

N° 680

ASSEMBLÉE NATIONALE

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

DIXIÈME LÉGISLATURE

N° 70

SÉNAT

PREMIÈRE SESSION ORDINAIRE DE 1993-1994.

Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale
le 3 novembre 1993.

Annexe au procès-verbal de la séance du 2 novembre 1993.

**OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES**

RAPPORT

sur l'intérêt du véhicule électrique au regard de la protection de l'environnement,

par M. PIERRE LAFFITTE,

Sénateur.

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale

par M. ROBERT GALLEY

Vice-Président de l'Office,

Déposé sur le Bureau du Sénat

par M. JACQUES MOSSION

Président de l'Office

AVANT-PROPOS

L'industrie automobile ne peut ignorer l'inéluctable percée du véhicule électrique. Quelle stratégie industrielle, quelle stratégie de recherche, quelles incitations pour lancer le marché intérieur ? Comment bâtir une industrie du véhicule électrique compétitive et dynamique ? Telles sont les questions qui se posent en France comme à l'étranger.

Car désormais, il n'est plus loisible de se contenter de débattre des avantages ou des inconvénients d'une mutation ou des risques à courir. Le risque majeur, synonyme de régression, c'est d'attendre et voir venir.

La France a de nombreux atouts spécifiques, notamment par rapport aux concurrents des États-Unis et du Japon :

- du courant électrique produit à bas prix sans pollution ni émission de gaz carbonique ou d'anhydride sulfureux ;
- un niveau de prix des carburants supérieur au niveau fixé par les études américaines pour assurer la compétitivité économique entre véhicule électrique et véhicule thermique ;
- de nombreuses villes anciennes au centre congestionné dont le patrimoine architectural de qualité est menacé ;
- une volonté très répandue de modernisme et de qualité de la part des maires et élus locaux ;
- enfin -et c'est l'essentiel- une industrie automobile dynamique et ouverte sur l'avenir.

Que nous manque-t-il ? Peut-être n'avons-nous pas encore défini et bien intégré la nécessaire stratégie de type volontariste et californien de la part de l'État et des collectivités locales, avec la ténacité, la continuité permettant à chacun de connaître ses obligations et les avantages et inconvénients à s'engager de façon claire. Le rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, saisi à la demande de M. Jean FRANÇOIS-PONCET, Président de la Commission des Affaires économiques et du Plan du Sénat, a l'ambition de contribuer de façon significative à résorber ce handicap. Pour le plus grand bien de l'industrie, de l'écologie, de la recherche, des transports et de la ville. Et ceci pour la France et pour l'Europe.

Dans un contexte économique et social parfois morose, il s'agit d'un nouveau facteur d'espoir et de dynamisme.

Pierre LAFFITTE

REMERCIEMENTS

Le rapporteur tient à remercier les membres du Comité de pilotage de son étude, à savoir :

- | | | |
|----|-------------------|---|
| M. | Claude FRÉJACQUES | Membre de l'Institut - Ancien Président du CNRS ; |
| M. | Yves GEORGE | Président de la Commission technique internationale de l'automobile ; |
| M. | Michel MOUSEL | Président de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ; |
| M. | Michel PECQUEUR | Vice-Président de l'Entreprise de recherches et d'activités pétrolières (ERAP). |

Il adresse des remerciements tout particuliers à M. Jean-Claude BALACEANU, Directeur général honoraire de l'Institut français du pétrole (I.F.P.) et à M. Alain BERTRAND, Ingénieur principal à l'I.F.P. pour la part qu'ils ont prise à l'élaboration de ce rapport et de ses annexes.

Par ailleurs, MM. Jean-Louis RICHARD, Président du Groupement interministériel des véhicules électriques, Jean SAFIR, Attaché commercial, responsable de l'antenne à Detroit du Conseiller commercial de France pour le centre des États-Unis, et M. le Professeur Claude WOLFF, Conseiller pour la science et la technique à l'Ambassade de France aux États-Unis, l'ont aidé de leurs compétences et appui.

Enfin, il remercie très chaleureusement les personnalités rencontrées en France ou à l'étranger pour la collaboration précieuse qu'elles lui ont apportée :

Personnalités rencontrées en France :

- | | | |
|----|------------------|--|
| M. | Georges BENOIST | Directeur de département - Département automobile. Division électronique et industrie - SAGEM. |
| M. | François BLAIZOT | Sénateur, Président du Conseil général de la Charente Maritime. |

M.	Michel BOUVIER	Ingénieur des services techniques chargé de la division air et silence. Mairie de Paris.
M.	Jean-Louis CAUSSIN	Directeur technique de Matra Automobile.
M.	Philippe CHARTIER	Directeur scientifique de l'ADEME.
M.	Jean-Pierre CORNU	Directeur du développement. Groupe batteries industrielles-propulsion SAFT.
M.	Michel CRÉPEAU	Maire de La Rochelle
M.	Claude DELARUE	Chef du département "énergie de substitution" Renault.
M.	Michel DEUDON	Directeur de division - division électronique et industrie - SAGEM.
M.	François FANTIN	Secrétaire général de l'AVERE-section française et nouveau responsable du programme véhicule électrique à l'EDF.
M.	Jean-François FAUVARQUE	Professeur titulaire de la chaire d'électrochimie industrielle. Conservatoire National des Arts et Métiers.
M.	André GIRAUD	Ancien Ministre.
M.	Philippe GUEDON	Président Directeur Général de Matra Automobile.
M.	Bernard GUELARD	Trésorier de l'AVERE.
M.	Jean-Yves HELMER	Directeur de la division automobile PSA.
M.	Bernard HULOT	Conseiller Technique. Direction Générale des Stratégies Industrielles. Ministère de l'Industrie.
M.	Jean-Marc KAHAN	Chef de service. Traitement de déchets et pollution atmosphérique. Mairie de Paris.
M.	Bernard LONG	PDG de SEER VOLTA. La Rochelle.
M.	Jacques MOLLARD	Directeur des services techniques de La Rochelle.
M.	Antonio MORETTI	Responsable du projet ELEGIE chez Renault.

M.	François NESPO	Ingénieur au département "Energie de substitution" Renault.
M.	Jean-Jacques PAYAN	Directeur de la recherche Renault et Président du programme PREDIT.
M.	François PELTIER	Directeur technique. Moteurs Leroy-Somer.
M.	Bernard PIERRE	Président directeur général de SAFT.
M.	Philippe de POMPIGNAN	Ingénieur général. Responsable des services techniques des transports automobiles municipaux. Mairie de Paris.
M.	Claude PROST-DAME	Président du Comité des technologies des véhicules routiers du PREDIT.
M.	François PUTOIS	Directeur général. Groupe Batteries Industrielles SAFT.
Mme	Claire RECLUS	Sous-Directeur de la protection de l'environnement. Mairie de Paris.
M.	Jacques SAINT-MARC	Secrétaire général du groupe inter-ministériel des véhicules électriques.
Mme	Gwenaëlle SANYN	Ingénieur. Centre de formation VE - EDF La Rochelle.
M.	Jacques TALLUT	Directeur du Technoforum. La Rochelle.
M.	Jacky VERGNE	Directeur général de SEER VOLTA. La Rochelle.
M.	Roland WOLF	Contrôleur général d'EDF et responsable du programme véhicule électrique à l'EDF.

Personnalités rencontrées à Bruxelles. Communautés Européennes :

M.	Paolo Maria FASELLA	Directeur Général de la DG XII
M.	Arturo GARCIA ARROYO	Directeur pour les actions de la RDT : technologies industrielles et des matériaux. DG XII.
M.	Hendrik TENT	Directeur général adjoint de la DG XII

Personnalités rencontrées aux Etats-Unis :

Washington

S.Exc.M.	Jacques ANDRÉANI	Ambassadeur de France aux États-Unis
M.	François ARMANET	Attaché scientifique à l'Ambassade de France.
M.	Kenneth BARBER	Director Electric and Hybrid Propulsion Division Office of Propulsion System U.S. Department of Energy.
M.	John J. BROGAN	Director Office of Propulsion System U.S. Department of Energy.
Mme	Kateri CALLAHAN	Executive Director. Electrical Transportation Coalition.
Mme	Lesly CORDES	Professional Staff Member of Senator J. Bennett Johnston (D-Louisiane) U.S. Senate.
M.	David GUSHEE	Senior Specialist in Environmental Policy - Congressional Research Service
M.	Henry KELLY	Assistant Director for Technology. OSTP (Office of Science and Technology Policy).

Membres du GAO (General Accounting Office)

Program Evaluation and Methodology Division :

Mme	Jacqueline D'ALESSIO	Project Manager, Electric Vehicles Project.
M.	Robert WHITE	Assistant Director, Transportation Issues.

Ressources, Community, and Economic Development Division :

M.	Chuck BAUSELL	Assistant Director, Economic Analysis Group.
M.	Greg FISCHER	Assistant Director, Energy Security and Policy (Alternative Fuels).
M.	Frank KOVALAK	Senior Evaluator, Energy Security and Policy (Alternative Fuels).
M.	Jaime E. LIZZARRAGA	Evaluator, Energy Policy.
Mme	Sarah VEALE	Senior Evaluator, Energy Security and Policy.

Californie (Los Angeles, Sacramento, San Francisco)

M.	Alan COCCONI	Président de l'AC Propulsion Inc.
M.	Gérard COSTE	Consul général de France à Los Angeles
M.	Alain FROSSARD	Conseiller Commercial au Consulat général de France à Los Angeles.
M.	Lee GRISSOM	Senior Advisor Economic Development. Office of Governor.
M.	Charles R. IMBRECHT	Senator, Chairman Energy Resources, Conservation and Development Commission.
Mme	LALLART-CARVALHO	French Trade Commission
Mme	Brenda M. LOPES	Directeur California Trade and Commerce Agency.
M.	Glenn M. PERRY II	Chief Operating Officer. CALSTART
M.	Pascal REVEL	Attaché scientifique au Consulat Général de France à San Francisco.
M.	Yvon ROE D'ALBERT	Consul général de France à San Francisco
M.	Herschel ROSENTHAL	Senator, Chairman of the California Energy Commission.
M.	Dean SCHONFELD	California Trade and Commerce Agency Office of Competitive Technology.
M.	Michael WIRSCH	Manager Electric Transportation Department. Sacramento Municipal Utility District.

Michigan (Detroit, Dearborn)

M.	Robert BRUETSCH	Assistant Chief. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Office of Air and Radiation.
Dr.	David COLE	Director, (OSAT) Office for the Study of Automotive Transportation. The University of Michigan.
M.	David FENSTERMACHER	Executive Director, Marketing. Ford Motor Company.
Dr.	Karl HELLMAN	Chief of Technology Development U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Office of Air and Radiation

M.	William KELLY	Director, International Governmental Affairs. Ford Motor Company.
M.	Richard LUCKI	Directeur de PSA aux Etats-Unis.
M.	Dave SMITH	Director, Electric Vehicle Marketing. Ford Motor Company.
M.	Don WALKOWICZ	Director USCAR (United States Council for Automotive Research).
M.	John WALLACE	Manager, Electric Vehicle Technology Programs. Ford Motor Company.
M.	Larry WEIS	Director of Communications, USCAR (United States Council for Automotive Research).

