les Japonais, le défi industriel qui consiste à transformer ces visions, reposant sur des évolutions économiques et sociales, en concept et finalement en produit répondant aux attentes de l'utilisateur citoyen.

Au delà de 2020

Les années 2020 - 2030 devraient voir l'apparition de l'hydrogène comme combustible de moteur à hydrogène du type « rotary engine », pour une utilisation quotidienne des véhicules inférieure à 100 km par jour. De façon générale, l'hydrogène est vu par les Japonais comme le combustible secondaire le plus prometteur de la



deuxième moitié du XXI^e siècle. La combustion de l'hydrogène a pour avantage principal d'entraîner l'émission d'un unique sous-produit non polluant, l'eau, et les Japonais participent comme la plupart des pays industrialisés au projet international WE-net (world energy network) sur le développement de cette ressource.

Ils conduisent d'ailleurs parallèlement des programmes de recherches et de développements sur les technologies de base, à savoir l'électrolyse de l'eau de mer à partir de l'énergie solaire ou de l'énergie géothermique pour la production propre de l'hydrogène. Les réservoirs d'hydrogène sous forme d'hydrures de métaux absorbant l'hydrogène en conditions hyperbares peuvent également servir pour les piles à combustible.

Pour une utilisation quotidienne supérieure à 100 km, les moteurs à combustion des véhicules hybrides pourraient être remplacés en 2020 par des moteurs à turbine à gaz ou de façon plus prospective par un moteur linéaire à lévitation magné-

tique, permettant la circulation à très grande vitesse sur les tronçons spéciaux interurbains.

D'autres technologies sont également étudiées pour une application aux systèmes hybrides et, notamment, les systèmes de volant d'inertie pour le stockage temporaire de l'énergie électrique et les ultra-condensateurs. Sur ces deux dernières technologies, le Japon possède d'ailleurs une avance technologique certaine, mais un certain nombre de problèmes à résoudre, procédés et coûts, empêchent apparemment d'imaginer une exploitation généralisée de ces technologies à l'horizon 2030.

Correspondance ADIT Japon

Quelques sources (voir aussi p. 80)

- Japon, Les tendances technologiques dans le domaine automobile dans les pays d'Asie, JARI, janvier 1999, résumé de 4 p. en langue française.
- Japon, Actes de la réunion Automotive engineering for future aged society organisée en septembre 1997 par la JSAE (Japan Society of Automotive Engineers).
- Japon, Sixième enquête prospective technologique, NISTEP (National Institute of Science and Technology Policy), 1997.
- Japon, Étude prospective sur les besoins et exigences futurs du consommateur pour le secteur automobile, JARI, 1997.

GM ouvre un centre de recherche automobile au Canada

Canada

General Motors en Amérique du Nord. Le géant automobile a investi ainsi 20 millions de dollars dans une initiative qui devrait créer à terme 160 emplois, la plupart pour des ingénieurs, afin de mettre en place un nouveau centre de R&D automobile. Jusque-là les constructeurs automobiles avaient peu investi en matière de R&D au Canada, malgré le nombre important d'unités de production de véhicules ou de pièces détachées. Le Centre de General Motors d'Oshawa travaillera plus spécifiquement sur les châssis et les sous-systèmes structurels, en plus des activités de recherche déjà présentes à Oshawa : nouveaux carburants, véhicules spéciaux et adaptation des véhicules aux grands froids. Les ingénieurs du centre travailleront en collaboration avec leurs collègues des États-Unis, du Japon, de Chine, du Mexique, du Brésil et de l'Australie. L'installation de ce centre à Oshawa pourrait inverser la récente tendance qu'ont les équipementiers canadiens à délocaliser leurs activités dans la région de Detroit.

Oshawa (Ontario) est devenu l'an dernier l'un des quatre centres régionaux de développement de

La R&D automobile en Suède

Suède

Diverses actions en faveur de la R&D ont eu lieu en 1999 en Suède dans le secteur de l'automobile. Ainsi, le gouvernement a décidé d'investir près de 500 millions de SEK (environ 56 M€) pour que les véhicules de fabrication suédoise (Volvo, Saab et Scania) soient plus « verts ». Le KFB (Comité national de recherche dans les communications et les transports), de son côté, a décidé d'accorder huit millions de SEK (894 000 €) pour soutenir plusieurs projets de recherche touchant aux problèmes d'environnement liés à la circulation dans les grandes villes. Parmi les projets les plus importants, citons celui mené à l'institut technologique de Lund qui, pendant 4 ans, va recevoir 1,7 million de SEK (190 000 €) pour étudier l'influence de l'état des routes et de la conduite des chauffeurs sur les émissions des véhicules. De son côté, l'industrie automobile participera financièrement à des actions de R&D, à hauteur de deux milliards de SEK (224 M€) durant les cinq années à venir. Les constructeurs américains Ford et GM profiteront de ces travaux en tant qu'actionnaires principaux de Volvo Personvagnar et de Saab. La recherche sera menée au sein des universités et des instituts de recherche. Les entreprises auront une grande influence sur le choix des projets de recherche et décideront elles-mêmes de l'exploitation des résultats. Les principaux objectifs sont la mise au point de matériaux plus légers et la diminution de consommation des carburants et des émissions. Ces efforts financiers s'inscrivent également dans les priorités de la politique énergétique suédoise.

Diverses actions en faveur de la R&D ont eu lieu en 1999 en Suède

La place des handicapés dans l'automobile

(1 yen = 0,009272 €)

Japon

Puis, les constructeurs ont proposé des dispositifs en option qui ont connu un grand succès puisque la JAMA (Japan Automobile Manufacturers Association) rapporte que 10 400 unités ont été vendues en 1997, contre 2 120 en 1992. Les deux modèles les plus vendus sont les voitures électriques et les voitures adaptées aux fauteuils roulants. Le modèle le plus populaire propose un petit ascenseur pour monter un fauteuil ; les autres sièges tournent automatiquement pour en faciliter l'installation. Depuis 1994, Toyota équipe l'Emina avec un ascenseur. Depuis, les autres constructeurs ont suivi. Ces ascenseurs sont vendus entre 300 000 et 800 000 yen, suivant le degré d'automatisation.

Jusqu'en 1990, l'offre destinées aux handicapés moteur consistait à adapter des voitures ordinaires.

Un autre système, proposé sur la Mini Car Toppo de Mitsubishi, abaisse le niveau du plancher arrière d'environ 10 cm pour permettre au handicapé de monter plus facilement. Mitsubishi a également développé un modèle entièrement automatique, avec rampe rabattable et fermeture automatique de porte. Ce système, disponible également sur la Demio de Mazda et le Wagon R de Suzuki, coûte entre 800 000 et 1,2 million de yen. En ce qui concerne les commandes manuelles d'accélération et de freinage (150 000 à 300 000 yen), l'entreprise Nisshin Jidosha Kogyo, leader du marché, fournit Mitsubishi, entre autre, tandis que Honda et Toyota ont développé des produits maison. Chez Honda, le système Franz (1,2 et 1,8 million de yen) permet de conduire uniquement avec les pieds. Aujourd'hui, les systèmes étrangers commencent à entrer sur le marché.



Quelle sera l'énergie utilisée par le véhicule du futur ?

La réponse des oracles de l'industrie automobile

Quelle sera l'énergie utilisée par l'automobile du futur ? Et le futur, c'est quand ? Ces questions ne sont pas nouvelles et un regard sur la façon dont une réponse leur a été donnée par le passé permet de mettre en perspective notre réflexion sur l'avenir.

Comme l'écrivait J.J. Chanaron à la fin des années soixante dix, « il serait ambitieux de prétendre résoudre ici un si vaste problème politique, économique, idéologique et, bien entendu, technique. La nature de la technologie automobile de l'an 2000 sera l'aboutissement d'un conflit et, en fin de compte, le résultat d'un compromis entre les intérêts souvent divergents des différents acteurs d'un système social ». Plus que des réponses précises à ces questions relatives au futur, ce sont donc les différents positionnements actuels des acteurs de cette industrie face à des changements paraissant de plus en plus inéluctables qu'il faut tenter de saisir.

Les enquêtes de prospective technologique analysées ensuite ont pour objet même de récolter les différents avis d'une partie de ce système social : les acteurs clés de l'industrie automobile. Le principal résultat de cette analyse est qu'aucune rupture n'est attendue dans les vingt prochaines années, quand bien même les technologies s'améliorent et les pressions environnementales se font plus fortes. Le changement de système de transport est un « mouvement long », qui devra être accompagné de profonds changements techniques mais aussi industriels, politiques et sociaux. Jusqu'à aujourd'hui les barrières techniques -difficiles à surmonter mais peut être plus confortables que d'autres problèmes- ont accaparé toute l'attention et tous les efforts.

Quelques leçons de l'histoire

La question du choix du type de motorisation s'est tout d'abord posée durant un peu plus d'une décennie au début du siècle, lorsque le cheval -aux performances limitées mais aux pollutions bénignes- n'avait pas encore choisi son remplaçant parmi trois prétendants : le véhicule à vapeur, le véhicule électrique et le véhicule thermique. Le sort du premier, en proie à des problèmes de sécurité, a été vite scellé. Le second a persisté quelques années, profitant de la limite principale du véhicule thermique, à savoir son démarreur manuel. Comble d'ironie, c'est un dispositif électrique, le démarreur électrique de Kettering, constitué d'une batterie plomb et d'une dynamo, qui permet la victoire définitive du véhicule thermique en 1912. Sauf quelques interrogations ponctuelles lors de périodes exceptionnelles, notamment la seconde guerre mondiale, le monopole technologique du véhicule thermique n'est ensuite plus inquiété jusque dans les années 60-70 où les véhicules alternatifs refont leur apparition, poussés par les questions environnementales et énergétiques.

Il convient alors de concevoir la voiture de l'an 2000, non polluante, et indépendante des sources instables d'approvisionnement en ressources pétrolières. Aussi bien en France qu'aux États-Unis et au Japon des programmes de recherche sont initiés, réunissant les

Surcoût et parts de marché des différents types de véhicules aux États-Unis					
		Surcoûts*		Parts de marché (%)***	
		Moyenne	Dispersion**	Moyenne	Dispersion**
Véhicule à combustion interne (VCI)	2000	1,26	0,17	97,12	0,04
	2010	1,60	0,27	89,71	0,10
	2020	2,02	0,38	77,55	0,25
Véhicule tout électrique (VE)	2000	2,29	0,30	1,31	1,50
	2010	2,31	0,23	4,10	1,00
	2020	2,38	0,23	7,49	1,30
Véhicule hybride batterie/essence (VH)	2000	2,47	0,38	1,14	5,00
	2010	2,44	0,25	4,09	2,00
	2020	2,54	0,32	7,91	1,60
Véhicule piles à combustible (VPC)	2000	5,15	0,67	0,16	-
	2010	4,36	0,75	0,71	-
	2020	3,98	0,66	2,96	4,00

* Référence de base : véhicule à combustion interne 1993

** Espace interquartile normé par la médiane = $(Q3-Q1)/Q2$. Q1 est le premier quartile, Q2 la médiane, et Q3 le troisième quartile

*** En pourcentage des véhicules vendus et non pas en pourcentage de la flotte de véhicules

pouvoirs publics, ainsi que les industries automobile et électrique. Ces projets communs d'un type nouveau s'intéressent particulièrement aux véhicules électriques à piles à combustibles et à batteries et génèrent des prévisions très optimistes. À contempler aujourd'hui la voiture de l'an 2000 tant attendue, on constate que les multiples pressions environnementales et énergétiques ont été satisfaites à l'intérieur du système véhicule thermique, en particulier grâce à l'allocation d'une part croissante des revenus qu'il génère à l'amélioration de ses performances et à la réduction de ses nuisances.

Si bien que l'automobile figure aujourd'hui parmi les produits de grande consommation utilisant le plus de ressources provenant de la recherche, sans que sa conception de base soit véritablement différente de ce qu'il était lors du gel de sa forme définitive à la fin des années 20.

La méthode Delphi

La méthode Delphi, mise au point par la Rand Corporation pour l'US Air Force à la fin des années 60, repose sur un travail d'enquête auprès d'experts de domaines scientifiques et technologiques correspondants. Les questions posées concernent par exemple les performances des technologies étu-

diées, les dates de commercialisation possibles et les diverses informations concernant les modes d'intervention publique, les positions technologiques internationales ou encore les besoins de coopération. Une des originalités de la démarche tient à la réalisation d'un deuxième tour d'enquête, incluant le même questionnaire que lors du premier envoi, accompagné des résultats agrégés du premier tour. L'objectif est d'atteindre un consensus parmi les différents experts ou du moins, car celui-ci est hors d'atteinte, d'éprouver les divergences d'opinions. Nous analysons les résultats ayant trait aux types de motorisation des véhicules des vingt prochaines années issus de plusieurs enquêtes Delphi récentes menées aux États-Unis, en Europe et au Japon.

L'enquête Delphi du laboratoire fédéral Argonne aux États-Unis

Cette enquête Delphi portant exclusivement sur les véhicules électriques et hybrides a été effectuée par le laboratoire fédéral Argonne en 1994-95 pour le compte du Département de l'Énergie. Quatre-vingt-treize experts ont été interrogés, principalement des industriels de l'industrie automobile au sens large, des décideurs publics et des scientifiques.



Résultats des Delphi anglais (A) français (F) et japonais (J) concernant les différents types de véhicules					
Sujets d'innovation	Pays	1er quartile	2e quartile	3e quartile	Problèmes à surmonter
Large diffusion* de VE avec des performances égales à celles des véhicules à combustion interne (essence)	France	2007	2009	2014	Techniques et coûts (F)
	Angleterre	2006	2009	2015	Réglementation puis marché, pas techniques (A)
	Japon	2008	2013	2017	Besoin de financement public et d'interactions entre acteurs (J)
Large diffusion* de VE incorporant des piles à combustible à haute efficacité de conversion énergétique	France	2008	2013	2017	Techniques et coûts (F)
	Angleterre	2006	2010	2015	Techniques et coûts (A)
	Japon	2011	2014	2019	Besoin de financement public (J)

* C'est à dire plus de 10 % des ventes

Cette collection d'opinion d'experts fait apparaître que les surcoûts occasionnés par l'ensemble des véhicules alternatifs persistent durant toute la période de prévision. La différence est moindre si l'on considère également l'augmentation du coût des VCI. Les VE et VH ne seront alors respectivement que de 18 et 26 % plus cher à l'horizon 2020. Très liés à ces coûts élevés, les VCI restent largement dominants dans les vingt prochaines années. Ainsi, les experts ne prévoient pas que le cercle vicieux qui empêche l'émergence de ces technologies (sans baisse des coûts pas de croissance du marché, sans celle-ci pas de baisse des coûts) soit brisé dans les prochaines années. Bien que lente, cette pénétration du marché automobile par les VE et VH est régulière, chacun atteignant 7,5 % et 8 % des ventes en 2020. Respectivement 30 et 40 % des experts ont indiqué des parts de marché supérieures à 10 % pour ces deux types de véhicules en 2020.

Les commentaires des experts laissent peu de doutes : leur succès technique dépend presque exclusivement des batteries. Notons que cette enquête portait également sur les types de batteries qui conditionnent ces succès. Sans contestation possible, la batterie lithium-polymère, dont la première génération arrive juste dans nos ordinateurs portables, soulève le plus d'optimisme aussi bien en termes d'augmentation de son énergie massique (et donc d'autonomie pour le véhicule) que de coûts.

Les coûts des VPC demeurent tels, quant à eux, que leur diffusion auprès du grand public est compromise (97 % plus élevés). De plus, ce sont ces estimations portant sur les VPC qui soulèvent le plus de désaccord parmi les experts (dispersion plus élevée des réponses). Des problèmes techniques très impor-

tants restent à surmonter, tel la production de masse des piles et le choix du carburant qui alimentera la pile et le reformer. Cependant, depuis 1994, année de l'enquête, des résultats très encourageants et une forte attention médiatique ont commencé à se faire sentir concernant les piles à combustibles. On peut penser que la même enquête effectuée aujourd'hui donnerait des résultats beaucoup plus optimistes pour cette technologie.

Les enquêtes Delphi anglaise, française et japonaise

Plusieurs enquêtes Delphi, touchant à tous les domaines d'innovation, ont été menées par les ministères chargés de la recherche et de la technologie en France (1993), au Japon (1996) et en Angleterre (1993). Nous comparons ici leurs résultats tenant au véhicule électrique à batteries et à piles à combustibles. Les experts européens et japonais sont plus optimistes que leurs homologues nord-américains concernant la diffusion des technologies de véhicules électriques à batterie et à piles à combustibles. Leur succès est anticipé par la majorité d'experts aux environs de 2010-2015 pour ces deux motorisations. La similarité de résultats prend d'autant plus de sens que ces enquêtes ont été faites complètement indépendamment les unes des autres. La configuration des villes et les schémas de déplacement ont sans doute influencé ces anticipations plus optimistes quant à la progression de ces technologies en Europe et au Japon.

Les résultats concernant les piles à combustibles apparaissent plus cohérents avec les récents événements dans ce domaine. Rappelons que DaimlerChrysler, en

Parts de marché des différents types de véhicules aux États-Unis (en %)			
Type de motorisation	Années	Médiane	Dispersion
Alcool ou mélange avec alcool	2004	1	2
	2009	2,1	2
Gaz naturel	2004	1	1
	2009	1	3
Propane	2004	0	-
	2009	0	-
Diesel	2004	1	1,7
	2009	2	2,15
Électrique	2004	0,1	10
	2009	1	2
Piles à combustibles	2004	0	-
	2009	1	2,8
Hybride	2004	1	1,8
	2009	3	1,3

étroite coopération avec Ford et Ballard annonce le début de la production pilote pour 2002, la mise sur le marché en 2004 (40 000 véhicules par an) et la barre des 100 000 véhicules seraient pour 2006. Ballard a dévoilé récemment sa dernière pile à combustible et prévoit un coût de production proche des coûts d'une motorisation thermique (3750 \$ pour 75 kW). GM associé à Toyota annonce 2004 également et Honda se risque à annoncer 2003. Les constructeurs automobiles français se préparent quant à eux pour la fin de la décennie.

L'enquête Delphi de l'OSAT

Cette enquête Delphi traitant de l'ensemble des changements affectant l'industrie automobile américaine est effectuée régulièrement depuis 1979 par l'Office for the Study of Automotive Transportation. Nous analysons ici la dernière en date datant de 1999.

Les diverses motorisations alternatives au VE restent confidentielles dans les dix prochaines années. Seul le véhicule hybride atteint les 3 % de part de marché médiane. Mais ce dernier chiffre est aussi à relativiser à la lumière des développements récents dans l'industrie automobile. Le succès des véhicules hybrides de Toyota (la Prius : plus de 30 000 véhicules vendus au Japon), et sans doute bientôt de Honda (Insight), sont des révélateurs d'une tendance à la montée de la part thermique de ces véhicules (baisse du taux d'hybridation). Ces deux véhicules ne fonctionnent en tout-électrique que sur des plages restreintes d'usage

(jusqu'à seulement 10-12 mph et en marche arrière pour la Prius) ou jamais (l'Insight n'est en mode électrique que lorsque le moteur est au point mort...). De sorte que le terme même de véhicule hybride soit banni au profit de celui de « gasoline-electric », de « Low Storage Requirement Vehicle » ou encore de « Mybrid » (pour Mild Hybrid).

Les raisons de cette tendance sont à chercher du côté de la batterie : il faut diminuer le prix tout en maintenant des performances acceptables. Peu de

progrès étant attendu de ce côté, la seule solution est de diminuer la part électrique du véhicule. Les bénéfices en termes de qualité de l'air sont donc réduits : ils sont d'ailleurs de plus en plus absents des discours officiels nord-américains au profit du seul objectif d'économie d'énergie, symbolisé par le célèbre « 80 miles per gallon » (80 mpg équivalent de notre « 3 litres au 100 »). Cet objectif de 80 mpg est celui d'un programme public/privé de R&D sans précédent dans l'histoire de l'automobile américaine, le Partnership for a New generation of Vehicle (PNGV). Après une période de recherche tout azimut, les partenaires ont opté pour le véhicule hybride à batteries et pour le véhicule à piles à combustibles. Pour le premier, l'objectif est de réduire la batterie autant que possible, tout en maintenant des gains en efficacité énergétique. L'autonomie en tout-électrique ne devrait pas dépasser les 8 km.

En conclusion

Cet exercice de prospective technologique à long terme, exercice des plus incertains, a cela d'ambigu qu'il s'appuie sur une quasi-certitude : le système de transport actuel apparaît comme le moins probable pour le siècle prochain. Diverses raisons justifient cette position opposée à ce qu'avancent les experts au travers des enquêtes Delphi : tout d'abord en raison des problèmes énergétiques et environnementaux -les deux ne sont jamais très éloignés- que génère le véhicule thermique sous sa forme actuelle. Même si le



volume restant des réserves pétrolières est régulièrement réévalué à la hausse, son qualificatif d'énergie non-renouvelable n'est pas encore remis en cause... Quant aux problèmes de pollution de l'air -pour ne parler que de cette pollution- non seulement ceux-ci se font plus nombreux, mais ils sont également plus fortement ressentis par des populations plus sensibles à la qualité de leur environnement. Enfin, si quelques doutes subsistent, en pariant par exemple sur la capacité des pays industrialisés à continuer de réguler ces problèmes sans pour autant changer de système, il suffit de se tourner vers la croissance des besoins de transport des pays émergents pour s'en convaincre définitivement : le système actuel n'est pas extrapolable à l'ensemble des populations.

Reste l'incertitude majeure : quel sera le système de transport du futur et quand apparaîtra-t-il clairement

comme une alternative viable aussi bien techniquement qu'économiquement ? De l'avis même des experts qui préparent aujourd'hui cet avenir, en travaillant directement sur ces technologies ou encore en assurant le rôle essentiel de conseillers auprès des pouvoirs publics, si changement il doit y avoir « à long terme », cette temporalité n'appartient pas aux vingt prochaines années. La prudence, apprise à force de prévisions non vérifiées dans ce domaine des énergies alternatives, et la « foi dans le changement progressif » demeurent donc de mise. À moins que des changements d'ordre social et politique prennent le pas sur les seuls changements techniques et permettent d'autres compromis entre performances et coûts d'un côté, et qualité environnementale de l'autre.

Philippe Larrue

Sources des enquêtes Delphi

- Ng H.K., Anderson J.L., Santini D.J., Vyas A.D., 1996, *The prospects for electric and hybrid electric vehicles : second stage results of a two stage delphi study*, Argonne National Laboratory (<http://www.doe.gov/bridge/home.html>).
- OSAT, 1999, *Delphi X forecast and analysis of the North American automotive industry*, OSAT, Ann Arbor Mi., (<http://www.asat.umich.edu/delphi.html>).
- Science and Technology Agency, 1997, *The sixth Technology Forecast Survey, future technology in Japan toward the year 2025*, Fourth Policy-Oriented Research Group, National Institute of Science and Technology "Policy, NISTEP report (<http://www.nistep.go.jp/achiev/summary-e/report52e/top.htm>)
- SOFRES, 1994, *Enquête sur les technologies d'avenir par la méthode Delphi*, Rapport des résultats par domaine, Contrat n°45 ML 16, SOFRES, Paris.
- United Kingdom Technology Foresight Programme, 1994, *Delphi Survey*, (<http://www.foresight.gov.uk>).

L'auteur

Philippe Larrue est doctorant en Sciences Économiques à E3i (Équipe Industrie Innovation Institutions, Université Montesquieu Bordeaux IV) sous la direction du Professeur Yannick Lung. Sa thèse, dont la date de soutenance est prévue pour avril, porte sur la coordination des activités de recherche et d'innovation dans les phases d'émergence industrielle. Cette réflexion est appliquée au cas des batteries pour véhicules électriques et hybrides. EDF (Direction des Études et Recherche) et l'ADEME (Service Programmation de la Recherche) cofinancent ce travail de recherche. Au sein de E3i, l'auteur a également participé à la mise en place et à l'animation d'une enquête Delphi de prospective technologique régionale en Aquitaine en 1995-96. E3i est un laboratoire d'Économie Industrielle et de l'Innovation, spécialisé dans l'étude des dynamiques productives et institutionnelles dans des domaines aussi divers que l'automobile, la pharmacie ou les industries de défense. Ce laboratoire est un des piliers du programme international GERPISA (Groupe d'Études et de Recherches Permanent sur l'Industrie et les Salariés de l'Automobile).

Contact

Philippe Larrue - tél : 05 50 84 86 71, e-mail : larrue@montesquieu.u-bordeaux.fr

Un véhicule électrique parcourt plus de 2 000 km en 24 heures

Mitsubishi Motors, fax : +81 3 5232 7747

Japon

Le 20 décembre 1999, Mitsubishi Motors a annoncé qu'un de ses prototypes de véhicules électriques est devenu

le premier véhicule de ce genre à avoir couvert plus de 2 000 km en 24 heures. Ce prototype électrique, un véhicule sport prévu pour 2 personnes, s'appelle FTO-EV et possède une vitesse de pointe de 186 km/h. À l'aide de sa nouvelle batterie de type lithium-ion développée conjointement avec Japan Storage Battery et Mitsubishi Chemical, la FTO-EV a accompli, en 24 heures, 899 tours de circuit sur la piste de 2,4 km de long du centre d'essais techniques de Mitsubishi Motors, couvrant alors la distance de 2 142,3 km. Ce nouveau record mondial pour les véhicules purement électriques a été établi entre le 19 et le 20 décembre 1999. Le précédent record datait de 1996 lorsque la Saturn EV de General Motors avait effectué 1 700 km.

Dans ce type de record, la recharge des batteries était une procédure longue, qui diminuait le temps de présence sur la piste et l'autonomie après chaque recharge. Par rapport aux batteries de type nickel-métal-hydrure, la nouvelle batterie de type lithium-ion-manganèse utilisée dans la FTO-EV diminue le temps de charge de 65 %, tout en augmentant l'autonomie de 10 %. En d'autres termes, il suffit de 20 mn de recharge pour que la FTO-EV ait un rayon d'action de 150 km. Cette batterie devrait être incorporée dans le système de propulsion hybride GDI-HEV, qui équipe actuellement le prototype SUW Advance.

Un petit véhicule électrique chez Nissan en février 2000

Nissan, fax : +81 3 3544 0109



Nissan

été testée à Yokohama dans le quartier Minato Mirai 21. Ce véhicule électrique, prévu pour 2 personnes, est vu comme une solution pour les petits déplacements au sein d'un site industriel ou dans les petites zones urbaines. Pesant 840 kg seulement, grâce à un usage abondant de l'aluminium, l'Hypermini a une autonomie de 115 km et peut atteindre la vitesse de 100 km/h. La voiture est également compacte puisqu'elle ne mesure que 2,66 m de longueur. Le prix de vente du véhicule sera fixé à 4 millions de yen (environ 200 kF) incluant le système de recharge ; mais après déduction des subventions accordées par le gouvernement, elle ne coûtera plus que 2,5 millions de yen (125 kF). Dans un premier temps, Nissan envisage de louer ces véhicules aux agences gouvernementales et aux grandes entreprises. Vingt-cinq unités sont déjà en instance d'être louées.

Japon

Des véhicules électriques pour les personnes âgées

Université de Tokyo, fax : +81 3 5684 4957

une petite voiture électrique, dans laquelle le contrôle des freins et de l'accélération s'effectue avec les mains. Cette voiture a été conçue pour la population âgée disposant de faibles réflexes au niveau des jambes. La voiture pèse 290 kg et mesure 2,3 m de long pour 1,2 m de largeur et 1,6 m de hauteur. Son autonomie de 30 km permet à ses utilisateurs de faire des courses ou de se rendre sur les lieux de loisir de leur voisinage. Au lieu d'utiliser un volant traditionnel, le conducteur déplace un levier avec la main droite pour diriger la voiture. La main gauche contrôle la vitesse, également à l'aide d'un levier. Pour des raisons de sécurité, la vitesse maximale a été limitée à 20 km/h.

Japon

Les perspectives d'évolution de l'ITS au Japon à l'horizon 2030

Le développement du transport automobile et l'utilisation massive des véhicules s'accompagnent d'un florilège de conséquences négatives : accidents, congestion des grands axes routiers et des centres urbains, détériorations de l'environnement et épuisement des ressources énergétiques fossiles. Cette analyse est particulièrement vraie dans un pays comme le Japon qui abrite près de 70 millions de véhicules, soit 10 % du parc automobile mondial, sur une surface représentant les deux tiers du territoire français.

La mauvaise situation actuelle sur les routes japonaises (congestion, accidents, détérioration de l'environnement) est accentuée par le fait qu'une petite partie seulement de ce territoire est habitée et équipée d'infrastructures routières et que la mégapole japonaise de Tokyo (les 23 arrondissements de Tokyo et les préfectures attenantes de Saitama, Kanagawa et Chiba) concentrent plus de 30 millions d'habitants représentant un quart de la population japonaise.

Parallèlement à ces difficultés, les besoins en transport se diversifient sous l'influence d'évolutions socio-économiques comme le développement des services de transports de marchandises pour le particulier, le vieillissement de la population, les nouvelles formes de travail, etc.

Dans ce contexte, l'ITS (Intelligent Transport System) apparaît aux yeux des Japonais, non seulement comme un nouveau moyen de répondre efficacement à ces enjeux, mais aussi comme un « système social » en lui-même, entraînant dans son développement l'émergence d'une industrie majeure pour la première moitié du XXI^e siècle.

Une déclaration de priorité nationale, une évolution en quatre phases

Les fondements de l'ITS au Japon sont le gage d'une vision à long terme. Ils représentent une coordination interministérielle rare et exemplaire. L'ITS est considéré au Japon comme une priorité nationale et c'est dans cette perspective que les cinq principaux ministères ou agences concernés par l'ITS (le Ministère de la Construction –MoC-, le Ministère des Transports –MoT-, le Ministère du Commerce International et de l'Industrie –MITI-, le Ministère des Postes et Télécommunications –MPT- et l'Agence de Police –NPA-) ont pris acte conjointement, en juillet 1996 du projet de développement à long terme des infrastructures, des technologies et des services d'ITS.

Le développement de l'ITS au Japon devrait connaître quatre phases. La première phase, qui débiterait aux environs de 2005, serait caractérisée par la généralisation de l'usage des systèmes embarqués de localisation et de navigation utilisant le GPS et recevant les services d'informations routières existants déjà aujourd'hui comme VICS (Vehicle



Information and Communication System). Les systèmes d'ETC (Electronic Toll Collection) permettant le passage des péages sans arrêt devraient se généraliser à la fin de cette première phase. Il s'agirait, en fin de compte, d'une phase de transition ou de maturation de la phase actuelle, correspondant aux prémices de l'ITS.

La deuxième phase, qui débiterait aux environs de 2010, pourrait inaugurer une véritable révolution du système de trafic caractérisée par l'introduction de nouveaux services pour les utilisateurs comme la fourniture d'informations routières à la demande : état du trafic, itinéraire conseillé, temps de parcours, etc. Parallèlement, un immense progrès devrait avoir été fait en matière de réduction des accidents (sécurité active) et de leurs conséquences (sécurité passive), aussi bien pour les conducteurs que pour les piétons. L'infrastructure des systèmes et l'organisation des services d'urgence devront avoir été grandement améliorés. D'un autre côté, les services de transport publics à programmation fixe ne devraient pas avoir subi de modifications majeures mais la fourniture d'informations relative à ces services devra avoir été intégrée (connexion entre les différents services et opérateurs) et son accès facilité grâce à Internet. Des progrès sur le rendement économique des organisations de logistique de transports de marchandise seront en cours.