Sommaire

AVANT-PROPOS	3
REMERCIEMENTS	5
I. LES ENJEUX	13
I.A. L'enjeu écologique	13
a) L'évolution du secteur des transports	13
b) Les problèmes	14
c) La solution du véhicule électrique	14
I.B. L'enjeu énergétique, un argument politique	16
I.C. L'enjeu économique potentiel	17
I.D. Les enjeux politiques et sociaux	20
a) L'opinion publique et l'écologie	20
b) Les responsables européens et nationaux	20
c) Les élus locaux	21
II - L'ÉTAT DE L'ART DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES	23
1. Le générateur électrochimique	24
2. L'électronique de puissance	26
3. Les moteurs électriques	26
4. Autres domaines	27
a. Le véhicule hybride	27
b. Le volant d'énergie	27
c. Le traitement des données en temps réel	27
d. Les télécommunications et la télématique	28
e. Divers	28
III. L'ÉCONOMIE	29
IV. LES MODALITÉS DES AIDES PUBLIQUES ET LES INCITATIONS À LA DEMANDE	31
IV - A. Les décisions administratives autoritaires	31
IV - B. Les aides financières	31
IV - C. L'appui à l'information objective	32
V. PROSPECTIVE DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE : LE SCÉNARIO PROBABLE	33
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	37
PREMIÈRE ANNEXE :	
Composants et technologies du véhicule électrique	41
A. LES BATTERIES	43
1. Batterie au plomb	47
2. Batterie Nickel-Cadmium	47
3. Batterie Nickel-Hydrure Métallique	49
4. Batterie Sodium-Soufre	50
5. Batterie Sodium-Chlorure de nickel	51
6. Batterie Nickel-Zinc	52
7. Batterie Fe-Ni	52
8. Batterie Zinc-air	53
9. Batterie Zinc-brome	54
10. Batterie Zn Cl ₂	54
11. Batterie Li Al - FeS (2)	55
12. Batterie Li-polymère	56

13. Equipement de recharge des batteries	56
a. Sécurité électrique	58
b. Réduction des harmoniques parasites dans le réseau électrique public	58
c. Moyen de paiement	58
d. Changement standard des packs de batterie	59
e. Mesure de l'état de charge des batteries	59
B. LES PILES A COMBUSTIBLE	60
1. La pile à hydrogène	60
a. Stocker l'hydrogène à bord : aucune des méthodes envisageables ne donne satisfaction :	60
b. Fabriquer l'hydrogène sur place	61
2. La filière à acide phosphorique	62
3. La filière à carbonates fondus (Li,K)	62
4. La filière à oxydes solides	62
5. La filière à membrane polymérique solide échangeuse de protons	62
6. Pile à combustible aluminium-air	63
7. Piles à combustible zinc-air	64
C. LES MOTEURS ELECTRIQUES	68
1. Le moteur à courant continu	68
2. Le moteur asynchrone (ou à induction) à cage d'écureuil	69
3. Moteur synchrone à aimant permanent	70
4. Moteur brushless à courant continu	70
5. Moteur à réluctance variable	71
6. Moteur dans les roues	71
7. Conclusion	72
D. LES VEHICULES ELECTRIQUES HYBRIDES	75
1. Véhicule hybride avec moteur à essence	75
2. Véhicule hybride à diesel	75
3. Véhicule hybride à turbine	76
4. Véhicule hybride deux temps	77
Conclusion	78
E. RECENTES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES	78
1. L'électronique de puissance	78
2. Les aimants permanents	82
3. Utilisation d'un volant d'énergie	83
4. Autres innovations techniques	85
DEUXIÈME ANNEXE : Compte rendu des visites	87
1. VISITE À EDF	89
2. VISITE À RENAULT-PREDIT	93
3. VISITE À PSA	97
4. VISITE AU CNAM	99
5. VISITE AU PREDIT	105
6. VISITE À RENAULT	111
7. VISITE À MATRA	115
8. VISITE À LA MUNICIPALITE DE PARIS	119
9. VISITE À SAGEM	123
10. VISITE À LEROY-SOMER	127
11. VISITE À SAFT	131
12. MISSION AUX ETATS-UNIS	139
Texte de la saisine	161

Une nouvelle industrie émerge, liée au progrès technique et aux exigences de l'environnement : elle concerne le véhicule électrique. Ce dernier est susceptible d'avoir un impact sensible sur le marché mondial de l'automobile, de constituer une opportunité pour les firmes américaines de reconquérir leur marché, pour les firmes japonaises de s'y maintenir, pour les firmes coréennes de s'y introduire. La France, en raison de ses options énergétiques favorables à l'électricité, du dynamisme de ses constructeurs d'automobiles et de l'importance de son industrie équipementière est bien placée sur ce marché dont l'importance économique sera avant trente ans très significative et peut-être de l'ordre de grandeur de celui de l'industrie automobile d'aujourd'hui.

I. LES ENJEUX

I.A. L'enjeu écologique

a) L'évolution du secteur des transports

Le secteur des transports est en perpétuelle croissance et plus de 95 % de l'énergie qu'il consomme est d'origine pétrolière et représente pour les pays de l'O.C.D.E. 50 % de leur consommation pétrolière, 20 % de leur consommation énergétique.

De 1973 à 1989, le taux de croissance des transports routiers de ces pays s'est accru de 2 % par an (3,2 % rien que pour l'Europe), les prévisions jusqu'à l'an 2005 conduisent à des taux de croissance de près de 1 % par an (près de 2 % pour l'Europe) faisant réapparaître les tensions sur le marché pétrolier des années quatre-vingts.

Sur le plan de la pollution, le gaz carbonique dégagé (effet de serre) par les transports s'est accru de 34 % alors que l'accroissement global n'est que de 7 %.

Pour les Etats-Unis, les transports représentent 500 millions de tonnes de pétrole (27 % des consommations d'énergie, 64 % des consommations pétrolières) et sont responsables de 63 % de la pollution par l'oxyde de carbone, 38 % par les oxydes d'azote, 34 % par les vapeurs organiques, 31 % par le plomb, 20 % par les particules émises, etc.

b) Les problèmes

Au delà de cette pollution globale, l'urbanisation croissante conduit à des situation insupportables pour les grandes agglomérations : Los Angeles, Athènes, Mexico, Milan, etc. En France, 30 % des populations des centres urbains sont exposés à un niveau sonore à la limite du supportable.

Des problèmes majeurs : changement de climat du à l'effet de serre, dérèglements biologiques dus à l'ozone atmosphérique généré par les oxydes d'azote, niveaux sonores intolérables en centre-ville imposent des mesures qui seront longues et difficiles à mettre en oeuvre et pour lesquelles le véhicule électrique est en partie une solution.

c) La solution du véhicule électrique

Face à la congestion et à la pollution croissante et insoutenable des centres urbains, le véhicule électrique (V.E.) apparaît aux autorités publiques, municipales en particulier, comme la solution susceptible d'assurer :

- la suppression pratiquement totale de la pollution locale : oxyde de carbone, oxyde d'azote, hydrocarbures imbrûlés (le V.E. est le seul véhicule "zéro pollution"),
- la réduction des bruits permettant le développement des livraisons de nuit dans les centres villes.

Si la pollution locale est réduite de façon décisive, elle est en fait délocalisée et remplacée par une pollution régionale et globale à la centrale électrique fonction du "mix" d'énergie primaire utilisée pour la production : nucléaire, hydraulique ou thermique (gaz, fuel, charbon, lignite).

Cette pollution régionale, apportée par la production de l'électricité nécessaire aux transports par véhicules électriques, est :

- nulle dans le cas d'une centrale hydraulique pour tous les polluants,
- nulle (à l'exception peut-être d'un léger accroissement de radioactivité) pour une centrale nucléaire¹,

¹ Il convient de noter que la radioactivité induite par une centrale au lignite -par suite des traces d'uranium présents dans le charbon et les lignites- est presque toujours supérieure à la radioactivité induite par une centrale nucléaire de puissance équivalente.

- sensible pour les centrales thermiques à combustibles fossiles par le dégagement de CO^2 inhérent à la production d'énergie, mais également par celui de SO^2 , de CO, des hydrocarbures imbrûlés, des NOX, des particules.

La pollution la plus forte est liée aux centrales à lignite et au charbon. Elle est la moins élevée pour les centrales au gaz. Cependant, la centralisation de l'opération permet, par ses effets d'échelle, des gains d'efficacité énergétique et l'élimination des polluants des fumées.

De très nombreuses études ont été publiées tant aux Etats-Unis, qu'en Europe et en France :

- la pollution en soufre est divisée par dix, celle en oxyde d'azote réduite d'un tiers, pour les centrales à gaz qui ont tendance à se développer et par rapport à celle de véhicules thermiques,

- pour les "mix" européens impliquant charbons et lignites ou américains (en dehors de la Californie où la part du gaz est importante), les niveaux de pollution par rapport aux véhicules thermiques conventionnels sont excellents quant aux CO et aux hydrocarbures imbrûlés ; ils sont du même ordre de grandeur pour le CO^2 . La réduction des oxydes d'azote est faible ou moyenne et la quantité de SO^2 dégagée par km parcouru suivant la teneur en soufre des charbons ou lignites peut être plus élevée. Mais précisons que cette notion de mix ne tient pas compte de la réalité industrielle, puisqu'une consommation accrue d'électricité conduit à construire une nouvelle centrale, qui tout normalement devrait être soit nucléaire à pollution quasi nulle, soit à gaz, à pollution faible.

La législation californienne qui impose entre 1988 et 2003 de faire passer le nombre de véhicules pollution zéro (Z.E.V., Zero Emission Vehicle) de 2 % à 10 % pour les fabrications de série de plus de 35.000 véhicules, relève d'un ensemble cohérent de mesures visant à réduire de 75 % la pollution du parc automobile ; elle fait suite à des réglementations qui, depuis 1960, ont déjà réduit les émissions d'hydrocarbures et de CO de 96 % et de 76 % celles de NO.

Cette réglementation définit un certain nombre de standards pour les véhicules à pollution réduite (L.E.V., Low Emission Vehicle) :

- les T.L.E.V. véhicules de transition,
- les véhicules à faible pollution (L.E.V.) qui constitueront 80 % du parc en 2003,
- les véhicules à très faible pollution (U.L.E.V.),

• et, finalement, les Z.E.V., véhicules à pollution locale zéro, normes auxquelles seuls les véhicules électriques répondent.

La répartition de ces différents véhicules dans le parc fixe, à une date donnée, la pollution moyenne et il est bien évident que dans un premier temps l'impact de la réduction du nombre des véhicules anciens polluants est bien plus efficace que la présence à une pénétration faible de véhicules électriques coûteux.

A plus long terme, seul le véhicule électrique apporte une solution définitive et stable dans le temps, car sa pollution locale est nulle. En outre, point très important pour qui connaît les difficultés du contrôle de véhicules anciens et polluants, les dispositifs anti-pollution des véhicules thermiques peuvent se dérégler. Les véhicules électriques à cet égard restent, quel que soit leur âge, non polluants.

I.B. L'enjeu énergétique, un argument politique

Comme nous l'avons vu, le secteur des transports en croissance continue de 2 % par an dépend à plus de 95 % du pétrole. Les transports constituent près de 60 % des utilisations énergétiques pétrolières et plus de 50 % de la consommation mondiale de pétrole.

A une époque marquée par les crises économiques et militaires du Moyen Orient, et devant la part prépondérante des réserves pétrolières de cette région, les pays industrialisés consommateurs sont nécessairement conduits à une politique de sécurité qui se traduit tant par la réduction des consommations pétrolières que par la recherche d'un pétrole présent dans des localisations géographiques diversifiées : pétrole marin, pétrole lourd, etc.

Quoi qu'il en soit, le pétrole de transport semble difficilement substituable par d'autres énergies : le gaz comprimé, les biocarburants, le méthanol ex gaz ou ex charbon, etc.

La possibilité de répondre de façon massive aux besoins des transports par une énergie électrique, elle-même accessible au départ à toutes les énergies : hydraulique, nucléaire, gaz, charbon, lignites, bois, solaire, éolienne, etc., apparaît donc comme un dessein considérable dont la faisabilité est démontrée depuis longtemps.

Le gain en consommation énergétique globale depuis le gisement d'énergie au km parcouru par le véhicule électrique existe déjà dans l'état actuel de la technique, mais devrait devenir plus appréciable avec les améliorations de rendement des batteries à la

charge et à la décharge et avec l'économie de consommation réalisée dans le trafic des centres villes.

Précisons ici qu'au stade initial de l'industrie du véhicule électrique l'impact du véhicule électrique sur les consommations pétrolières restera modeste. Le "gisement" de substitution est d'abord celui des carburants urbains (de l'ordre de 20 % des consommations pétrolières ou inférieur). Une pénétration de 10 % du V.E. ne touchera que 2 % des besoins en pétrole.

En revanche, l'impact sur les prix peut être sensible parce que l'on touche à des consommations à la marge et à la valeur marginale du pétrole dans son emploi de masse le plus noble. La pénétration crédible de véhicules électriques est donc de nature à modérer les prix du marché pétrolier. Il relève indiscutablement de la politique de sécurité des pays consommateurs.

I.C. L'enjeu économique potentiel

L'industrie des transports constitue un des secteurs industriels les plus importants : près de 50 millions de véhicules sont construits par année, avec un chiffre d'affaires de l'ordre de 800 milliards de dollars. L'Europe est le premier marché mondial avec un solde exportateur de 20 milliards de dollars ; le chiffre d'affaires de l'industrie américaine représente 200 milliards de dollars et ses importations 40 milliards de dollars, elle emploie un travailleur américain sur sept.

En France, le chiffre d'affaires de l'industrie automobile est de 330 milliards de francs avec un solde exportateur de l'ordre de 30 - 35 milliards de francs ; il correspond à 10 % de la production industrielle ; la main d'oeuvre directe, équipements compris, est de l'ordre de 350.000 personnes, auxquelles il faut ajouter 470.000 personnes dans les industries fournisseuses (métallurgie, pneumatiques, plastiques, peintures) ; si l'on y ajoute les emplois d'usage de l'automobile, y compris le raffinage et les transports routiers, elle implique 2.600.000 personnes.

Plus encore, l'industrie automobile entraîne dans son sillage les industries des moteurs, une part de la métallurgie, des plastiques, des caoutchoucs, des matériaux en général, de l'industrie de la peinture, de l'électronique, etc.

C'est un domaine de compétition sévère entre trois pôles : Europe, Etats-Unis, Asie (Japon, Corée).

L'apparition d'une mutation dans ce domaine non seulement aura des répercussions considérables par le volume des chiffres d'affaires et la redistribution des parts du marché mondial global, mais aussi par son impact sur des industries souvent nouvelles : batteries, moteurs électriques, électronique de puissance, matériaux nouveaux, climatisation, systèmes de stockage d'énergie, aimants permanents, dont les marchés sont en forte croissance, comme par exemple celui des batteries pour équipements portables (ordinateurs, aspirateurs, téléphones, etc.).

Ces considérations économiques expliquent la politique des trois pôles de l'industrie automobile :

- Les Etats-Unis (20 à 23 % des fabrications), en tête par la législation californienne qui impose le V.E., y voient une occasion de reconquête de leur marché (cas des trois grands constructeurs dans le Michigan).

Mais, désormais, avec l'évolution de la conjoncture internationale, la réduction des budgets militaires et la crise du secteur militaro-spatial, des arguments économiques et sociaux objectifs et puissants viennent renforcer l'intérêt du véhicule électrique : il s'agit pour la Californie de trouver des secteurs de reconversion de ses ingénieurs, scientifiques et industries de haute technologie ; les transports électriques constituent un domaine potentiel important.

La Californie pourrait devenir un centre de fabrication des composants du véhicule électrique, avec la création de structures comme CALSTART, consortium sans but lucratif de développement de techniques avancées dans les technologies de transports assurant une vitrine de composants du véhicule électrique : contrôle de la batterie, moteurs, chargeurs par induction, siège à température conditionnée, système de sécurité ... composants mis au point par des industriels ou des associations d'industriels. Le budget actuel est de 20 millions de dollars, un premier objectif dans les années 2000 vise 60.000 emplois.

D'autres Etats comme le Massachusetts qui a adopté la législation californienne ont les mêmes ambitions et sont engagés dans des développements analogues sur la base de la même analyse.

- L'Asie : Japon et Corée (33 % de la production) sont intéressés par ce nouveau marché potentiel où le Japon entend maintenir ses positions et la Corée élargir les siennes.

- L'Europe enfin (33 % des fabrications) favorisée dans ce domaine, à l'inverse des Etats-Unis, tant par le prix élevé de ses

carburants qui contribue à assurer la compétitivité du véhicule électrique, que par la concentration de ses centres urbains pour lesquels le rayon d'action limité de ces véhicules est un inconvénient moins gênant qu'aux États-Unis.

Au sein de l'Europe, la France, par le dynamisme de son industrie automobile (P.S.A., RENAULT, MATRA), l'importance de son industrie des batteries (S.A.F.T.) et ses options énergétiques nucléaires, apparaît comme un partenaire puissant, motivé et particulièrement actif dans la compétition internationale pour cette percée technologique peut-être de très grande importance et dans laquelle le risque est moindre de s'engager que de rester passif.

I.D. Les enjeux politiques et sociaux

a) L'opinion publique et l'écologie

Les préoccupations d'environnement, on l'a vu, ont constitué un élément essentiel déterminant dans la recherche d'une solution aux problèmes de pollution urbaine en particulier aux États-Unis. En Europe, on constate que nombre de villes sont amenées à interdire, certains jours, la circulation automobile pour cause de pollution excessive. Et l'expérience quotidienne montre bien que l'opinion publique est favorable au véhicule électrique, chacun sait que l'électricité est le vecteur énergétique le plus moderne, le plus souple, le plus efficace. Toutefois, l'information circule mal. Beaucoup pensent «que ce n'est pas au point», ou que «les industriels sont contre» ou qu'il y a «trop d'intérêts en jeu». Notre rapport pourra, à cet égard, apporter des lumières nouvelles.

La qualité de vie apportée par l'électricité n'est plus à prouver. Dans le cas de la France, il faut ajouter que la grande part d'électricité provenant de l'hydroélectricité et la bonne acceptation de l'énergie nucléaire rendent, en outre, intéressante l'utilisation de cette énergie nationale.

En revanche, on peut s'étonner qu'il n'y ait pas d'organisation qui milite, toutes forces confondues, en faveur du véhicule électrique, comme il y en a qui défendent les intérêts des céréaliers ou de l'industrie des travaux publics. Faut-il créer un groupe français analogue à l'Electric Vehicle Coalition de Washington ?

b) Les responsables européens et nationaux

Certains en Europe, peut-être liés à tel ou tel lobby, ont évoqué le fait qu'au niveau global un transfert de consommation énergétique du secteur essence automobile vers le secteur électrique n'assurerait pas la diminution de la pollution et on a dans diverses enceintes, et notamment à Bruxelles, parlé d'une pollution en SO₂ induite par le véhicule électrique ! Car l'électricité est parfois produite par des centrales utilisant des lignites riches en soufre. Sur le plan de la pollution atmosphérique globale, d'aucuns estiment qu'il faut prendre en compte la production «européenne de l'ensemble des centrales existantes». Cette notion de "mix" européen, déjà évoquée ci-dessus, est presque arrivée au stade de dogme, sous l'effet évident de groupes de pression favorables à l'utilisation de lignite chargé en soufre polluant, pour produire de l'électricité.

S'agissant de ressources énergétiques complémentaires à prévoir pour le futur, la notion de mix actuel n'a aucun sens. Mesurer les pollutions induites par l'usage futur de véhicules électriques ne peut se faire qu'en examinant les nouvelles centrales qu'il faudrait construire à cet effet, en cas d'introduction massive du véhicule électrique.

En fait, pendant de nombreuses années, la consommation d'électricité supplémentaire sera une consommation en heures creuses qui ne nécessitera pas d'investissements nouveaux mais régularisera la consommation jour/nuit. Et par la suite on peut dans de nouvelles centrales -au gaz naturel ou nucléaires- éviter l'essentiel des pollutions moyennes actuelles.

Les "public utilities" des États-Unis l'ont bien compris. Elles adhèrent, nombreuses, à l'Electric Vehicle Coalition, groupement qui à Washington défend avec brio et efficacité la cause du véhicule électrique.

Ce lobby axe ses propos sur les thèmes majeurs de l'environnement, de l'indépendance énergétique, de l'aménagement du territoire et des défis technologiques à relever avant les concurrents, notamment japonais.

Peut-être conviendra-t-il d'intervenir auprès du Parlement européen et de Bruxelles sous une forme analogue en créant un groupement européen pour le véhicule électrique. Ce GEVE pourrait d'ailleurs être chargé de recenser et diffuser toutes les initiatives nationales et mondiales pour mieux informer les parlementaires, les socioprofessionnels, les responsables des commissions et les responsables régionaux et territoriaux.

c) Les élus locaux

Les préoccupations des élus locaux en matière de véhicule électrique correspondent en général à un certain nombre de soucis :

1. le souci de bien gérer les finances publiques ;
2. la lutte contre le bruit et la pollution ;
3. l'image de marque de la ville ou de la région en matière d'environnement, comme en matière de modernité ;
4. la volonté de développement économique local (création d'emplois, adaptation des emplois aux nouvelles technologies, création de richesses, etc.).

Le premier point est bien évidemment important en l'état actuel. Il existe une lacune immense dans l'information du public et des élus locaux en ce qui concerne les potentialités, les coûts d'usage et d'entretien des véhicules électriques.

Le rapport de l'Office parlementaire permettra, nous l'espérons, de contribuer à une meilleure information. Soulignons toutefois ici la nécessité absolue d'aller plus loin. En particulier, des programmes tels que le programme mis en oeuvre par le Groupement interministériel des véhicules électriques avec l'ADEME¹ et la Communauté de Bruxelles (3 millions de kilomètres sous contrôle technique et économique précis) doivent améliorer l'information objective des élus locaux et du public.

De plus, tant qu'une solution satisfaisante ne sera pas proposée en matière de coût d'investissements des batteries, on sera devant le handicap du surcoût en capital initial, même si en coût de fonctionnement le véhicule électrique devient plus que compétitif. En revanche, si la location des batteries devient une règle générale comme cela est envisagé en France, la compétitivité économique est d'ores et déjà assurée.

Les trois autres points conduisent tous à un engagement positif des collectivités locales. On l'a bien vu lors de l'appel d'offres réalisé qui a mobilisé plus de cinquante villes, appel d'offres dont beaucoup avaient été écartées a priori.

Les élus locaux sont en général très favorables au véhicule électrique tout en étant sous-informés sur le plan technique et économique. *Il faut donc mieux organiser l'information, tant des services techniques des villes, que des élus responsables.*

1 Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

II - L'ÉTAT DE L'ART DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Le développement du VE, constamment annoncé depuis des décennies mais toujours retardé par la supériorité du véhicule thermique, dépend évidemment de certaines percées technologiques dans plusieurs domaines dont les plus importants sont les générateurs électrochimiques et l'électronique de puissance. La recharge, un des points clefs du système de transport par VE, est, elle-même, conditionnée par :

- la limitation du stockage d'énergie électrique de la batterie donc du rayon d'action du véhicule,
- les facilités, les caractéristiques et le coût d'implantation du réseau de distribution électrique.

Comme on l'a vu, le VE de zone urbaine doit avoir une autonomie de 100 km en Europe, de 100 miles ou de 200 km aux Etats-Unis, avec des performances de vitesse et d'accélération équivalentes à celles d'un VT moyen. En tablant sur une consommation de 100 Wh par km, on est conduit à des capacités satisfaisantes de stockage de l'ordre de 20 à 40 kWh.

Quant à la distribution, si l'on ne veut pas être conduit à des investissements prohibitifs susceptibles de mettre en cause le développement même du véhicule électrique, il faut que ces 20 à 40 kWh soient accessibles grâce au réseau conventionnel : distribution classique monophasée (avec prise de terre) 16-25 ampères - 220 volts qui en 8-10 heures peut effectivement délivrer une énergie de 30 à 50 kWh. Au delà de ces recharges "standards", on arrive à des distributions plus puissantes techniquement accessibles, mais plus coûteuses, impliquant des équipements de sécurité.

La recharge lente s'opérerait la nuit de préférence pour ne pas surcharger le réseau et bénéficier des tarifs les plus économiques. La recharge rapide de secours, a priori nécessaire face à la hantise de la panne sèche électrique (30 km en une demi-heure, soit une puissance de 12 kW), implique des ampérages très élevés qui nécessitent également des équipements de sécurité.

Le changement standard de packs de batteries est évidemment une solution de secours envisageable. Mais il pose des problèmes de manutention, d'investissement, car les batteries sont coûteuses, de standardisation des assemblages de colis de batteries qu'il conviendrait d'étudier de façon coordonnée.

En revanche, il faut souligner tout l'intérêt qui s'attacherait à la création d'une société de leasing, d'autant plus que les avantages de cette formule s'allieraient à ceux d'une protection accrue de l'environnement.

1. Le générateur électrochimique

En 1991, les grands industriels américains de l'automobile, le DOE¹ et l'EPRI² ont créé l'US ABC (US Advanced Batteries Consortium) pour financer en commun des travaux de recherche et de développement sur les batteries avancées non polluantes, ce qui exclut la filière au plomb et au nickel cadmium (les seules qui seront industrialisées à l'horizon 1998, date d'application de la législation californienne). Cet organisme a déterminé le cadre des travaux en fixant les objectifs à moyen terme : 80 ou 100 Wh/kg, 150 ou 200 W/kg, 600 cycles, 150 \$/kWh.