Vers un véritable « système social » en 2030

La troisième phase, qui peut être envisagée à l'horizon 2020, inaugurerait l'ère d'un système qui ne sera plus seulement technique et organisationnel, mais véritablement social. Le cadre réglementaire sera éventuellement modifié pour établir l'ITS comme industrie majeure de la première moitié du XXI^e siècle ; un système économique de plusieurs milliers de milliards de yen (plusieurs centaines de milliards de Francs) et de plus d'un million d'emplois dans lequel les services seront prédominants.

D'un point de vue technologique, les systèmes d'autoroutes automatisées (AHS, ou, au Japon, Advanced Cruise-Assist Highway System), devraient connaître

leur première mise en service réelle. De façon plus générale, la conduite automatisée devraient constituer, avec la sécurité, le noyau dur des technologies avancées d'ITS à l'horizon 2030. À cette échéance, l'ITS devrait avoir atteint sa maturité à la fois technologique et sociale, et se combiner avantageusement aux développements d'une société de l'information s'appuyant, pour l'infrastructure physique, sur un réseau national élargi de fibres optiques.

Les TIC au cœur des systèmes

La caractéristique commune à l'ensemble des technologies et services imaginés pour l'ITS en l'an 2030 est le fait qu'ils reposent tous sur une combinaison d'« infrastructures intelligentes » en interaction avec des « véhicules intelligents ». Cette « intelligence » est apportée par les technologies d'information et de communication qui sont au cœur de l'ITS.

Pour les japonais, les systèmes de conduite automatisée seront en cours d'introduction d'abord dans le secteur professionnel (véhicules de transport et véhicules commerciaux). En échange, les véhicules à usage individuel, qui n'auront pas disparu du fait de l'évidente nécessité de ce concept au moins encore pour quelques décennies, seront équipés en standard d'un certain nombre de systèmes.

Ces équipements seront capables de gérer à la fois certains paramètres internes ou propres au véhicule et de permettre au même moment une interactivité forte avec l'environnement extérieur et en particulier l'infrastructure de circulation : routes, mais aussi sites de stationnement, sites d'interfaces avec les autres modes de transport, etc.

Interactivité, personnalisation, temps réel et universalité

Les services d'informations routières devront être en mesure de répondre en temps réel aux demandes spécifiques et individuelles des utilisateurs : conseils d'itinéraires, prévisions de temps de parcours tenant compte des informations de trafic en temps réel, informations détaillées sur l'état du trafic sans qu'il soit nécessaire d'être sur place (accès à l'ensemble



des informations locales) et fourniture d'un service analogue aux piétons.

Ces services devront permettre le signalement sélectif en temps réel de dangers ou d'événements à moyenne distance (présence d'un bouchon, d'une sortie d'établissement scolaire, d'un accident, d'un ralentissement) et proposer des réponses adéquates (déviation ou réduction de la vitesse par exemple), intégrant la situation sur le reste du réseau.

Il est pensable de se voir proposer un choix pourvu d'indices ou de probabilité tenant compte des préférences du conducteur. Ils auront été intégrées grâce aux technologies d'intelligence artificielle : réduction du temps, agrément de voyage, etc. Un autre service sera largement répandu : la détection automatique de places de stationnement disponibles à proximité du lieu de destination et la possibilité de réservation à l'avance de ces places.

Enfin, les informations de cartographie ou les informations fournies sur les destinations ou sites de type touristique, météorologique, etc. seront renouvelées automatiquement et en temps réel. À l'extrême limite, les supports d'enregistrement ne seront plus utiles et les systèmes de navigation et d'informations fonctionneront comme de véritables ordinateurs en réseau, en exploitant les ressources de serveurs distants.

L'ensemble des fonctions d'accès au véhicule ou de passages contrôlés (péages autoroutiers, accès aux car-ferries, portiques d'entrée de parking, de sites privés, etc.) seront entièrement automatisés ou simplifiés grâce aux technologies de communication dédiées de courte portée. Idéalement, le conducteur utilisera un dispositif qui serait de nos jours une carte à puce radio (carte sans contact) multi-usages supportant des protocoles et des modes de transmission sécurisés.

Sécurité et automatisation

L'« intelligence » des véhicules est caractérisée par une très forte pénétration de l'électronique, de l'informatique et des technologies de communication dans son sein. Elle vise à remplacer ou renforcer les sens utilisés lors de la conduite. L'application ultime qui devrait être en phase d'introduction concrète pour les

véhicules à usage professionnel en 2030 est certainement la conduite automatisée. Cependant, cette mise en œuvre de haute technologie dans le véhicule servira d'abord la sécurité.

Les véhicules seront équipés en série d'un ensemble de dispositifs de sécurité réduisant à l'extrême les risques d'accident et les conséquences de ceux-ci. On trouve à la base des principales applications des technologies très variables de radars embarqués à bord du véhicule mais aussi présents au niveau de l'infrastructure et permettant la fourniture d'informations relatives à l'environnement de conduite ou à un danger imminent à courte distance : la présence d'un obstacle, piéton etc. et leurs caractéristiques de déplacement.

Les technologies d'alerte et de réaction semi-automatique ou automatique aux dangers détectés, reposant sur l'intelligence artificielle, seront normalisées. Les systèmes se déclenchant automatiquement en cas d'accidents et fournissant aux services d'interventions d'urgence et aux services de gestion du trafic les informations essentielles (localisation, état du véhicule, risques à prévoir, nombre de passagers voire leur état) seront devenus courants.

Différents types de capteurs (électromagnétiques, magnétostrictifs, voire biologiques) fourniront en continu des informations sur l'état du véhicule mais aussi sur celui de son conducteur et notamment de son niveau de vigilance. Sur la base des informations recueillies par ces capteurs, des services de maintenance opérant une surveillance à distance pourront voir le jour et les constructeurs pourraient, à terme, profiter d'une source d'informations incommensurable.

Des « boîtes noires » de véhicules sont même imaginées par les japonais, mais celles-ci soulèveront sans aucun doute la question des libertés individuelles et il est difficile de prévoir leur existence effective dans le futur.

Le véhicule multimédia

Dans la perspective d'une société de l'information où il sera encore fait un usage massif de systèmes de transport individuel, le véhicule devra constituer un



espace sans frontières ni limitations techniques au regard des applications d'information et de communication. De plus, ces applications contribueront au confort et à l'agrément du conducteur comme de ses passagers.

Les systèmes de navigation intégrés à l'habitacle en série et dotés de dispositifs d'affichage pour chaque place du véhicule et les services de fournitures d'informations locales, de réservation d'hôtel et d'entrée de manifestations, etc. seront en place dès le tout début du troisième millénaire. Les systèmes de paiement en ligne et en mode mobile avec commande vocale seront généralisés. Les technologies d'identification et de sécurisation associées pourront être semblables à celles utilisées dans les systèmes d'accès précédemment évoqués ou reposer sur des avancées majeures (code vocal, iris, empreinte digitale). Les technologies de transmission d'images animées en mode mobile et à grande vitesse seront mûres en 2030 et permettront de supporter une gamme étendue de services multimédia : films et jeux vidéos à la carte, vidéophone, bibliothèque électronique et Internet de nouvelle génération à très haut débit, supportant les images animées. Le courrier électronique pourra être consulté et « écouté » oralement grâce au système de voix de synthèse généralisé quinze années avant.

Enfin des systèmes de communication inter-véhicules à portée restreinte devraient avoir été généralisés précédemment pour des raisons conjointes de sécurité et d'agrément. Associés aux technologies d'affichage et de traitement des hauts débits, ils permettront d'établir des connexions temporaires entre un ou plusieurs véhicules pour des applications diverses : réalisation de tâches communes, jeux en groupe, etc.

L'ensemble de ces nouvelles fonctions du véhicule sera supporté par un bus informatique, un véritable « ITS bus », permettant de bonnes intégration et évolution des équipements et services. Le véhicule constituera à lui seul un véritable réseau local mobile interconnecté avec l'extérieur, des structures fixes ou d'autres véhicules, donc d'autres mini-réseaux locaux. Les défis technologiques liés à cette

conception du véhicule portent non seulement sur les techniques de transmission et de connexion mais aussi sur l'infrastructure physique du « réseau de véhicule » qui devra parallèlement respecter les contraintes du design et de l'environnement des instruments de navigation, du poids, de l'encombrement et du coût.

Une nouvelle organisation du transport des marchandises

Des infrastructures « intelligentes » se trouveront au cœur d'une nouvelle organisation du transport des marchandises. Ces structures supporteront l'interactivité nécessaire aux technologies et applications décrites précédemment, mais seront aussi optimisées pour faciliter et améliorer la circulation des biens. La généralisation des achats en ligne aura entraîné la demande en transport, et l'ITS aura permis d'améliorer grandement son organisation.

La gestion de flotte de véhicules professionnels avec les outils de localisation qui est déjà introduite en cette fin de siècle sera complètement généralisée et optimisée en combinaison avec les autres modes de transport ferroviaires et maritimes. La gestion de conteneurs se fera également à partir du GPS ou d'un système de localisation par satellites équivalent.

L'information sur les grands services de transport publics sera intégrée dans un même service et les différents modes de transport (routier, maritime, aéronautique) seront coordonnés grâce à une exploitation intensive des technologies d'information et de communication.

À l'horizon 2030, de petites portions des infrastructures routières les plus importantes en terme de trafic, comme l'axe Tokyo-Nagoya, devraient avoir été modifiées pour permettre l'introduction progressive mais concrète de systèmes de circulation automatisée. Sur ce plan, le Japon privilégie l'introduction de systèmes de circulation en convoi, dans un premier temps pour les véhicules à usage professionnel. La généralisation d'un tel système sur le réseau autoroutier japonais permettrait de réduire d'environ 150 milliards de francs par an les pertes dues aux



embouteillages et de 6 à 7 milliards de FF les pertes liées aux accidents.

Des bénéfices sociaux et économiques énormes

En cette fin de siècle, le parc de systèmes de localisation et de navigation embarqués dépasse les 1,2 millions d'unités et plusieurs services d'informations routières sont déployés sur la quasi-totalité du territoire japonais. Il ne fait aucun doute que les problèmes aigus de congestion du trafic routier que connaît le Japon, en particulier sur les axes autoroutiers et la banlieue de Tokyo, combinés à l'affection particulière que portent les japonais aux systèmes électroniques en tous genres, devraient permettre de confirmer cette vision « matérialiste » de l'ITS à l'horizon 2030.

Pour les japonais, l'ITS représentera, encore à cette époque, le premier secteur économique du pays devant l'automobile ou les télécommunications. Contribuera-t-il au bénéfice de la balance commerciale ? La réponse dépend du niveau de développement des pays voisins. Mais la stratégie nipponne vise clairement à une mondialisation de l'ITS reposant sur des technologies et des standards soutenus par les industriels nippons. L'avance prise dans ce domaine peut être décisive. De façon moins visible aux yeux du grand public, le Japon est convaincu de la contribution décisive qu'apportera l'ITS aux problèmes d'environnement global et principalement de réduction des émissions de CO₂ et de dépendance aux ressources énergétiques fossiles. À l'horizon 2030, l'ITS pourrait même jouer un rôle plus important dans la réduction des atteintes à l'environnement que le développement de l'usage des véhicules de nouvelle génération non ou faiblement polluants.

Les grands systèmes d'ITS qui devraient être opérationnels à long terme sur l'ensemble du territoire japonais

- les systèmes d'informations routières et de trafic associés à des bases de données touristiques et de combinaison de modes de transport (possibilité de s'informer sur les autres moyens de transport). Ces services sont déjà en application dans la région de Tokyo avec VICS (Vehicle Information & Communication System) et ATIS (Advanced Traffic Information Service) ;
- les systèmes de péage entièrement automatisés ;
- les systèmes d'ASV (Advanced Safety Vehicle) liés à la sécurité ;
- les systèmes de contrôle et de gestion du trafic routier impliquant l'utilisation de systèmes d'informations et de nouveaux systèmes de signalisation ;
- l'efficacité du transport (nouvelle gestion des flux de fret routier et de véhicules utilitaires) ;
- les systèmes de crise permettant de recueillir rapidement les informations sur les dégâts comme les tremblements de terre, limitant la circulation à certains véhicules ou conférant aux véhicules de secours une priorité absolue, et les systèmes de retour d'information liés. ●

D'autres bénéfices sociaux, comme une meilleure adéquation de l'infrastructure de circulation des biens, des hommes et de l'information avec les besoins d'une société aux caractéristiques qui auront largement évoluées (vieillesse, télétravail, etc.), seront le signe de la maturité du système.

En définitive, passé le premier quart du XXI^e siècle, l'ITS se présentera au Japon, non seulement comme le premier secteur économique du pays mais aussi comme un cadre pertinent au développement combiné, voire intégré, des infrastructures routières et des moyens de transport. Les technologies avancées d'information et de communication, qui donneront à ces supports une forme d'intelligence et l'interactivité, sont la clé de ce choix déterminant pour le futur.

Correspondance ADIT Japon



Entre circulation intelligente et intelligence de la route

La voiture de demain sera-t-elle intelligente ? À une époque où la tendance est de mettre de « l'intelligence » un peu partout dans nos objets quotidiens, il semble difficile pour l'automobile, tout comme pour la maison ou les matériaux, d'échapper, à terme, à ce mouvement. Encore balbutiante, mais techniquement réalisable, du moins à moyen ou long terme, la circulation intelligente, qui associe des voitures instrumentées à des routes automatisées, fait l'objet de nombreux travaux tant en France qu'à l'étranger et passe par le développement progressif de systèmes plus simples d'ores et déjà commercialisés.

Toutes les enquêtes l'ont prouvé et beaucoup d'automobilistes peuvent en témoigner : dans de nombreux cas, l'accident aurait pu être évité ou sa gravité réduite, si le comportement du véhicule confronté à des situations extrêmes avait été contrôlé par un système d'assistance à la conduite. Disposant notamment de capteurs, d'algorithmie et d'une certaine puissance de calcul embarqué, celui-ci aurait pu à la fois analyser une situation donnée et fournir une réponse adéquate, tout ceci en une fraction de seconde. De même, un conducteur parfaitement informé sur l'itinéraire qu'il doit emprunter pour aller d'un point à un autre dans une ville où la circulation est difficile, mais également renseigné en temps réel sur l'état du trafic, économisera du temps tout en réduisant son stress, d'où une conduite plus attentive et une diminution évidente du risque d'accident.

L'aide à la navigation pour commencer

C'est donc principalement pour accroître la sécurité de chaque automobiliste et, plus généralement, améliorer la qualité du trafic routier que les constructeurs automobiles, en collaboration avec différents parte-

naires industriels et institutionnels, travaillent sur ces sujets extrêmement prometteurs. Ainsi, dès le milieu des années 80, les grands constructeurs mondiaux se sont lancés dans le développement de différents programmes comme par exemple Prométhéus ou Carminat. Objectif : adapter à l'automobile les technologies de l'électronique et de l'informatique afin notamment de suppléer au conducteur dans des situations critiques de conduite.

Premières applications issues de quelques-uns de ces grands programmes de recherche, plusieurs systèmes de navigation automobile comme Travel Pilot de Bosch, Carin de Philips, le NVX-F160 de Sony ou encore Carminat de Renault sont actuellement commercialisés. Véritables copilotes numériques, ces équipements utilisent un système de réception par satellite (GPS), un récepteur numérique d'ondes radio (RDS) relié au PC de circulation et d'informations routières, une base de données cartographiques stockées sur un disque optique et un ordinateur de bord qui permet de coordonner l'ensemble des opérations. Tout véhicule équipé de ce système permet ainsi à son conducteur de connaître à tout moment le meilleur itinéraire à choisir en fonction du trafic.

Un véhicule mais aussi un capteur d'informations

Moyen de locomotion permettant de se déplacer d'un point à un autre, l'automobile peut être également un capteur d'information utile à la gestion du trafic routier. C'est ainsi qu'en 1994, Cofiroute et Renault ont lancé le développement d'ADAMS, un système d'information embarqué temps réel sur autoroute, permettant de localiser automatiquement un véhicule dès son entrée sur l'autoroute et d'utiliser ce dernier comme capteur d'information pouvant être transmises à l'exploitant. Par la suite, PSA Peugeot Citroën et CS Route sont venus s'associer à Cofiroute et Renault au sein d'un projet baptisé AIDA (Application pour l'Information Des Autoroutes) qui fait notamment l'objet d'une expérimentation à grande échelle près de Paris. Offrant à l'automobiliste diverses prestations quant à l'amélioration de sa sécurité et de son confort dès son entrée sur l'autoroute, ce système permet parallèlement à l'exploitant de disposer en temps réel d'informations fiables provenant des véhicules présents sur le réseau.

Adapter la vitesse d'un véhicule en fonction du trafic

Aux États-Unis, de nombreuses voitures équipées d'une boîte de vitesse automatique disposent d'un accessoire très utile : le régulateur de vitesse. Pour le conducteur disposant d'un véhicule de ce type, il suffit alors de programmer la vitesse à laquelle il souhaite se maintenir. Résultat : plus besoin d'agir sur les pédales, le régulateur se chargeant d'accélérer ou de ralentir quand il le faut. L'ACC ou Adaptive Cruise Control, constitue l'étape suivante de ce système. Identique au régulateur de vitesse déjà commercialisé, il présente toutefois la particularité d'être capable d'adapter la vitesse d'un véhicule en fonction du trafic.

Lorsqu'un véhicule équipé d'un tel dispositif rejoint un véhicule plus lent, un capteur -un télémètre à infrarouge multifaisceaux- repère immédiatement sa distance et calcule sa vitesse. Pour le régulateur, il ne reste plus alors qu'à agir sur le moteur et, éventuellement, sur les freins, afin de maintenir le véhicule à bonne distance de celui qui le précède. D'ores et déjà commercialisé par quelques-uns des grands constructeurs automobiles pour leurs voitures haut de gamme, ce régulateur de vitesse « intelligent » devrait se développer progressivement sur l'ensemble des gammes de véhicules.

Parallèlement, l'ACC fait l'objet de travaux dans le cadre d'Urban Drive Control, un projet européen qui rassemble une dizaine de partenaires, parmi lesquels on compte quatre constructeurs automobiles (Renault, PSA, Jaguar et Fiat) et la ville de Turin (voir aussi l'article sur la sécurité en Italie, page 75). Initié au début de l'année 1996, ce programme a pour but de combiner les systèmes de gestion et d'information du trafic qui existent à ces nouveaux dispositifs de régulation de vitesse intelligents afin d'adapter à la ville ces derniers qui, précisons-le, sont essentiellement destinés à

la circulation sur autoroute ou voie express. Un véhicule sur lequel ont été intégrés le système ACC et des informations concernant les vitesses recommandées, provenant du centre de gestion du trafic et diffusées via un réseau de balises, pourra ainsi ralentir et stopper automatiquement aux feux tricolores répertoriés par le réseau ou derrière des véhicules qui y sont momentanément arrêtés.

Contrôle latéral du véhicule et état physique du conducteur

L'endormissement est l'une des principales causes de sortie de route. Le sommeil au volant est responsable de 23 % des accidents mortels pour les occupants de camions, et de 10 % pour les voitures individuelles. D'où l'idée d'alerter le conducteur d'un véhicule quand celui-ci risque de s'endormir. Un des systèmes étudiés actuellement par plusieurs constructeurs vise à analyser en permanence la position du véhicule sur la chaussée par rapport aux bandes latérales, et réagir aux déviations en prévenant le conducteur à l'aide notamment d'une vibration sur le volant.

Un autre dispositif mis au point par Renault est basé pour sa part sur la détection du mouvement des paupières du conducteur à l'aide d'un dispositif constitué de diodes électroluminescentes, d'une caméra



miniature et d'un calculateur de bord. Sachant que plus un individu est gagné par la fatigue, moins il est capable de garder les yeux ouverts, les ingénieurs en ont déduit qu'en mesurant en permanence le temps de fermeture des paupières d'un conducteur, il est possible, le cas échéant, de le prévenir qu'à brève échéance il ne pourra plus lutter contre le sommeil. Grâce à ce système, un véhicule a la capacité de diagnostiquer l'état physique de son conducteur. Prochainement opérationnel sur les camions et les autocars, ce système devrait rapidement se développer sur les automobiles.

L'autoroute automatique : un concept utopique ?

Reste que l'ensemble des systèmes actuellement commercialisés ou en cours de développement sont limités à l'apport d'une assistance à la conduite, principalement sur autoroute, visant à améliorer la sécurité et le confort du conducteur. Nous sommes donc encore loin des concepts plus futuristes de « conduite automatique » ou « d'autoroute automatisée » qui, pour leur part, représentent une véritable rupture technologique. Le développement de tels systèmes implique en effet non seulement l'utilisation d'équipements très sophistiqués embarqués à bord du véhicule mais également la construction d'une infrastructure routière adaptée.

D'ores et déjà, plusieurs grands projets d'autoroutes automatiques font l'objet d'études, principalement aux États-Unis (voir encadré) et au Japon (voir l'article sur l'ITS au Japon, page 19), mais également en France où plusieurs organismes de recherche publics ont travaillé sur des études préliminaires du concept, il est vrai encore assez large, de « route automatisée ». Verra-t-on pour autant dans quelques décennies de véritables « trains » de véhicules équipés de systèmes de conduite automatique circuler sur des infrastructures devenues, elles aussi, « intelligentes » ou s'agit-il d'une utopie ? Aujourd'hui, personne ne peut véritablement répondre à cette question qui soulève elle-même de nombreuses interrogations allant bien au-delà des seuls développements technologiques envisagés.

Voitures sans pilote aux États-Unis

Des démonstrations de conduite automatisée ont eu lieu à San Diego du 7 au 12 août 1997. Une voie spécifique (appelée HOV, High Occupancy Vehicles) accueillait entre Los Angeles et San Diego des voitures de série (des modèles « Le Sabre », de GM) prises en charge sur cette voie par un système les guidant automatiquement. La vitesse atteignait 100 km/h et l'écart de 5 m entre les véhicules restait constant. Les accélérations, ralentissements, changements de files étaient gérés par l'ordinateur de bord, relié à celui de la gestion de la file grâce à des capteurs. Le système a été mis en œuvre par un consortium, le NAHSC (National Automated Highway System Consortium) composé de sociétés privées (comme GM ou Lockheed), des universités de renom et des agences fédérales.

Si l'évolution technologique actuelle nous autorise à penser que l'homme disposera très certainement des outils nécessaires à la mise en service d'autoroutes automatiques dans quelques décennies, d'autres questions, capitales, doivent être posées dès à présent notamment quant à l'utilité de tels développements « extrêmes » et à leur acceptation par la population. Il faut d'ailleurs souligner que cette remarque, quelque peu à contre-courant du climat actuel, reflète une interrogation plus générale d'un nombre sans cesse grandissant de citoyens sur le rôle et l'importance de la technologie au sein de la société actuelle. Que restera-t-il du plaisir de la conduite dans cette hypothétique ère de l'autoroute automatique ? Les constructeurs automobiles pourront-ils encore évoquer cette liberté de déplacement qu'offre l'automobile ? Les populations seront-elles prêtes psychologiquement à accepter l'utilisation de cette conduite « passive » qui les déresponsabilisera encore un peu plus ? Telles sont quelques-unes des questions que tout citoyen est en droit de se poser et auxquelles devront répondre tôt ou tard chercheurs, ingénieurs, industriels et décideurs dans le cadre d'une profonde réflexion sur l'avenir des transports.

Jean-François Desessard

Japon

Réalité virtuelle pour les systèmes de navigation embarqués

Antenne Adit au Japon - Ministère de la Construction (Japon)

Le ministère japonais de la Construction (MoC) devrait financer, au cours de l'année fiscale 2000, une série d'expérimentations sur une nouvelle technologie de systèmes d'informations géographiques (SIG). Cette technologie permettra une visualisation 3D fidèle de l'environnement géographique et pourra être appliquée, entre autres, aux systèmes de navigation embarqués.

Le but de ces travaux, conduits en collaboration avec de grandes entreprises productrices et consommatrices de données SIG, est de développer les technologies et la base de données publiques nécessaires à la commercialisation d'un système avancé de navigation d'ici à trois ans. Cette base reposera sur les données produites par ces grandes entreprises (NTT par exemple), les opérateurs électriques régionaux, le Geographical Survey Institute (GSI) du MoC, ainsi que sur les données de la NL (National Land Agency) et les photographies aériennes. Le budget prévu pour ce projet pour l'année fiscale 2000 s'élève à 13 milliards de yen (650 millions de francs).

Le ministère japonais de la Construction (MoC) devrait financer, au cours de l'année fiscale 2000, une série d'expérimentations sur une nouvelle technologie de systèmes d'informations géographiques (SIG).

Suède

Création d'une société dédiée à l'ITS

*Ambassade de France en Suède -
Association Franco-Suédoise pour la Recherche*

Wireless Car. L'objectif des trois sociétés suédoises est de développer et de vendre des solutions globales de services électroniques mobiles aux constructeurs automobiles et aux utilisateurs : signal d'alarme en cas d'accident, diagnostic automatique de l'état du véhicule grâce à un module GSM permettant non seulement l'accès à l'internet mais aussi une réactualisation à distance des logiciels, etc. La nouvelle société, qui ne compte encore que quelques employés, est provisoirement installée chez Volvo à Göteborg et attend le feu vert de la commission européenne pour se développer.

À l'occasion du salon de l'automobile de Genève, Ericsson, Telia et Volvo ont annoncé la création d'une filiale commune,

Extension du nombre des péages électroniques

- Hitachi, fax : +81 3 3258 5480
- Clarion, fax : +81 3 3400 8505
- Toshiba, fax : +81 3 5444 9202
- Ministère des Transports, fax : +81 3 3580 3111

L'ITS (Intelligent Transport Systems), qui vise à augmenter la sécurité sur les autoroutes grâce aux dernières technologies des télécommu-

nications, est déjà une réalité au Japon. En effet, plus d'un million de VICS (Vehicle Information and Communication Systems), qui donnent des informations sur la circulation routière, sont actuellement en service. Les systèmes ETC (Electronic Toll Collections), qui permettent au conducteur de traverser les péages sans s'arrêter, sont en cours d'installation. L'organisme affilié au gouvernement, JHP (Japan Highway Public Corp), a prévu d'installer 440 systèmes ETC avant l'année fiscale 2002. L'inauguration du premier ETC aura lieu vraisemblablement au printemps 2000, sur certains stands parmi les 62 péages des autoroutes autour de Tokyo. Avec ces systèmes, les automobilistes peuvent franchir les péages à une vitesse de 40 km/h. Les sommes sont ensuite déduites directement sur leur compte via le terminal et la carte magnétique à l'intérieur de la voiture.

Le Ministère de la Construction estime qu'avec les systèmes ETC le débit de voiture aux péages sera multiplié par 3,5, résorbant nombres d'embouteillages aux alentours. Hitachi et Clarion d'une part, et Toshiba et Yazaki d'autre part se sont déjà lancés sur ce marché, en proposant des modules ETC postes de radio et autres options facilitant les conditions de conduite de l'automobiliste.

Selon le Ministère des Transports, ces autoroutes intelligentes devraient permettre de réduire de 2/3 les accidents routiers, et permettre d'économiser ainsi 1 200 milliards de yen d'ici 2015. De plus, la diminution du nombre d'embouteillages devrait permettre de réduire de 1,1 millions de m³ le volume de CO₂ émis par les gaz d'échappement d'ici 2010.

Le point de vue de l'expert - Pierre-Yves Texier (LCPC Paris)

1. Le gain en accidents reste à vérifier.
2. L'augmentation du débit de voitures aux péages est vraisemblable, mais par voie équipée uniquement ; il pourrait être réaliste si toutes les voies étaient équipées, mais cela suppose que tous les véhicules soient eux aussi équipés.

Véhicule propre : les visions américaine et japonaise

Les points de vue nationaux au sujet des véhicules propres sont relativement différents entre les États-Unis et le Japon, même si les émissions de CO₂ et la diminution des réserves d'hydrocarbures sont des problèmes d'ordre mondiaux. Les États-Unis donnent la priorité au rendement énergétique, afin de limiter leur dépendance au pétrole, les émissions gazeuses étant considérées comme un problème secondaire. Le Japon préfère insister sur la réduction des émissions et compte sur l'ITS (Intelligent Transport System) pour y aboutir. Les ruptures technologiques sont ainsi très nettes dans l'archipel. En tout état de cause, le véhicule propre est un concept stratégique dans les deux pays, et les pouvoirs publics interviennent de ce fait directement dans les orientations de la R&D.

Pour répondre aux grands problèmes mondiaux d'environnement, que ce soit aux États-Unis ou au Japon, les interventions des pouvoirs publics en faveur du véhicule propre ont pris la forme de programmes nationaux, mais avec des différences fondamentales dans l'approche. Ainsi aux États-Unis, le programme PNGV (Partnership for a new generation of vehicle, créé en 1993) a pour objectif un nouveau véhicule qui divise la consommation de carburant par trois pour parvenir à parcourir 35 km par litre (3 litres aux 100 km). Les différents sous-programmes (par exemple *Cooperative Automotive Research for Advanced Technology* -CARAT-, *Advanced Technology Program* -ATP-, *Grant Opportunities for Academic Liaison with Industry* -GOALI-, etc.) financent donc des efforts de recherche sur la combustion interne. Les résultats de ces travaux ont déjà permis d'écarter, à court terme, les turbines à gaz et le moteur Stirling, ainsi que les ultracondensateurs et les volants d'inertie. Les options retenues depuis 1997 par les Américains, celles pour lesquelles des financements sont consentis, sont l'injection directe, les piles à combustible et les batteries.

Six prototypes japonais

Au Japon, le MITI dirige fermement les orientations à prendre. Les interprétations des réponses à appor-

ter aux grands problèmes d'environnement globaux sont propres aux stratégies nippons. Elles sont résumées dans le principal projet national sur ce thème : l'ACE Project (Advanced Clean Energy vehicle project). Contrairement au PNGV, l'ACE Project est un programme spécifique, doté d'un budget indépendant et à l'initiative du MITI lui-même. C'est la NEDO (New Energy and industrial technology Development Organization) qui en assure la direction. Celle-ci en a confié la maîtrise d'œuvre au JARI (Japan Automotive Research Institute). Selon ce projet, six constructeurs devront proposer six prototypes de véhicule hybride pour 2003. Les prestataires ont été sélectionnés : il s'agit des principaux constructeurs japonais, à l'exception de Toyota, qui est déjà en avance sur le véhicule hybride. Cette limitation du nombre d'intervenants permet de canaliser les efforts de développement et de concentrer les ressources. La technologie à développer est arrêtée : ce sera le véhicule hybride. Les carburants à utiliser devront être « propres » (gaz naturel, diméthyl éther...). Sur les six prototypes, deux seront des bus, deux des camions légers (de 2 t) et deux des automobiles. Les Japonais n'ont pas rejeté toutes les technologies. Ainsi les ultracondensateurs, les volants d'inertie et les moteurs céramiques pourront faire l'objet d'une perspective d'études à moyen terme (2010-2020).



La préférence va au véhicule hybride

Aux États-Unis comme au Japon, le véhicule propre est un véhicule hybride, avec un moteur à essence ou une pile à combustible, les États-Unis y adjoignant des batteries électrochimiques. L'architecture préférentielle est l'hybride série, même si les premiers véhicules hybrides commercialisés sont organisés autour d'une architecture parallèle. Dans un premier temps, le générateur de puissance primaire reste pour les Américains un moteur à essence de nouvelle génération tandis que les Japonais, probablement dans une perspective à plus long terme, semblent lui préférer le moteur au gaz naturel avec stockage du combustible, pour le véhicule individuel, sous forme adsorbée (ANG). Les trois constructeurs américains développent des systèmes hybrides CIDI (Compression Ignition Direct Injection), bien que des problèmes d'émissions de NOx subsistent. De plus, il semble nécessaire de modifier les carburants pour atteindre les objectifs du PNGV. De toutes façons, l'amélioration des moteurs à essence ne peut qu'emprunter une approche intégrée en considérant globalement le moteur, le train, le carburant, le post-traitement des émissions et les divers capteurs de contrôle.