Examinons maintenant la situation :

La batterie au plomb (40 Wh/kg, 90 W/kg, 1000 cycles) bénéficie d'une expérience plus que centenaire sans être pour autant arrivée au bout de ses améliorations (batteries bipolaires, ...). Elle conservera certainement son créneau dans le domaine des chariots de manutention et des engins rustiques. Sauf progrès dont certains sont en cours, elle devra laisser la place aux concurrentes pour les VE urbains et surtout périurbains à cause de ses caractéristiques énergétiques modestes.

La batterie NiCd (65 Wh/kg, 200 W/kg, 2000 cycles) marque un net progrès, en particulier sa puissance massique est excellente. Son avenir commercial est assuré, mais elle n'est pas sans défauts :

- un prix élevé, presque celui de l'automobile sans batterie, qui implique la mise en place de montages financiers pour son acquisition par leasing ;
- la relative rareté du cadmium (20000 t/an) qui ne posera éventuellement problème qu'après la production cumulée de 2 millions de VE ;
- le difficile contrôle de l'état de charge.

1. Department of Energy.

2. Electric Power Research Institute.

Tout ceci conduit à s'intéresser aussi aux filières avancées susceptibles de prendre le relais. La batterie NaS (100 Wh/kg, 100 W/kg, 400 cycles), étudiée depuis 1965, a longtemps semblé prometteuse mais, outre la contrainte d'être maintenue à 350°C dans un réservoir thermostaté, elle souffre de la fragilité aux chocs thermiques de son composant principal en céramique, ce qui limite aléatoirement sa durée de vie et provoque des feux au sodium. Ces problèmes ne semblent pas encore résolus et même, selon des informations officielles récentes, les fabricants n'assureraient pas les livraisons prévues et renonceraient à leurs projets.

Les constructeurs américains, allemands et italiens qui avaient misé sur la solution NaS doivent donc se rallier rapidement au NiCd, solution déjà choisie par les Français et les Japonais, en attendant l'émergence industrielle d'autres systèmes.

Le mieux placé semble être le Ni-MH (nickel-hydrure métallique) un peu supérieur au NiCd sur le plan énergétique (80 Wh/kg, 200 W/kg, 1500 cycles) et qui, malgré des craintes anciennes, ne devrait pas coûter plus cher. Une fois confirmés de récents résultats prometteurs, il pourrait déboucher vers l'an 2000.

Le zinc-air, très étudié il y a 15 ans puis abandonné en raison de difficultés techniques liées à la mise en oeuvre du zinc, réapparaît. Les sociétés DEMI¹ et LUZ-EFL² annoncent des chiffres remarquables qui restent à vérifier sur le plan industriel : 300 Wh/kg et 50 \$/kWh.

Pour le long terme (après 2010), les systèmes au lithium, et plus particulièrement la filière LiAl-FeS₂ (120 Wh/kg, 220 W/kg, 1000 cycles), sont prometteurs ; aussi sont-ils très étudiés par l'US ABC.

Les piles à combustibles sont aussi à considérer. Elles ne nécessitent pas une longue recharge électrique mais le remplissage du "carburant" et éventuellement le changement rapide d'une électrode usée, ce qui pose le problème d'un nouveau circuit de distribution. Deux systèmes pourraient déboucher à moyen terme (2000-2005) :

- avec membrane polymérique échangeuse d'ions
- aluminium-air.

Les travaux en cours départageront ces candidats d'ici quelques années et en premier lieu pour les autobus et les camions. L'industrie européenne n'est pas absente.

1. DEMI : Dreisbach Electro Motrice Incorporated.

2. LUZ-EFL : Electric Fuel Limited.

2. L'électronique de puissance

Elle remplit un double rôle très différent de celui de l'électronique de calcul :

- opérer des commutations sous forte tension et avec des fréquences élevées
- modifier à volonté l'alimentation de tous les composants solides du système de traction : voltage, ampérage, fréquence, forme des ondes,...; de cette façon chacun d'eux est utilisé de façon optimale dans toutes les circonstances (démarrage, accélération,...) sans intervention humaine.

De telles possibilités améliorent le fonctionnement du moteur continu mais transforment celui des moteurs alternatifs.

D'où la percée de dispositifs comme les IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor), les thyristors GTO (Gate Turn Off) et MCT (MOS Control Thyristor) fabriqués par les industries japonaises et américaine. Le développement du VE provoquerait un enrichissement industriel certain en amenant les Français à prendre une part de ce marché stratégique. Les études de l'Office ont conduit à relancer le groupe électronique de puissance CRIN (CNRS-Industrie).

3. Les moteurs électriques

Ils bénéficient des progrès réalisés particulièrement en électronique de puissance et en aimants permanents. Les moteurs continus sont les moins concernés par ces avancées. Leur importance actuelle dans les VE devrait disparaître (ils sont lourds, difficiles à fabriquer en série, assez peu améliorables par l'électronique de puissance...) sauf dans le créneau des chariots de manutention.

Parmi les moteurs alternatifs, deux se détachent :

- le moteur synchrone alimenté en ondes créneaux appelé "brushless continu" avec rotor en aimant permanent (dont les meilleurs sur le plan de la puissance magnétique ont un point de Curie de 150°C seulement)
- le moteur asynchrone à cage d'écureuil et sans aimant permanent qui l'emporte sur tous les points : meilleur marché, meilleur rapport puissance-poids, plus grande puissance disponible (150 kW).

Ce dernier semble devoir équiper la plupart des VE standards. Son électronique de puissance assez chère diminuera beaucoup avec une fabrication en série et une recherche technologique appropriée.

4. Autres domaines

a. Le véhicule hybride

Permettant de faire face aux limitations d'énergie embarquée par les batteries donc de rayon d'action des VE, il comporte un moteur thermique associé à un électrique selon deux configurations :

- en série ou "tout électrique" il recharge continuellement la batterie en fonctionnant selon un régime optimal pour le rendement et la non pollution (c'est le cas de la turbine à gaz) ;
- en parallèle il fonctionne uniquement hors des villes (c'est le cas du diesel ou peut-être du deux-temps).

Généralement une batterie NiCd est utilisée pour fournir une surpuissance (accélération, montée de côte, dépassement,...) aux moteurs thermiques (c'est aussi le cas avec les piles à combustible). La question est de savoir si le VH ne cumule pas les inconvénients de prix et, malgré tout, de pollution des deux véhicules. Il pourrait répondre à des niches spécifiques : bennes à ordures, ...

b. Le volant d'énergie

Pour récupérer l'énergie de freinage on peut utiliser :

- un moteur fonctionnant en générateur et alimentant la batterie (rendement 20 %)
- un volant d'inertie lourd et délicat à monter (rendement 40 %)
- une supercapacité (rendement 60 %).

Ce dernier élément, relativement nouveau, est actuellement étudié dans de nombreux laboratoires. L'énergie récupérée accroît le rayon d'action du VE (6 %) et évite de surdimensionner les batteries pour les cas peu courants de surpuissance.

c. Le traitement des données en temps réel

Les progrès spectaculaires réalisés en matière de microprocesseurs (vitesse et puissance de calcul) et de capteurs de données (rapidité et précision des mesures) permettent de déterminer en temps réel le fonctionnement du bloc moteur et de commander en conséquence l'électronique de puissance.

d. Les télécommunications et la télématique

Les VE disposant d'une importante source d'électricité se prêtent mieux que les VT aux applications des télécommunications et de la télématique : recherche d'un parking, détermination du meilleur trajet compte tenu des informations fournies, ...

e. Divers

On se bornera à la liste ci-dessous non limitative :

- l'étude d'aimants permanent dotés à la fois d'une bonne puissance magnétique et d'un point de Curie élevé qui favoriseraient les moteurs synchrones ;
- le "bus de terrain", câblage spécial entourant le véhicule, qui permet la circulation de l'ensemble des communications atteignant leur objectif grâce à un codage numérique spécifique à chacun d'eux ;
- les pompes à chaleur thermoélectriques assurant le confort thermique des passagers à moindre dépense électrique et sans carburant embarqué, ni pollution ;
- les paliers magnétiques évitant les pertes par frottement ;
- l'intelligence floue facilitant les prises de décision automatique (freinage, changement de vitesse, ...).

Au total, l'industrialisation des VE entraînera à la fois un renouvellement et un enrichissement technique :

- renouvellement parce que 70 % des composants utilisés dans les VE nécessiteront l'emploi de technologies nouvelles ;
- enrichissement car le recours à ces dernières s'accompagnera de la découverte d'autres applications dans des domaines porteurs d'avenirs.

Citons l'électronique de puissance et les volants d'énergies (supercapacités) fournissant une grande puissance d'énergie instantanée dans d'autres types d'engins (chars Leclerc, ...).

III. L'ÉCONOMIE

S'agissant de la compétitivité économique du véhicule électrique, un grand nombre d'évaluations ont été tentées aux États-Unis (Ford), en Europe, en Suède, en Allemagne, en France (ADEME)... Les études impliquent nécessairement des données prospectives tenant compte des améliorations possibles à moyen terme, des performances des batteries (énergie et puissance par kg, prix au kWh, durée de vie) telles que celles fournies par le consortium US ABC à moyen et long terme.

Malgré une certaine dispersion dans les évaluations quantitatives portant sur des prototypes précis, on peut considérer que, dans la mesure où on atteint entre les années 1995 et 2000 des séries de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de véhicules (petite berline, autonomie 100 km ou plus, 20 kWh, vitesse et accélération raisonnable...), le coût du véhicule électrique sans batterie sera très proche de celui du véhicule thermique (70 000 F) ; le coût de la batterie peut représenter jusqu'à 50 % du prix du véhicule (35 000 F mais la moitié en prenant les objectifs moyen terme de US ABC 150 dollars/kWh).

Quant à la dépense actualisée sur dix ans pour 10 000 km/an, au coût au km parcouru on arrive :

- pour les États-Unis, où le carburant est plus de trois fois moins cher qu'en Europe, à un coût de l'ordre de 20 % supérieur à celui du véhicule thermique passager ou fourgonnette) ; la compétitivité implique donc des aides financières justifiées par l'intérêt écologique ou l'indépendance énergétique ;

- pour l'Europe, et en particulier pour la France, les véhicules électriques semblent pouvoir atteindre la compétitivité dès le lancement des premières séries, les postes entretien et énergie compensant le surcoût actualisé des batteries (les évaluations américaines fixent du reste le prix du carburant conduisant à la compétitivité au niveau des prix français du super, avant la majoration du 12 juillet 1993).

Il importe de remarquer que dans ces évaluations, l'électricité est comptée à un prix de 0,3 à 0,5 F/kWh indiquant pour une large part une recharge d'heures creuses, ce qui suppose que l'État accepte une perte de rentrées financières (ou de subventions) de l'ordre de 3 000 F/an et par véhicule (taxe intérieure sur les produits pétroliers).

On notera que les frais d'établissement du réseau de distribution électricité ne sont pas pris en compte même s'il ne s'agit

que d'une recharge de nuit utilisant les puissances classiquement distribuées 16-25 Amp 220 volts. Ceci est logique puisque ce réseau a été réalisé indépendamment de l'existence de cette clientèle nouvelle.

En conclusion, pour l'Europe et la France, si l'on atteint un seuil de production annuelle de 50 000 véhicules pour autant que les conditions d'utilisation satisfassent les consommateurs, l'économie globale du véhicule électrique semble devoir être compétitive voire plus favorable, et ne soulève financièrement qu'un problème d'investissement initial (15 000 à 30 000 F) soluble par une location des batteries ; cette compétitivité liée aux prix des carburants apparaît donc déjà en Europe bien avant d'émerger aux États-Unis.

IV. LES MODALITÉS DES AIDES PUBLIQUES ET LES INCITATIONS À LA DEMANDE

Si au plan local, régional et national le véhicule électrique apporte une série d'avantages quant à l'environnement et à la sécurité énergétique du pays, et peut conduire à des développements économiques créateurs d'emplois, son coût, son investissement initial, ses inconvénients d'usage conduisent les Pouvoirs Publics à favoriser son développement par des aides financières, des avantages d'utilisation, incitations assorties de campagnes d'information sur l'intérêt de cette innovation. La puissance publique dispose ainsi de toute une gamme de moyens pour amener le véhicule électrique au seuil de marché commercial normal.