Parallèlement, les États-Unis comme le Japon croient à l'hybride à pile à combustible, malgré les nombreux écueils techniques qu'il reste à résoudre. À terme, les piles à combustible ont donc un fort potentiel de remplacement des moteurs à combustion interne. Mais quel que soit le choix du combustible primaire, essence ou méthanol, les échéances de développement des programmes américains et nippons sur cette technologie ne seront certainement pas respectées. La voie idéale de l'hydrogène direct, à plus ou moins long terme, est explorée par les Japonais qui travaillent sur les hydrures métalliques pour le stockage. En matière de stockage d'énergie restituable, les Japonais explorent également des voies technologiques audacieuses : ultracondensateurs et volant d'inertie, en plus des batteries au lithium-ion également étudiées par les Américains. Enfin, l'allègement, qui permet une réduction drastique de la consommation de carburant, préoccupe plus particulièrement les Américains et constitue de ce fait un axe important de développement pour réduire la consommation d'énergie.

Les Américains apparaissent concrets, les Japonais audacieux

De façon générale, les Américains auraient tendance à favoriser et soutenir des orientations technologiques sur le véhicule propre qui sont dans le prolongement des technologies actuelles : moteur à essence, pile à combustible à essence, allègement du véhicule par substitution de matériaux, reformulation des carburants. Cette approche devrait permettre d'aboutir très rapidement à des résultats concrets et à protéger les intérêts à court et moyen termes de l'industrie pétrolière et automobile américaine. Cependant ce choix s'effectuerait en échange d'une visibilité à court terme critiquable. L'un des avantages de la pile à combustible à essence est l'existence actuelle des infrastructures ; son inconvénient étant le dégagement de CO, qui réduit les performances de la pile. On pense ainsi aux États-Unis à un reformeur multiple acceptant l'essence, le méthanol et le gaz naturel.

Les Japonais, quant à eux, inaugureront une voie plus innovante ou en rupture avec les technologies automobiles actuelles : moteur au gaz naturel, pile à combustible au méthanol direct (DMFC, direct methanol fuel cell, sans reformeur donc avec un poids et un volume réduits) mais aussi, à plus long terme, à hydrogène direct, et enfin systèmes de stockage avancés d'énergie (ultracondensateurs, volant d'inertie). Ces systèmes, qui permettent de restituer l'énergie produite par le freinage, ne sont, à ce jour, pas encore satisfaisants (temps de décharge trop court pour les ultracondensateurs, sécurité insuffisante des volants d'inertie).

Les développements concernant l'allègement des véhicules sont sensiblement les mêmes dans les deux pays, avec les inconvénients de coûts, de production à grande échelle et de recyclage qu'ils apportent. Toutes ces orientations misent sur la nécessité d'opérer de nouveaux choix dans le champ des technologies automobiles pour répondre aux défis environnementaux du XXI^e siècle. Elles ont l'inconvénient de ne pas offrir de résultats concrets à très court terme.

Patrick Henry

*Cet article a été rédigé à partir de l'étude
Les orientations dans le domaine du véhicule propre
aux États-Unis et au Japon, parue en août 1999.*

La biomasse pour un diesel écologique

Wayne Richardson, Bureau des opérations des TEAM,
tél : +1 613 996 54 19

Canada

Ensyn Technologies Inc., une entreprise d'Ottawa spécialisée en technologie de la conversion thermo-chimique de la bio-

masse, en partenariat avec Ressources naturelles Canada et avec l'industrie canadienne et européenne, mène un projet de 410 300 dollars, pour fabriquer un diesel écologique extrait du pétrole pyrolytique de la biomasse.

Subventionné à hauteur de 156 250 dollars par le FACC (Fonds d'Action sur le Changement Climatique), ce projet prévoit d'utiliser un brevet d'Ensyn pour optimiser et déployer une technologie de solution de tensio-actifs permettant de mélanger au diesel la bio-huile produite à partir de la pyrolyse rapide des matières cellulosiques.

Cette bio-huile peut servir à produire de la chaleur et de l'électricité, de même qu'un mélange de diesel à 10 %, ce qui permettrait de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les économies initiales de CO₂ sont estimées à 170 000 tonnes par an.

L'énergie thermique du moteur transformée en électricité

Japon

Le MITI, le Ministère de l'Industrie et du Commerce japonais, va développer un

élément de conversion thermo-électrique, pour produire de l'électricité à partir de la chaleur dégagée par le bloc moteur. Le but est naturellement de réduire la consommation en essence des véhicules, mais aussi de diminuer la quantité de gaz à effet de serre rejetée dans l'atmosphère, en sollicitant moins le moteur thermique.

Au bout de 2 ans, soit en mars 2002, une évaluation des avancées techniques et des coûts sera effectuée. Si elle s'avère prometteuse, un projet sur le développement de cette technologie sera amorcé et deviendra partie intégrante du programme New Sunshine de la NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization).

L'objectif du MITI est de trouver une solution pour fournir de l'électricité à la batterie à partir de la chaleur des gaz d'échappement présents dans le silencieux. L'énergie thermique émise à travers les parois latérales du conduit d'échappement devrait permettre d'éliminer la présence de l'alternateur et du redresseur de courant au sein du véhicule. L'alternateur fournit du courant aux batteries qui, elles, alimentent les phares et les divers moteurs de bord (climatiseur, etc.). Il représente près de 20 % des dépenses énergétiques d'une automobile. Potentiellement, une telle découverte représenterait donc un gain net de 20 % en consommation et tout autant sur les gaz à effet de serre. Il n'existe à ce jour pas de brevet relatif à la récupération de l'énergie thermique des gaz d'échappement automobile pour former de l'électricité.

Un programme de R&D sur l'éthanol

Suède

22 millions de SEK (2,46 M) dans un programme de R&D visant à produire de l'éthanol à partir du bois. Le but est de réduire les coûts de ce carburant à 4 SEK par litre (au lieu de 5 à 6 SEK par litre avec les techniques actuelles). L'éthanol est principalement utilisée dans les bus urbains : 300 bus fonctionnent aujourd'hui à l'éthanol, la plupart dans la région de Stockholm. On compte aussi 300 voitures hybrides roulant à l'éthanol ou à l'essence.

L'Agence suédoise de l'Énergie (STEM) a investi, fin 1999,

Nouvelles mesures contre la pollution de l'air urbain

Japon

Tokyo Metropolitan Government, fax +81 3 5388 1329

dans les agglomérations. Les grandes villes japonaises ont en effet subi de plein fouet la croissance rapide du parc automobile. Le gouvernement devrait encourager l'utilisation de véhicules propres pour les transports publics et la collecte des déchets, pour remplacer la flotte actuelle de véhicules diesel. D'autres mesures viseraient à limiter les émissions industrielles de polluants secondaires, et à encourager le développement des véhicules au GNL.

À Tokyo, le gouvernement local a annoncé le 27 août une nouvelle stratégie de réduction des véhicules diesel, à l'occasion d'une campagne « No Diesel ». De nouvelles mesures devraient être annoncées pour limiter la vente des véhicules fonctionnant au diesel, en augmentant les taxes sur le gazole, en encourageant le traitement des gaz d'échappement et en abaissant les normes d'émission, en particulier pour les particules. Selon le gouvernement, si les distances couvertes par des véhicules diesel représentent seulement 20 % du total des distances parcourues, 70 % des oxydes d'azote et près de la totalité des particules sont émis par ces véhicules.

Fin 1999, le gouvernement japonais annonçait de nouvelles mesures en cours pour maîtriser la pollution de l'air

Une solution qui tombe pile

Dans un contexte de préoccupations environnementales qui ne cessent de s'amplifier, en particulier dans les grandes villes de plus en plus asphyxiées par la pollution d'origine automobile, la pile à combustible apparaît aujourd'hui comme la solution miracle pour redonner aux citoyens une qualité de vie plus conforme à leurs aspirations. Pour autant, si les programmes de recherche fleurissent dans le monde entier avec à la clé des progrès importants et la présentation de plusieurs prototypes équipés de piles à combustible, la commercialisation à grande échelle de ce type de véhicule nécessitera encore un certain nombre d'années et sans doute quelques sauts technologiques.

1839 : après avoir plongé deux lames de platine dans un électrolyte acide, l'anglais Sir William Grove expose la première à de l'hydrogène et la seconde à de l'oxygène. Résultat : la forte déflexion de son galvanomètre lui confirme qu'une décharge énergétique vient d'être créée. Ainsi vient-il de découvrir le principe de la pile à combustible. Néanmoins, durant plus d'un siècle, celle-ci va rester une curiosité de laboratoire en raison notamment de la découverte et de l'industrialisation de la dynamo. Et ce n'est qu'au début des années 60 que des modèles, développés par le motoriste américain Pratt & Whitney, feront leur apparition sur les capsules spatiales américaines Gemini avant d'équiper les modules lunaires du programme Apollo. Si le coût de développement de ces premières piles est prohibitif - cette compé-

tition américano-soviétique sur fond de guerre froide autorisant tous les excès - techniquement il s'agit là d'une avancée considérable.

L'idée de pouvoir produire de l'électricité à partir de l'hydrogène, un élément chimique inépuisable, qui plus est sans entraîner de pollution, séduit aussitôt allemands, japonais et français qui entament dans la foulée le développement de programmes de recherche. Reste que l'écart est immense entre les prototypes utilisés par la Nasa et d'hypothétiques piles à combustible que les industriels rêvent de construire en série. L'enthousiasme retombe donc très vite, notamment en France, d'autant plus que les chocs pétroliers frappent coup sur coup, reléguant par la même les études sur la pile à combustible dans le fond de quelques laboratoires d'où, l'espace d'un instant, des industriels avaient voulu la

Sur le principe de l'électrolyse inverse

Constituée de deux électrodes -anode et cathode- séparées par un électrolyte, c'est-à-dire un matériau qui bloque le passage des électrons tout en laissant circuler les ions, la pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Ainsi, le combustible à base d'hydrogène H_2 est amené sur l'anode. Là, H_2 se transforme en ions H^+ et libère des électrons qui sont captés par l'anode. Arrivés sur la cathode, les ions H^+ se combinent aux ions O^- , constitués à partir de l'oxygène de l'air, pour former de l'eau. Le transfert des ions H^+ et des électrons vers la cathode produit ainsi un courant électrique continu à partir de l'hydrogène et de l'oxygène. Il faut préciser que la réaction est déclenchée à l'aide d'un catalyseur, en général une fine couche de platine disposée sur les électrodes.

Abondant, l'hydrogène semble être le carburant idéal, sa combustion ne produisant que de l'eau, sous la forme liquide ou de vapeur. Reste qu'il est inflammable dans l'air mais également en présence d'oxygène. En outre, il est incolore et inodore, d'où les précautions qu'exige sa manipulation. Par ailleurs, compte tenu de sa faible densité, l'hydrogène occupe beaucoup de place, un inconvénient majeur pour des piles destinées à équiper des véhicules, d'autant plus que les constructeurs souhaitent parvenir à concevoir des réservoirs de stockage de l'hydrogène à la fois légers, plus compacts et plus sûrs. D'où l'idée d'utiliser un hydrocarbure plus facilement stockable, voire un alcool comme le méthanol. De l'hydrogène peut être en effet produit à la demande par reformage de ces composés, autrement dit en faisant réagir ces derniers, à température élevée, en présence d'un catalyseur, voire de vapeur d'eau. Ce n'est donc qu'en utilisant de l'hydrogène pur ou un composé hydrocarboné issu de la biomasse que l'on peut parler de convertisseur propre à propos de la pile à combustible, chaleur et eau étant les deux sous-produits de cette réaction électrochimique.

faire sortir. Mais pour la pile à combustible, l'aventure se poursuit avec succès, à présent sur le nouveau vaisseau spatial américain, la navette qui effectue son premier vol.

Parallèlement, les américains, via leurs ministères de la Défense et de l'Énergie, se lancent dans d'importants programmes de R & D. L'époque est alors de plus en plus à la limitation des émissions polluantes des automobiles. De là à penser que l'utilisation de la pile à combustible pourrait, à plus ou moins long terme, envoyer le moteur à combustion finir sa vie dans un musée, il n'y a qu'un pas. D'où un redémar-

rage, dès le milieu des années 80 mais surtout au début des années 90, des recherches sur le sujet se traduisant par le lancement de programmes de R & D notamment au Canada, aux États-Unis et en Allemagne. Il est alors d'autant plus urgent de travailler dans cette direction que les États-Unis votent en 1990 le « Clean Air Act », une loi reprise aussitôt par la Californie - imitée par la suite par d'autres États - qui décide pour sa part qu'en 2003, seuls les constructeurs pouvant justifier de 10 % de ventes de véhicules à pollution nulle ou ZEV (Zero Emission Vehicle) pourront y commercialiser des automobiles.

Déjà plusieurs démonstrateurs ou prototypes

Aujourd'hui, les progrès réalisés au cours de ces dix dernières années sont tels que certains constructeurs n'hésitent pas à parier sur la commercialisation des premières voitures équipées d'une pile à combustible avant

2005. D'ores et déjà, DaimlerChrysler a présenté au printemps de l'année 1999 sa dernière Necar (New Electric Car). Équipée d'une pile à membranes à échange de protons, la Necar 4 affiche une vitesse de 145 km/h pour une autonomie de 400 km. Reste à produire ce véhicule, dont les piles sont directement alimentées par de l'hydrogène, stocké à l'arrière du véhicule, à un prix acceptable par les acheteurs potentiels, « l'aspect le plus important qui réserve encore le plus de travail » selon le chef de projet de piles à combustible chez DaimlerChrysler. Pour ce faire, le constructeur allemand ne lésine pas

sur les moyens puisqu'il a décidé d'y investir des budgets importants de l'ordre de 1 à 1,5 milliard d'euros.

En présentant P2000, un prototype de berline d'avant-garde alimenté à l'hydrogène, Ford qui utilise la même technologie que son concurrent allemand, développée par leur filiale commune, le canadien Ballard, leader mondial des piles à combustible, a montré de son côté qu'il pariait lui aussi sur une commercialisation de ce type de véhicule au cours des prochaines années. De leur côté, les deux constructeurs français, Renault et PSA Peugeot Citroën, ne sont pas en reste puisque, dans le prolongement des programmes Fever (démonstrateur présenté en juin 1998) et Hydro-Gen (démonstrateur devrait être présenté en juin prochain), menés dans le cadre des projets européens Joule II et III, ils ont décidé d'unir leurs ressources et leur

expertise en proposant un programme de quatre ans auquel sont associés le CEA, Air Liquide, de Nora, Total Fina, Elf et Valeo.

Pour ce Groupement d'Intérêt Économique de Recherches et d'Études PSA-RENAULT (GIE R.E. PSA-RENAULT), labellisé en septembre dernier par le réseau de recherche technologique « Pile à Combustible », lui-même mis en place par le ministère de l'Éducation Nationale, de la Recherche et de la Technologie en juin 1999, il s'agit en particulier de déterminer les conditions de faisabilité et de compétitivité, pour la commercialisation en série, au plus tard en 2010, d'un véhicule doté d'une pile à combustible. Pour y parvenir, trois étapes devront être franchies avec succès. D'une durée d'un an, la

Différents types de piles à combustible

Si elles reposent sur le même principe consistant à produire de l'électricité et de la chaleur à partir d'un combustible dont la formule chimique contient obligatoirement de l'hydrogène, les piles à combustible développées aujourd'hui font appel à des techniques variées. Elles sont au nombre de cinq (AFC, PEMFC, PAFC, MCFC, SOFC). La pile alcaline ou AFC (Alcalin Fuel Cell), dont les applications sont actuellement limitées au domaine spatial, voire au transport, fonctionne à basse température (70-80° C) et utilise un électrolyte liquide constitué de potasse. En outre, elle présente une forte sensibilité au CO₂ présent dans l'air. Pour sa part, la pile à membrane polymère échangeuse de protons ou PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) a un domaine d'application très vaste qui s'étend du portable aux centrales de puissance en passant par les transports. Entièrement solide et fonctionnant aux alentours de 100° C, elle présente une sensibilité au CO qui est un sous-produit du réformage.

Fonctionnant à température moyenne, soit environ 200° C, avec un électrolyte liquide, la pile à acide phosphorique ou PAFC (Phosphoric Acide Fuel Cell) est embarquée principalement à bord de bus, mais peut être également utilisée pour la production stationnaire d'électricité tout comme la pile à carbonate fondu ou MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) qui fonctionne à une température élevée de 650° C avec un électrolyte liquide. Enfin, de technologie entièrement solide, la pile à oxyde solide ou SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) qui fonctionne à une température allant de 600 à 1 000° C, vise les applications stationnaires et les gros transports.

première est une étape de viabilité économique, environnementale et technologique qui est destinée à évaluer les différentes filières possibles à la fois pour la pile, le reformeur et le carburant. Une seconde étape de deux ans permettra d'étudier les process et de valider les technologies retenues. Enfin, c'est au cours de la troisième étape que seront réalisés les prototypes représentatifs d'une petite série. Précisons que 34 millions de francs, dont 30 % financés par le ministère de l'Éducation Nationale, de la Recherche et de la Technologie, sont consacrés à l'étude de viabilité, une somme qui reste néanmoins très modeste au regard des budgets consacrés à ces recherches en Allemagne et aux États-Unis.



Abaïsser considérablement le coût de revient

Aujourd'hui, si la démonstration technologique semble faite, il reste à réussir la démonstration économique, ce qui n'est pas une mince affaire. Une étude réalisée par le DoE, le ministère de l'Énergie américain, envisage un prix de revient de 50 dollars au kW alors qu'il s'élève actuellement à 1 200 dollars ! Aussi les constructeurs vont-ils devoir notamment développer des membranes aussi

performantes mais beaucoup moins coûteuses et développer des procédés industriels permettant de les produire à faible coût. On estime qu'il faudrait parvenir à descendre à environ 100 francs le mètre carré de membrane électrolyte. Autre problème, la plaque bipolaire dont le coût de fabrication nécessite de gagner un facteur cent. Quant au catalyseur, il est impératif de diminuer les quantités de platine utilisées, voire même de le supprimer au profit d'autres solutions qui font l'objet de recherche. Rappelons que 30 grammes de platine sont aujourd'hui nécessaires. Par ailleurs, des choix restent à faire quant au stockage du combustible.

Tels sont quelques uns des nombreux problèmes auxquels chercheurs et ingénieurs vont devoir apporter

Le bâtiment mais aussi l'électronique portable

Solution pour l'automobile, la pile à combustible l'est également pour alimenter des habitations en électricité et pourraient à terme remplacer les accumulateurs électriques dans l'électronique portable (téléphones cellulaires, ordinateurs portables, etc.). D'ores et déjà, plusieurs expériences visant à alimenter en électricité et en chaleur les maisons individuelles sont menées dans le monde, en particulier aux États-Unis où General Electric devrait bientôt commercialiser une pile à combustible baptisée Plug Power 7000, mais aussi au Japon. De leur côté, Électricité de France et Gaz de France ont réalisé une première dans l'Hexagone en installant à Chelles une pile à combustible à acide phosphorique d'une puissance de 200 kilowatts électriques et de 220 kilowatts thermiques, raccordée au réseau basse tension d'EDF et destinée à alimenter des logements. Reste que cette technologie semble être difficilement compétitive sur le plan financier, d'où l'existence de subventions de la part du gouvernement américain pour la plupart des achats de ces piles à combustible dite « stationnaires ».

des solutions très rapidement s'ils veulent relever les paris engagés par plusieurs constructeurs quant à la commercialisation de véhicules équipés de pile à combustible avant 2005. Certains spécialistes estiment que l'amélioration des technologies existantes ne suffira pas pour que cette technologie soit commercialement viable. Aussi faudra-t-il alors réaliser de véritables sauts technologiques, autrement dit découvrir de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés ce qui entraînerait une rallonge de quelques années sur les prévisions par trop optimistes semble-t-il de certains constructeurs.

Jean-François Desessard

Canada

Ballard acquiert une licence pour les piles à combustible au méthanol

*Ballard Power Systems Inc., Burnaby, BC, Canada,
tél : +1 604 412 3195, fax : +1 604 412 3100*

Ballard Power Systems a acquis en 1999 une licence mondiale non exclusive pour la propriété intellectuelle des

piles à combustible à usage direct du méthanol (DMFC), auprès de DTI Energy Inc., qui en détient l'exclusivité de la propriété intellectuelle.

Cette licence est basée sur la technologie développée au Jet Propulsion Laboratory du Caltech (California Institute of Technology) et au Loken Hydrocarbon Research Institute de l'USC (University of Southern California). Ballard a également acquis le droit de sous-licencier aux membres de son alliance, sous certaines conditions.

Dans un DMFC, le méthanol alimente directement la membrane à échange protonique (PEM) de la pile en tant que carburant, au lieu de passer à travers un convertisseur dans lequel il est transformé en un flux de carburant contenant de l'hydrogène. La pile à combustible est moins complexe, possède un volume inférieur, un poids inférieur et enfin un coût moindre.

Japon

Un nouveau carburant liquide pour les piles à combustible

Kogakuin University, fax : +81 3 3342 5304

Une équipe de recherche, menée par le professeur Seijiro Suda de la Kogakuin University

à Tokyo, a développé un carburant liquide, fournissant de l'hydrogène aux piles à combustibles bien plus efficacement que les méthodes existantes.

Alors que les différents constructeurs japonais promettent en chœur d'ici 2004 des voitures à piles combustibles, les voies technologiques pour accomplir cette tâche sont cependant très diverses. Certains, comme Nissan, privilégient la voie du reformeur de méthanol pour fournir l'hydrogène, misant sur la disponibilité du méthanol. À l'heure actuelle, ces reformeurs occupent un volume équivalent à celui de la banquette arrière et du coffre. D'autres, comme Toyota, cherchent à stocker directement l'hydrogène via un alliage spécial, permettant alors au véhicule à pile à combustibles de n'émettre aucun polluant. L'alliage en question ne pouvant retenir que 1 à 2 % de son poids, cela implique d'en embarquer plusieurs centaines de kilogrammes pour avoir l'autonomie d'un véhicule essence. De plus, cet alliage doit se retrouver au sein d'un réservoir métallique d'une importante épaisseur, pour des raisons de sécurité.

La réussite opérée par les universitaires japonais réside dans la découverte d'un carburant liquide qui améliore de 5 à 10 fois la capacité d'absorption de l'hydrogène de l'alliage, tout en permettant un stockage plus sûr dans un réservoir en plastique. Ce système complet est alors beaucoup plus léger que les systèmes de stockage d'hydrogène existant. L'hydrogène stocké représente, en poids, 10 % du système, fournissant jusqu'à 400 km d'autonomie aux véhicules, selon la version. Ce nouveau système ne possède pas de convertisseur et simplifie de ce fait le design de l'unité génératrice. Par ailleurs, l'hydrogène est extrait à travers un catalyseur métallique, qui fonctionne sans nécessiter d'équipements complexes. Le carburant est une solution chimique de composé métallique et d'hydrogène. Les composés métal-hydrogène sont habituellement volatiles, rendant leur manipulation difficile. L'équipe de Seijiro Suda a réussi à rendre ces composés stables tout en facilitant la phase d'extraction de l'hydrogène. Pour l'instant, le carburant est cher dans sa forme courante très purifiée. Mais sa production en masse devrait réduire considérablement les coûts, notamment grâce à l'utilisation efficace des substances naturelles rares que l'on dissout dans ces liquides de haute pureté.

Accord Ballard - UCAR**Canada**

Ballard Power Systems a signé un accord avec UCAR International pour le développement conjoint et l'exclusivité de la fourniture du GRAFOIL Flexible Graphite. Le graphite flexible est un élément clé dans la fabrication des plaques de distribution du flux des piles à combustibles. Les plaques dirigent le mouvement des molécules d'hydrogène et d'oxygène à l'intérieur de la pile à combustible, dispersent la chaleur et délivrent le courant électrique. UCAR a développé des matériaux offrant un très bon compromis conductivité électrique / poids / coût de fabrication.

Miniaturisation du convertisseur**Grande-Bretagne**

Une équipe internationale dirigée par des britanniques a réussi à miniaturiser l'un des composants essentiels des piles à combustible appliquées à l'automobile : le convertisseur chimique, qui extrait l'hydrogène du méthanol. Cet élément, baptisé « Mercatox » et qui représente une avancée notable, est suffisamment petit et léger (moins de 100 kg) pour satisfaire aux contraintes liées à l'automobile. Autre point fort, son temps de démarrage : il n'a besoin que de 30 à 60 secondes pour atteindre sa température de réaction ; de ce fait son temps de réponse aux actions du conducteur est inférieur à 5 secondes. Une pile prototype de 20 kW a été réalisée et testée, sachant que 50 kW sont toutefois nécessaires pour motoriser un véhicule.

Nouveaux alliages pour le stockage de l'hydrogène des piles à combustible (1)**Japon**

Toyohashi University of Technologies, fax : +81 462 37 1666

découvert un moyen d'améliorer la résistance à l'eau des alliages pour le stockage d'hydrogène. Cette technologie arrive à point pour rallonger la durée de vie des matériaux et garantir ainsi le développement des piles à combustible.

Jusqu'à présent, la présence d'eau dans l'atmosphère entraînait la détérioration rapide des alliages utilisés pour les piles à combustibles. Le procédé proposé, lui, fait intervenir un traitement par microcapsules avec une méthode sol-gel, en utilisant du silicate de méthyle comme matériau de base sur un alliage magnésium-nickel.

Nouveaux alliages pour le stockage de l'hydrogène des piles à combustible (2)

Tohoku University, fax : +81 22 217 5031

Une autre équipe de chercheurs, à l'université de Tohoku, développe des alliages, constitués à 80 % de chrome et de titane, pour le stockage de l'hydrogène. Par rapport aux autres alliages à base de terres rares et destinés aux piles à combustible, comme les alliages de lanthane et de nickel, ces alliages de chrome et titane comportent moins de vanadium, qui est un métal coûteux. La réduction du coût de production de cette dernière classe d'alliages à capacité d'absorption d'hydrogène équivalente à celle des alliages à base de terres rares devrait ainsi entraîner leur commercialisation et leur utilisation massive dans les réservoirs à hydrogène pour les véhicules électriques fonctionnant avec des piles à combustible (voitures, bateaux).

Japon

Honda dévoile deux prototypes à pile à combustible...

Honda Motor, fax : +81 3 5412 1515

Le 6 septembre 1999, Honda a dévoilé à la presse deux prototypes de véhicules à piles à combustibles, la FCX-V1 et la FCX-V2. Les deux prototypes se fournissent en énergie à l'aide d'une PEFC (Proton Exchange Fuel Cell) à polymère solide d'une puissance de 60 KW. Ils possèdent également tous les deux des moteurs synchrones à aimant permanent à courant alternatif, dotés d'une puissance de 49 kW. Alors que la FCX-V2, entièrement construite par Honda, utilise un reformeur de méthanol, la FCX-V1, avec une PEFC construite par Ballard Power Systems, dispose d'une alimentation directe en hydrogène grâce à son réservoir en La-Ni₅, alliage à occlusion d'hydrogène. Après avoir abandonné le marché des véhicules électriques, Honda se lance dans celui des piles à combustibles. La dernière tendance consiste à mettre au point un véhicule solaire fonctionnant à l'aide d'une pile à combustible. Ainsi, le 23 avril 1999, Honda a déposé un brevet (JP 11113106) sur un dispositif où la pile PEFC se contente de suppléer l'énergie photovoltaïque dans le véhicule.

Japon

...et Ford propose un prototype familial

Au Salon de Francfort de 1999, Ford a présenté la FC5, un concept car familial qui devrait être produit en série en 2004. Disposant de cinq places, ce véhicule à pile à combustible au méthanol est le fruit d'une collaboration avec Ballard Power Systems et DaimlerChrysler. La grande nouveauté, en comparaison des prototypes précédents, est l'installation des piles sous le plancher du véhicule. Les passagers et le large coffre disposent ainsi d'un volume comparable à celui d'un véhicule traditionnel.

Fuel Cell Quarterly (États-Unis)



L'innovation, principal vecteur de développement

Entre les équipementiers, les sous-traitants et les constructeurs, un nouveau cadre relationnel s'établit dans le secteur automobile en Europe. Malgré la disparité des situations dans chacun des pays, il entraîne une plus grande intégration des fournisseurs au cycle de développement et de production du véhicule. À l'image de leurs clients, les sous-traitants automobiles doivent aujourd'hui être flexibles, innovants et prêts à délocaliser leurs activités.

Pour diverses raisons qui tiennent à la fois à la nature même du produit final, à la demande des utilisateurs et à l'organisation industrielle, l'industrie automobile s'accommode mal d'innovations technologiques radicales. Son évolution passe plutôt par des améliorations ou des modifications mineures successives.

Au-delà de ce constat, les nouvelles technologies peuvent elles-mêmes connaître un temps de gestation important. L'ABS par exemple, apparu assez récemment, a été imaginé dans les années 50. Le succès des nouvelles technologies est très souvent lié à des phénomènes culturels ; ainsi, la transmission automatique est montée sur les véhicules de série aux États-Unis et au Japon, alors qu'elle est optionnelle, voire superflue et indésirable en Europe. En outre, contrairement à d'autres marchés de masse, les innovations dans le domaine de l'automobile sont souvent nées de pressions réglementaires liées aux économies d'énergie, à la sécurité et aujourd'hui à l'environnement, et plus rarement de la demande du marché lui-même.

Identifier les vagues technologiques

De leur côté, les sous-traitants sont contraints de créer de nouvelles sources de profits, et les innovations technologiques s'avèrent être leur principal atout pour cela. Quant aux constructeurs automobiles, ils doivent pouvoir se différencier de leurs concurrents ; et la solution essentielle qui leur est offerte est dans ce cas aussi le développement technologique.

De plus, il est clair que dans la tendance actuelle de réduction des prix des équipements traditionnels et de stagnation ou faible potentiel de croissance des marchés dans les pays industrialisés, les nouvelles sources de profits se trouveront principalement dans

les innovations technologiques.

Par conséquent, dans ce contexte particulier, il semble intéressant d'identifier la grande vague technologique qui porte actuellement le secteur de l'automobile. Celui-ci a été porté après guerre par la vague des technologies de moteurs à fort taux de compression. Cette vague a progressivement fait la place aux technologies liées aux microprocesseurs vers les années 70, qui n'arrivent d'ailleurs à maturité qu'actuellement.

Ces deux grands mouvements technologiques ont créé un environnement propice au développement d'autres technologies et à l'introduction de technologies qui autrement n'auraient pas été exploitées par le secteur automobile.

Aujourd'hui les fournisseurs ne doivent donc pas introduire une seule et unique nouvelle technologie, car leurs chances de succès seraient faibles. Il s'agit plutôt de proposer un ensemble de technologies qui tireraient profit de celles déjà mises en jeu dans une innovation majeure. L'exemple de l'ABS illustre bien ce phénomène. L'introduction de ce système nécessite en effet l'installation de capteurs de vitesse sur les quatre roues. Il est évident que ceux-ci ont pu alors fournir d'autres informations que celles exclusivement nécessaires au fonctionnement de l'ABS. Par exemple, pour le contrôle de la vitesse en tant que telle, de la tenue de route, de la localisation du véhicule, de la pression des pneumatiques, etc.

Pour relever efficacement un tel défi, les sous-traitants doivent être en mesure d'identifier à la fois les nouvelles technologies porteuses et le cortège de technologies qui en dépendent et qui sont applicables à d'autres fonctions. Ils doivent aussi pouvoir traiter et développer ces technologies, c'est-à-dire mettre en place une capacité propre de R&D. Cette orientation va dans le

Les nouveaux développements en cours chez les sous-traitants européens

Priorité au recyclage : aboutir aux objectifs européens de recyclage de plus de 85 % en poids du véhicule d'ici à 2002 est un défi de premier ordre auquel sont confrontés notamment les fabricants de pièces plastiques.