IV - A. Les décisions administratives autoritaires

C'est la méthode particulièrement efficace retenue par l'État de Californie dont la législation impose 2 % de véhicules électriques dans les véhicules neufs en 1998, 10 % en 2003 ; la législation fait tache d'huile dans les quatorze États américains et entraîne, à l'échelle mondiale, la détermination des constructeurs automobiles.

Des mesures de ce type pourraient être arrêtées de façon plus souple. Par exemple, on peut, par la loi, imposer que le renouvellement des flottes de l'État, des entreprises publiques, et des sociétés nationales, soit obligatoirement réalisé en véhicules électriques, sauf démonstration d'impossibilité technique, au cas par cas. Ceci pourrait être étendu aux collectivités locales, aux flottes de services urbains, de desserte d'aérodromes, etc.

Les interdictions de circulation dans les centres villes des véhicules polluants, en étant levées pour les véhicules électriques, pourraient aussi être des incitations fortes.

Des zones de limitation de bruit peuvent conduire de même à une interdiction de fait de véhicules dont la pollution sonore serait excessive dans certaines zones urbaines.

IV - B. Les aides financières

Elles sont attribuées à l'acquisition du véhicule ou à des détaxations de l'énergie électrique ; elles peuvent prendre la forme de réduction de taxes, de crédit d'impôts (4 000 dollars par véhicule électrique en Californie), etc.

C'est en fait le cas lorsque l'on accepte de fournir l'énergie électrique destinée au transport au même prix que l'énergie électrique courante : il en résulte pour les États des pertes de recettes sur les taxes affectées aux produits pétroliers (de 2 000 à 4 000 F/an par véhicule).

Les taxes sur les véhicules automobiles étant le plus souvent liées à la puissance ou à la cylindrée favorisent les véhicules électriques.

Ces aides peuvent aussi être attribuées selon d'autres modalités :

- primes à l'acquisition qui peuvent être fixes (France 15 000 F/véhicule) ou égales à la différence des prix entre véhicule électrique et thermique (cas de la Suède, de la Suisse...) ;
- soutien à un système financier de location des batteries ;
- aide financière publique au réseau de distribution électrique, aux parkings, aux garages d'immeubles avec recharge...

IV - C. L'appui à l'information objective

Rappelons ici l'importance primordiale des centres d'évaluation et de test des véhicules et de leurs équipements. La nouveauté déconcerte toujours et la variété des solutions techniques actuelles nécessite que des organismes en partie financés par l'État apportent au public les précisions qu'il est en droit de demander.

On a évoqué ci-dessus le programme 3 millions de kilomètres sous contrôle technique précis par les deux centres de La Rochelle et de Sophia-Antipolis.

On notera qu'en Allemagne, le Centre d'évaluation de Rügen est financé à hauteur de 10 millions de francs par le Ministère fédéral de la Recherche.

V. PROSPECTIVE DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE : LE SCÉNARIO PROBABLE

L'industrie automobile mondiale semble parfaitement consciente de la mutation qu'impliquera une percée industrielle du véhicule électrique, elle reste hésitante entre le poids des éléments positifs indiscutables : mise en place programmée de la législation, maturité des techniques, seuil de rentabilité accessible, et le poids d'éléments incitant à la prudence : non-compétitivité dans certaines parties du globe, performances insuffisantes pour certains usages nécessitant des progrès techniques difficilement prévisibles... ; tout cela explique une politique de certaines industries, notamment aux États-Unis, composée d'initiatives techniques impliquant la compétition avec des prototypes spécifiques à chaque marque et un partage frileux des risques par la création de consortiums (USCAR qui traite des grands thèmes : sécurité, émission, matériaux... dont les batteries par USABC, programme PREDIT¹ en France, programmes communautaires, etc.).

Aux États-Unis une question se pose : la législation californienne entrera-t-elle en vigueur en 1998 ou sera-t-elle décalée ?

L'État de Californie semble déterminé politiquement et sa capitale SACRAMENTO a développé un programme complet et cohérent d'expérimentations de la filière véhicule électrique : flottes de véhicules, postes de recharge, parkings, entretien, information, formation, etc. (programme SMUD, Sacramento Municipal Utility District).

La législation californienne est imitée par les États du Massachusetts, du Maine, de New-York et prise en considération par une dizaine d'autres États.

Le nouveau gouvernement fédéral démocrate semble au moins aussi motivé que son prédécesseur.

Par ailleurs, comme on l'a vu, des motivations économiques importantes de reconversion des industries militaro-spatiales, en Californie mais également dans d'autres États comme le Massachusetts ou l'Arizona, à industries de hautes technologies, viennent conforter les arguments stratégiques généraux d'environnement et d'indépendance énergétique.

Toutes les considérations développées militent donc en faveur du maintien du calendrier de la réglementation californienne : du reste, l'ensemble des fabricants, équipementiers, producteurs

1. Programme de recherche pour l'innovation et la technologie dans les transports terrestres.

d'électricité, municipalités sont regroupés dans l' "Electric Transportation Coalition" à laquelle participent PSA et Asea Brown Boveri comme Européens, qui assure un lobby bien organisé, puissant et efficace à Washington et dans l'ensemble des États-Unis.

Les grands fabricants de Detroit (Ford, GM, Chrysler) ont leurs réalisations propres (Impact de GM, Ecostar de Ford, TEvan de Chrysler), sont unis dans des consortiums (USCAR, USABC...), et semblent envisager suivant l'évolution de la conjoncture à cinq ans :

- soit d'affirmer, en 1998, que la réglementation est irréaliste parce que non économique et sans marché ;

- soit si la situation leur apparaît acceptable, de réclamer une aide fédérale (justifiée, par exemple, par les impératifs de sécurité énergétique couvrant l'écart de rentabilité du véhicule électrique).

L'industrie américaine semble très attentive au marché européen, non seulement à cause de ses filiales en Europe, mais parce que c'est le marché le plus important à l'échelle mondiale, et que la compétitivité du véhicule électrique y apparaîtra en premier à cause du prix du carburant et compte tenu des caractéristiques de nos villes et des comportements des propriétaires de véhicules.

* * *

Compte tenu de l'engagement de l'industrie européenne, de la position déterminée de l'industrie française, des arguments écologiques et de stratégie énergétique, de l'impact du véhicule électrique sur des industries porteuses d'avenir et des prises de position volontaristes qui en résultent au niveau des gouvernements et des autorités régionales et municipales, la situation française est très différente. L'émergence technique et industrielle du véhicule électrique est en cours. Les centres d'évaluation et de test des véhicules électriques de La Rochelle et de Sophia-Antipolis, appuyés par le groupement interministériel pour le véhicule électrique, l'ADEME et les services de la CEE, les réalisations pilotes dans les villes choisies permettront d'informer mieux la clientèle.

Pour la France, tout milite, en effet, pour qu'elle s'engage dans une politique très volontariste. Ce domaine industriel non seulement rencontre les préoccupations mondiales, mais répond à ses options énergétiques, au développement de ses grands secteurs industriels, automobile électrique, batteries, électronique. De plus, ceci nous ouvrira des productions de hautes technologies porteuses d'avenir.

À noter que cette stratégie doit comporter un côté volontariste du côté des équipementiers puisque, selon certaines évaluations, près de 70 % des composants d'un véhicule électrique sont différents des véhicules thermiques et 40 % très différents. C'est donc une nouvelle industrie qui viendra se greffer sur l'industrie actuelle de fabrication de composants, d'assistance et de gestion des services après-vente et commercialisation.

C'est aussi un renouveau du système d'entretien des véhicules et de leur maintenance.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

1. La voiture électrique est une innovation majeure qui présente un intérêt incontestable au point de vue de la protection de l'environnement. C'est là sa principale justification, ses autres avantages ne faisant que conforter cet élément primordial.

Le transfert de la pollution due à la circulation automobile des centres-villes vers des zones où elle est moins directement nocive et plus facile à contrôler et à maîtriser et la réduction du niveau sonore des moteurs sont des facteurs essentiels pour améliorer la qualité de la vie en zone urbaine. Ces avantages sont indiscutables dans les villes européennes à riche passé historique qui sont les plus atteintes par les nuisances de la circulation automobile et l'Europe devrait être prioritairement intéressée par ce type de véhicule.

Aux États-Unis, les choses sont moins nettes et c'est principalement le souci de la qualité de l'air qui constitue le vecteur de développement de la voiture électrique.

Les enjeux énergétiques paraissent moins importants dans la mesure où le véhicule électrique sera avant tout un véhicule urbain destiné à assurer les transports soit de personnes, soit de marchandises peu pondéreuses à l'intérieur des villes ou à leurs périphéries.

En revanche, le développement de véhicules électriques et non plus seulement l'adaptation de batteries et de moteurs sur des modèles déjà existants peut être un puissant facteur de développement ou de redéploiement industriel à l'heure où beaucoup d'industries de pointe se voient contraintes de procéder à des reconversions, sous l'effet notamment de la réduction des budgets militaires.

2. Les solutions techniques actuellement offertes par l'industrie sont suffisamment avancées pour permettre dès maintenant un développement du véhicule électrique. La France est bien placée à cet égard, il serait regrettable qu'elle laisse la place dans ce secteur à la concurrence étrangère.

3. Il est nécessaire de poursuivre les recherches. Les véhicules thermiques bénéficient d'un siècle de recherches qui se poursuivent. S'agissant du véhicule électrique il faut, en effet, améliorer les performances limitées par celles du stockage électrique.

Pour les usages urbains qui se caractérisent par une multiplicité de petits parcours entre lesquels peuvent s'insérer des temps de recharge, ces inconvénients ne sont pas rédhibitoires; ils le deviennent, en revanche, lorsqu'il s'agit de parcours importants.

L'effort de recherche doit se développer aussi bien dans un cadre européen qu'à l'échelon national.

Les programmes européens financés par la Communauté semblent avoir été limités. S'agit-il d'un manque de réalisme devant l'ampleur de l'enjeu ? S'agit-il de l'effet retardateur émanant de certaines entreprises ou de certains pays qui considèrent qu'il ne faut pas que la Communauté s'y engage ? Les deux sans aucun doute.

L'enjeu, à terme, touche la survie d'une part notable de l'industrie automobile européenne. Cela mériterait pourtant infiniment plus que des bribes de programme (Joule ou Brite).

Pourquoi ne créerait-on pas, au niveau communautaire, une *Task Force* spécialisée, dotée d'un budget au moins comparable sinon supérieur à celui qu'y consacrent les États-Unis ou le Japon ?

La même timidité se trouve dans le programme de recherche national ou régional en France. Le programme de 500 millions en deux ans, est certes en augmentation. Mais il faut en priorité le double. *On ne peut considérer que la recherche dans le secteur du véhicule électrique soit du seul ressort de l'industrie privée ; on ne considère pas que la recherche dans le domaine aéronautique soit du seul domaine de l'industrie correspondante. L'enjeu, en termes d'emploi et de PIB, du véhicule électrique est nettement supérieur à terme et en matière de stratégie nationale l'enjeu est aussi important.*

Nous sommes loin du compte pour le financement public ou privé malgré l'existence de recherches dans le domaine du stockage de l'énergie - menées en France par l'Institut français du Pétrole, ELF, EDF, Alcatel-Alsthom, SAFT... Quant aux constructeurs automobiles,

ils ont, jusqu'à une époque récente, perçu les trois secteurs techniques essentiels : stockage énergétique, systèmes d'électronique de puissance, motorisation, comme des problèmes qui concernaient les seuls équipementiers, qui ne disposent pas de la même surface financière que les constructeurs.

Il faut d'urgence remédier à cela et prévoir de grands programmes de recherche.

Les constructeurs ont en la matière pris leurs responsabilités. L'État pas encore, à un niveau suffisant.

4. Il est indispensable de développer des centres d'évaluation, de test et de normalisation du véhicule électrique et de prévoir une large information du public.

Là encore au niveau gouvernemental et au niveau européen, on est ébahi par le retard des réalisations et des programmes et surtout les limites de l'engagement de la puissance publique.