Alléger les véhicules : aluminium, matériaux composites et nouveaux design pour l'acier. Même si une partie des pièces d'acier est remplacée par des nouveaux matériaux composites ou en métaux frittés, l'allègement principal sera obtenu par utilisation de l'aluminium. De plus, l'industrie automobile utilisera de façon intensive les outils informatiques de design et de simulation pour redessiner les pièces.

Embarquer toujours plus d'électronique :

- Capteurs : les technologies aéronautiques, comme les capteurs de mouvements linéaires et de rotation sans contact (au travers d'un champ électromagnétique), seront appliquées au secteur automobile.
- Câblages : avec le développement de l'électronique, le câblage des véhicules s'accroît au point de constituer une entrave au design. Cependant les nouvelles technologies qui sécurisent les systèmes électroniques embarqués permettent d'imaginer d'autres solutions.
- Airbags : la généralisation des airbags à l'ensemble des véhicules entraîne une forte concurrence. D'intenses développements optimisent leur fonctionnement. Les airbags intelligents intègrent de nouveaux paramètres en provenance de capteurs variés.
- Systèmes d'accès et de démarrage : les clés seront bientôt du passé. L'accès au véhicule et le démarrage seront mis en œuvre par des systèmes comme les cartes à puce sans contact.
- Systèmes de localisation : encore peu courant chez nous, ces outils très populaires au Japon devraient se généraliser sur le marché européen. Dotés d'un écran plat et d'un lecteur de CD-ROM ou de DVD, ils permettent toute une série d'applications électroniques. Ils peuvent être couplés aux systèmes de communication comme le téléphone cellulaire, pour des services personnalisés.

Améliorer les liaisons au sol :

- Suspension et tenue de route à la recherche d'un plus grand confort : différentes approches sont en concurrence pour le contrôle actif de la tenue de route, mais aucune ne devrait aboutir à un contrôle total, en particulier à cause de la consommation en carburant.
- La transmission automatique attendue en Europe : son intégration se fait très lentement avec seulement 20 % du parc équipé et de fortes différences régionales, le Nord de l'Europe étant en tête. Les nouvelles technologies de transmission automatique répondent aux exigences des utilisateurs en matière de consommation. Comme elles s'accroissent à la réglementation en matière d'environnement, le mouvement devrait s'accroître. Parallèlement, les boîtes manuelles évoluent vers la compacité. Une tendance intermédiaire prend forme, les systèmes hybrides manuel/automatique dits semi-automatiques. BMW et Renault expérimentent cette approche depuis un certain temps.

Un véhicule et des combustibles propres :

Les tendances en matière d'émissions gazeuses et d'économie des énergies conduisent à imaginer un véhicule propre pour le futur. Un grand nombre de technologies sont candidates et il est probable que plusieurs d'entre elles seront développées et exploitées simultanément.

sens d'un plus grand rôle alloué aux fournisseurs de l'automobile, en matière de design et de développement, à la demande d'ailleurs des constructeurs.

La vague de l'électronique porte la sous-traitance automobile

Si l'on tient compte du contexte de développement et d'adhésion des nations industrialisées à l'ITS, il y a fort à parier que les technologies de communication formeront la prochaine grande vague technologique pour le secteur de l'automobile. Le déploiement des systèmes de communication à l'intérieur même du véhicule et vers l'extérieur (par des échanges avec les infrastructures routières au sens large) pourrait être le

prochain catalyseur de l'introduction d'une multitude d'autres technologies ou d'applications au service des autres fonctions du véhicule.

Ainsi donc, la transformation radicale et rapide du secteur automobile devrait se prolonger quelques années encore, grâce, entre autre, à l'ITS. Les mots clés de cette restructuration sont « consolidation » et « alliance » ; leur déclinaison respective sont « modularisation » et « électronique ».

Les consolidations se font dans un champ technologique donné ou autour d'un concept modulaire, tendance semble-t-il plébiscitée dans une certaine mesure par les constructeurs, du moins en Europe. Les alliances se font entre spécialistes de la mécanique et experts de l'électronique. Ces derniers avaient été,



jusqu'à aujourd'hui, peu présents dans le secteur. La composante électronique occupe une place croissante dans des systèmes très représentatifs de la mécanique comme la transmission ou la direction.

Des stratégies sont à mettre en œuvre

Par conséquent, il apparaît comme indispensable que les sous-traitants et équipementiers français du secteur automobile axent leurs stratégies sur ces évolutions technologiques. Or, la plupart se contentent de suivre les demandes des deux grands constructeurs nationaux : PSA et Renault.

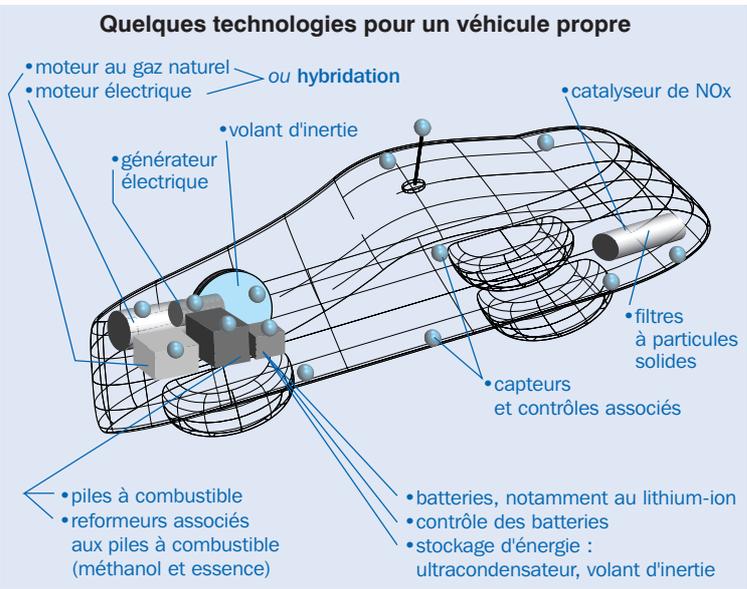
sécurité. Mais des secteurs plus dynamiques apparaissent aujourd'hui : celui des châssis, et surtout des moteurs et de la transmission. Des opportunités existent aussi dans le secteur de la carrosserie pour lequel il faut compter sur une composante technologique forte dans le futur, du fait de la tendance à l'allègement.

En ce qui concerne la délocalisation de l'activité, il est préférable de réfléchir avant de la mettre en œuvre, car des solutions logistiques peuvent exister. La stratégie de certains équipementiers à ce sujet peut être discutée. La délocalisation demande en effet des investissements considérables pour des résultats souvent médiocres, alors que ces ressources auraient pu servir à d'autres actions comme des acquisitions ou de la R&D.

Des alliances sont à imaginer

On peut d'autre part proposer d'établir des alliances entre la mécanique et l'électronique, sous forme de partenariats de R&D, ou de joint-ventures dans les niches où l'électronique s'impose en force. Il n'est pas exclu d'envisager des collaborations avec des groupes du secteur automobile plus importants que le sien car le client final -le constructeur- préférera s'adresser à un familier de son domaine. De plus, un fabricant d'électronique déjà sous-traitant dans l'automobile aura tout intérêt à élargir son catalogue à l'ensemble des modules ou sous-systèmes utilisés ou utilisables dans un proche avenir dans les véhicules.

Il est indispensable de mettre en place une organisation dans les entreprises de sous-traitance pour identifier ces nouvelles applications et leurs extensions possibles. Il est préférable de se tourner vers des technologies peu onéreuses et exploitables dans d'autres fonctions du véhicule, à l'instar des capteurs de vitesse de l'ABS. Pour compléter cette démarche, il convient de développer une capacité de R&D apte à répondre aux opportunités identifiées. Il sera alors possible de réagir à la demande pressante des constructeurs qui consiste à faire assumer aux fournisseurs une part des développements technologiques exigés par de nouvelles normes de sécurité, d'environnement et par le marché lui-même.



Dans un contexte de mondialisation, l'équipementier va devoir, si ce n'est déjà fait, anticiper la pression à la réduction des coûts en travaillant en étroite collaboration avec ses clients, par exemple dans le cadre de grands programmes. Il est d'autre part intéressant de pouvoir consolider son activité ou acquérir de nouveaux savoir-faire par des acquisitions ou des fusions avec d'autres entreprises. Parallèlement, les activités connexes ou non profitables devront être cédées : il semble que la consolidation autour d'un pôle technologique donné, voire autour d'un concept de module, soit un gage de développement dans ce secteur. Les jeux sont malheureusement déjà faits dans certains domaines comme l'électricité, l'habillage intérieur et la



Patrick Henry

Transmission continue pour les véhicules à propulsion avec moteur à l'avant

Nissan, fax : +81 3 3544 0109

Japon

Nissan a développé un système de transmission continue (CVT, Continuously Variable Transmission) pour les véhicules

à propulsion possédant leur moteur à l'avant (FR, Front engine Rear drive). Auparavant, il n'était pas possible d'installer les CVT sur les voitures de type FR, à cause des problèmes occasionnés sur la courroie métallique. Le système développé par Nissan est un CVT en forme de tore qui comprend un disque, une courroie et surtout un lubrifiant spécial permettant à la courroie de supporter de plus grands efforts.

Cette transmission ne fait plus appel à des rouleaux, mais se contente de déplacer les composants et changer leurs angles relatifs pour faire varier légèrement le rapport de vitesse. La nouvelle transmission est également transposable sur les véhicules à propulsion. Avec les CVT conventionnels, que l'on trouve sur les véhicules à traction (FF, Front engine Front drive), il y avait des restrictions sur l'espace entre le moteur et l'arbre de transmission, rendant ce système inutilisable sur les voitures de type FR.

De plus, jusqu'ici, les CVT ne pouvaient être appliquées qu'aux véhicules ayant une cylindrée n'excédant pas 2 litres. Or Nissan applique la CVT aux véhicules d'une cylindrée de 3 litres, ce qui constitue une première mondiale. Ce constructeur est un des leaders en matière de transmission continue et possède plus de 4 000 brevets déposés à ce sujet.

Pistons rotatifs en développement chez Mazda

Mazda, fax : +81 82 287 5237

Japon

Mazda a annoncé la présentation, lors du Tokyo Motor Show de cet automne, de sa prochaine génération de moteur à pistons rotatifs, en cours de développement.

Le constructeur envisage de présenter une berline de 280 chevaux, dotée d'un moteur d'une cylindrée de 1,3 l à pistons rotatifs.

Ces moteurs, qui utilisent des rotors à la place de pistons alternatifs, ont un meilleur rendement et génèrent moins de pollution que les moteurs conventionnels. Pour l'instant, Mazda demeure l'unique constructeur au monde cherchant à produire ce type de moteur. Néanmoins, depuis que Ford a pris une part dans son capital en 1996, les efforts concernant la réduction des coûts ont mis à mal ce projet qui reste très coûteux.

Commande et réglage électromagnétiques des soupapes sans capteur

Management-Informationen Nr.752/753 -
Ambassade de France en Allemagne

Allemagne

Des chercheurs de l'université de la Ruhr à Bochum (département des techniques de mesures et de réglages élec-

troniques) ont élaboré, au cours d'un projet de recherche mené conjointement avec le service des techniques automobiles de Siemens AG, les bases de la commande électromagnétique des soupapes de seconde génération à savoir le réglage du mouvement des soupapes sans capteur.

Avec les arbres à cames traditionnels, les durées d'ouverture et de fermeture des soupapes sont imposées « mécaniquement » à l'origine et les réglages restent ainsi très limités.

Au contraire, le fonctionnement des soupapes par commande électromagnétique variable présente de nombreux avantages : diminution de la consommation d'essence de 15 %, diminution des émissions, augmentation du couple. Le mouvement de chacune des soupapes est réalisé par un boîtier de commande électromagnétique qui permet à une armature de se déplacer librement entre deux électro-aimants. De plus, l'énergie nécessaire à l'ouverture et à la fermeture de la soupape est minimisée grâce à deux ressorts de soupapes. Pour obtenir un fonctionnement régulier et une durée de vie optimale, le mouvement des soupapes et des armatures dans les boîtiers de commande doit se faire sans chocs. Pour ce faire, une électronique de pointe assure l'activation des électro-aimants de même que les réglages nécessaires aux déplacements.

Cependant, jusqu'à présent, la détermination de la position des soupapes était réalisée par des capteurs de position ou de vitesse. De tels systèmes sont en toujours en phase de développement dans différents centres de recherche de l'industrie automobile. À l'université de Bochum, on s'est par contre essentiellement intéressé à la commande électromagnétique des soupapes de seconde génération. Ce système ne nécessite plus de capteur, ce qui entraîne une diminution considérable des frais (capteurs, câbles et électronique) et une amélioration de la fiabilité de l'ensemble. Les premiers essais d'un tel système sur un moteur à combustion ont été couronnés de succès.

La propulsion électrique : une nécessité pour le futur

La recherche dans le secteur des transports terrestres se penche actuellement sur plusieurs solutions innovantes qui pourraient être moins coûteuses, plus efficaces et plus propres. Les véhicules électriques hybrides, les bus à piles à combustible, la propulsion électrique, les carburants de substitution, tous attirent l'attention par leurs potentiels. Ces concepts sont liés par la réalité des ressources, des infrastructures et des investissements. Essayons d'imaginer l'automobile des années 2030-2040 : les progrès les plus sensibles concerneront l'électronique, qu'il s'agisse des commandes ou de la puissance, et l'intégration de ces technologies dans le véhicule sans modification majeure de la plate-forme. Ainsi la propulsion des véhicules deviendra électronique et permettra de ce fait l'utilisation de différentes sources énergétiques.

En 2030-2040, un véhicule électrique hybride utilise plus d'une force de propulsion. La combinaison la plus courante est celle qui associe un moteur à combustion interne (MCI), avec un réservoir à carburant, à un moteur électrique avec sa batterie. Une petite proportion de véhicules utilisent les piles à combustible au lieu du MCI, cependant leur utilisation à grande échelle est limitée par les infrastructures et les coûts. Le couple moteur est transmis aux roues selon une des deux configurations suivantes :

- la configuration en série : le moteur sert uniquement à charger la batterie ;
- la configuration en parallèle : le moteur et le véhicule créent tous les deux le couple moteur.

Le coût et l'efficacité, associés à la conversion de puissance, impliquent la configuration en série pour les véhicules utilitaires lourds, alors que les véhicules utilitaires légers utilisent plutôt la configura-

tion en parallèle. Dans chacun des deux systèmes, le contrôle de l'alimentation du couple moteur est automatisé.

Moteur électrique et convertisseur avant tout

Les véhicules légers pour le transport de passagers utilisent un système électrique fournissant jusqu'à 150 V, aussi bien pour le moteur de traction que pour les systèmes accessoires du véhicule. Ces systèmes sont basés sur une conversion de puissance efficace et économique. Le convertisseur à transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) représente le cœur du système de contrôle du moteur. Il comprend des modules IGBT demi-pont fonctionnant sous des voltages et des courants importants, des barres de bus à faible inductance, des condensateurs



à verrou électromagnétique à haute fréquence, des condensateurs à fort pouvoir ondulatoire, des capteurs et des limiteurs de courant et un réseau de circuits logiques. Le convertisseur est monté sur un dissipateur thermique qui sert également de cache arrière au moteur.

Le système de conversion de puissance remplace d'autres systèmes mécaniques comme les courroies, les chaînes de distribution et les systèmes hydrauliques. Le démarreur et l'alternateur sont remplacés par le moteur de traction. Le moteur de 15 kW est conçu sans balais. Il pèse environ 7 kg, son diamètre est de 180 mm et sa longueur de 130 mm. Il fonctionne en courant continu dans une plage de 120 V à 150 V et produit de 60 à 100 A. Le logement du moteur est intégré au châssis du véhicule pour créer une meilleure dissipation thermique. Le moteur a un rendement supérieur à 94 %, sans parler de la vitesse électronique. Le contrôle du couple moteur assure, lui, une efficacité de 92 %.

Une commande électronique globale

La commande du moteur est un système global et informatisé de commande du véhicule. Il dirige le système de propulsion électronique, gère tous les accessoires, règle la charge de la batterie, contrôle et affiche les différents paramètres nécessaires à l'utilisateur, comme la température des composants, la vitesse du véhicule, les dispositifs de sécurité. La commande du moteur transmet l'énergie des batteries au moteur et permet la bonne intégration du moteur et de la machine. La commande possède des convertisseurs continu/continu pour les fonctions accessoires. Elle utilise un microprocesseur exploitant des logiciels évolutifs, ce qui permet l'utilisation d'une interface graphique de PC pour modifier les paramètres du système. Le code source se divise en modules qui permettent aux clients de développer les logiciels adaptés à leurs besoins, y compris en termes de communication et de navigation. Le système englobe des fonctions de sécurité pour

protéger les véhicules du vol et empêcher toute modification des programmes en l'absence du code homologué.

Un véhicule hybride à base d'un diesel deux temps

L'investissement substantiel effectué au cours du XX^e siècle dans le MCI est le garant de sa large utilisation en 2030-2040. Cependant, le moteur le plus économique à cette date est un diesel à deux temps. Ce moteur émet beaucoup moins de gaz d'échappement, consomme moins de carburant et offre une puissance volumique plus importante que d'autres moteurs. Cette configuration électrique hybride a modifié les exigences des moteurs. Ils sont conçus pour les besoins courants du couple moteur plus que pour un rendement maximum. Cela permet l'utilisation de moteurs plus petits. La configuration hybride évite ainsi la surcharge du moteur diesel et le démarrage au ralenti. Les avancées en matière de technologie des batteries sont tout aussi importantes que les récentes évolutions technologiques du moteur, car elles permettent le stockage d'énergie requis par la configuration hybride. La batterie au plomb, qui fournit l'énergie de stockage dans la plupart des véhicules, est une unité hermétique de 150 V / 5 Ah. De son côté, le lithium est employé dans un nombre croissant de véhicules en raison de ses qualités supérieures. La technologie des batteries au plomb, ainsi que les infrastructures de fabrication sont très développées. Il en résulte des coûts tout à fait abordables. La batterie continuera à être une priorité bien au-delà de 2040, pour une meilleure performance des véhicules.

Des performances significatives

Les véhicules à propulsion électrique auront leur place parmi les véhicules des années 2030-2040 et apporteront des avantages décisifs. Le développement de ce type de propulsion permettra un fonc-

tionnement plus efficace du véhicule et une flexibilité accrue dans la conception du véhicule. Avec sa conception modulaire, le véhicule à propulsion électrique réduira le délai de mise sur le marché de nouveaux véhicules. Le fonctionnement efficace du système limitera de manière significative les émissions de gaz dans l'air. L'efficacité du carburant permettra de parcourir jusqu'à 100 miles par gallon (42 km/l). Les performances du véhicule seront améliorées de

manière significative, en raison d'un couple moteur disponible plus important, d'un délai de réponse plus court et d'un poids plus faible. Le rapport coût / performance des véhicules à propulsion électrique sera l'atout indiscutable de succès sur le marché en 2030-2040.

Gary Helm

*Traduction/adaptation :
Pool LEA Université Marc Bloch - ADIT*

L'auteur

M. Gary Helm, Président Directeur Général et administrateur de eCycle, a rejoint l'entreprise en octobre 1998. En mai de la même année, il a obtenu un mastère d'ingénierie à l'Université d'État de Pennsylvanie (Pennsylvania State University). Ces cinq dernières années, il a été le président du Comité de Qualité de l'Air (Air Quality Management), organisme de conseils en environnement situé en Pennsylvanie. L'entreprise de M Helm a réalisé des études de qualité de l'air pour plus de 30 clients dont Bethlehem Steel Corporation, Lucent Technologies, Rhône-Poulenc et MG Industries. S'appuyant sur son expérience du marché en matière d'industrie environnementale, M. Helm est maintenant chargé de pourvoir au développement d'eCycle, Inc., pour en faire un constructeur et équipementier automobile de classe mondiale.

La société eCycle

La société eCycle, Inc. est impliquée directement dans le développement de propulseurs électriques (eDrive) pour véhicules légers. Elle s'applique à répondre aux besoins des consommateurs en matière de transports personnels, loisir et style de vie.

eCycle Inc. et son produit vedette eCycle sont nés en 1996, lorsqu'on s'est rendu compte qu'il existait un marché important et inexploité pour une moto attrayante, économique et très performante. En cherchant à créer le véhicule le plus économique, le plus excitant et le plus avancé sur le plan technologique, Dan Sodomsky, directeur de l'ingénierie chez eCycle, a imaginé la moto électrique eCycle.

Dans les années qui ont suivi, eCycle a développé des composants pour propulseurs électriques très compétitifs qui étaient en mesure de fournir de l'énergie non seulement à la moto eCycle, mais pouvaient aussi s'appliquer à d'autres produits comme les scooters et les voitures. De plus, ces éléments de propulseurs s'avéraient nécessaires aux véhicules électriques hybrides. eCycle a commencé à développer une moto électrique hybride qui aura une autonomie supérieure de plus de 100 % à celle d'une moto conventionnelle, et un couple moteur plus important pour un prix identique. eCycle est prêt à lancer sur le marché des composants de propulseurs innovants et compétitifs pour les autres constructeurs automobiles.

Contact

*M. Gary Helm
eCycle, Incorporated
Reading, (Pennsylvanie, États-Unis)
tel: +1 610 939 0480, fax: +1 610 939 0474, e-mail: ghelm@ecycle.com*



Considérations sur le coût de l'énergie des techniques hybrides

Après avoir classifié les solutions hybrides à deux sources d'énergie ou plus, l'auteur analyse les coûts de l'énergie. Ces coûts sont comparés, entre les véhicules conventionnels (CV), électriques (battery-only-electric-vehicle, BOEV) et hybrides (hybrid-electric-vehicle, HEV). Une distinction est faite entre les modes électrique et thermique, en particulier dans les véhicules hybrides. L'auteur montre que, pour un petit véhicule urbain, HEV présente des avantages de coûts d'énergie significatifs sur CV et sur BOEV. De plus HEV a, en mode électrique, des émissions nulles à l'échappement, comme BOEV. Il a d'autre part de nombreux avantages, une autonomie supérieure aux autres types de véhicules et un confort comparable à CV. Ce confort peut même être supérieur si un CVT électronique, spécifique aux solutions hybrides, est utilisé.

Un système hybride est par définition composé de deux sources d'énergie différentes, ou plus :

- une unité auxiliaire de puissance : un moteur à combustion ou une pile à combustible et
- un système de propulsion électrique : en général un système d'emmagasinage d'énergie tel que batteries, ultra capacités, volants d'inertie...

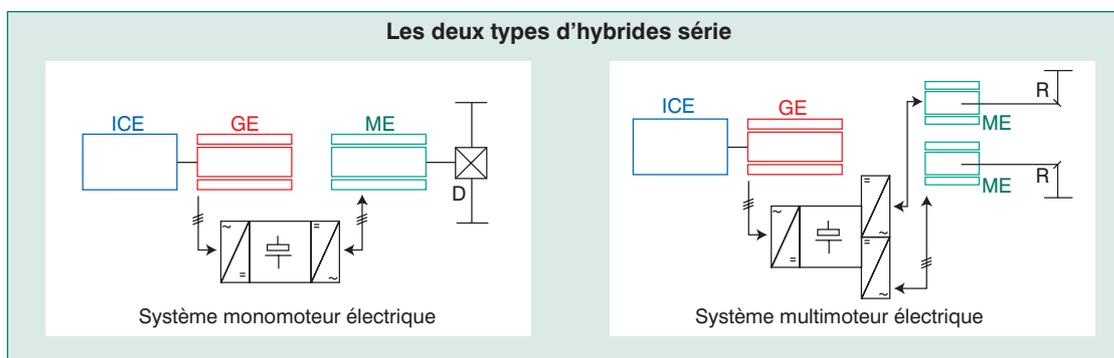
Ces combinaisons, bien choisies, peuvent rendre les **véhicules hybrides (HV)** jusqu'à deux fois plus efficaces que les **véhicules conventionnels (CV)**, tout en fournissant des performances et un confort similaires. Elles permettent d'allier les points fort des éléments choisis en évitant dans une large mesure leurs points faibles. Les systèmes hybrides assurent une autonomie comparable aux véhicules avec une motorisation classique (moteur thermique avec une boîte à vitesses), tout en réduisant les émissions polluantes et les consommations. Les véhicules électriques (**Battery-only electric vehicle, BOEV**) nécessitent une batterie avec une énergie importante pour assurer une autonomie satisfaisante. Cette solution est « propre » au moins à l'échappement. Elle peut être

pénalisée par les coûts, le poids et d'autres caractéristiques des batteries. Les coûts de l'énergie de ces différents types de véhicules sont comparés plus loin pour un petit véhicule urbain.

Nous considérons ici la combinaison hybride d'un **moteur à combustion interne (ICE)** avec une batterie. De nombreuses autres combinaisons sont envisageables. Les combinaisons considérées ont l'avantage d'utiliser des éléments bien connus et sont réalisables aujourd'hui. Les autres combinaisons hybrides ont les mêmes caractéristiques fondamentales que celles considérées.

On distingue deux grandes familles de systèmes d'entraînement hybride :

- **l'hybride série (HS)**. Le moteur à combustion est connecté à une **génératrice (GE)** qui produit de l'électricité. Cette énergie électrique est emmagasinée ou directement utilisée pour entraîner un ou plusieurs **moteurs électriques (ME)** qui fournissent la puissance nécessaire pour propulser le système. Les roues sont entraînées par les moteurs électriques.



Dans le système monomoteur électrique, ce moteur peut être de type asynchrone ou synchrone (avec ou sans aimants). La fonction du différentiel mécanique (D) doit être accompli par les moteurs électriques ou par leur pilotage

- **L'hybride parallèle (HP).** Le moteur à combustion et le système de propulsion électrique sont directement liés aux roues du véhicule. Le moteur à combustion est utilisé à haute vitesse et le système électrique est utilisé comme appoint pour les accélérations, la récupération et éventuellement sur les côtes et au démarrage.

Les hybrides série

L'hybride série produit de l'électricité à bord. Les nombreuses conversions de puissance mécanique / électrique dégradent le rendement mais permettent de découpler les roues du moteur thermique. Le HS permet l'utilisation d'électricité pour entraîner le ou les moteurs électriques. Le découplage permet des stratégies de contrôle intéressantes et une optimisation du fonctionnement du moteur thermique.

Le HS permet ainsi d'obtenir des véhicules à émissions faibles, en particulier dans des cycles urbains. Aussi, ce système est très bien adapté à un fonctionnement en mode électrique dans les limites de l'autonomie fournie par la batterie choisie. La batterie est relativement coûteuse et lourde, au moins aujourd'hui encore et probablement pour les années à venir et peut pénaliser particulièrement les petits véhicules à bas prix. Elle permet une conduite propre, la récupération de l'énergie au freinage, l'utilisation du moteur thermique dans des conditions optimales.

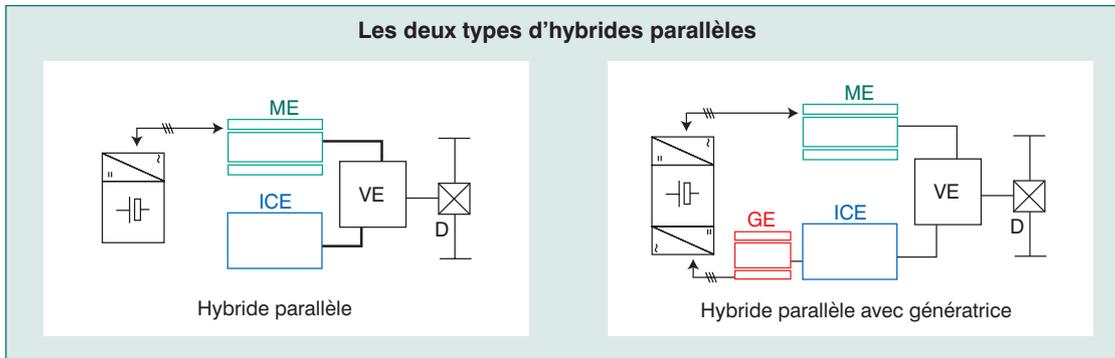
L'utilisation de plusieurs moteurs asynchrones avec

une seule source d'alimentation est une solution relativement complexe à mettre en œuvre. La différence des vitesses de rotation en virage fait glisser les moteurs asynchrones par rapport à leur fréquence d'alimentation, et crée donc des pertes additionnelles. Une alimentation individuelle par moteur (synchrone avec ou sans aimants, ou asynchrone) avec une électronique de pilotage superposée aux électroniques moteur est une solution simple à mettre en œuvre mais peut être coûteuse. L'électronique de pilotage doit être capable d'assurer le fonctionnement même en cas de défauts sur les onduleurs, ce qui est délicat [1].

Le rendement des HS est, en général, médiocre sur un cycle complet européen, américain ou japonais. Il peut être amélioré si les rendements des moteurs électriques sont élevés en traction et en récupération. Le rendement de la batterie, en charge et en décharge, est également important, d'autant plus évidemment, qu'elle est utilisée fréquemment.

L'utilisation fréquente de la batterie permet de réduire les émissions du véhicule, souvent au détriment du rendement du système. Toutefois la recharge de batterie au réseau peut donner aussi une énergie à bas prix dans certains pays, surtout si les tarifs de nuits sont utilisés et si les tarifs ne changent pas de façon significative. L'analyse comparative des coûts d'exploitation, lorsque des sources électriques et de combustible sont utilisées, est faite séparément.

Le HS est, en général, intéressant pour ses émissions faibles et son utilisation d'énergie électrique.



La batterie peut être chargée par inversion du fonctionnement du moteur électrique ou par une génératrice de petite taille. Différentes variantes sont envisageables.

Toutefois la construction du système et son contrôle nécessitent beaucoup de soin pour éviter une détérioration rapide du rendement et des coûts de production sensiblement plus élevés que les véhicules conventionnels, surtout liés au dimensionnement du système électrique avec la batterie.

Les hybrides parallèles

Dans cette configuration, les sources d'énergie primaires, le moteur à combustion et la batterie sont liés directement et séparément aux roues du véhicule.

Le moteur à combustion est utilisé, en général, pour rouler sur route et autoroute, et la batterie fournit un appoint pour les accélérations, la récupération, le ralenti et parfois permet les démarrages. En mode urbain, on peut utiliser un mode électrique seul si la batterie le permet ou un mode hybride mixte si la batterie est plus modeste [2].

Le HP (hybrides parallèles) est classifié en :

- HP où les couples s'additionnent,
- HP où les vitesses s'additionnent.

De nombreuses variations sont réalisables. Toutes ne sont pas nécessairement intéressantes [3].

Dans le système hybride parallèle le moteur thermique et le moteur électrique peuvent agir indépendamment sur la traction. Dans la plupart des cas, le moteur thermique attaque à travers un réducteur ou une boîte à vitesses avec un embrayage (VE) le train de traction. Le moteur électrique

sert à assurer certains régimes de pointe en accélération ou la traction à basses vitesses. Ce système peut permettre, par rapport au système série, une réduction de la taille de la machine électrique et de la batterie.

Le HP permet dans sa configuration la plus simple une petite batterie, légère et bon marché. On comprend que l'industrie automobile se soit en majorité orientée vers ce type de véhicule. Dans sa configuration plus complexe, une grosse batterie et d'importants moteurs électriques permettent un mode électrique substantiel.