En France, il n'existe qu'un seul centre de test et d'évaluation indépendant des constructeurs fonctionnant depuis plusieurs années (La Rochelle) et un deuxième s'est mis en place à Sophia-Antipolis. Le visiteur est souvent étonné de la faiblesse des moyens dont ces centres disposent malgré le dynamisme de leurs promoteurs. En Allemagne, le centre de Rügen est bien équipé. Il apparaît urgent de mettre en place, en Europe et en France, des moyens supplémentaires pour ces centres de test et d'évaluation et, le cas échéant, d'en créer d'autres et d'assurer leur interaction effective. Dans les diverses localisations, ces centres devraient évaluer de façon concrète les divers véhicules, équipements et systèmes proposés.

La richesse d'informations qu'apporteront des millions de kilomètres parcourus par des milliers de voitures testées est indispensable. Les clients, les donneurs d'ordre, les équipementiers et les constructeurs disposeront d'une véritable information comparative crédible.

Les mêmes opérations menées dans les divers pays européens permettraient de préparer les décideurs et les populations à une percée du véhicule électrique basée sur une connaissance précise de leurs caractéristiques actuelles, des préséries et des caractéristiques des prototypes. Il faut que les Gouvernements et la Commission de Bruxelles se préoccupent de ce problème, comme de celui de la normalisation des équipements.

5. Par dessus tout, il apparaît que seule une politique volontariste des pouvoirs publics est à même d'assurer la percée rapide du véhicule électrique.

De la part des Gouvernements et des Parlements, une volonté politique clairement affirmée en faveur du véhicule électrique entraînera et confortera la détermination des constructeurs d'automobiles.

Cette volonté peut se traduire par des incitations fiscales concernant le véhicule lui-même, l'énergie utilisée, les flottes de véhicules ou encore les structures de préfinancement et de leasing des batteries.

L'État peut aussi donner l'exemple en décidant, chaque fois que cela est possible, de recourir au véhicule électrique plutôt qu'au véhicule thermique.

Enfin, les collectivités locales ont un rôle à jouer par l'adoption de mesures de natures multiples :

- utilisation des véhicules électriques pour les transports municipaux ;
- aide au réseau de distribution électrique sur les parkings, les garages d'immeuble, etc. ;
- définition et mise à disposition de places de parking réservés aux véhicules électriques ;
- harmonisation entre parking véhicule électrique et arrêts de transports en commun ;
- obligation de livraison avec véhicules zéro pollution dans les zones semi-piétonnes ;
- autorisations préférentielles de circulation : centres villes, couloirs réservés, etc.

ADOPTION DES CONCLUSIONS DU RAPPORT PAR L'OFFICE PARLEMENTAIRE

Au cours de sa séance du 7 juillet 1993, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a adopté les conclusions du rapporteur.

PREMIÈRE ANNEXE

Composants et technologies du véhicule électrique

- A. Les batteries
- B. Les piles à combustible
- C. Les moteurs électriques
- D. Les véhicules hybrides
- E. Récentes innovations techniques

A. LES BATTERIES

Les batteries constituent l'élément clé limitatif du développement des véhicules électriques et hybrides. Parmi les nombreux systèmes électrochimiques envisageables, la sélection s'opère sur plusieurs critères et en particulier :

- les performances énergétiques
- la durée de vie (mesurée en nombre de cycles charges-décharges)
- la rareté et le prix des matériaux utilisés
- la facilité de fabrication de l'appareillage
- les problèmes de maintenance, de toxicité et de récupération finale

Le premier point est le plus important. On distingue :

- l'énergie massique exprimée en Wh/kg qui détermine l'autonomie du VE et dont la valeur est généralement assez éloignée de sa limite théorique
- la puissance massique exprimée en W/kg dont dépend la capacité du VE à changer de régime (accélération, dépassement, montée en côte...)

Les deux tableaux ci-dessous indiquent :

- les caractéristiques des principaux systèmes envisagés
- les performances exigées des batteries avancées à moyen et long terme définies par l'USABC (consortium américain regroupant les industriels concernés par le VE) qui constituent pratiquement les données de référence.

Une trentaine de filières a été envisagée et essayée avec des succès divers :

- celle au plomb, qui n'a jamais quitté la scène depuis plus d'un siècle, est la seule à être industrialisée
- certaines (Ni Cd, Ni MH,...) accèdent à la notoriété après une longue période d'ombre et des premières applications dans les domaines de faible énergie

- d'autres (Ni Zn, Ni Fe, Zn Cl₂,...) sont apparues comme des challengers sérieux avant d'être abandonnées
- des dernières (comme Zn - air que nous traiterons avec les piles à combustible) reviennent à la lumière après une première notoriété suivie d'un oubli de 15 ans.

Ce changement dans l'échelle des valeurs correspond à une meilleure estimation de certains critères (maintenance, protection de l'environnement,...) ou à des percées technologiques (métallurgie des poudres,...). Nous allons essayer de faire le point actuel.

Caractéristique des systèmes électrochimiques envisagés

Filière	Energie mass théor. (Wh/kg)	Energie massique (Wh/kg)	Puissance massique (W/kg)	Durée de vie (nombre de cycles)
Plomb	165	40	90	1000
Ni-Cd	208	65	200	2000
Ni-Fe	264	50	100	300
Ni-Zn	322	70	160	200
Ni-H ₂	372	80	200	1500
Zn-Br ₂	430	70	90	500
Li Al-FeS	454	130	150	100
Zn-Cl ₂	663	60	50	1400
Na-S	685	100	100	400
Na-Ni Cl ₂	790	100	-	-
Zn-O ₂	1070	300	150	200
Al-O ₂	4030	250	150	-
Li Al-FeS ₂	1159	120	220	1000
Li-carbone		140	250	1200

Critères de l'USABC

Critère	Objectif à moyen-terme	Objectif à long-terme
puissance massique (W/kg)	150 (200 désirés)	400
énergie massique (Wh/kg)	80 (100 désirés)	200
durée de vie (an)	5	10
nombre de cycle	600	1000
dégradation de W et Wh (en %)	20	20
prix en \$/kWh (1000 unités de 40 kWh)	150 max	100 max
température opératoire (°C)	-30 à + 65	-40 à + 85
temps de recharge (heure)	6 max	3 à 6
décharge continue en 1 h. (%)	75	75

1. Batterie au plomb

En raison de son ancienneté (découverte par Gaston PLANTE en 1859, premier tricycle électrique en 1881), cette filière :

- est la seule à être industrialisée
- équipe 95 % des VE (livraison de lait en Grande-Bretagne, chariot de manutention d'objets lourds, voiturette de golf,...)
- dispose d'une technologie éprouvée et d'une grande sécurité d'emploi.

Elle n'en continue pas moins à être améliorée :

- En 1957, la société Sonnenschein (filiale du CEAC) a inventé la batterie étanche "dryfit" à électrolyte gélifié qui ne demande aucun entretien et équipe depuis 1985 une quantité croissante de VE en Europe (flotte de Citystromer,...)
- Plus récemment la technique NVR (New Valve Regulation) améliore le modèle ouvert ("flooded") qui domine encore le marché mondial malgré les soins périodiques qu'il exige
- le concept bien connu de batterie bipolaire, où la même plaque de plomb est anode d'un côté et cathode de l'autre, fait l'objet d'études intensifiées depuis peu en France (SORAPEC), aux Etats-Unis (Electrosorce, Trojan,...), dans l'espoir d'aboutir à des performances de 50 Wh/kg, 200 W/kg et 1000 cycles.

Ces efforts sont développés non pas dans le cadre de l'USABC (la batterie au plomb n'est pas considérée comme avancée) mais dans celui de l'ALABC (Advanced Lead-Acid Battery Consortium créé en début 1992 et rassemblant alors une cinquantaine d'industriels concernés) qui dispose d'un budget de 19,3 M\$ sur 4 ans. Ils devraient permettre à la batterie au plomb de maintenir sa position prédominante dans le secteur de l'engin lourd de manutention et de garder une petite part de celui de l'automobile électrique où les batteries concurrentes (Ni Cd, Ni MH,...) ont toute chance de s'imposer d'ici la fin du siècle.

2. Batterie Nickel-Cadmium

Mise au point dès 1901 par Edison pour Ford et développée par Messerschmidt en 1944-45, la batterie nickel-cadmium s'est imposée dans les domaines industriels du générateur électrique de secours (aviation, lanceurs de satellites, TGV, métro, relais de

télécommunications, signalisation du trafic routier, éclairage des grands bâtiments,...) et, depuis 1988, des appareils mobiles (ordinateurs portables, aspirateurs, caméscopes, jouets,...). Attaquant avec succès celui de la traction automobile, elle équipait la plupart des modèles de VE urbains européen et japonais de démonstration exposés à Florence en septembre 1992. Elle ne manque pas, en effet, de qualités :

- longue durée de vie
- possibilité de recharges rapides
- puissance et énergie massique élevées permettant à un VE très sophistiqué comme le japonais IZA de parcourir 500 km à 40 km/h
- seule filière disponible industriellement avec le plomb à l'horizon 1998.

Cela ne signifie pas pour autant une rapide percée commerciale pour les VE commerciaux. En effet la filière Ni-Cd pose encore des problèmes :

- un prix élevé (quatre fois supérieur à celui des batteries au plomb), conséquence de celui du nickel
- un effet de mémoire (la capacité de charge diminue temporairement après une longue série de charges et décharges partielles) que l'on sait combattre par une pleine recharge à intervalle régulier
- une mauvaise connaissance de l'état de charge (30 % puis 10 %)
- une faible efficacité au dessus de 50°C mais on peut facilement y remédier en mettant la batterie dans un caisson thermostaté
- les éventuels effets mal connus des recharges rapides type Nissan (40 % de la charge en 6 minutes) sur la durée de vie et le réchauffement de la batterie, que l'on cherche à combattre grâce à un chargeur intelligent
- la toxicité du cadmium, surestimée dans les VE où il est utilisé sous une forme chimique non dangereuse (solution basique insoluble dans l'eau) ce qui n'a pas empêché son interdiction provisoire en Californie
- une disponibilité limitée mais finalement non contraignante de ce métal.

En effet, le cadmium, sous-produit obligé (20 000 t/an) de l'extraction du zinc et utilisé dans le VE à raison de 40 kg par unité, sera recyclé à presque 100 %, dans le cas des batteries. Jusqu'à une production cumulée de 2 millions de VE, aucun problème de ressources ne devrait se poser. Au delà, le recours progressif à la filière nickel-hydrure métallique assouplira la situation .

L'avenir commercial des VE à batteries NiCd semble double :

- les VE urbains qui, bénéficiant des recharges ultra rapides de jour, auront une autonomie élargie avec, éventuellement, moins de batterie donc une diminution de prix
- les véhicules hybrides (VH) en raison de la nervosité des batteries NiCd qui seront rechargées continuellement et en douceur par un moteur thermique ou une pile à combustible.

Le domaine des engins lourds de manutention devrait rester une chasse gardée des batteries au plomb dont le poids ne constitue pas un inconvénient pour cette application.

3. Batterie Nickel-Hydrure Métallique

La batterie Ni-MH bénéficie des progrès effectués dans les deux technologies du stockage de l'hydrogène par des hydrures métalliques et de la batterie Ni-Cd. Elle ressemble fort à cette dernière (sauf que l'électrode négative est en hydrure métallique au lieu de cadmium) et possède certaines de ses qualités :

- bonnes tolérances aux surcharges et décharges
- grande durée de vie
- fonctionnement à basse température
- pas de maintenance en raison de son étanchéité
- énergie et puissance massiques un peu supérieures

De plus elle ne souffre pas d'effet de mémoire lors de la recharge et ne possède qu'en très faible quantité du cadmium nocif sous certaines formes chimiques (d'ailleurs non utilisées dans les VE).

En contrepartie son prix est supérieur (mais devrait baisser avec une fabrication en masse) et elle exige une excellente gestion thermique (contrôle de la montée en température et de la pression d'hydrogène en

cours de recharge,...). On cherche aussi à améliorer les matériaux de stockage d'hydrogène qui sont de deux sortes :

- le type éprouvé AB_5 où A (La, mischmetal) est une terre rare ou un mélange de terres rares et B du nickel (en tout ou en partie)
- le type $A B_2$ avec A : Ti, Zr,... et B : Ni, Mn, Ch, V,...