Le HP donne souvent un très bon rendement à haute vitesse puisque la transmission mécanique est alors optimum. À basse vitesse, le rendement énergétique du système n'est en général pas très bon car le moteur thermique, s'il est utilisé, est lié aux roues et les points de travail ne peuvent pas être choisis de façon optimale. Si le ou les moteurs électriques sont utilisés, la situation ne sera pas meilleure. La récupération d'énergie peut améliorer sensiblement cette situation.

Le HP a souvent un bon rendement, surtout dans les cycles où les vitesses élevées sont importantes. Les émissions dépendent du moteur thermique et des catalyseurs utilisés. Des progrès importants ont été faits à ce sujet ces dernières années, qui ont amélioré de façon considérable les émissions des véhicules conventionnels [4].

Système hybride série / parallèle

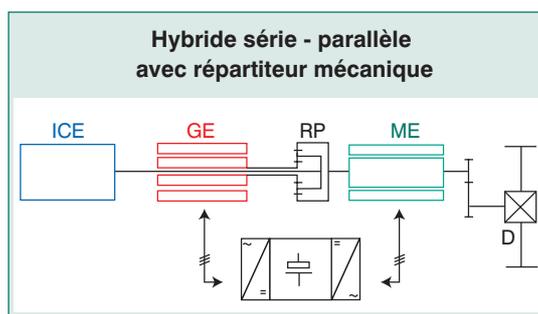
Une construction particulière des HP permet d'obtenir un véhicule hybride parallèle avec des performances optimisées :

- à basse vitesse, comparables aux HS,
- à haute vitesse, comparables aux HP.

Ces systèmes, appelés série - parallèle, sont intéressants puisqu'ils fournissent un optimum. Le premier véhicule hybride sur le marché, la Toyota Prius, fait partie de cette catégorie [5]-[6]. Les variantes possibles dépendent en particulier du dimensionnement de la batterie et du moteur électrique [7]. Dans les cas extrêmes :

- une petite batterie et un moteur électrique modeste fournissent un support à l'accélération et une récupération éventuellement modeste. Ce système peut être autarcique, ne nécessitant pas de recharge du réseau.
- une batterie plus importante permet un mode électrique avec recharge au réseau. Ce cas n'est souvent pas favorable car le système comprend alors des poids et des coûts maximums, toutefois il permet un mode électrique substantiel.

En résumé, le système série - parallèle est intéressant. Il permet diverses variantes. Dans le cas d'une petite batterie avec un petit moteur électrique, il peut être alors autarcique. Il est intéressant de noter que l'utilisation de transmission à rapport variable continu (CVT) permet d'obtenir un confort de conduite tout à fait remarquable. Différents types de CVT sont envisageables. Le CVT électromagnétique permet



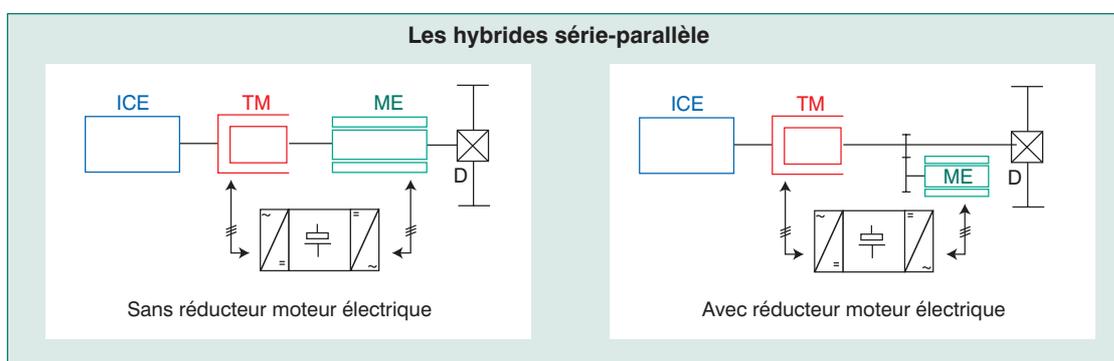
d'obtenir un rendement favorable [8], [9].

Ce système est caractérisé par la possibilité de fonctionnement en hybride série, hybride parallèle et tous les hybrides intermédiaires. Les différents fonctionnements sont atteints grâce au dispositif du répartiteur de puissances. Nous classifions donc ici ce type de système sous cette forme.

Répartiteurs mécanique ou électrique

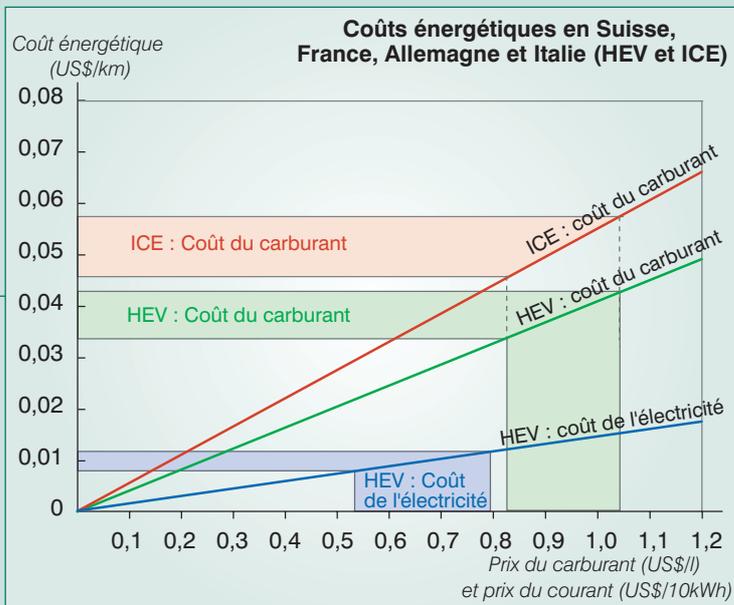
C'est le système qu'utilise actuellement la Toyota Prius. Un réducteur planétaire est utilisé ici pour répartir les puissances entre le moteur thermique, la génératrice et le moteur électrique (voir schéma).

L'idée du système avec répartiteur électrique est de supprimer le répartiteur mécanique et d'assurer sa fonction par une machine électrique spéciale, le transmuteur (TM). Il s'agit d'une machine où le stator peut tourner et est ici directement accroché à l'arbre de sortie du moteur thermique. L'alimentation du stator se fait à travers un jeu de bagues collectrices [10].



Un multiplicateur avec un rapport faible de multiplication (ex. : rapport 2) permet une réduction du volume du moteur électrique.

Estimation et comparaison des coûts de l'énergie des véhicules hybrides-électriques, électriques et conventionnels



La figure ci-contre montre les coûts de l'électricité et du carburant pour les véhicules hybrides-électriques (HEV) et les véhicules avec moteur à combustion interne (internal combustion engine, ICE).

Les hypothèses considérées pour les rendements énergétiques sont données sur le tableau (1) et correspondent à un petit véhicule urbain.

Les prix considérés ici du carburant et de l'électricité ont été convertis ci-dessous en dollars US afin de pouvoir être comparés - voir tableau (2).

(1) Hypothèses sur les rendements HEV et ICE

Rendement énergétique électrique HEV	15 kWh/100 km
Rendement énergétique en carburant HEV	4,0 l/100 km
Rendement énergétique en carburant ICE	5,5 l/100 km

(2) Prix considérés de l'électricité et du carburant

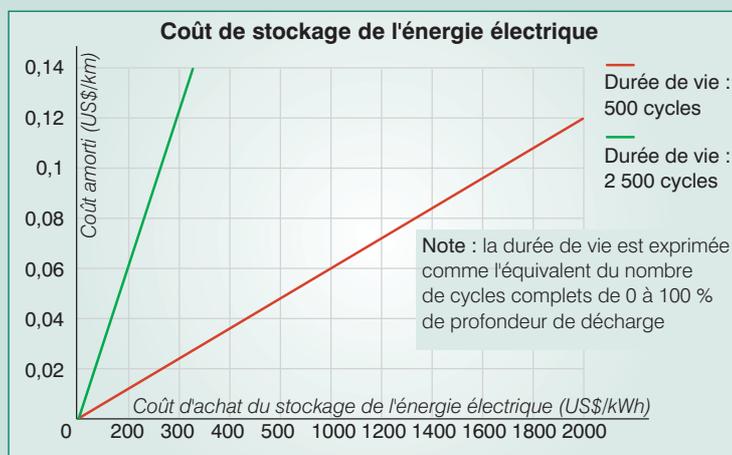
Taux de Change	Horaires	Électricité (kWh)	Essence (l)
Suisse			
CHF / USD		CHF / USD	CHF / USD
USD / CHF 0,6554	22h-6h	0,120 / 0,079	1,250 / 0,819
	6h-22h	0,215 / 0,141	
Allemagne			
DM / USD		DM / USD	DM / USD
USD / DM 0,5389	21h30-6h	0,110 / 0,059	1,600 / 0,862
	6h-21h30	0,235 / 0,127	
France			
FRF / USD		FRF / USD	FRF / USD
USD / FRF 0,1599	23h-7h	0,330 / 0,053	6,500 / 1,039
	7h-23h	0,550 / 0,088	
Italie			
ITL / USD		ITL / USD	ITL / USD
USD / 1000 ITL 0,5534		1825 / 1,010	

Les fourchettes de prix dans les quatre pays européens : France, Allemagne, Italie et Suisse sont données sur le tableau (2). La France a, à la fois, le prix de l'électricité le plus bas (tarif de nuit) et le prix de l'essence le plus haut.

À noter sur les abscisses que le prix de l'essence moyen, entre le plus haut et le plus bas niveau est de 0,93 USD par litre. Le prix de l'électricité, tarif de nuit, entre le plus haut et le plus bas niveau est de 0,66 USD/10 kWh (soit 0,066 USD/kWh). Les coûts correspondants pour l'énergie consommée, par km, sont déterminés sur les ordonnées et reportés sur le tableau (3).

(3) Coûts de l'énergie pour HEV et ICE

HEV utilisant l'électricité	0,01000 USD/km
HEV utilisant l'essence	0,03720 USD/km
ICE utilisant l'essence	0,05115 USD/km



2

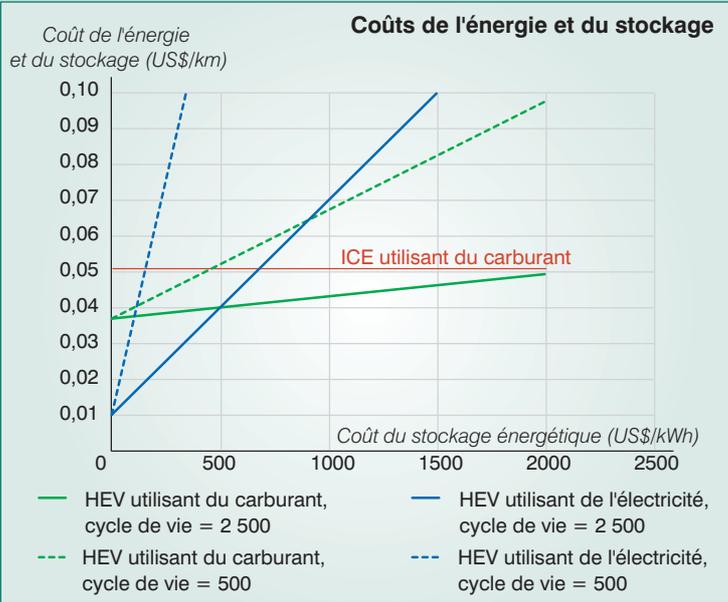
Cette figure donne les coûts de remplacement pour la batterie de stockage de l'énergie en faisant l'hypothèse que ces coûts sont amortis par km sur le temps de vie de la batterie.

Elle doit évidemment être utilisée sur une base théorique. Des résultats pratiques de mesures effectives doivent lui être substitués dans la mesure du possible. On voit sur cette figure qu'une batterie à 1 000 USD/kWh, qui donne 2 500 cycles, aura le même coût de remplacement qu'une batterie à 200 USD/kWh qui donne 500 cycles. Ce qui est évidemment à prévoir.

D'autres possibilités ont été étudiées car ce système série – parallèle, comme d'ailleurs tous les systèmes hybrides, permet une grande souplesse d'utilisation. De nombreuses alternatives peuvent être construites [11]. L'hybridation permet l'électrification du système d'entraînement à divers degrés. La possibilité d'avoir des systèmes électriques avec des tensions multiples, afin d'obtenir des énergies et des puissances plus élevées qu'aujourd'hui, a soulevé un grand intérêt ces dernières années. Les systèmes incluent la tension standard de 12 V et d'autres plus élevées, en général 42 V, qui permettent de supporter diverses nouvelles fonctions électriques : pompes électriques, direction assistée électrique, « X-by-wire »,

contrôle électrique de catalyseur, démarreur - alternateur intégré, nouveau type de contrôle moteur thermique, etc. Les multitensions permettent, en fonction des charges requises, d'obtenir de meilleurs rendements.

Ces systèmes sont alimentés par une génératrice accouplée au moteur thermique, ce qui permet aussi un démarrage plus silencieux et plus rapide. Le système 42 V autorise aussi le développement de fonctionnalités difficilement réalisables avec 12 V et la réduction significative des courants et des pertes associées. Ces systèmes sont hybrides au sens de la définition, lorsque le système électrique est utilisé pour la traction, le ralenti et / ou la récupération.



3

La figure 3 combine les coûts moyens pour l'énergie de la figure 1 et les coûts variables pour le stockage de l'énergie de la figure 2.

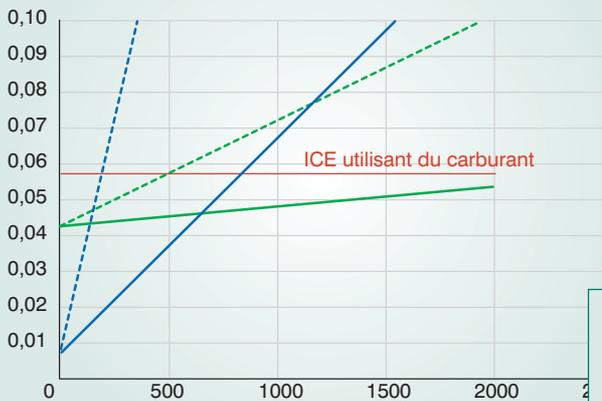
Pour le véhicule conventionnel ICE c'est évidemment une constante à 0,05115 USD/km indépendants des coûts du stockage. À noter les deux courbes des coûts de HEV utilisant l'électricité. Elles coupent les ordonnées (pour des coûts de stockage de 0) à 0,01 USD/km, qui est simplement le coût de l'énergie. Pour des coûts de stockage supérieurs à 0, les coûts par km augmentent. À noter aussi, à partir de ces deux courbes, qu'une batterie à 200 USD/kWh qui donne 500 cycles a le même coût de 0,07 USD/km qu'une batterie à 1 000 USD/kWh qui donne 2 500 cycles.

Le coût total des HEV qui utilisent l'essence, les deux courbes sur la figure 3, exige une hypothèse supplémentaire. Nous supposons que dans les HEV qui utilisent l'essence, la batterie a deux objectifs :

- la récupération de l'énergie de freinage électrique
- permettre l'utilisation du moteur à combustion dans des conditions optimales.

Ceci représente l'hypothèse de base du tableau (1). La consommation HEV, utilisant du carburant, est de 4 l/100 km tandis que le véhicule conventionnel consomme 5,5 l/100 km. Pour déterminer les coûts de stockage de l'énergie électrique, il est nécessaire de savoir comment la batterie sera utilisée par rapport à l'énergie totale

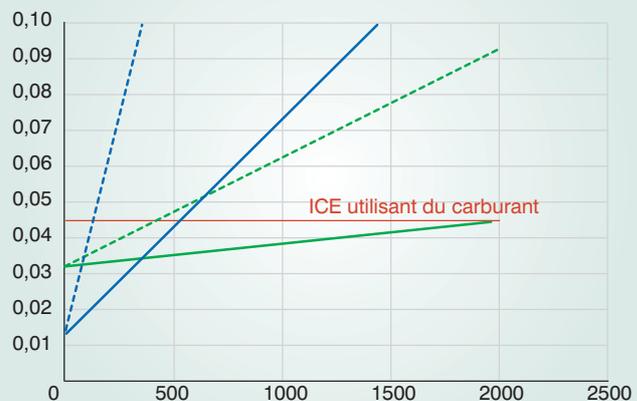
Coûts totaux de l'énergie et de son stockage en France



4

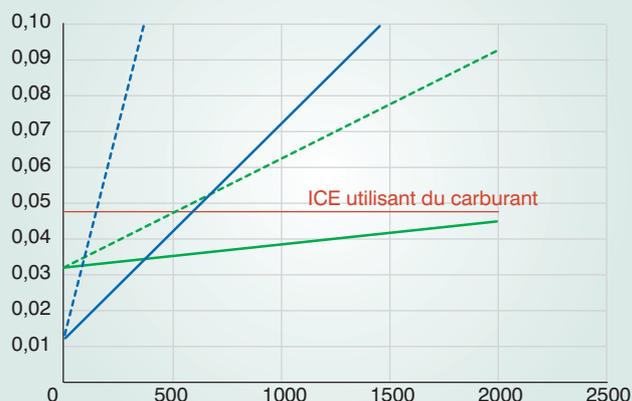
fournie par le moteur thermique. Cette fraction est déterminée directement par la stratégie de contrôle. Pour la figure 3, nous supposons que 10 % de l'énergie délivrée sur la route a été cyclée à travers la batterie. Les figures 4, 5, 6 et 7 donnent les coûts de l'énergie avec le stockage en France, Suisse, Allemagne et États-Unis.

Coûts totaux de l'énergie et de son stockage en Suisse



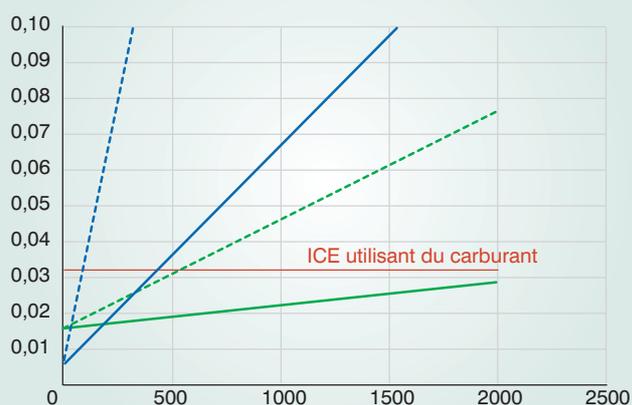
5

Coûts totaux de l'énergie et de son stockage en Allemagne



6

Coûts totaux de l'énergie et de son stockage aux États-Unis



7

Conclusion

Avec ces hypothèses, les résultats qui concernent les coûts peuvent être résumés de la façon suivante :

(1) Lorsqu'on utilise de l'essence, HEV avec batterie de 500 USD/kWh qui délivre 500 cycles ou une batterie de 200 USD/kWh qui délivre 2 500 cycles donnera un coût total de l'énergie et du stockage d'environ 0,05 USD/km. Ce qui est très proche des coûts obtenus avec un véhicule conventionnel.

(2) Lorsqu'on utilise de l'électricité, les coûts de l'énergie et du stockage de HEV seront inférieurs aux coûts obtenus avec un ICE si

a. la batterie a 500 cycles et coûte moins de 140 USD/kWh

b. la batterie a 2 500 cycles et coûte moins de 700 USD/kWh.

Les objectifs 2 sont difficiles, mais ne semblent pas impossibles à atteindre. La situation 1 est immédiatement réalisable avec les bénéfices importants d'émissions associés aux HEV.

Nous voyons que le mode électrique sur véhicule hybride et électrique, est plus coûteux, au km, que le mode thermique. À moins que les coûts de la batterie, ou plutôt du système batterie, soient inférieurs aux limites mentionnées, qui sont difficiles à atteindre. Le mode thermique hybride, à plus faible consommation, est nettement plus avantageux que dans un véhicule conventionnel et, dans ce cas, le système batterie peut aussi être plus coûteux.

Beaucoup de points positifs pour les véhicules hybrides

Le véhicule hybride peut être utilisé pour parcourir de courtes distances au moyen de la batterie. Pour les distances plus longues, il y a la possibilité de faire le plein de carburant comme un véhicule conventionnel. Les hybrides produisent moins d'émissions et ont une meilleure consommation que les CV sur les longs trajets et ont la même quantité d'émissions que les véhicules électriques sur les courtes distances.

L'hybride offre le même sentiment de sécurité que le CV en ce qui concerne l'autonomie et la recharge. Aussi, sur les longs trajets, une partie peut être effectuée avec l'électricité. L'hybride permet une électrification plus importante des km parcourus que les véhicules électriques. La comparaison des rendements et des émissions est également favorable aux versions hybrides [2] [13]. Il faut noter que le poids de la batterie dans les véhicules hybrides et dans les véhicules électriques peut rapidement devenir un handicap [14].



En résumé, le véhicule hybride :

- permet l'utilisation de nouvelles fonctionnalités électriques ou au moins une utilisation plus rationnelle des systèmes électriques.
- électrifie des trajets importants.
- réduit les consommations de carburant par une utilisation plus efficace du moteur thermique, par la récupération, par l'utilisation judicieuse des batteries.
- réduit les émissions de CO₂.
- réduit les émissions de gaz nocifs : CO, NOx, H-C.
- donne le même sentiment de sécurité concernant l'autonomie que les véhicules conventionnels.
- donne une autonomie supérieure aux CV et aux BOEV.

- donne un confort supérieur par l'utilisation de CVT électronique ou électromagnétique.

Les véhicules hybrides comprennent plus de composants que les véhicules conventionnels. Un concept et une construction doivent être recherchés, en fonction des missions requises pour minimiser les coûts, qui bien sûr ne doivent pas dépasser de façon significative ceux des véhicules conventionnels. Les conditions requises pour cela sont analysées séparément. S'ils prennent en compte ces conditions, les véhicules hybrides pourront être vendus en quantité et avoir un impact sensible sur l'environnement.

Robert Apter

Bibliographie

- [1] B. Arnet, M. Jufer, Motor short-circuit on vehicles with multiple drives, *EVS 14*, 1998.
- [2] S. Friedman et al., Potential of series and parallel hybrid vehicles to improve mobility, *Proceeding Conference FISITA*, 1998.
- [3] C. Anderson, E. Petit, The effect of APU characteristics on the design of hybrid control strategies for hybrid electric vehicles, *SAE paper 950493*, 1995.
- [4] J.S. Reuyl, NEVCOR, California test case: success or are modifications needed ?, *5th Int. Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lisbon, Portugal, July 1999*.
- [5] Akira Nagasaki et al., Development of the hybrid/battery ECU for the Toyota hybrid system, *SAE paper 981122*, 1998.
- [6] S. Sasaki et al., Toyota's newly developed electric-gasoline engine hybrid powertrain, *EVS 14*, 1998.
- [7] K. Yamaguchi et al., Development of a new hybrid system. Dual system, *SAE paper 960231*, 1996.
- [8] W. Kriegler et al., Mechanische oder elektrische CVTs, ein Ausblick, *VDI-Bericht 1418*, p.525, 1998.
- [9] J. Mayrhofer et al., A hybrid drive based on a structure variable arrangement, *EVS 12*, p. 189, 1994.
- [10] S. Moore, M. Ehsani et al. A charge sustaining HEV application of the transmotor, *SAE paper 1999-01-0919*, 1999.
- [11] M. Schmidt, Input-split, parallel, hybrid transmission, *US-patent 5,558,588*, 1996.
- [12] J.S.Reuyl, Nevcor, Policy implications of hybrid-electric vehicles, *Rapport NREL*, April 1996
- [13] R.Apter, C.Finidori, M.Präthaler, Impact des véhicules hybrides sur l'environnement, *GEVIQ, Colloque national Génie électrique Vie et Qualité, Marseille 21-22 Mars 2000*.
- [14] W. Buschhaus, A.K.Jaura, M.A.Tamor, P2000LSR-Ford systematic and integrated HEV development program, *VDI-Berichte nr.1459*, 1999, page 123-135.

L'auteur

Robert APTER, a dirigé le projet Swatchmobile de développement d'un nouveau véhicule hybride/électrique avec DaimlerChrysler.

Contact

Robert Apter
Yverdon (Suisse)
tél +41 24 4266326 / +41 79 6000631, fax + 41 24 4267160, e-mail : robertapt@hotmail.com

La nouvelle vague de véhicules hybrides au Japon

Au Japon, le MITI (Ministry of International Trade and Industry) prévoit une réduction de la consommation des moteurs essence de 23 % entre 1995 et 2010. Les constructeurs automobiles japonais travaillent très sérieusement au développement de véhicules moins polluants et plus économiques. Après la domination du moteur thermique en raison de ses performances, et l'utilisation presque exclusivement urbaine de la voiture électrique du fait de sa faible autonomie, voici venue l'ère du véhicule hybride qui allie le meilleur des deux principes. D'utilisation très simple pour le conducteur, le véhicule hybride fait en réalité appel à une technologie particulièrement complexe.

Afin d'encourager les constructeurs automobiles à accélérer le développement de véhicules moins polluants, les pays industrialisés fixent des objectifs très fermes en matière de réduction des émissions gazeuses. Les moteurs à essence régissent en maître en terme d'accélération et de vitesse de pointe, tout en pêchant par leurs émissions polluantes et leur consommation élevée. Les moteurs électriques se distinguent par un excellent rendement avec une pollution restreinte, mais leur faible autonomie bouleverse les habitudes du conducteur. Ceci explique l'emploi essentiellement urbain de la voiture tout électrique. De ce constat est né le concept de véhicule hybride, qui utilise un système de propulsion à la fois thermique et électrique, le second intervenant en cas de faible rendement du premier.

Pionnière, la Prius de Toyota

Fin 1997, Toyota commercialisait la Prius, premier véhicule hybride de quatre places capable de parcourir 28 km au litre d'essence. L'excellent chiffre

d'affaires réalisé cette année-là avait permis à Toyota de vendre ce modèle à perte, au prix de 2,15 millions de yen au lieu des 3 à 4 millions estimés. Considérant que la voiture hybride bouleverserait l'industrie automobile dans un futur très proche, Toyota était bien décidé à prendre de l'avance sur ce marché. Deux ans plus tard, les ventes allaient au-delà des prévisions et dépassaient les 30 000 unités. Ces résultats encouragèrent le MITI à élargir son aide, tout d'abord allouée au développement de voitures électriques, au domaine des véhicules hybrides. Cette aide prend en charge la moitié du dépassement du prix du véhicule écologique par rapport au prix d'un véhicule à essence de même catégorie. Elle est par exemple de 550 000 yen pour la Prius. La Prius possède un système THS (Toyota Hybrid System) qui contrôle de façon automatique l'intervention de l'un ou l'autre système de propulsion suivant les circonstances : électrique en ville et thermique aux vitesses plus élevées. Elle sera commercialisée en Europe au courant de l'année.

L'Insight de Honda : d'excellentes bases technologiques

Honda fut le premier à suivre l'exemple de Toyota en lançant l'Insight, véhicule à deux places qui parcourt 35 km au litre. Sa conception est basée sur les points forts du constructeur qui détient le moteur essence le plus puissant au monde : un système électronique IMA (Integrated Motor Assist) est associé aux qualités remarquables du moteur thermique VTEC (Variable valve Timing and lifting Electronic Control) qui délivre 250 chevaux pour 2 litres de cylindrée. La version hybride, sur une base de trois cylindres d'une cylindrée totale de 1 litre, optimise la consommation en sacrifiant les performances, mais déploie tout de même 70 chevaux. La Prius ne délivre, elle, que 58 chevaux pour une cylindrée de 1,5 litre.



La Prius a été le premier véhicule hybride de série. Sa motorisation est de type parallèle.

Dans le concept IMA, le moteur électrique est enclenché ou arrêté en fonction du régime du moteur thermique : phase d'accélération, de freinage ou vitesse de croisière ; il fait office de générateur, en récupérant l'énergie cinétique lors des freinages. Ce moteur électrique sans balai (ultra-fin à courant continu) est installé entre le moteur thermique et la transmission, ce qui réduit de façon significative la complexité et le poids du système de propulsion. La réduction du nombre de modules des batteries, du



La combustion dans les moteurs à mélange pauvre produit d'importantes quantités d'oxydes d'azote (NOx) qui sont difficiles à traiter. Honda a développé sa propre technologie LEV (Low Emission Vehicle). Dans ce système, les NOx sont séparés des autres gaz avant d'être adsorbés par un catalyseur qui réduit sélectivement les NOx en N₂.



Le mode 10-15 japonais

Cette procédure officielle évalue l'efficacité d'une voiture. Elle dure 660 secondes et comporte deux phases : un test initial de pause au démarrage (de 24 secondes) est suivi d'une première phase de trois cycles successifs (de 134 secondes chacun) qui simule la conduite en ville. La seconde phase simule la conduite rapide sur axes routiers et correspond à un cycle unique de 234 secondes. La vitesse et le temps de parcours des montées, palliers et descentes sont enregistrés au cours des différents cycles.

type nickel métal hydrure, participe également à l'allègement de l'ensemble. La gestion de l'énergie est assurée par le PCU (Power Control Unit), qui optimise l'activité du moteur électrique et le stockage de l'énergie dans ces batteries.

Les prototypes hybrides commercialisés

Chaque constructeur japonais possède actuellement son prototype hybride, si bien qu'une vague de modèles devrait envahir le marché nippon d'ici 2001. Suzuki propose par exemple le Pu3-Commuter qui possède trois prototypes de ville : essence, hybride, électrique. La version hybride détient le record de consommation du véhicule à deux places : 39 km/l en mode 10-15 japonais. Comme dans l'Insight, le moteur électrique est situé entre le moteur thermique à mélange pauvre et la transmission continue.

Spécialiste des petites voitures, Daihatsu a développé la Move EV-HII, une quatre places particulièrement légère et compacte grâce à sa carrosserie entièrement en aluminium et à la réduction du volume et du poids des batteries. Son moteur incorpore la technologie DVVT (Daihatsu Variable Valve Timing), qui réduit l'équipement électrique du système tout en gardant un bon rendement puisque le Move parcourt 37 km au litre en mode 10-15. Le dispositif électrique est réduit davantage encore dans la SUV Advance de Mitsubishi, modèle à cinq places, pour n'intervenir qu'au démarrage. Les performances remarquables du moteur thermique GDI-HEV, inspi-

ré de la série GDI-Sigma, et un système de transmission continue permettent d'allier puissance et rendement élevés : 105 chevaux pour 1,5 litres de cylindrée, la voiture parcourant 31,5 km/l.

Deux moteurs électriques

La grande nouveauté du prototype monospace hybride de Toyota HV-M4, un modèle à six places et quatre roues motrices, réside dans l'installation d'un second moteur électrique synchrone à aimant permanent, destiné à décentraliser le système de propulsion. L'un des moteurs électriques est placé en amont du moteur thermique pour imprimer la propulsion aux roues avant, tandis que l'autre participe à l'accélération des roues arrières lorsque celle-ci devient nécessaire. La présence de deux moteurs électriques améliore également l'efficacité de la récupération de l'énergie cinétique. Le volume et le poids des batteries sont réduits par rapport à la Prius, libérant plus d'espace dans le coffre.

Le prototype de quatre places Elten Custom de Subaru possède également deux moteurs électriques qui sont reliés au moteur thermique et à la transmission continue via un convertisseur de couple. Le système de propulsion est très compact. Quant à Nissan, ce constructeur a installé le système de propulsion NEO Hybrid sur sa Tino Hybrid avec deux moteurs

Deux systèmes d'entraînement : hybride série et hybride parallèle

Dans l'hybride série le moteur à combustion est connecté à une génératrice productrice d'électricité. L'énergie électrique est stockée ou utilisée pour entraîner un ou deux moteurs électriques qui propulsent le véhicule.

Dans l'hybride parallèle, les moteurs thermique et électrique sont liés aux roues ; le premier est utilisé à vitesse élevée, le second participe aux accélérations et à la récupération et peut intervenir dans les côtes et au démarrage. Des variantes de ces systèmes sont à l'étude pour améliorer les performances, les rendements et le confort, tout en réduisant la taille des moteurs et des batteries.



Comparaison de différents modèles hybrides							
Prototype	TOYOTA Prius	HONDA Insight	SUZUKI PU3 Commuter	SUBARU Elten Custom	DAIHATSU Move EV-Hil	MITSUBISHI SUW-Advance	NISSAN Tino Hybrid
Longueur (mm)	4 275	3 940	2 675	3 440	3 395	3 880	4 264
Capacité (nbre de places)	4	2	2	4	4	5	5
Poids (kg)	1515	820	600	980	780	980	1 775-1 920
Moteur thermique	4 cylindres DOHC en ligne INZ-FXE	3 cylindres SOHC en ligne ECA-MF2	3 cylindres DOHC en ligne	4 cylindres DOHC en ligne		GDI-HEV	4 cylindres QG18DE
Cylindrée (l)			0,66	0,66	0,66	1,5	1,8
Puissance max. (ch DIN-tr/mn)	58 à 4 000	70 à 5 700		42 à 6 000	40 à 5 000	105	101 à 5 200
Couple maximum (kg.m-tr/mn)	10,4 à 4 000	9,4 à 4 800		5,1 à 5 000	5,8 à 5 000	14,3	14,4 à 4 000
Consommation en mode 10-15 (km/l)	28	35	39	33	37	31,5	
Moteur électrique	Tous les moteurs électriques sont de type synchrone à aimant permanent						
Puissance maximale (kw-tr/mn)	30 entre 940 et 2 000	10 à 3 000		8,5	18		17
Nature des batteries	Nickel-metal hydrure	Nickel-metal hydrure		Nickel-métal hydrure	Nickel-métal hydrure	Lithium-ion	Lithium-ion

électriques : le premier assure le démarrage, le second fournit l'énergie nécessaire à la mise en route du moteur thermique et sert de générateur des batteries au lithium-ion. La technologie CVTC (Continuous variable Valve Timing Control) donne de meilleurs rendements car elle augmente le taux de compression en contrôlant l'ouverture des soupapes.

Les piles à combustible

Les connaissances acquises au cours de la mise au point des véhicules hybrides seront autant d'atouts dans la course au développement de véhicules utilisant des piles à combustible. Ces voitures devraient faire preuve d'une grande autonomie avec des taux d'émissions très faibles comparés aux véhicules thermiques, grâce à l'assistance de batteries électriques et de systèmes de récupération de l'énergie cinétique. Alors que les constructeurs japonais sont encore divi-

sés sur le choix des batteries -lithium-ion pour Mitsubishi et Nissan ou nickel-métal-hydrure pour les autres- l'utilisation de piles à combustible ne devrait pas nécessiter de modification technologique importante du dispositif électrique mis au point pour les véhicules hybrides.

Bien conscients du fait que la préservation de l'environnement constitue l'une des préoccupations majeures de l'opinion publique, les constructeurs automobiles s'efforcent de développer des véhicules moins polluants afin d'améliorer leur image de marque, et donc leur résultats commerciaux. Sachant qu'au niveau mondial l'industrie automobile génère un chiffre d'affaire annuel de 1 000 milliards de dollars, on peut s'attendre à une explosion du marché de la pile à combustible. Il devrait s'ouvrir en 2003.



Beaucoup d'hybrides chez les constructeurs japonais

Japon

Le 10 décembre 1997, Toyota surprenait le monde en commercialisant la Prius (4 places), le premier véhicule hybride.

Sans que le conducteur n'ait à se soucier de la recharge des batteries, ce type de voiture fait appel à l'électricité pour seconder le moteur thermique durant les phases où il a un faible rendement comme le démarrage, la conduite en ville, etc. Toyota établissait alors un record d'efficacité (28 km/l), qui allait tenir près de 2 ans.

Parmi ses concurrents, Honda a été le plus rapide en sortant, le 1^{er} novembre 1999, l'Insight (2 places), le second véhicule hybride de série pouvant, lui, effectuer 35 km/l.

Ce nouveau record est principalement dû à l'avènement de moteurs thermiques à mélange pauvre plus efficaces, ainsi qu'à l'allègement des véhicules par l'emploi massif de l'aluminium. Maintenant, chacun des constructeurs automobiles japonais possède son propre prototype de véhicule et on peut s'attendre à une vague de véhicules hybrides performants d'ici 2001. Pour information, les prototypes Pu3-Commuter de Suzuki (2 places), Move EV-II de Daihatsu (4 places), Elten Custom de Subaru (4 places) et la SUW Advance de Mitsubishi (5 places) parcourent respectivement 39 km/l, 37 km/l, 33 km/l et 31,5 km/l. Nissan, qui tient ses essais sur route depuis avril 1999, a prévu de vendre sa Tino Hybrid (5 places) en série limitée au début de l'année 2000. Toyota, quant à lui, reste au-dessus du lot et prépare déjà la sortie de son deuxième véhicule hybride, la HV-M4 (6 places), qui sera à la fois le premier monospace hybride et le premier véhicule hybride à quatre roues motrices.

L'hybride de Honda passe les tests américains haut la main

Japon - États-Unis

Honda, fax : +81 3 5412 1515

L'agence de la protection environnementale américaine (US EPA, Environmental Protection Agency) déclare que la version

deux places de l'Insight, véhicule hybride de Honda sorti le 1^{er} novembre 1999 au Japon, est la voiture la plus économe parmi celles devant être commercialisée en 2000 aux États-Unis. Les tests sur autoroute ont montré que la voiture effectuait 29,8 km avec un seul litre d'essence, alors qu'en ville elle pouvait en faire 25,9. Ces chiffres font désormais office de records auprès de l'EPA pour les véhicules de cette catégorie (comprenant entre autres l'Avalon de Toyota et la 626 de Mazda).

Cette voiture est dotée du moteur thermique VTEC, d'une cylindrée de 1 litre mais d'une puissance de 125 chevaux, et d'un moteur électrique qui assiste le moteur thermique dans les accélérations et dans la conduite en ville. Le châssis de la voiture est en aluminium extrudé, de 40 % plus léger que son homologue en acier usuel.

Les valeurs de consommation ont été obtenues avec les test 10-15 japonais, ce qui explique les différences avec les valeurs américaines.

Sortie de la Pistachio, thermique aussi performante que les hybrides

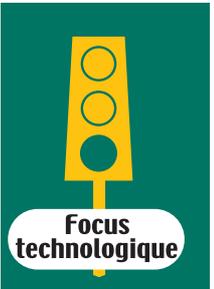
Mitsubishi Motors, fax : +81 3 5232 7747

ASG. Cette voiture est la plus petite au monde fonctionnant avec un moteur essence à mélange pauvre, lui permettant d'effectuer 30 kilomètres avec un seul litre d'essence. La Pistachio est donc la voiture la plus économe au monde fonctionnant à l'essence uniquement, et se permet même de surclasser la Prius de Toyota, qui consomme 28 km/l. Son moteur GDI-ASG, doté de 4 cylindres en ligne et d'une cylindrée de 1 100 cm³, possède les dernières améliorations de la technologie GDI de Mitsubishi. Il dispose notamment d'un système d'arrêt automatique qui fait démarrer le moteur moins de 0,1 s après que le conducteur a effleuré la pédale des gaz, et cela indépendamment de la dextérité du pilote. Son poids inférieur à 1 000 kg contribue aussi largement au record. Le prix de vente de la Pistachio a été fixé à 950 000 yen, alors que les véhicules hybrides Insight (35 km/l) et Prius (28 km/l) valent respectivement 2,10 et 2,15 millions de yen. Grâce à sa technologie GDI, Mitsubishi Motors a réussi à mettre au point un véhicule essence aussi performant que les véhicules hybrides, mais revenant moins de deux fois moins cher.

Japon

Mitsubishi a débuté le 27 décembre 1999 la vente de la Pistachio, son dernier véhicule compact doté du moteur GDI-

L'ère des multimatériaux



Les matériaux jouent un rôle majeur dans l'industrie automobile, de la conception d'un véhicule à son recyclage. Néanmoins, il s'agit d'un sujet qui, s'il suscite beaucoup de débats, connaît curieusement la progression la moins rapide de cette industrie. Aluminium, magnésium, plastique, composites, polymères, font régulièrement la une et pénètrent progressivement nos voitures. Pour autant, les nouveaux matériaux n'y sont pas encore nombreux et font figure d'un serpent de mer réapparaissant au gré des modes. À l'origine de ce phénomène, les fortes contraintes auxquelles est soumise cette industrie. Résultat : les constructeurs cherchent de plus en plus à utiliser le bon matériau à la bonne place, une règle qui fait entrer l'automobile dans une nouvelle ère, celle des multimatériaux.

L'exercice salutaire auquel devraient se livrer plus souvent les experts et les spécialistes, toutes disciplines confondues, est celui qui consiste à se replonger dans les rapports prospectifs publiés il y a dix, quinze, voire vingt ans. Le résultat d'une telle démarche est en général très instructif. En effet, que de prévisions erronées, que de solutions avortées, que de choix différés sont enfouis à tout jamais au tréfonds de ces documents pourtant labellisés à l'époque où ils furent rédigés. L'industrie automobile ne fait pas exception. Pour s'en convaincre, il suffit d'ouvrir quelques-uns de ces rapports publiés par les plus grands constructeurs mondiaux il y a seulement une dizaine d'années. Ainsi, l'un d'eux prévoyait qu'en l'an 2000 nos voitures ne comporteraient plus que 35 % d'acier. L'exemple est édifiant car aujourd'hui la quasi-totalité de nos véhicules sont principalement métalliques avec un pourcentage qui tourne autour de 70 %, dont 5 à 8 % d'aluminium. S'il est vrai que les nouveaux matériaux ont fait quelques apparitions permettant de réaliser de petites évolutions, globalement, depuis une dizaine d'années, c'est la stabilité qui règne au niveau des matériaux dans l'industrie automobile, une stabilité qui s'explique principalement par les contraintes spécifiques de ce marché.

Une des composantes d'un vaste système interactif

Rappelons tout d'abord que l'automobile représente un énorme marché ce qui correspond à un poids colossal en matériaux. On comprend dès lors que beaucoup de fournisseurs s'y intéressent de très près. Dans ces conditions, il est difficile pour les constructeurs, sans cesse confrontés à une très large gamme de produits, de définir et de choisir les matériaux des voitures de demain, d'autant plus que ces choix sont tributaires d'un très grand nombre de critères, évidemment techniques, mais aussi économiques et socio-culturels. Quel qu'il soit, chaque matériau représente une filière qui commence à s'ébaucher à l'état de minerai et va passer, progressivement, par différentes étapes (élaboration, transformation, etc.) avant d'être commercialisé sous la forme d'un produit, en l'occurrence un véhicule. Néanmoins, la filière ne s'arrête pas là. Durant l'utilisation du véhicule, il faut en effet continuer à s'intéresser au comportement du matériau. Enfin arrive l'étape du recyclage. Or tout au long de ces différentes étapes, il va falloir prévoir et anticiper en permanence tant au niveau technique que sur des aspects plus économiques ou financiers (coûts), voire même géopolitiques (approvisionnements en matières premières).



Tout ceci constitue autant de contraintes qui vont donc influencer fortement sur le choix initial du constructeur. Élément important dans la création d'un nouveau modèle de voitures, le matériau n'est en effet qu'une des composantes d'un vaste système interactif. Ainsi, il est impossible de parler d'un matériau sans évoquer la façon de le transformer. Car aussi excellent soit-il en laboratoire, un matériau n'a pas d'avenir industriel si l'on ne sait pas en faire une pièce qui, assemblée à d'autres pièces, deviendra un véhicule. D'où la nécessité pour le constructeur de connaître parfaitement les propriétés d'un matériau afin de pouvoir le transformer. Sait-on emboutir tel ou tel matériau ? Sait-on l'assembler ? Connaît-on les traitements thermiques utilisables ? Faut-il le forger ? Doit-on le fabriquer à la fonderie ? Quand un constructeur décide de lancer un nouveau modèle de voiture, il doit également savoir quel est son comportement dans le temps, c'est-à-dire sur environ une quinzaine d'années. Or, il est certain que de telles contraintes ne facilitent pas l'arrivée de matériaux nouveaux dont on ne connaît pas forcément très bien les propriétés.

Des contraintes qui freinent l'innovation

Autre contrainte particulièrement importante pour les constructeurs, leur très grande dépendance, qui ne cesse de s'accroître, vis-à-vis de leur réseau d'équipementiers. Étant donné qu'il existe de plus en plus de matériaux très différents mais également de plus en plus de technologies qui y sont associées, un constructeur ne peut plus raisonnablement maîtriser l'ensemble d'une filière. Aussi doit-il s'entourer d'un solide réseau de transformateurs et d'équipementiers. Mais un tel contexte interdit à un constructeur de s'engager dans une « solution matériau » nouvelle s'il ne dispose pas des compétences en interne ou s'il ne trouve pas le transformateur adéquat. Difficile alors de privilégier l'innovation.

Les multiples réglementations concernant principalement la sécurité, mais aussi la protection de l'environnement, pèsent également fortement dans le choix des matériaux lors de la conception d'un nouveau modèle de voiture. Il faut rappeler qu'à l'horizon 2015, 95 % d'une automobile devront être recyclés

dont seulement 5 % par voie énergétique. Dès 2005-2006, ce pourcentage devra atteindre 85 % alors qu'il n'est aujourd'hui que de 75 %. Aussi pour un nouveau matériau utilisé faut-il se soucier dès le début de son devenir jusqu'au recyclage. Or la tendance actuelle des multimatériaux est particulièrement contraignante pour cette étape du recyclage.

Autre influence importante sur le choix des matériaux : les souhaits particuliers du client qui reposent essentiellement sur le coût et le confort. Pour un matériau d'intérieur notamment, il faudra prendre en compte des critères très subjectifs comme le toucher, la couleur ou encore l'odeur. Enfin, il reste un critère qui tient un rôle important dans l'industrie automobile que l'on appelle l'effet de série. Il faut savoir qu'un grand constructeur produit aujourd'hui un véhicule chaque minute. Or pour produire aussi rapidement, de très gros investissements sont nécessaires ce qui conduit à une certaine rigidité de la part du constructeur vis-à-vis du client - mais aussi de son service marketing - qui, de son côté, souhaiterait voir les modèles changer plus rapidement.

Alléger les voitures : l'exemple de l'A2

Pour autant, la distribution des matériaux à l'intérieur d'une automobile évolue progressivement en fonction des questions auxquelles les constructeurs doivent apporter des solutions. Première de ces questions : le poids. L'accroissement de la sécurité et du confort (ABS, vitres électriques, sièges, climatisation, etc.) a joué un rôle important dans l'alourdissement avéré des voitures actuelles. Aussi, l'objectif n'est-il plus de réduire leur poids mais d'éviter qu'il augmente. Rappelons que l'on peut économiser 5 à 6 % sur la consommation d'un véhicule en gagnant 10 % sur la masse, ce qui est énorme et difficile à réaliser. Pour alléger une automobile, il existe actuellement plusieurs solutions.

La principale d'entre elles : l'utilisation de l'aluminium, à la fois dans la structure mais aussi dans les pièces de pont. L'Audi A2, présentée en 1999 par le constructeur allemand, est sans doute le plus bel exemple actuel de réussite en matière d'allègement. Développé il y a cinq ans, le concept Audi Space Frame (ASF) qui fait appel



à l'aluminium, après avoir été appliqué à la luxueuse A8, permet aujourd'hui à l'A2, véhicule de moyenne gamme, d'être la plus légère de sa catégorie avec un poids à vide inférieur à 900 kg, soit environ 150 kg de moins que les voitures classiques de son segment. L'avance technologique prise par Audi est d'autant plus importante que l'aluminium se prête nettement mieux que l'acier au recyclage.

À côté de l'aluminium, l'acier constitue lui aussi une excellente solution pour alléger la structure des voitures. Les constructeurs utilisent alors des aciers spéciaux à haute limite d'élasticité. Il faut savoir que grignoter un dixième sur l'épaisseur d'une tôle permet de gagner 10 % au niveau du poids. Seul problème : en augmentant ses caractéristiques mécaniques, la mise en forme et l'assemblage sont beaucoup plus difficiles.

Magnésium, plastique, composites

Généralement, chaque constructeur automobile se focalise sur quelques pièces. Ainsi, Renault a systématisé les ailes en thermoplastique. Les deux ailes avant de la Clio permettent ainsi de gagner trois kilos. Désormais, les capots en aluminium sont de plus en plus utilisés et vont se généraliser au cours des prochaines années. Quant au plastique, il est très présent dans la New Beetle de Volkswagen. Pour sa part, la Smart est l'un des premiers véhicules équipés de panneaux en plastique colorés dans la masse. Seul inconvénient : leur résistance au vieillissement solaire n'étant pas suffisante, il a fallu les recouvrir d'un vernis pour les protéger.

Autre matériau dont l'utilisation ne cesse d'augmenter : le magnésium. Il faut rappeler qu'après la seconde guerre mondiale, la coccinelle de Volkswagen contenait déjà 18 kg de magnésium. Abandonné très rapidement pour des problèmes d'usure et de corrosion qui, depuis, ont été réglés, ce matériau revient en force. Ainsi, tous les volants sont aujourd'hui en magnésium, de même que certaines pièces comme le support de colonne de direction. Chez Fiat, il existe des traverses de planche de bord en magnésium. Enfin, le coupé Mercedes est équipé de sièges dont la structure est également en magnésium. Observation particulièrement intéressante : la prise de capitaux

par des grands constructeurs automobile - General Motors, Ford et Volkswagen notamment - dans des entreprises productrices de magnésium.

Côté composites, les constructeurs les utilisent déjà dans la carrosserie et le châssis. L'Espace est un magnifique exemple de carrosserie en composites classiques (SMC). Certains constructeurs et équipementiers travaillent sur des carters de crémaillère de direction en composites, les uns utilisant des polyamides, d'autres faisant appel à des graphites epoxy. Pour sa part, le Range Rover est doté de bras de suspension en composite, dont les extrémités en aluminium sont coulées directement sur le composite. D'ores et déjà, des lames de ressort en composites sont en production chez Renault/Volvo. Quant à Nissan, il a équipé l'essieu arrière de sa Vanette d'une lame composite.

La répétabilité, une notion capitale

Progressivement, l'automobile entre donc dans une nouvelle ère, celle des multimatériaux. À plus ou moins long terme, l'aluminium et sans doute les composites pourraient être utilisés dans la fabrication des suspensions afin d'alléger encore un peu plus le poids des véhicules. Le plastique et des associations plastique/aluminium devraient également entrer peu à peu dans les carrosseries et la structure des véhicules. On évoque également les composites et l'utilisation d'aciers à haute performance. Plus exotique, le domaine des mousses polymères est en plein développement. On trouve également des mousses métalliques.

Autrement dit, les idées ne manquent pas mais les constructeurs sont de plus en plus contraints en particulier par les coûts. Seule certitude : l'automobile est entrée dans l'ère des multimatériaux et sera de plus en plus un véritable patchwork. La Classe A de Mercedes et la Lupo de Volkswagen en sont une brillante illustration. Seul inconvénient des multimatériaux : l'assemblage. Par exemple, on ne sait pas encore souder des composites, d'où l'obligation de les visser. On peut néanmoins les coller. Le châssis de la Lotus Elise est entièrement collé. Mais encore faut-il qu'un procédé soit parfaitement répétable, une notion qui s'avère capitale dans l'industrie.

Jean-François Desessard



Les voitures de l'avenir prennent forme avec les composites

Les composites auront-ils leur rôle à jouer dans les voitures que nous conduirons dans le nouveau millénaire ? Pour ceux qui rêvent des voitures du futur, la conférence et l'exposition de la SAE (Society of Automotive Engineers, Association des ingénieurs de l'automobile) qui ont eu lieu à Detroit en mars, ont présenté une large palette de concepts et de composants qui pourraient se trouver sur les automobiles du XXI^e siècle. Mais, bien au-delà de la portée de ce bilan technologique annuel, les systèmes composites sont-ils considérés comme essentiels pour les voitures et les camions qui vont prendre la route ces dix ou vingt prochaines années ?

Lors de conversations avec les constructeurs, les fournisseurs de matériaux, les designers et les étudiants en ingénierie automobile, un certain nombre de thèmes communs, relatifs aux composites dans les automobiles du futur, reviennent fréquemment :

- la préparation de la résine pour les opérations à température élevée, pour un remplissage plus facile du moule dans les modèles complexes (comme les traverses de pare-chocs rainurés) et pour permettre la texturation et la coloration dans la masse (pour les panneaux de carrosserie renforcés) multipliera les possibilités d'applications des composites automobiles.
- les avantages des procédés doivent être perfectionnés, en s'appuyant sur la base de données technologique qui a déjà fait ses preuves. Par exemple, le moulage en feuilles (SMC, sheet moulding compound) bénéficie d'un riche passé alors que les procédés de moulage liquide qui comprennent le moulage renforcé par injection et réaction (RRIM, reinforced reaction injection moulding), le moulage par injection et réaction structurel (SRIM, structural reaction injection moulding) et le moulage par transfert (RTM, resin transfer moulding) offrent de belles perspectives avec des inventions performantes telles que le Projet P4 du Consortium des composites automobile (voir *Reinforced Plastics*, décembre 1998, p. 28).
- les lignes du véhicule redessiné (points de rupture entre les panneaux de carrosseries) sont plus aérodynamiques. Le design qui intègre une structure avec un profilé de carrosserie, une conception modulaire permettant de réduire le poids et l'assemblage ainsi que la fonctionnalité combinée du type de véhicule constituent les nouvelles tendances.

De nouveaux profils

Les principaux constructeurs interrogés n'envisagent pas de fabriquer une voiture tout composite. Ils estiment que les composites sont importants dans l'association des matériaux et espèrent davantage d'améliorations dans la conception, les matériaux et la fabrication. Larry Oswald, ingénieur en chef au service de la carrosserie, Liberty and Technical Affairs pour la société DaimlerChrysler de Madison Height, Michigan, USA, cite deux véhicules en cours de développement chez DaimlerChrysler, qui constituent deux extrêmes, totalement opposés, quant à l'utilisation des composites. Le CCV -dont les pan-

neaux de carrosserie contiennent 15 à 20 % de polyéthylène téréphtalate (PET) renforcé de verre- a été conçu comme un véhicule léger, simple à fabriquer, destiné à être le candidat à l'achat d'une première voiture dans les pays dont le marché est naissant (voir *Reinforced Plastics*, décembre 1997). Il fut moulé par injection en utilisant seulement quatre pièces principales.

L'Intrepid ESX2 -dont les panneaux de carrosserie sont constitués de 30 à 35 % de fibre de verre et d'un mélange de polypropylène (PP) et de polysulfone (PS)- présente une aérodynamique de pointe et une nouvelle transmission. Cette voiture est caractérisée par de grands panneaux de carrosserie thermoplastiques, renforcés à la fibre de verre et moulés par injection, combinant des structures moulées avec des surfaces extérieures rigides et des surfaces intérieures plus souples. La carrosserie collée est fixée sur un châssis plus bas qui comprend également des renforts composites pour une meilleure résistance en cas d'accidents.

Selon Oswald, le profilé optimisé de l'ESX2 constitue une aérodynamique émergente ; ce profil permet de réduire la masse de différents éléments de la transmission. « La capacité de produire des éléments de carrosserie légers et intégrés, grâce au moulage par injection sans formes angulaires difficiles à démouler, réduit le coût en termes de calcul global de pièces et d'assemblage », déclare-t-il. « Il est désormais possible de mouler presque le quart d'une voiture en une

seule opération et d'obtenir une carrosserie intégralement collée ».

L'état de surface : le défi du futur

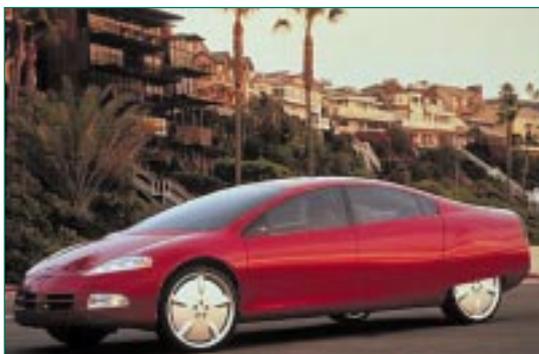
D'après Oswald, les défis pour les voitures du futur pourraient modifier l'état de surface de la classe A. Le CCV est teinté dans la masse et ne présente pas la brillance de haute qualité de la peinture au pistolet classique. De considérables efforts de recherche sont en cours chez DaimlerChrysler afin de développer des options de finis de surface grâce à des revêtements ou des films de surface, qui supprimeraient la peinture coûteuse, tout en restituant une partie de la brillance habituelle.

Ticona Of Summit, New Jersey, USA, fut l'un des principaux fournisseurs de résine pour le projet du CCV. Cette société a travaillé avec DaimlerChrysler lors de cinq itérations de préparation de résine PET Impet afin d'atteindre les objectifs du constructeur en matière de coût (3,3 \$/kg), de performance et de recyclage. Les caractéristiques clés du PET Impet sont le triplement de la force d'impact des PET traditionnels ainsi que la stabilité dimensionnelle et les capacités de moulage.

Steve Leyrer, directeur du marketing de Ticona Polyesters, signale que les pièces du CCV fabriquées en résine PET vitrifiée ont démontré que ces panneaux thermoplastiques renforcés peuvent supporter 1 800 cycles de chargement (l'équivalent de plus de 160 000 km sur route en pleine charge) et présentent des modes de défaillance anodins ; ce qui s'est traduit par une performance plus sûre après des tests rigoureux. Il vante en outre les mérites de l'intégration de la fonction structurelle/extérieure du CCV : « Nous n'avons pas eu besoin de fabriquer une voiture à l'intérieur d'une voiture ».

D'autres aspects positifs du programme auquel il fait référence : les durées de cycle courtes (3 minutes) et la possibilité de regrouper l'équipement de moulage par injection, les opérations de collage et la manipulation robotique en ligne avec une presse à emboutir dans un espace plus petit que lors des opérations traditionnelles de soudage du métal. Selon lui, les nouveaux groupes moteur vont modifier le design automobile. « En rai-

DaimlerChrysler



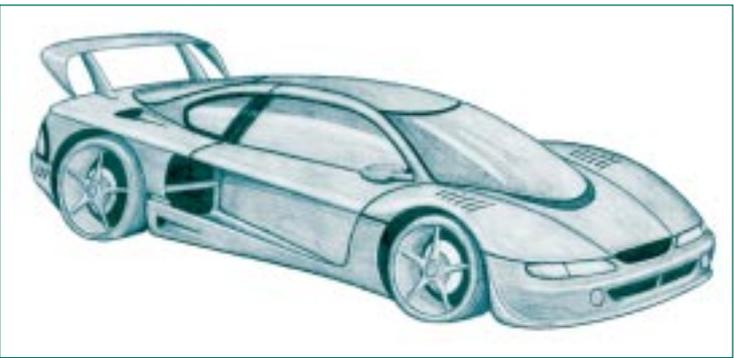
L'Intrepid ESX2, dont les panneaux de carrosserie sont constitués de fibre de verre et d'un mélange de polypropylène et de polysulfone, présente une aérodynamique de pointe



son du design plus uniforme des transmissions alternatives comme les ensembles de batteries, les véhicules ne seront pas aussi hauts verticalement ; les systèmes d'allumage vont réduire de taille également, de sorte que le cadre à l'avant de la voiture n'aura plus besoin d'être aussi large, réduisant ainsi la résistance aérodynamique. »

Selon Richard Jeryan, spécialiste technique pour les applications structurales au laboratoire de recherche de Ford Motor Co, à Dearborn, Michigan, les processus de fabrication optimisés pourrait modifier les décisions commerciales au sujet des plates-formes des véhicules. Collaborateur chez Ford depuis 1965, Jeryan a travaillé sur les composites pendant près de vingt ans. En 1995, son groupe de recherche fut le leader pour le moulage et l'assemblage du châssis du monospace de ce constructeur, un châssis à six pièces composé d'ester de vinyle/fibre de verre imprégné. « Nous pouvions justifier d'une durée de cycle de sept minutes pour le moulage par transfert de résine de ces panneaux de carrosserie, ce qui représentait une réduction considérable par rapport aux durées de cycle des fabrications de composites précédentes », se souvient-il. « On a tenu compte des données les plus intéressantes du processus de contrôle de ce programme lors de la réalisation du bac d'accumulateur en ester de vinyle/fibre de verre du Ranger ».

Plus récemment, Ford a participé avec General Motors (GM) et DaimlerChrysler au développement du procédé P4 de préformage programmable à base de poudres du Consortium des composites automobiles (Automotive Composites Consortium). « Il pourrait s'agir du procédé de préformage le plus rentable à ce jour », suggère Jeryan. Jeryan souligne que Ford utilise plus de SMC sur ses véhicules que tout autre constructeur. « Les composites offrent des possibilités de conception exceptionnelles pour les parties extérieures en élargissant les possibilités des formes ; le SMC étant remarquable pour les pièces embouties, qui ne pourraient pas être réalisées en



La GT Sport de AD&C dispose d'un châssis thermoplastique fibre de verre – fibre de carbone. La texture de surface des éléments de carrosserie améliore l'aérodynamique.

métal, telles que le capot de la Mustang 1998 », précise-il. « Les voitures du futur élargiront le développement de ces capacités à de nouvelles conceptions, et l'ensemble de nos fournisseurs continuera ses efforts pour constamment s'améliorer et livrer des pièces de haute qualité ».

Innovations pour le châssis

Les voitures de série qui seront mises en circulation ces cinq prochaines années avec un potentiel de 80 à 90 % de réalisation à l'aide des composites comprennent le coupé électrique Sunrise de Solectria Corp de Wilmington, Massachussets (qui présente des panneaux de carrosserie en sandwich alternant fibre de verre et fibre de carbone/acrylique ainsi qu'un châssis d'une pièce en fibre de carbone et de verre RTM), de même que le monospace électrique Sparrow pour les petits trajets urbains (commuter car) et la voiture de tourisme à cinq places Paradigm, une voiture hybride électrique fabriquée aux États-Unis pour la Chine.

Malgré son apparence traditionnelle, la Paradigm présente un châssis extrudé et collé obtenu à partir d'un ester de vinyle/fibre de verre sur lequel sont montés un ester ASA formé sous vide non renforcé et des panneaux de carrosserie en ABS. Les panneaux de pavillon présentent des ASA/ABS thermoformés renforcés d'un ester de verre/vinyle grâce au procédé breveté RTM sous vide. L'Automotive Design &

AD&C



La Baja de AD&C est un SUV à châssis de fibre de verre et ester de vinyle.

Composites Ltd (AD&C) de San Antonio, Texas, espère achever six prototypes avant le 30 août, y compris un véhicule pour les essais aux chocs.

Michael Van Steenburg, cadre administratif chez AD&C, a affirmé à Reinforced Plastics que le châssis de 37 kg utilise la fibre de verre unidirectionnelle dans un tissu cousu, extrudé et collé. Le châssis composite est d'environ 50 % plus léger qu'un châssis comparable en acier et peut absorber 80 % d'énergie supplémentaire en cas d'accidents. Le procédé cyclique de moulage RTM développé par la société peut permettre un moulage rapide de grandes quantités (environ 1,5 m² en trois minutes) sans émission de COV et avec un faible coût d'équipement -de l'ordre de 3 200 \$/m². Se référant à la Paradigm et à plusieurs autres projets avec les Trois Grands (The Big Three : Ford, GM et DaimlerChrysler), Van Steenburg pense que : « Dans les cinq à dix prochaines années, nous allons assister à une utilisation plus prononcée des composites dans la structure des véhicules, notamment sur les marchés de niches. »

Un autre exemple issu de son atelier est la Baja, un utilitaire sport (SUV) au profil exceptionnel comportant des panneaux de carrosserie en ASA/ABS qui sont teintés dans la masse, un châssis en ester de vinyle/fibre de verre et une conception modulaire permettant de loger des options de transmission. Actuellement, AD&C réalise un travail approfondi sur la texturation des panneaux de carrosserie dans la

masse qui, d'après Van Steenburg, permet un profil exceptionnel se jouant des règles d'aérodynamique et diminuant la traînée.