Les études industrielles ont sérieusement commencé en 1975. Le remplacement sur le satellite Intelsat 5 d'une batterie Ni Cd par une Ni MH en 1982, marque le début d'une concurrence qui du domaine aérospatiale s'est étendue à celui des applications mobiles (ordinateurs, aspirateurs,...) avant d'attaquer celui du VE. Plusieurs sociétés sont en compétition mais deux seulement, le laboratoire OVONICS et la firme industrielle SAFT - America, ont reçu un contrat de l'USABC. La première vient de publier des résultats prometteurs qui laissent sceptiques les spécialistes.

4. Batterie Sodium-Soufre

La batterie Na-S, développée depuis 28 ans par Ford, puis par General Electric, ABB, CGE, Yurasa, Chloride Silent Power,... comporte des réactants liquides soufre et sodium séparés par une électrolyte solide de type céramique (alumine bêta) qui est à la fois conducteur de l'ion sodium et isolant électronique à la température opératoire de 350°C. L'ensemble est contenu dans un récipient hermétiquement scellé et thermiquement contrôlé par un microprocesseur pour le maintenir à la bonne température.

Ses avantages ne sont pas négligeables :

- une énergie massique très supérieure à celle des batteries au plomb et Ni Cd
- une absence pratique de perte de charge (on récupère toute l'énergie qui a été introduite)
- un fonctionnement sans maintenance de -20°C à + 60°C
- la détermination facile de l'état de charge.

Elle possède aussi plusieurs défauts :

- une fragilité mécanique des pièces en céramiques encore mal maîtrisée en production industrielle et entraînant un regrettable manque de fiabilité sous l'effet de chocs thermiques

- la nécessité d'être maintenue à 350°C (on ne peut pas dépasser une dizaine de cycles refroidissement-réchauffement)
- une puissance massique deux fois inférieure à celle de la batterie NiCd qui répond mieux aux changements rapides de régime
- des problèmes de sécurité résolus aux yeux des techniciens (les industriels ont fait des essais de chocs concluants) mais mal ressentis par le public et par certains législateurs (interdiction d'emploi au Japon) qui redoutent les températures élevées de fonctionnement et les feux de sodium.

La batterie NaS a déjà été expérimentée dans l'espace et sur la route. Elle devait équiper une nouvelle génération de VE allemands (Mercedes, BMW), italiens et américains. Ce projet semble compromis car, selon des informations parfois contradictoires, ABB n'assure pas ses livraisons et aurait reconsidéré sa politique industrielle en matière de batteries NaS après 12 ans d'efforts.

5. Batterie Sodium-Chlorure de nickel

La batterie Na-Ni Cl₂, qui comporte une électrode négative en sodium liquide séparée de l'électrode positive solide en Ni Cl₂ par une fine céramique d'alumine bêta (bonne conductrice de l'ion sodium) et un électrolyte liquide en Na Al Cl₄, possède des similitudes avec celles au NaS:

- emploi d'alumine bêta et de sodium
- énergie massique actuelle de 100 Wh/kg
- température opérationnelle de 250-300°C.

Certains avantages particuliers sont mis en avant par ses promoteurs:

- bon fonctionnement après 300 cycles refroidissement-réchauffement
- durée de vie de 900 cycles
- résistance aux chocs (chute de 10 m), aux surcharges électriques et aux vibrations
- pas de problème de corrosion

- formation de Na Cl lorsque Na et Na Al Cl₄ sont mis en présence sous forme liquide
- stockage thermique de 3,3 kWh sur une batterie de 20 kWh utilisable pour le réchauffement de l'espace habitée du VE.

En fait, les essais en vraie grandeur ne sont pas suffisamment avancés (équipements de 3 Mercedes 190 depuis la mi-1991) pour se faire une idée valable de la filière et de sa capacité à supplanter les batteries NaS. Le principal fabricant (Zebra) assure qu'il disposera d'une capacité de production de 10 MWh en fin 1993 mais se préoccupe de la cherté du nickel et envisage soit de le recycler soit de le remplacer par du fer moins onéreux.

6. Batterie Nickel-Zinc

Très étudiée de 1978 à 1986 la filière Ni Zn est tombée ensuite dans une complète désaffection malgré une énergie spécifique supérieure de 50 à 100 % à celle au plomb, car elle présente par rapport à celle-ci :

- un prix double
- une durée de vie moitié (moins de 400 cycles en laboratoire) due à la solubilité du ZnO déchargé à l'anode qui change progressivement la forme de l'électrode et aucun industriel n'est parvenu à pallier ce défaut rédhibitoire.

7. Batterie Fe-Ni

Au cours des années 1980 cette filière partait favorite pour remplacer celle au plomb et on comptait plusieurs projets industriels:

- association SAFT-Peugeot-AFME pour un VE de 850 kg en 1984
- camionnette Voyager de Chrysler en 1986
- véhicules utilitaire Master et Express de Renault essayés à Chatelleraut à partir de 1986.

Tous ces travaux ont été abandonnés en raison des progrès de la concurrence (Ni Cd,...) et des défauts de la filière :

- faible efficacité énergétique exigeant une surcharge de 50 %

- électrolyse de l'eau de l'électrolyte nécessitant une alimentation en eau à chaque recharge (d'où délicats problèmes de maintenance).

8. Batterie Zinc-air

Le système électrochimique Zn-air, traité plus largement dans le chapitre sur les piles à combustible, fait l'objet d'un renouveau après quinze ans de silence, probablement dû à des problèmes technologiques (manipulation délicate des fines poudres de zinc, difficile fabrication d'électrodes efficaces, circulation des suspensions de zinc,...). Puis au début des années 1990 deux sociétés ont brusquement annoncé des résultats remarquables.

- a. DEMI (Dreisbach Electro Motrice Incorporated- Santa Barbara), après avoir amélioré l'électrode à air, a gagné plusieurs courses automobiles d'endurance (404 km parcourus sur une seule charge en trafic urbain) et envisage de commercialiser à la mi-1995 des VE dont les batteries, de 120-240 Wh/kg coûteraient 50 \$/kWh dans une fabrication de masse.
- b. Luz EFL (Electric Fuel Limited - Jérusalem) a amélioré la fabrication de la fine poudre de zinc et de l'électrode de zinc. L'énergie massique serait portée à 300 Wh/kg (donc une batterie de 10 kWh pèserait 24 kg au lieu de 210 pour une au Ni Cd). Des essais, effectués sur des voitures de la poste de Munich, atteignent des autonomies de 300 km et se déroulent sans poser de problème particulier (le changement de l'électrode usée se fait en trois minutes).

Tout cela repose le problème de l'implantation d'un nouveau circuit commercial de distribution, une fois dépassé le stade des flottes captives et confirmés les résultats précédents peut-être un peu optimistes.

9. Batterie Zinc-brome

Dans les batteries Zn-Br₂, les deux électrolytes (Zn-Br₂ d'une part et Zn-Br₂ plus agent complexant de l'autre) sont stockés séparément et pompés selon deux parcours différents vers les deux parties d'une cellule bipolaire comportant un séparateur. Cette technique étudiée par Exxon depuis les années 1970 présente quelques avantages :

- fabrication en grande série potentiellement bon marché car les principaux éléments sont en plastique (électrodes en carbone-plastique, séparateur en polyéthylène,...)
- fonctionnement à température ambiante
- mesure aisée de la décharge qui peut atteindre 100 %.

Mais le reste du bilan est moins prometteur :

- caractéristiques énergétiques moyennes
- risque de croissance de dendrites de zinc dans le séparateur (nécessité d'une décharge complète après plusieurs cycles)
- durée de vie encore insuffisante
- nocivité du brome gazeux en cas de fuite (ce qui l'élimine du programme USABC)
- complexité du dispositif mécanique (pompes,...) qui accroît d'autant les causes de pannes.

Les essais routiers réalisés depuis 1985 ont permis d'améliorer le système et d'obtenir des performances satisfaisantes en particulier sur une Panda-Fiat (autonomie de 260 km à 50 km/h, vitesse maximale de 120 km/h). On parle d'une mise en service de 10 000 batteries par an. Mais cette filière ne nous semble pas pouvoir s'imposer face à la concurrence des autres.

10. Batterie Zn Cl₂

En 1972, Armand HAMMER, président de Occidental Petroleum, lançait cette batterie mise au point par sa filiale Udylyte Co et qui venait de faire des essais sur une Chevrolet Vega (96 km/h, 160 km d'autonomie). En 1976 cette filière développée par Energy Development Association faisait l'objet d'une Joint Venture réunissant Gulf + Western, Hooker Chemicals, l'ERDA et l'EPRI. Une solution aqueuse de Zn Cl₂ stockée à l'extérieur chargeait une

électrode de zinc et une autre de chlore qui était retiré puis libéré sous forme gazeux lors de la décharge. Le dispositif avait une grande durée de vie car les électrodes n'étaient pas attaquées lors du processus électrochimique. L'objectif était d'obtenir un VE doté d'une vitesse de 110 km/h et d'une autonomie de 240 km. Le système a été abandonné vers 1985.

11. Batterie Li Al - FeS (2)

La batterie Li Al - FeS (2) comprend :

- une électrode négative composée de l'alliage Li (20 %) Al (80 %)
- une électrode positive composée de FeS ou de FeS₂ et recouverte de nitrures de molybdène et de titane pour éviter la corrosion du soufre
- un électrolyte liquide formée de sels fondus Li Cl (67,1 %) - K Cl (32,9 %)
- un séparateur poreux (céramique de nitrure de bore,...) isolant chaque électrode tout en permettant le passage d'ions.

On cherche à diminuer la trop grande résistance électrique interne de l'électrode positive :

- en réduisant son épaisseur
- en ajoutant des éléments conducteurs (carbone spécialement traité,...).

Le système fonctionne à 350-500°C (température optimale : 450°C) mais on sait le doter d'un excellent confinement thermique. Ne possédant ni composés dangereux, ni gaz explosifs, le système apparaît assez sûr. Ses possibilités sont prometteuses, avec une énergie massique de 100 Wh/kg pour Fe S et 225 pour FeS₂. Mais ces batteries étudiées pour le long terme ne devraient pas déboucher industriellement avant 2000-2005.

L'USABC s'intéresse au concept bipolaire de l'Argonne National Laboratory (sel de lithium fondu dans un conteneur isolant) et a accordé un contrat de 7,3 M\$ à Argonne pour sa mise au point ainsi que 17,3 M\$ à Saft America pour sa commercialisation.

12. Batterie Li-polymère

On remplace l'électrode négative en Li Al de la filière précédente par une électrode organique où Li est intercalé dans le réseau polymérique. Les performances actuelles (150 Wh/kg, 100 W/kg, 300 cycles) devraient être portées à un niveau sensiblement supérieur (300 Wh/kg, 300 W/kg, 1000 cycles) avec un temps de recharge de 20 minutes.

On prévoit une production pilote de batteries de 20-30 kWh assurant aux VE une autonomie de 300 km. Leurs prix passeraient de 700 \$/kWh à 150-200 \$/kWh en utilisant des matériaux peu chers. Cela leur assurerait une bonne compétitivité économique à long terme. Des industriels américains (WR Grace/Johnson et Delco Remy/Valence) ont reçu un contrat de 24,5 M\$ sur trois ans pour développer cette technique.

13. Equipement de recharge des batteries

La recharge, à l'évidence un des points clefs du système de transport par véhicule électrique, est conditionnée par deux impératifs :

- la limitation de stockage d'énergie électrique de la batterie qui restreint d'autant le rayon d'action du véhicule
- les facilités, les caractéristiques et le coût d'implantation du réseau de distribution électrique.

Comme on l'a vu, le véhicule de zone urbaine doit avoir une autonomie de 100 km en Europe, et de 200 km aux Etats-Unis, avec des performances de vitesse et d'accélération équivalentes à celles d'un véhicule automobile moyen. Si l'on compte sur une consommation de 100 Wh/km, on est conduit à des capacités de stockage de l'ordre de 15 à 30 kWh pour les véhicules de zone urbaine.

On se trouve alors confronté à l'obligation de construire deux types de chargeurs :

- l'appareil embarqué de faible puissance (2 à 5 kW) utilisé pour la recharge douce et généralement nocturne de l'entière capacité des batteries (15 à 30 kWh) en 6 à 10 heures à l'aide du réseau normal monophasé avec prise à terre (230 V, 25 à 50 A)
- l'appareil de grande puissance (au moins 10 kW) implanté dans un poste public (voie publique, parking, station-service,...) et permettant le "biberonnage" ou le "dopage", c'est-à-dire une recharge rapide (généralement de 6 à 30 minutes) de 40 à 60 %

de la capacité des batteries suffisante pour ramener le VE à son garage.