« Dans notre société, tout est question de choix. », dit-il. Pour lui, les voitures du futur pourraient utiliser des composites dans tout le bloc moteur, avec peut-être une chemise d'aluminium sur les cylindres. « Je pense également qu'une évolution du métal vers les composites pourrait être possible pour les arbres de transmission longitudinaux, les demi-arbres de roue (partie de la transmission constituée de compo-

site obtenu par bobinage filamentaire), et les logements, comme les logements de transmission. »

Tom Corbin, vice-président de Corbin-Pacific à Hollister, en Californie, déclare : « Si on recommençait à zéro aujourd'hui, il n'y aurait aucune raison de faire une voiture en métal. » Ce performant fabricant de pièces détachées pour moto a fait appel aux brevets et méthodes de production de motos pour créer en 1996 le prototype de la Sparrow, une voiturette électrique à trois roues (TPV, très petite voiture). La société prévoit de fabriquer 800 Sparrows cette année, 4 000 véhicules en l'an 2000 et 20 000 unités d'ici 2001. Corbin concède que les gens n'achètent pas la Sparrow pour ses atouts écologiques, mais parce qu'elle est rapide et a des lignes très inhabituelles. Ce module de transport personnel de 408 kg permet de parcourir plus de 96 km avec une seule charge et peut atteindre une vitesse de 96 km/h. Selon Corbin, la Sparrow a été conçue pour circuler dans des grandes villes très polluées où les places de parkings manquent.

Deux bacs porteurs, moulés manuellement par contact, à partir de fibres de verre non tissées (mat) et d'isopolyester, forment le châssis monocoque, le bac de batterie et le profil extérieur du véhicule. Des inserts métalliques servent de renforts aux points d'attache. « Nous pensons que des véhicules aux lignes adoucies comme la Sparrow, qui offre une sensation de spontanéité ou de naturel, sont révélateurs des

voitures du XXI^e siècle. », déclare Corbin. Actuellement, il étend la capacité de ses procédés tandis que la production de la Sparrow se renforce pour intégrer les procédés RTM, SRIM, RRIM, le formage sous vide et le SMC. « Nous pensons que les éléments de suspension comme le bras oscillant et la barre de torsion pourraient être en composites, nous sommes donc en train de faire une analyse par la méthode des éléments finis et testons ces prototypes. » Corbin se rallie à l'avis des constructeurs qui considèrent qu'il faudrait améliorer de multiples matériaux pour augmenter le rendement de la production des véhicules. Dans son cas, il se réfère exclusivement aux composites.

« On n'a pas besoin d'une voiture faite entièrement de fibres de carbone, par exemple. On a besoin d'un véhicule construit dans un but précis dont chaque type de matériau

sa Citadel, une voiture concept hybride essence/électricité et dont la ligne profilée, à laquelle Larry Oswald fait allusion, mélange les lignes d'un coupé sport et d'un utilitaire sport. Oswald s'attend à ce que les conceptions synthétiques se poursuivent car elles permettent d'atteindre la forme la plus efficace, permettant de combiner des fonctions tout en évitant la lourdeur et la résistance aérodynamique.

En ce qui concerne des synthèses tout à fait différentes, des étudiants du campus de l'Université de Californie-Davis aux États-Unis, sont chargés, en s'appuyant sur leurs meilleures connaissances en matière de techniques



La Sparrow de Corbin-Pacific

riau renforcé soit analysé pour ce qu'il apporte à chaque composant. »

Des véhicules « de synthèse »

Une tendance qui émerge tout juste dans la conception de voitures est la synthèse des fonctionnalités entre différents types de véhicules, intégrée dans un modèle unique. En 1997, Pontiac a sorti son concept de véhicule hybride Rageous, qui, avec sa calandre et son déflecteur, a la ligne d'un coupé sport et dont la capacité de traction est proche de celle d'un utilitaire sport (SUV). Daimler Chrysler vient de commencer

et de matériaux, de transformer un châssis en acier traditionnel et un véhicule à moteur thermique en un véhicule très performant et peu polluant, dans le cadre de concours de conception pour lequel le Ministère de l'Énergie a sponsorisé la Voiture du Futur (FutureCar) et la SAE a sponsorisé la Voiture Écologique (EcoCar). La toute dernière participation de l'UC-Davis pour la voiture du futur est la Coulomb, voiture hybride électrique, à base du châssis et de la transmission de la Mercury Sable.

Nathaniel Meyr, un étudiant en techniques mécaniques et sciences des matériaux de l'équipe de UC-Davis, rapporte que la façon la plus évidente d'aug-

Corbin-Pacific



La Sparrow : batteries ▲
habitacle ▼

Corbin-Pacific



menter l'économie de carburant est d'alléger le véhicule et de réduire la résistance aérodynamique. L'équipe utilise des composites à base de fibre de verre et de fibre de carbone pour créer un nouvel assemblage tableau de bord/pare-chocs ; le pare-chocs arrière et des parties du coffre, les panneaux culbuteurs pour les orifices d'entrée et de sortie de l'air du refroidissement de la batterie et un châssis en cinq pièces. Le châssis a été modifié pour introduire un bac de batterie de 22 kg en fibre de carbone et epoxy qui devrait réduire le poids de la voiture d'environ 50 % par rapport aux bacs en aluminium utilisés auparavant.

L'UC-Davis a remporté le concours de la Voiture du Futur en 1997 et le concours du Véhicule Hybride Électrique en 1994-1995. « Je pense que les composites apparaîtront de plus en plus dans tous les aspects des véhicules modernes », déclare Meyr, « principalement en raison des avantages liés à leur faible poids. Les véhicules électriques et hybrides peuvent être pénalisés par leur poids allant de 90 à 270 kg à cause de transmissions et batteries multiples. Les composites constituent une alternative évidente pour résoudre ce problème. »

Vicki P. McConnell
Traduction/adaptation :
Pool LEA Université
Marc Bloch - ADIT



E n s a v o i r p l u s

Cet article a été publié dans Reinforced Plastics de mai 1999, sous le titre original **Future car: composites drive millennium models**. Il est reproduit avec l'aimable autorisation de Elsevier Science Ltd©.

L'auteur

Vicki P. McConnell est directrice des Word Warrior Writing Services à Denver, dans le Colorado, aux États-Unis, un service de rédaction contractuel pour des revues spécialisées internationales sur les matériaux, la conception, la fabrication et d'autres aspects scientifiques ou technologiques. Elle dispose de douze années d'expérience dans le domaine des composites à matrice polymère, métallique et céramique, dans une large variété de produits finis.

En 1995, elle est devenue rédactrice en chef de la rubrique traitant des moyens de transport pour les revues High Performance Composites et Composites Technology (Ray Publishing, Denver). Elle a ainsi rédigé des articles de fond sur les applications des composites dans le secteur de l'automobile et du transport de masse. Tout au long de sa carrière comme rédactrice sur les composites, Vicki P. McConnell a écrit près de 50 articles sur les voitures, les camions, les cars et les trains dans des revues telles que Reinforced Plastics, Design News, Composites Industry Monthly, Advanced Composites Bulletin, Advanced Materials and Composites News, Plastic Design Forum, Advanced Composites, Speedlines et Transportation Composites Newsletter (TCN) de Scientific American.

Les plus remarquables sont : " Plastics package the future of automotive transportation " (article de couverture de Plastics Design Forum, septembre 1994); " Electric Avenue: automotive report on electric vehicles " (article de couverture du High Performance Composites, juillet/août 1995) ; "Composite battery tray unitizes EV-1 primary structure" (Composites Technology, mars/avril 1997) ; "Range Rovers of the Green Fleet: Electric and Hybrid Electric Vehicles" (Composites Technology, mars/avril 1998) ; "Electric vehicles parade green technologies" (High Performance Composites, mars/avril 1998) ; des articles de couverture du TCN : "Automotive technology innovations bolster increased composites usage" (juin); "Aerospace success with Al MMCs prompts automotive interest" (sept.); "A million lbs of composites in auto/bus CNG tanks (octobre) ; et une couverture spéciale de l'exposition sur les composites automobiles organisée par l'ACCE (American Chamber of Commerce Executives), la SAMPE (Society for the advancement of material and process engineering), le DOE (Department of energy), et l'IBEC (International Bank for Economic Cooperation), (novembre).

En tant que responsable éditorial de Automotive Composites Design and Manufacturing Guide (guide de fabrication et de conception des composites automobiles, Ray Publishing, 1997), Vicky McConnell a été corécepiendaire de la Médaille de Bronze d'Excellence, récompense réservée aux publications techniques de référence décernée par l'International Automotive Media Conference.

Mme McConnell est actuellement rédactrice du bulletin d'information mensuel du Scientific American, Transportation Composites newsletter (financé par les seuls abonnements), et depuis janvier 2000, rédactrice d'une deuxième publication du Scientific American, Fuel Cell Industry Report (concernant les applications automobiles et stationnaires).

Liste complète des articles sur les composites automobiles rédigés par Mme McConnell, sur demande par e-mail (voir ci-dessous).

Contact

Vicki P. McConnell
Denver (Colorado, États-Unis)
tél : +1 303 329 8506 / +1 303 316 4395, e-mail : wrdwrrior@earthlink.net

Un acier fin et résistant à destination de l'automobile

- Colin Lewis, British Steel Products, Welsh Technology Center à Port Talbot, Royaume-Uni, tél : +4 1639 871 111
- ULSAB, <http://www.ulsab.org>

En 1995 s'est créé le consortium « Ultra Light Steel Auto Body » (ULSAB). Regroupant trente-cinq producteurs d'acier dont neuf américains, l'ULSAB s'était fixé pour objectif de fabriquer une structure automobile en acier aussi performante mais plus légère que celles existantes.

Après avoir dépensé 22 millions de dollars, le consortium a rempli toutes les phases du projet, depuis la conception et le design jusqu'à la validation des pièces par des tests mécaniques. Les structures en acier ont une épaisseur qui n'est comprise qu'entre 0,7 et 2 mm, alors que les structures traditionnelles ont une épaisseur de 4 mm.

L'assemblage et les tests mécaniques ont été réalisés dans une usine Porsche en Allemagne. Colin Lewis, de British Steels, détaille les performances de cette structure fine en acier qui garantit la sécurité du conducteur dans l'édition de mars 1999 de Materials World. Le gain de poids est de 20 %, tandis que les propriétés mécaniques en torsion et en flexion sont elles aussi améliorées.

*High Tech Materials,
2 avril 1999 - États-Unis*

Des composites à matrices métallique pour l'automobile

- Tony Zahrah, Matsys, 1827 Park Rd. NW, Washington DC, tel: +1 703 256 0550

Les constructeurs automobiles cherchent à diminuer le poids des voitures en utilisant des matériaux plus légers, moins chers et présentant des meilleures propriétés mécaniques. La métallurgie des poudres permet d'obtenir des composites à matrice métallique qui offrent ce type d'avantages par rapport aux pièces traditionnelles usinées. Les composites à matrice métallique (CMM) sont obtenus à partir de poudres céramiques ou métalliques qui sont densifiés lors d'une étape de frittage sous pression.

Cette méthode abaisse le coût de production et permet de fabriquer des pièces plus solides que celles obtenues par moulage par coulée. Cette technique est cependant limitée par le diagramme de phase des différents constituants. De plus, les fines poudres métalliques ont une faible fluence, ce qui nuit à la qualité de l'écoulement vers le moule et oblige à rajouter des liants parfois onéreux. Le National Institute of Standards and Technology (NIST) mène un projet commun avec Matsys Inc., une entreprise américaine basée en Virginie qui fabrique des CMM. Ensemble, ils ont développé un système pour fabriquer des pièces à partir de poudres d'aluminium sans faire appel à des liants onéreux et en évitant tout problème d'écoulement. Il s'agit de mettre à profit les qualités de l'air comme lubrifiant. La contribution du NIST consiste à mettre au point une simulation par ordinateur de la métallurgie de l'aluminium. Celle-ci est nettement moins connue que celle de l'acier. Bénéficiant d'un financement de l'US Navy, cette étude se poursuit en étudiant des composites à matrice intermétallique destinés aux systèmes de propulsion des navires. Matsys possède déjà un brevet.

*High Tech Materials,
9 avril 1999 - États-Unis*

Canada**Thixomoulage : des matières plastiques
au magnésium**

Steve Lawrynuik, General Manager, Husky's Advanced
Manufacturing Center, Bolton (Ontario), tél : +1 905 951 50 00

L'entreprise Husky Injection
Molding System Ltd de Bolton
(Ontario), un des leaders mon-
diaux dans le domaine de la

construction de machines de moulage par injection pour matières plastiques, utilise son expertise pour l'appliquer au moulage par injection d'alliages de magnésium. Cette nouvelle activité est appelée à prendre une grande importance au sein de l'entreprise. Une équipe de 24 personnes a été constituée pour développer des machines utilisant le concept du thixomoulage qui utilise le moulage par injection pour fabriquer des pièces en magnésium, délaissant ainsi les techniques traditionnelles de moulage. Les principaux avantages de ce procédé sont le peu d'investissement et d'espace nécessaires car il ne requiert pas de fonderie. De plus, les basses températures utilisées par ce procédé permettent d'allonger la durée de vie des moules et de raccourcir le temps de refroidissement des pièces moulées, ce qui réduit la durée du cycle de fabrication. Enfin, les pièces en magnésium obtenues par thixomoulage offrent une meilleure résistance mécanique et à la chaleur ainsi qu'une durée de vie plus longue. Elles sont aussi plus facilement recyclables, ce qui constituera un argument de poids au Japon où, à partir de 2001, les entreprises devront reprendre leurs anciens produits pour les recycler lorsque leurs clients en achèteront de nouveaux. Les pièces moulées en magnésium sont de plus en plus utilisées, que ce soit en informatique pour la fabrication des portables ou dans le secteur automobile où les constructeurs cherchent à réduire le pourcentage de pièces en acier afin de respecter les normes en vigueur. Le thixomoulage pourrait aussi être envisageable pour des métaux tels que le zinc ou l'aluminium.



Sécurité routière : Comment l'Italie freine l'hécatombe routière

L'Italie multiplie les initiatives visant à réduire le nombre de morts sur les routes. Aux vastes projets d'amélioration du réseau existant s'ajoutent les progrès attendus de technologies comme la télématique des transports ou les routes et véhicules dits intelligents.

Comme dans tous les pays européens, le problème de la sécurité routière est très préoccupant en Italie où l'on dénombre près de 10 000 décès par an sur les routes, dont 6 000 dans la semaine qui suit l'accident. Un chiffre auquel s'ajoutent quelque 45 000 blessés par an.

Les leviers d'action qui permettent d'enrayer l'hécatombe sont les mêmes que dans les autres pays : le facteur humain -avec les campagnes d'information et les mesures de prévention et de contrôle-, l'amélioration de la sécurité des infrastructures routières, et l'amélioration de la sécurité active et passive des véhicules.

Dans son Plan national pour la sécurité routière, qui s'intègre dans le nouveau Plan général des transports (PGT), le ministère italien des Transports et de la Navigation prend en compte explicitement tous les aspects concourant à améliorer la sécurité routière : conception, construction, entretien et adaptation des routes et des dispositifs de sécurité, contrôle et prévention des comportements à risque des conducteurs, amélioration des véhicules, politiques tarifaires, juridiques et administratives, etc. En première estimation, le coût global des mesures de ce plan s'élèverait à près de 2 500 milliards de liras par an (8,5 milliards de francs, 1,3 milliard d'euros).

Le ministère des Transports envisage également de mettre en place, en s'inspirant d'autres expériences européennes, un Institut national de recherche sur les transports.

Commencer par les points noir

Or, si le renforcement des mesures visant à améliorer le comportement des conducteurs et des autres usagers de la route se poursuit, les autorités italiennes prennent aujourd'hui conscience d'un fait : il est nécessaire de ne pas surestimer le facteur humain dans les causes d'accidents, si l'on souhaite réellement améliorer la sécurité routière. Un compte-rendu de l'Inspection de la circulation, du ministère des Travaux Publics, souligne ainsi auprès du Parlement que l'interprétation des causes d'accidents en fonction du seul comportement humain est insuffisante et qu'il est indispensable de mieux prendre en compte les facteurs d'urbanisme et d'aménagement des routes.

L'amélioration des routes apparaît ici comme une priorité, avec une bonne partie des infrastructures encore aux standards des années 70, alors que le trafic a augmenté de 60 % depuis. Si le réseau autoroutier (6 500 km) est dans un bon état dans l'ensemble, le reste des routes (plus de 300 000 km) est lui dans un état médiocre, tant au niveau des revêtements que de la signalisation, des barrières de sécurité ou de la largeur des voies. Selon les calculs de Confindustria, la principale organisation représentative des entreprises manufacturières et de services en Italie, il serait nécessaire d'investir 467 000 mil-



Statistiques internationales sur les accidents de la route en 1997			
	Nbre de morts sur la route	Nbre de tués pour 100 000 habitants	Nbre de tués pour 100 000 véhicules à moteur
Grande-Bretagne	3743	6,3	13,0
Suède	541	6,1	13,4
Allemagne	8549	10,4	19,5
Italie	6724	11,7	19,8
France	8444	14,4	27,0
Espagne	5604	14,3	30,2

L'Italie et l'Allemagne se placent ici devant la France, en termes de nombres de morts sur la route pour 100 000 véhicules à moteur, mais derrière la Grande-Bretagne et la Suède.

Nota : ces chiffres ne précisent pas de quelle façon sont comptabilisés les décès : par exemple, il s'agit en Suède de ceux qui surviennent dans les 30 jours qui suivent l'accident, alors qu'en Italie le délai considéré est d'une semaine seulement. Mais l'organisme Eurispes en Italie, qui a comptabilisé également les décès causés quelques mois plus tard par les suites de l'accident, constate que le nombre de morts passe alors d'environ 6 000 à 10 000 par an, soit une augmentation de 67 %.

liards de livres (1 582 milliards de francs, 241,2 milliards d'euros) pour atteindre le niveau de qualité des routes allemandes.

Cependant, s'il est certain que des interventions structurelles à long terme sont indispensables, des mesures immédiates peuvent être prises rapidement pour limiter le nombre d'accidents mortels. À l'image de la petite ville de Cattolica où une simple modification de la signalisation a fait chuter de plus de 50 % le nombre d'accidents.

Ainsi, une analyse de l'influence des facteurs environnementaux sur les risques d'accident, réalisée par l'Inspection générale de la Sécurité, du ministère des Travaux Publics, a permis de mettre en évidence sur le territoire de véritables « points noirs » de la circulation : régions, villes ou tronçons particuliers où le risque d'avoir un accident est dix fois plus élevé que la moyenne. Il apparaît que 35 % des accidents se produisent sur 15 % du territoire, causant 45 % des décès et 30 % des blessés. À titre d'exemple, il suffirait de mettre aux normes les barrières et les garde-corps sur ces sites pour réduire de 13 % le nombre de morts et de 11 % celui des blessés.

Autoroutes intelligentes

Plus futuriste, la combinaison de voitures et de routes intelligentes doit permettre de résoudre le dilemme entre transport public et transport privé, tout en conciliant vitesse, économie et sécurité.

L'Italie participe aux différents projets européens Eurêka du domaine, comme Prometheus, Demeter, Europolis et surtout Drive I et Att (Advanced transport telematics) et a réalisé par ailleurs son propre projet appelé « Easy driver », testé sur un tronçon d'environ 20 km entre Padoue et Mestre. Elle travaille également à l'infrastructure d'infomobilité prévue dans le cadre du Plan national

télématique -un plan qui risque cependant de ne pas produire rapidement de résultats concrets comparables à ceux des États-Unis ou du Japon, faute de programmes précis, de standards reconnus et d'investissements constants. Il est très probable que les infrastructures et les technologies européennes devront recourir à des investissements américains et japonais, malgré le risque de voir s'échapper des brevets et des standards de fabrication.

Avant d'arriver à une complète intelligence, les autoroutes italiennes sont d'ores et déjà équipées de panneaux d'information, de moyens de contrôle permanent de la circulation et des conditions météorologiques -à l'usage des automobilistes- et, surtout, du système de péage au vol Telepass, de la Société des Autoroutes, actuellement leader mondial en termes d'étendue d'utilisation.

Télématique des transports en ville

Au niveau urbain, un des plus importants projets de télématique des transports en Italie est le projet 5T, mis en place à Turin et actuellement en phase de test. Ce projet, porté par un consortium créé en 1992,



Le détail des sous-systèmes du projet 5T à Turin :

Superviseur : garantit l'intégration des systèmes et l'amélioration du service en termes de mobilité, sous la tutelle de l'environnement. Il relève, grâce à la coopération des différents sous-systèmes, le flux de la circulation, prévoit la mobilité, intègre les exigences environnementales et formule les stratégies d'intervention sur les transports et la circulation. Les sous-systèmes coopèrent à la stratégie générale en incluant les décisions du superviseur dans leurs propres stratégies opérationnelles.

Contrôle de la circulation : régule les feux de croisement et le contrôle du trafic privé dans les diverses situations locales en activant les politiques suggérées par le superviseur. Dans le même temps, il garantit la priorité des feux aux véhicules des transports en commun. Il opère sur 150 croisements du réseau urbain et environ 700 unités relevant de la circulation.

Transports publics : à travers le SIS (Système Informatif du Service, qui opère sur le parc entier des 1 350 véhicules), ce sous-système garantit la régularité et la vitesse du service grâce au contrôle de leur avancement et à la demande de priorité des feux. Il coopère à la stratégie de l'information aux usagers et à l'amélioration du service suivant les indications provenant du superviseur. Il opère avec 300 unités visualisant les arrivées aux arrêts de transports en commun, 100 unités d'annonce à bord et 250 unités de comptage des passagers.

Priorité maximum : permet aux ambulances de choisir le meilleur parcours et de désengorger les croisements de rues tout le long du trajet choisi. Le module fonctionne déjà sur 15 ambulances.

place Turin à l'avant-garde européenne de la gestion de la circulation en ville. D'autres villes comme Rome (projet Capitals), Trieste et Milan ont repris certains éléments de ce projet en y intégrant petit à petit l'ensemble des fonctions.

Le Consortium 5T, pour « Technologie Télématique pour les Transports et le Trafic à Turin », regroupe cinq entreprises privées (Mizar, Fiat, Tecnost, Solari, Italtel) représentant une participation de 33 % et deux sociétés publiques (ATM et AEM), dont la participation est de 67 %. La mairie de Turin a autorisé la participation de ces deux entreprises municipales en offrant à ATM une subvention de 1,5 milliard de lires (5,1 millions de francs, 775 000 euros).

L'objectif du Consortium est d'améliorer le service à la mobilité, la qualité de l'environnement et la sécurité. Ceci se traduit notamment par une réduction de 25 % du temps moyen de trajet, de 18 % de l'émission de pollution et de 18 % de la consommation des véhicules. Les usagers disposeront en parallèle de

services plus efficaces et d'informations incitant à utiliser les transports en commun.

Le coût du projet est de 13,6 milliards de lires (46,1 MF, 7 M). À son financement s'ajoutent 3,7 milliards de lires (12,5 MF, 1,9 M) du Ministère de l'Environnement et 3,9 milliards de lires (13,2 MF, 2 M) de la Communauté Européenne.

Pour atteindre les objectifs du Consortium, dix sous-systèmes coopèrent, remplissant les fonctions suivantes : supervision centrale, information aux usagers, contrôle de l'environnement, gestion de la priorité maximum (pour les ambulances ou la police), contrôle des transports en commun, contrôle du trafic privé, contrôle des parcs de stationnement, intégration tarifaire et monétaire, orientation collective et orientation individuelle (voir encadré).

Les véhicules

La sécurité des véhicules est naturellement un autre cheval de bataille pour la sécurité routière. Une étude a été menée entre 1994 et 1997 par Elasis, une société du groupe Fiat, sur 250 accidents de la route survenus dans une zone circonscrite de la Campanie. Les résultats font apparaître que les voitures constituent la cause déterminante de l'accident dans 18 % des cas (manque de fiabilité et de sécurité).

Les innovations technologiques visant à améliorer la sécurité des véhicules sont principalement le fait des constructeurs automobiles. Pour ceux-ci, la sécurité et la fiabilité représentent un argument commercial important, à l'heure où aucune obligation n'existe encore concernant l'installation d'airbags ou de systèmes de freinage ABS par exemple.



FIAT : des systèmes intelligents pour une voiture plus sûre

- **alarme anticollision** : informe le conducteur de la présence d'un obstacle ou d'un véhicule très lent, grâce à un radar détectant des objets à 150 mètres, même dans le brouillard.
- **frein d'urgence** : ralentit la voiture et enclenche, en cas de danger, une procédure de freinage même sans en avertir le conducteur.
- **appel d'urgence** : un système appelle automatiquement les secours.
- **Cruise Control Adattativo** : la voiture accélère et ralentit selon le flux du trafic, sans l'intervention du conducteur, tout en maintenant une distance de sécurité avec les autres véhicules grâce à un radar.
- **moniteur d'angle mort** : une petite lumière sur le tableau de bord indique au conducteur qu'une voiture est en train de doubler.
- **maintien de voie** : des caméras situées dans les rétroviseurs permettent de signaler au conducteur les sorties de voie du véhicule (Lane warning).
- **contrôle de l'état de fatigue du conducteur** : le système observe les battements de cils du conducteur pour lui signaler qu'il est en train de s'endormir ; s'il s'endort malgré tout, une manœuvre d'urgence prend le contrôle du véhicule, le ralentissant progressivement jusqu'à l'arrêt total.
- **informations sur la circulation** : par satellite, un ordinateur de bord indique au conducteur la route la moins encombrée.
- **télénavigation** : le même ordinateur donne toutes les informations au conducteur pour aller d'un point à un autre, en lui indiquant le temps restant ; ce système peut aussi indiquer le restaurant ou l'hôtel le plus proche.
- **reconnaissance de commande vocale** : permet au conducteur d'enclencher un système ou de téléphoner par simple ordre vocale.
- **Stop and go** : dans un embouteillage, ce système contrôle automatiquement la voiture et lui permet d'aller au gré du trafic grâce à des capteurs situés tout autour de la voiture.
- **télécontrôle** : permet, en ville, de réguler la vitesse de façon à profiter de l'onde verte ; activé, le système ne permet pas au véhicule de dépasser la vitesse limite autorisée.
- **télédiagnostic** : en cas de problème de fonctionnement du véhicule, lors de l'appel automatique de secours, le système renseigne sur la nature de la panne.
- **localisation par satellite** : permet de situer la voiture, par exemple en cas de vol.

Au centre de recherche de Fiat, toute une série de développements sont en cours, dans le cadre d'un Plan d'Innovation, pour intégrer au véhicule des dispositifs de sécurité préventive sophistiqués : alarmes anticollision, freinage d'urgence, appel d'urgence automatique, contrôle automatique de la vitesse, alerte « angle mort », maintien automatique dans la voie, contrôle de l'état de fatigue du conducteur, systèmes d'information sur la circulation, télénavigation, localisation par satellite... (voir encadré)

L'intégration croissante « d'intelligence » sur les véhicules a pour but de faire voyager le conducteur

en sécurité et avec un maximum de confort, non seulement physique mais aussi psychologique : moins de stress pour rejoindre une destination et vis-à-vis des dangers de la route. Néanmoins, cette intégration doit s'accompagner de la formation des conducteurs, qui doivent éviter les risques inutiles. La combinaison « conducteur / véhicule intelligent » coopérant à une meilleure sécurité, devrait permettre de réduire le nombre et la gravité des accidents.

Marie-Laure Spaak

Nous remercions le Service scientifique de l'Ambassade de France en Italie pour sa contribution à cet article.

À lire

Italie. Ministero dei Trasporti e della Navigazione, Il nuovo Piano Generale dei Trasporti - Capitolo 3: I riferimenti del PGT per l'ambiente e la sicurezza. 1999.

URL : <http://www.trasportinavigazione.it/>

Des pneus réduisent de 15 % la distance de freinage

Japon

Yokohama Rubber a développé un pneu baptisé Studless Tyre qui réduit de 15 % la distance de freinage par temps de pluie. Ce pneu contient à sa surface près de 2,5 milliards de particules de résine ayant chacune un diamètre de 100 μm . Ces billes sont toutes creuses, et leurs cavités microscopiques permettent d'emprisonner l'eau se trouvant un contact du pneu. Ainsi, sur les routes mouillées, ses pneus « boivent » la route. Des essais effectués à 40 km/h sur une route détrempée ont montré qu'avec ces pneus la distance de freinage passait de 56 m à 49 m, soit une baisse de 15 % par rapport aux pneus classiques. De plus, l'ajout de ces billes à la surface augmente la dureté du pneu, et améliore son adhérence à la route.

Bien que les ventes de véhicules aient stagné ce semestre, les ventes de pneus ont augmenté de 3 %. La compagnie espère alors retrouver le niveau de ses ventes d'avant la crise, grâce à ce pneu qui est l'aboutissement de trois ans d'études.

Contrôle de la distance de sécurité sans laser

Japon

Fuji Heavy Industries, fax : +81 3 3347 2126

La société japonaise Fuji Heavy Industries a développé un système qui alerte le conducteur s'il se trouve trop près du véhicule qu'il suit. Au lieu d'une caméra et d'un laser généralement employés, ce nouveau système est pourvu de deux caméras situées aux deux extrémités du rétroviseur intérieur. Un ordinateur, placé dans le véhicule, confronte les images prises sous deux angles différents pour évaluer la distance de sécurité en amont de la voiture avec une précision de l'ordre du mètre. Lorsque cette distance est trop faible, une sonnerie se déclenche pour avertir le conducteur du danger. Outre un gain financier, ce nouveau système possède aussi l'avantage de fonctionner indépendamment de l'état du véhicule en amont du conducteur. En effet, lorsque la voiture qui précède est sale, les faisceaux laser se réfléchissent mal, ce qui peut créer des dysfonctionnements dangereux. La société Fuji Heavy équipera de son système la voiture Legacy Lancaster de Subaru dans le courant de l'année 1999.

Une durite plus hermétique

Japon

Mitsubishi Motor, fax : +81 3 5232 7747

Une durite, réduisant de 50 % l'évaporation des hydrocarbures polluants contenus dans l'essence qui alimente le moteur, vient d'être développée par Mitsubishi, conjointement avec Meiji Rubber Seika. Elle est fabriquée avec une résine contenant du fluor, qui a d'excellentes propriétés de prévention d'évaporation, et avec une résine polyamide mélangée à une colle de résine contenant du fluor. Les essais ont montré que la durite possédait une grande durée de vie et une grande résistance aux vibrations du moteur, même si elle est endommagée après plusieurs accidents. Mitsubishi pense équiper graduellement ses véhicules avec cette durite, dès le début de l'année 2000. Ce nouveau produit prend place dans son projet de construire des véhicules écologiques et offrant une plus grande sécurité.

Un nouveau centre de recherche en sécurité

Suède

Le « Volvo Cars Safety Center » a été inauguré le 29 mars 2000 à Torslanda (Göteborg). Dans ce nouveau centre coopéreront Volvo, Autoliv, Saab Automobile, Chalmers, l'université de Göteborg et, dans une certaine mesure, Lear Corporation. Les simulations de collisions faites au sein de cette installation sont parmi les meilleures du monde.

bibliographie

Les tendances de la R&D automobile

- **Ménard (C.), Les équipementiers font un pas de plus vers l'intégration,** *L'Usine Nouvelle* n° 2726, 23 mars 2000, p. 66 à 69.
- **Communauté Européenne. Car wars, Euroabstracts,** février 2000, p. 21
- **L'auto revisitée par le 42 volts,** *Industries et Techniques*, n° 810, décembre 1999, p. 58 à 77.
- **Les constructeurs japonais osent l'extravagance,** *L'Usine Nouvelle* n° 2709, 10 novembre 1999, p. 88 à 92.
- **Ménard (C.), Des ruptures technologiques sans précédent attendent l'automobile,** *Hors série L'Usine Nouvelle*, novembre 1999, p. 106 à 108
- **Ménard (C.), L'automobile en course pour réduire la consommation,** *Hors série L'Usine Nouvelle*, novembre 1999, p. 92 à 94.
- **L'automobile entre en trombe dans le nouveau millénaire,** dossier spécial *La Tribune*, 13 octobre 1999, 20 p.
- **Royaume-Uni. Automotive fuels for the future – the search for alternatives,** *International Energy Agency*, septembre 1999.
- **États-Unis. L'analyse du marché japonais de l'automobile,** *Service Commercial de l'Ambassade des États-Unis au Japon*, août 1999, 12 p.
- **États-Unis. Les futures innovations dans le secteur des transports,** *ministère des Transports américain*, août 1999, 25 p.
- **Commission Européenne. Düx (P.), Eickenbusch (H.), Spaak (M.-L.), Vehicle manufacturing : the race for new concepts,** *Techno-Economic Analysis Report, ESTO-IPTS*, juin 1999, p. 49 à 59.
- **États-Unis. Le programme de recherche et développement du ministère des Transports américain,** *Commission Recherche-Technologie, ministère des Transports américain (DoT)*, mai 1999, 150 p.
- **États-Unis. L'analyse de l'activité du secteur automobile aux États-Unis et de l'évolution de l'industrie automobile américaine,** *Office of Automotive Affairs du Département du Commerce américain (DoC)*, mars 1999, 17 p.
- **Japon. Les tendances technologiques dans le domaine automobile dans les pays d'Asie,** *JARI*, janvier 1999, résumé de 4 p. en langue française.
- **États-Unis. Le programme de R&D " Carat " pour la mise au point des technologies de la voiture du futur,** *DoE*, janvier 1999, 77 p.
- **États-Unis. Le plan stratégique du département de l'énergie américain pour l'utilisation de véhicules à énergie alternative,** *Office of Transportation Technologies du Département de l'Énergie (DoE)*, janvier 1999, 8 p.
- **États-Unis. Delphi X forecast and analysis of the North American automotive industry,** *OSAT*, 1999, *Ann Arbor Mi.* (<http://www.asat.umich.edu/delphi.html>).
- **États-Unis. Économie et politique des transports aux États-Unis,** *Brookings Institution*, 1999, 575 p.
- **Moustacchi (A.), Payan (J.-J.). L'automobile, avenir d'une centenaire.** *Flammarion* : Paris, 1999. 126 p.
- **États-Unis. Les futures orientations stratégiques de l'industrie du véhicule au gaz naturel,** *Natural Gas Vehicle Association (BGVA)*, 1999, 24 p.
- **Les nouveaux chemins de l'innovation,** *L'Usine Nouvelle* n° 2656, septembre 1998, p. 62 à 86.
- **Tugayé (Y.), Véhicules électriques et hybrides : quelles perspectives pour le futur ?,** *MELT-DRAST-CPVS*, juillet 1998, 58 p.
- **Commission Européenne. Schmitt (A.), Impact du développement des véhicules électriques sur les consommateurs, les embouteillages et les habitudes de circulation en Europe,** *IPTS Report n°24*, p. 42 à 47, mai 1998, *IPTS-JRC*.

bibliographie

- Commission Européenne. Greaves (C.) et al. **Vehicle technologies future analysis**, ESTO/IPTS-JRC, janvier 1998, 57 p.
- **ZO, le nouveau concept-car de Renault**, *Technologies France, ADIT*, n° 41, janvier 1998, p. 18 et 19.
- États-Unis. **Les avancées technologiques du programme PNGV**, NRC, janvier 1999, 108 p. (résumé en français : Tugayé (Y.), **Les avancées du programme américain PNGV**, MELT-DRAST-CPVS, janvier 1998, 17 p.)
- États-Unis. **L'analyse de l'utilisation de véhicules à énergie alternative aux États-Unis**, National Renewable Energy Laboratory (NREL) du ministère de l'Énergie américain (DoE), 1998, 42 p.
- États-Unis. **La nouvelle stratégie de R&D américaine dans le domaine des transports terrestres**, DoT, décembre 1997, 231 p.
- États-Unis. **Les nouvelles technologies pour les systèmes de transport avancés**, DoT, septembre 1997, 550 p.
- France. **Annuaire des technologies-clés**, Ministère de l'Économie, des finances et de l'industrie, septembre 1997, 444 p. (fiches n° 74 à 78)
- Japon, **Actes de la réunion Automotive engineering for future aged society organisée en septembre 1997 par la JSAE (Japan Society of Automotive Engineers)**.
- Tugayé (Y.), **Les enjeux de l'industrie automobile américaine**, MELT-DRAST-CPVS, août 1997, 30 p.
- Italie, Fischer (F.), **Dov'è nascosta l'auto del futuro?**, *Avvenire*, mai 1997.
- **Le Japon et les systèmes de transport intelligents**, Ambassade de France au Japon, mai 1997, 10 p.
- Lamure (C.), **Des apports techniques pour le futur des transports en agglomération ?**, synthèse INRETS, février 1997, 147 p.
- États-Unis, **Toward a sustainable future**, special report 251, Transportation Research Board, 1997, 134 p.
- Japon, **Rapport d'enquête publique du Comité de réflexions sur les routes et le XXI^e siècle**, dépendant du Conseil des routes du MOC (ministère de la Construction japonais), 1997.
- Japon, **Sixième enquête prospective technologique**, NISTEP (National Institute of Science and Technology Policy), 1997.
- Japon, **Étude prospective sur les besoins et exigences futurs du consommateur pour le secteur automobile**, JARI, 1997.
- États-Unis, **The US automobile manufacturing industry**, US Department of Commerce, Office of Technology Policy, décembre 1996.
- Lamure (C.), **Sustainable transportation, Hors de l'ombre portée de la Californie**, Compte-rendu de mission, INRETS, octobre 1996, 33 p.
- Lamure (C.), **Quelle automobile dans la ville ?** Presses de l'ENPC : Paris, 1995. 333 p.
- Quiley (R). **Alternative cars in the 21st century, a new personal transportation paradigm**. Society of Automotive Engineers (SAE) : Warrendale (Pennsylvanie, États-Unis), 1994. 396 p.
- Japon, **L'automobile au XXI^e siècle**, Institut Nissan de recherches sur le trafic, 1992.
- Japon, **Des technologies pour l'automobile du XXI^e siècle**, Table ronde sur les problèmes de l'automobile, MITI, 1990.
- Japon, **L'automobile au XXI^e siècle**, JARI (Japan Automobile Research Institute, dépendant du MITI), 1990.
- Japon, **L'automobile au cœur de la société du XXI^e siècle**, Table ronde sur les problèmes de l'automobile, MITI, 1989.
- États-Unis, **Advanced automotive technologies**, US DoE, 17 p.

bibliographie

Le véhicule électrique

- *Finlande. Information Technology powers the electric vehicle : High Technology Finland 2000, Espoo (Finlande) : 1999, p. 50 et 51.*
- *Japon. Le parc japonais de véhicules électriques, Japan Electric Vehicle Association (JEVA), 1999, 38 p.*
- *Deroin (P.) - Ménard (C.), Vers la batterie en plastique, hors série L'Usine Nouvelle, Paris : novembre 1998, p. 60 et 61.*
- *États-Unis. Les comptes rendus du 15^e symposium sur le véhicule électrique, Office of Advance Automotive technologies (OAAT) du Department of Energy (DoE), octobre 1998, 70 p.*
- *France. Véhicules électriques ou appareils de communication portables, recherche, industrie et marché des batteries au Japon, Ambassade de France au Japon, juillet 1998, 57 p. (réf ADIT : SMM 98 096).*
- *La preuve par l'information, RDT Info, Bruxelles : juin-juillet 1998, p. 12 et 13.*
- *France, La mise en place du système véhicules électriques, groupe interministériel Véhicules Électriques, mars 1998, 5 p.*
- *États-Unis. Les technologies pour les véhicules électriques et hybrides, SAE, 1998, 152 p.*
- *France. 38^e symposium japonais sur les batteries, Ambassade de France au Japon, Service pour la Science et la Technologie, décembre 1997, 21 p. (réf ADIT : SMM 98 006)*
- *États-Unis. The sixth Technology Forecast Survey, future technology in Japan toward the year 2025, Fourth Policy-Oriented Research Group, National Institute of Science and Technology Policy, Science and Technology Agency, NISTEP report, 1997. (<http://www.nistep.go.jp/achiev/summary-e/report52e/top.htm>)*
- *France. Le véhicule électrique aux États-Unis, Laboratoire d'Électrotechnique de Grenoble, décembre 1996, 123 p.*
- *Lamure (C.), Le véhicule électrique à l'horizon 2004, MELT-DRAST-CPVS, avril 1996, 35 p.*
- *Ng (H.K.), Anderson (J.L.), Santini (D.J.), Vyas (A.D.), The prospects for electric and hybrid electric vehicles : second stage results of a two stage delphi study, Argonne National Laboratory, 1996. (<http://www.doe.gov/bridge/home.html>).*
- *France. Enquête sur les technologies d'avenir par la méthode Delphi, Rapport des résultats par domaine, Contrat n°45 ML 16, SOFRES, Paris, 1994.*
- *Royaume-Uni. Delphi Survey, United Kingdom Technology Foresight Programme, 1994. (<http://www.foresight.gov.uk>).*
- *Japon. Plan de diffusion du véhicule électrique, Comité pour le VE (dépendant du MITI), 1991.*

Les systèmes de transports intelligents

- *États-Unis. Intelligent transport systems, applications, ATIP, mars 2000. (réf ATIP : 00.013, <http://www.atip.or.jp>).*
- *Japon. Proposition interministérielle pour une architecture systématique pour les systèmes ITS au Japon, MITI, Ministère des transports, Ministère de la Construction, Ministère des Postes et Télécommunications, agence de la Police Nationale, novembre 1999, 74 p.*
- *Haquin (B.). L'ordinateur pilote le réglage moteur, R&D - la route de l'innovation, n° 14, octobre 1999, p. 18 à 23.*
- *Quand les avions inspirent les voitures, RDT Info, septembre 1999, p. 34 à 35.*
- *L'électronique prend le pouvoir ... non sans mal, L'Usine Nouvelle, n° 2703, septembre 1999, p. 71 à 94.*

bibliographie

- **L'équipement des automobiles de demain,**
Revue des télécommunications d'Alcatel, 4e trimestre 1999, p. 273 à 278.
- **Sagem prépare l'électronique de demain,**
R&D - la route de l'innovation, n° 13, juillet 1999, p. 45 à 47.
- **Japon. La politique japonaise en matière de gestion intelligente du trafic routier,**
Ministère japonais de la Construction, juin 1999, 39 p
- **Wald (M. L.). Un mouchard dans chaque voiture,**
Courrier International n° 450, juin 1999, p. 44 (original paru dans le New York Times).
- **Seroussi (S.). La moitié des voitures sera équipée d'aide à la conduite d'ici cinq ans,**
La Tribune, 28 avril 1999, p. 25.
- **France. Les systèmes de transport intelligent : priorité du MPT,**
Poste d'Expansion Économique au Japon, Action Japon n° 35, mars 1999, p.6.
- **Le DVD s'impose dans les systèmes d'aide à la navigation,**
Bulletin de la société franco japonaise des techniques industrielles, n° 135, décembre 1998, p. 5.
- **Davis (B.). Continental integrates tires, electronics,**
Automotive News Europe, 8 novembre 1998, p. 13.
- **Une noria d'équipements hybrides intégrés,**
Industries et Techniques, n° 798, novembre 1998, p. 38 à 45.
- **Vers l'automatisation de la conduite, hors série L'Usine Nouvelle, novembre 1998, p. 64 à 65.**
- **Les logiciels embarqués, R&D - la route de l'innovation, n° 10, octobre 1998, p. 12 à 15.**
- **L'urban drive control : magique et perfectible,**
R&D - la route de l'innovation, n° 10, octobre 1998, p. 7.
- **États-Unis. 21st century autos & intelligent transport system (ITS) in Japan,**
ATIP, septembre 1998. (réf ATIP : 98.080, <http://www.atip.or.jp>).
- **États-Unis. Emissions management using ITS technology,**
US Dept of Transportation, septembre 1998, 15 p.
- **Japon. Les réflexions conduites au sein de la JARI dans le domaine de l'ITS,**
JARI, juin 1998, 20 p. en langue française.
- **France. La mise en œuvre des systèmes de transports intelligents en Australie,**
Ambassade de France en Australie, Bulletin d'Actualité Scientifique, Technique et Industrielle n° 67, août 1998, p. 40.
- **France. Le Japon et les systèmes de transport intelligents,**
Ambassade de France au Japon, mai 1997, 10 p.

L'automobile et l'environnement

- **Consommation et dépollution : Renault explore de nouveaux concepts,**
Technologies France, ADIT, n° 60, février 2000, p. 8 et 9.
- **Du benzène et des villes, RDT Info 23, septembre 99, p. 28 et 29.**
- **États-Unis. Whither tomorrow's car - Environmental vehicle conference, session de questions-réponses, document audio, juin 1999, <http://evworld.com/reports>**
- **États-Unis. Advanced technology vehicles : the political and regulatory environment, document audio, juin 1999, <http://evworld.com/reports2>**
- **États-Unis. Advanced technology vehicles : shaping the future of automotive transportation, document audio, juin 1999, <http://evworld.com/reports2>**
- **États-Unis. Global warming threat : automobile challenge and response, document audio, juin 1999, <http://evworld.com/reports2>**

bibliographie

- **États-Unis. Preparing for the coming storm**, Moore (B.), juin 1999, <http://ewworld.com/main>
- **États-Unis. La réduction des gaz à effet de serre dans le secteur des transports aux États-Unis**, Office of Transportation Technologies, ministère de l'Énergie américain (DoE), avril 1999, 24 p.
- **FAP : la solution face au problème des particules**, Technologies France, ADIT, n° 52, avril 1999, p. 8 et 9.
- **Cinq cent kilomètres à zéro émission**, RDT Info 21, février 99, p. 12 et 13.
- **Royaume-Uni. New generation engines**, Daniels (J ;R.), Economist Intelligent Unit, janvier 1999, 300 p.
- **États-Unis. Les effets de l'utilisation de l'éthanol sur la consommation d'énergie et sur l'environnement**, Center for Transportation Research (CTR), Argonne National Laboratory, janvier 1999, 39 p.
- **L'automobile en quête de l'inaccessible zéro pollution**, supplément La Tribune, 28 septembre 1998, 18 p.
- **États-Unis. Emissions management using ITS technology**, US Dept of Transportation, septembre 1998, 15 p.
- **France. L'industrie automobile japonaise, considérations énergétiques et environnementales**, Ambassade de France au Japon, février 1998, 34 p.
- **Japon. Les activités du Centre de recherche sur la pollution et la sécurité automobile**, Centre japonais de recherche sur la pollution automobiles, 1998, 226 p.
- **États-Unis. Les stratégies visant à réduire les effets à long terme de la pollution provoquée par les véhicules sur l'environnement**, NRC - Transportation Research Board, août 1997, 134 p.
- **États-Unis. Review of the research program of the partnership for a new generation of vehicles**, Board on Energy and Environmental Systems, National Academy Press, 1997, 144 p.
- **Japon. Rapport de recherche sur les véhicules faiblement polluants**, JEVA (Japan Electric Vehicle Association), 1996
- **Japon. Étude prospective sur les exigences environnementales et sociétales pour le secteur automobile**, JARI, 1995.
- **Italie. The environmental challenge**, Fiat Auto, 1995, 80 p.
- **Japon. Les véhicules à énergie propre**, Sous-comité spécial n°2 dépendant du conseil sur les énergies de l'ANRE (Agency of Natural Resources and Energy), 1994.
- **Italie. Contratto di programma tra ministero dell'ambiente e Fiat**, Ministero dell'ambiente, février 1991, 38 p.
- **États-Unis. Comparative alternative clean fuel provisions of the clean air act and the energy policy act**, US DoE, 10 p.
- **Suède. Air pollution from the transport sector, a scenario study for Europe**, Swedish Environmental Protection Agency (Swedish EPA), Report 5023, 62 p. (<http://www.environ.se:8083/swedenvironment/no0001/0001.html#art19>)

Les piles à combustible

- **Pile à combustible : un véhicule français avant la fin de la décennie**, Technologies France, ADIT, n° 60, février 2000, p. 6 et 7.
- **France. Situation des piles à combustible en Italie**, Ambassade de France en Italie, février 2000, 19 p. (réf ADIT : SMM 00 021).
- **Ménard (C.), La pile à combustible roulera en 2004**, Hors série L'Usine Nouvelle, novembre 1999, p. 95.
- **France. Les piles à combustible aux États-Unis**, ADIT, août 1999, 208 p. (réf ADIT : DT 99 008).

bibliographie

- **France. Les piles à combustible au Japon,** *Ambassade de France au Japon, juillet 1999, 16 p. (réf ADIT : SMM 99 067).*
- **États-Unis. L'utilisation d'une pile à combustible Zinc/Air pour les véhicules électriques,** *Lawrence Livermore National Laboratory, janvier 1999, 5 p.*
- **États-Unis. Les résultats des recherches conduites en 1998 par les sous-contractants industriels américains dans le domaine des piles à combustible,** *Energy Conversion Team de l'Office of Advanced Automotive Technologies, ministère de l'Énergie américain (DoE), novembre 1998, 90 p.*
- **France. Le piles à combustibles : état des lieux et perspectives (Allemagne),** *Ambassade de France en Allemagne, novembre 1998, 95 p. (réf ADIT : SMM 98 104).*
- **États-Unis. Les travaux du DoE dans le domaine des piles à combustible pour le transport,** *Energy Conversion Team de l'Office of Advanced Automotive Technologies, ministère de l'Énergie américain (DoE), novembre 1998, 65 p.*
- **France. Les piles à combustibles, une technologie émergente en Suède,** *ADIT, juillet 1998, 59 p. (réf ADIT : DT 98 009).*
- **France. Tugayé (Y), Le carburant hydrogène, MELT-DRAST-CPVS, juin 1998, 29 p.**
- **États-Unis, Le programme américain d'utilisation des piles à combustibles pour les transports terrestres de demain,** *Office of Transportation Technologies, DoE, janvier 1998, 20 p. en langue anglaise avec une synthèse en français d'Yves Tugayé. (MELT-DRAST-CPVS).*
- **Commission Européenne. A fuel cell research development and demonstration – Strategy for Europe up to 2005, DG XII, 1998, 20 p.**
- **États-Unis, In a step toward a better electric car, company used fuel cell to get energy from gasolin,** *New York Time, octobre 1997, 4 p.*

Motorisation, mécanique, énergie

- **Ménard (C.), Veillée d'armes dans l'injection directe diesel,** *L'Usine Nouvelle n° 2729, 13 avril 2000, p. 88 à 90.*
- **France. État des lieux sur le moteur GDI de Mitsubishi,** *Ambassade de France au Japon, Service pour la Science et la Technologie, 1087/DSUR, 12 nov. 1999, 27 p. (réf ADIT : SMM 99 099).*
- **États-Unis. Les carburants pour les véhicules du futur,** *Sous-Commission Énergie et Environnement de la Chambre des Représentants, octobre 1999, 20 p.*
- **États-Unis. La politique américaine en matière de limitation du soufre dans les carburants,** *Congressional Research Service, juillet 1999, 6p.*
- **La révolution des moteurs sans arbre à cames,** *R&D - la route de l'innovation. Paris : juillet 1999, p 60 à 62.*
- **Motorisations : les voies de l'avenir, R&D - la route de l'innovation,** *n° 10, octobre 1998, p. 46 à 49.*
- **États-Unis. Les nouvelles technologies pour la mise au point des futurs moteurs,** *SAE, 1998, 79 p.*
- **Flywheels in hybrid vehicles,** *Scientific American, octobre 1997, p. 75-77.*
- **Le moteur EV3 de MDI,** *<http://www.zeropollution.com>*

bibliographie

Les véhicules hybrides

- R. Apter, C. Finidori, M. Pr athaler, **Impact des véhicules hybrides sur l'environnement**, GEVIQ, Colloque national Génie  lectrique Vie et Qualité, Marseille 21-22 mars 2000.
- France. **Le point sur les véhicules hybrides au Japon**, Ambassade de France au Japon, Service pour la Science et la Technologie, 64/DSUR, 18 janv. 2000, 27 p. (réf ADIT : SMM 00 001).
-  tats-Unis. **La modélisation d'un système de stockage d'énergie destiné aux véhicules hybrides**, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Laboratoire de recherches du Département de l'énergie (DoE), août 1999, 45 p.
- J.S. Reuyl, NEVCOR, **California test case: success or are modifications needed?**, 5th Int. Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lisbon, Portugal, juillet 1999.
- S. Moore, M. Ehsani et al. **A charge sustaining HEV application of the transmotor**, SAE paper 1999-01-0919, 1999.
- W. Buschhaus, A.K.Jaura, M.A.Tamor, **P2000LSR-Ford systematic and integrated HEV development program**, VDI-Berichte nr. 1459, 1999, p. 123-135.
- Badin (F.), **Les véhicules hybrides aux  tats-Unis**, Ambassade de France   San Francisco, janvier 1998, 6 p.
- Akira Nagasaki et al., **Development of the hybrid/battery ECU for the Toyota hybrid system**, SAE paper 981122, 1998.
- S. Sasaki et al., **Toyota's newly developed electric-gasoline engine hybrid powertrain**, EVS 14, 1998.
- B. Arnet, M. Jufer, **Motor short-circuit on vehicles with multiple drives**, EVS 14, 1998.
- W. Kriegler et al., **Mechanische oder elektrische CVTs, ein Ausblick**, VDI-Bericht 1418, p.525, 1998.
- S. Friedman et al., **Potential of series and parallel hybrid vehicles to improve mobility**, Proceeding Conference FISITA, 1998.
- France. **La Prius, premier véhicule hybride de série**, Ambassade de France au Japon, novembre 1997, 8 p.
- **Hybrid Electric Vehicles**, Scientific American, octobre 1997, p. 70-74.
- Japon. ** tude sur le développement des systèmes de véhicules hybrides**, JARI, 1997.
- J.S.Reuyl, Nevcor, **Policy implications of hybrid-electric vehicles**, Rapport NREL, avril 1996
- K. Yamaguchi et al., **Development of a new hybrid system. Dual system**, SAE paper 960231, 1996.
- M. Schmidt, **Input-split, parallel, hybrid transmission**, US-patent 5,558,588, 1996.
- C. Anderson, E. Petit, **The effect of APU characteristics on the design of hybrid control strategies for hybrid electric vehicles**, SAE paper 950493, 1995.
- J. Mayrhofer et al., **A hybrid drive based on a structure variable arrangement**, EVS 12, p. 189, 1994.
- Tugayé (Y.), **Les progrès réalisés dans le cadre du programme américain sur les véhicules électriques et hybrides**, MELT-DRAST-CPVS, 16 p.

bibliographie

Les nouveaux matériaux pour l'automobile

- **France. Veille technologique sur les matériaux composites à matrice organique utilisés dans l'industrie automobile aux États-Unis** / Flores (R.), École Centrale de Lyon, sept. 1999. 58 p. (réf ADIT : DT 99 007)
- **Automobile et plastique : les nouveaux défis**, Profession plastique – Entrées en matière. Paris : sept. 1999, n° 17, p. 6 à 12.
- **France. Compte-rendu de mission au Japon sur les matériaux composites et les transports terrestres**, Ambassade de France au Japon, Service pour la Science et la Technologie, févr. 1999, 34 p. (réf ADIT : SMM 99 019).
- **Hait (J.-F.), Des mousses métalliques comme éléments de structure**, hors série L'Usine Nouvelle, Paris : novembre 1998, p. 81 et 82.
- **États-Unis. Advanced materials for automotive components**, Published search, NTIS, 1997, (239 travaux recensés).

La sécurité automobile

- **États-Unis. Un plan de R&D visant à assurer la sécurité des transports aux États-Unis**, National Research Council (NRC), octobre 1999, 78 p.
- **Sécurité automobile : Renault développe de nouveaux systèmes**, Technologies France, ADIT, n° 54, juin 1999, p. 9 à 11.
- **Conduite automobile et climat : développement de nouveaux outils d'analyse**, Technologies France, ADIT, n° 53, mai 1999, p. 9.
- **États-Unis. L'utilisation et l'efficacité des systèmes de protection des passagers**, National Highway Traffic Safety Administration, mai 1999, 35 p.
- **Motorisation et sécurité active, des évolutions significatives**, Technologies France, ADIT, n° 50, mars 1999, p. 11 et 12.
- **Japon. Compatibilité dans les collisions véhicule contre véhicule. Facteurs ayant une influence dans l'importance des blessures infligées** / Tateishi (K.). Japan Automobile Research Institute, février 1999, 8 p.
- **Italie. Il nuovo Piano Generale dei Trasporti - Capitolo 3: I riferimenti del PGT per l'ambiente e la sicurezza**, Ministero dei Trasporti e della Navigazione, 1999. (<http://www.trasportinavigazione.it/>)
- **Allemagne. Transport and Traffic, Organization-Vehicle Technology-Safety**, Fraunhofer Gesellschaft, 1997, 15 p.
- **Japon. Résultats de recherches sur l'ASV (Advanced Safety Vehicle) et orientations technologiques futures**, MOT (Ministry of Transport), 1996.

bibliographie

Autres types de sources

Banques de données

- *Profound-MAID* (revue de presse internationale permanente et ciblée)
- *Automotive news service*, 50 000 réf. bibliographiques.
- *Global mobility database* (SAE), 105 000 réf. bibliographiques.
- *Motor industry research association* (MIRA), 35 000 réf. bibliographiques, 65 % Royaume-Uni et États-Unis, 25 % Europe continentale et 10 % Japon.
- *Volkswagen literature*, 137 000 réf. bibliographiques, 60 % Allemagne.
- *Globalbase*, 1 100 000 réf. bibliographiques, 700 sources internationales, 60 % Europe, 20 % États-Unis.

Internet

Constructeurs

- <http://www.conceptsecurite.renault.fr>
- <http://www.peugeot.com>
- <http://www.bmw.de>
- <http://www.audi.com>
- <http://www.vw-online.de>
- <http://www.fiat.com>
- <http://www.gm.com>
- <http://www.chryslercorp.com>
- <http://www.buick.com>
- <http://www.ford.com>
- <http://www.fordenvirodrive.com>
- <http://www.mitsubishi-motors.co.jp>

Organismes de recherches, universités, fédérations

- Programme USCAR, <http://www.uscar.org>
- Autoroutes Intelligentes - États-Unis, <http://www.carsurvey.com>
- Programme PNGV, <http://www.ta.doc.gov/pngv>
- Transportation Research Board, <http://www.nas.edu/trb/>
- Rocky Mountain Institute, <http://www.rmi.org/>
- The Motor Industry Research Association, <http://www.mira.co.uk/>
- Advanced Transportation Technology, Office of Transportation Technologies, <http://www.ott.doe.gov/technologies.shtml>

Autres

- Véhicule électrique, <http://evworld.com> (lettre électronique hebdomadaire)
- Base de données de l'ADIT, <http://www.adit.fr>

Magazines et revues

- France, *Veille Transports Intelligents*, ADIT, trimestriel (8 numéros parus)
- France, *Vigie Énergie-Globe*, ADIT, mensuel
- France, *Vigie Matériaux avancés*, ADIT, mensuel
- France, *R&D, la route de l'innovation*, Renault, trimestriel.
- Suède, *Technology report*, Volvo.
- États-Unis, *Reinforced Plastics*, Elsevier Science, mensuel.
- Royaume-Uni, *Automotive News Europe*, hebdomadaire.

Ambassades de France à l'étranger

Le réseau des Conseillers Scientifiques et Techniques des Ambassades de France à l'étranger a participé de façon continue à la collecte des informations nécessaires à cette étude.

L'Agence pour la Diffusion de l'Information Technologique (ADIT) est un Établissement Public à caractère Industriel et Commercial, placé sous la double tutelle du Ministère des Affaires Étrangères et du Ministère chargé de la Recherche. Son Décret de création lui confie le soin de collecter, traiter et diffuser les informations scientifiques et techniques internationales, pour accompagner le développement des entreprises françaises.

Pour répondre aux demandes d'informations ou d'expertises émanant d'acteurs économiques ou institutionnels français, l'ADIT exploite un puissant réseau d'accès à l'information technologique, industrielle et stratégique développé dans les principaux pays étrangers.

Les ingénieurs spécialisés qui composent cette agence sont capables de mobiliser rapidement des experts reconnus au plan international, d'interpréter leurs avis, et de les traduire en terme d'enjeux technologiques, industriels et commerciaux.

Ils utilisent des outils puissants pour le traitement de l'information : le développement des réseaux numériques et la progression de la puissance des ordinateurs de bureau permettent en effet aujourd'hui une informatisation accrue des activités de veille.

L'ADIT vous propose de découvrir d'autres outils d'accès à l'information :

- **Technologies Internationales**, mensuel multisectoriel sur l'état des technologies mondiales.
- **Technologies France**, mensuel qui valorise les réalisations scientifiques, technologiques et industrielles françaises.
- **9 bulletins sectoriels d'alerte technologique - Collection VIGIE -**
Matériaux Avancés, Environnement, Informatique Appliquée, Agronomie et Industrie Alimentaire, Optoélectronique, Énergie-Globe, Génie Civil, Médecine et Pharmacie, Technologie de l'Information.
Ces bulletins sont le complément naturel de TECHNOLOGIES INTERNATIONALES.

L'ADIT tient à votre disposition plusieurs supports de documentation susceptibles de répondre à tous vos besoins, notamment en termes de littérature grise. N'hésitez pas à nous contacter, nous sommes au service de votre développement.

Cet ouvrage est le résultat d'une veille prospective, effectuée de septembre 1997 à mars 2000, dans le domaine des technologies automobiles, à l'initiative de M. Jacques Theys, responsable du Centre de Prospective et de Veille Scientifique à la Direction de la Recherche du ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. Il est le fruit du travail d'une équipe d'ingénieurs de l'ADIT, spécialisés dans l'automobile, les transports, les matériaux, l'énergie, l'environnement, l'électronique et les nouvelles technologies, à laquelle ont aimablement accepté de se joindre des experts internationaux.

La recherche des données et le travail d'analyse se sont appuyés sur de nombreuses sources de littérature blanche et grise, les banques de données spécialisées, l'internet et le réseau international de correspondants de l'ADIT. Les articles qui sont présentés ici sont ainsi le résultat de la synthèse d'un nombre élevé de sources de tous types, qui ont été citées globalement en bibliographie.

Nous tenons à remercier tout particulièrement le réseau des Conseillers Scientifiques et Techniques des Ambassades de France à l'étranger pour sa participation continue et active à la collecte des informations, les experts qui ont accepté de rédiger des articles, Bill Moore, animateur du site *EVWorld*, ainsi que M. Claude Lamure, chargé de prospective technologique à l'INRETS, pour son avis éclairé.