Dans une première approche, la recharge rapide n'avait été conçue que pour des cas exceptionnels (crainte d'une panne sèche..) d'autant qu'elle endommageait les classiques batteries au plomb. Depuis peu, les Japonais préconisent une stratégie différente basée sur la recharge fréquente et non dommageable des batteries, généralement au NiCd, accompagnée d'une réduction du nombre de batteries, donc d'un allègement du VE, ce qui atténue la diminution de son autonomie entre deux charges.

Les chargeurs embarqués ne posent pas de problèmes particuliers. Certains envisagent de leur adjoindre des appareils de diagnostic intelligent, permettant de vérifier l'homogénéité de la recharge. Par contre les chargeurs puissants des stations urbaines, qui doivent être le fruit d'une étroite collaboration entre autorités municipales, fabricants de VE et producteurs d'électricité, sont encore loin du stade, pourtant nécessaire au développement du VE, d'établissement de normes européennes et même mondiales. De nombreuses techniques sont explorées : câble composite transportant la puissance électrique dans des conducteurs métalliques et des information dans des fibres optiques, dispositif d'électronique de puissance (IGBT) effectuant des commutations sous forte tension et avec une fréquence élevée, carte magnétique indiquant la procédure à suivre, contrôle de la charge par microprocesseur, communication avec l'ensemble des composants de VE par des systèmes BUS,... Mais le plus important est la bonne adaptation du courant de charge grâce à la connaissance intime des caractéristiques de la batterie obtenue par la détermination d'un grand nombre de paramètres. On retrouve le problème très général de la "boîte noire", interface intelligente déjà intégrée aux batteries NaS, qui relate toute l'histoire antérieure de la batterie (charges et décharges précédentes) et permet, grâce à des algorithmes bien adaptés, d'optimiser sa recharge et de la contrôler à partir du VE.

En fait, même si des travaux cherchent à développer un puissant chargeur embarqué, l'implantation de stations urbaines semble inévitable car les projets futuristes visant à alimenter les VE par des câbles électriques enterrés sous la chaussée ont été abandonnés en raison de leur coût prohibitif (5 MF le km à Playa Vista - Californie). Cela pose des problèmes pratiques et nous allons en expliciter quelques-uns.

a. Sécurité électrique

Il faut penser à la sécurité, en particulier des enfants et des chiens, lorsque ces appareils sont situés sur la voie publique. Il faut aussi éviter les risques de manipulation. C'est un des atouts des chargeurs à induction dans lequel on met face à face deux plaques séparées par une couche d'air d'environ 1 cm. La première située sur le sol de la station constitue le primaire d'un transformateur dont la deuxième plaque fixée sur le VE est le secondaire. Une fois les deux plaques bien positionnées, un dispositif automatique permet le chargement en 4-5 heures de la batterie avec un rendement électrique de 87 %.

b. Réduction des harmoniques parasites dans le réseau électrique public

Les producteurs d'électricité (EDF,...) admettent sans crainte le développement de la recharge douce pendant la nuit mais appréhendent les recharges rapides ("biberonnages") de jour qui créent des harmoniques parasites sur le réseau. Plusieurs solutions sont envisagées pour remédier à ce défaut. La meilleure nous semble être la mise au point de dispositifs d'électronique solide de puissance utilisés dans les chargeurs rapides et qui, entre autres qualités (fiabilité, faible coût...), auraient celle de ne pas perturber le réseau.

c. Moyen de paiement

Le meilleur moyen semble être la carte à mémoire "intelligente", c'est-à-dire dotée d'un microprocesseur capable d'identifier le client et de déduire directement la somme due de son compte bancaire. Cette solution demande un gros effort d'investissement mais son concept s'adapte à d'autres tâches :

- location de voitures en libre service
- interface de communication entre le VE et le poste de charge
- contrôle du courant de charge à partir du VE (boîte noire).

On envisage aussi au Japon la solution conviviale de club qui permet de sélectionner les utilisateurs. Contre un droit d'entrée et une cotisation annuelle, les membres reçoivent une carte intelligente, moins sophistiquée que la précédente, donnant accès aux VE en libre service et aux chargeurs rapides.

d. Changement standard des packs de batterie

Le changement standard des packs de batterie est une solution ancienne surtout utilisée pour les courses d'autos où l'opération est effectuée très vite grâce à systèmes assez simples (batteries déplaçables par roulements à galets,...). On peut l'envisager pour des flottes captives mais plus difficilement pour les voitures privées et cela pour plusieurs raisons :

- obligation d'implanter un réseau de distribution très onéreux
- non standardisation des batteries de marque différente et des assemblages de colis pour des VE conçus par des constructeurs différents
- mauvaise connaissance de l'état de charge des batteries nouvelles (on risque de remplacer un cheval fatigué par un autre presque aussi fatigué).

Ce dernier point est explicité ci-dessous.

e. Mesure de l'état de charge des batteries

L'état de charge de la batterie détermine l'autonomie dont dispose encore le VE. Le conducteur doit connaître ce paramètre en continu à l'aide d'appareils embarqués ni trop lourds, ni trop complexes, ni trop onéreux. Le problème se pose différemment selon le type de batteries :

- il est très facile avec celles au Zn Br (un simple flotteur mesure le niveau de l'électrolyte)
- il se résoud sans peine avec celles à haute température (NaS,...) où les réactions parasites irréversibles sont négligeables par rapport à la réaction principale réversible
- il se complique avec celles au Pb - PbO₂ et au Ni Cd pour lesquelles la réaction principale, prédominante dans une première phase où l'état de charge atteint 70-80 %, se dégrade lors de la phase mixte où des réactions parasites (électrolyse de l'eau,...) prennent progressivement le dessus.

En particulier dans les batteries au Ni Cd il faut renoncer aux mesures directes pour s'en tenir à des indirectes (température, ampérage, nombre de cycle) alimentant un algorithme qui simule le comportement de la batterie (en tenant compte du vieillissement) et l'effet de l'écart de température entre la charge et la décharge. La précision est au mieux de 10 %.

B. LES PILES A COMBUSTIBLE

Une pile à combustible transforme directement l'énergie chimique en énergie électrique par oxydation d'un combustible sur l'anode de l'appareil et réduction de son comburant sur la cathode. Elle représente donc une solution pour fournir de l'énergie électrique aux VE autre que les batteries. A la différence de celles-ci, les électrodes ne subissent aucune modification de structure pendant ces réactions à qui elles servent uniquement de support. Le combustible et le comburant étant stockés à l'extérieur, cela permet un fonctionnement continu avec ravitaillement des réactants électrochimiques et implique donc nécessairement la distribution d'un combustible secondaire.

1. La pile à hydrogène

Découverte en 1839 par l'Anglais W.R. GROVE, la pile à combustible, surpassée par des générateurs d'énergie concurrents plus efficaces, n'a longtemps suscité aucun intérêt industriel. Il a fallu attendre 1953 et la construction par l'Anglais F.T. BACON d'un prototype de 1 kW, qui a servi de modèle aux piles hydrogène-oxygène utilisées dans les missions spatiales à partir de 1968, pour que l'on cherche à tirer parti de ses qualités en propulsion automobile : excellent rendement énergétique, fonctionnement silencieux et non polluant (les effluents hydrogène et oxygène se transforment au eau). Mais cela suppose la résolution de plusieurs problèmes technologiques et économiques qui s'avèrent plus ardues dans le domaine concurrentiel de l'automobile que dans celui, très subventionné, de l'espace. C'est particulièrement vrai pour la mise à disposition de l'hydrogène où, en l'absence de canalisation publique dont l'implantation demanderait un investissement considérable, on ne dispose que de deux solutions :

a. Stocker l'hydrogène à bord : aucune des méthodes envisageables ne donne satisfaction :

- stockage cryogénique utilisé dans l'espace : très cher, encombrant et valable pour une durée limitée
- stockage sous pression élevée : faible densité énergétique
- stockage dans des hydrures métalliques : étude au stade de la faisabilité.

b. Fabriquer l'hydrogène sur place

C'est la seule approche actuellement envisageable. On peut utiliser un reformeur embarqué traitant à la demande le matériau hydrogéné stocké (méthanol liquide, méthane comprimé,..) en provoquant une pollution atmosphérique négligeable en plus du CO₂ normalement émis. Encore faut-il qu'il soit bon marché (n'utilisant pas de catalyseur au platine), compact et multicarburant. Cela fait l'objet de nombreuses études, en particulier à la Communauté Européenne et au DOE américain.

On peut aussi chercher à se passer du reformeur embarqué. La Communauté Européenne a financé de 1986 à 1989 une étude sur les piles à électrolyte solide doté d'une forte conductivité électronique et contenant peu ou pas de platine pour produire de la chaleur (300°C) et provoquer le reformage interne du méthanol. Mais, aucun des matériaux organiques ou minéraux essayés pour constituer la membrane n'ayant donné pleine satisfaction, le projet a été abandonné.

Une autre étude communautaire concerne l'oxydation directe du méthanol sur deux types de piles :

- à électrolyte liquide acide : on accélère le processus lent d'oxydation à l'anode en utilisant du platine tertiaire et on combat l'empoisonnement du platine grâce à une meilleure compréhension du phénomène
- à électrolyte solide : la fabrication bon marché d'une membrane contenant peu de platine (on vise 1 mg par cm²) et fonctionnant à 80°C, ce qui accélère la réaction, semble possible.

Finalement la filière à hydrogène, utilisée dès 1959 sur un tracteur agricole par Allis-Chalmers (États-Unis) puis sur quelques autres engins, n'a pas débouché commercialement. Le projet Euréka Bus constitue, à notre connaissance, la seule application terrestre actuelle (premiers essais prévus en juin 1993 sur des circuits privés de Bruxelles et d'Amsterdam avec une pile Elenco de 78 kW). Mais il s'agit plutôt d'une étude de R&D sur prototype (stockage cryogénique de 2 t pour 41 kg d'hydrogène) dont l'aboutissement commercial est loin d'être assuré.

Aussi d'autres filières utilisant d'autres combustibles que l'hydrogène pur font-elles l'objet de recherches.

2. La filière à acide phosphorique

L'oxydation du combustible conduisant fatalement pour des combustibles carbonés à du CO_2 , cela amène à s'intéresser aux électrodes acides qui ne sont pas neutralisées au cours du fonctionnement. La filière à acide phosphorique, actuellement la plus développée, est étudiée dans divers pays (Japon, Etats-Unis, Italie) pour des applications de puissance (petites centrales, unité de cogénération) susceptibles de déboucher vers 1992-95. En raison de son caractère acide, elle n'est affectée ni par la présence de CO_2 , ni par celle de traces de CO , ce qui rendrait possible un reformage d'hydrocarbures à la vapeur. Trop encombrante pour les voitures personnelles ou les fourgonnettes, elle pourrait équiper des autobus. Le DOE prévoit la construction et l'essai en Californie du Sud de trois autobus urbains et d'un routier vers 1994-95.

3. La filière à carbonates fondus (Li,K)

Elle fonctionne à température assez élevée (650°C) et, en raison de la fragilité de sa matrice aux vibrations, ne convient pas aux applications mobiles. On l'étudie pour d'autres objectifs : petites centrales (1996), cogénération (1996)...

4. La filière à oxydes solides

Constituée de céramique Y_2O_3 et Zr O_2 conductrice ionique à 1000°C , elle vise les mêmes applications de puissance (petites centrales, cogénération) mais à un horizon plus lointain (au delà de 2000). Sa capacité très prometteuse pourrait lui permettre d'équiper des flottes captives de VE commerciaux à une date encore mal définie.

5. La filière à membrane polymérique solide échangeuse de protons

Etudiée dans les années 1960 pour le programme Gemini puis abandonnée à cause de la trop courte durée de vie de la membrane, elle peut être remise en selle avec l'emploi du Nafion (polytétrafluoréthylène sulfoné). Ce matériau, malgré son prix élevé et sa sensibilité aux traces de CO , présente, en effet, des avantages sérieux :

- moindre imprégnation par du platine

- faible épaisseur de la membrane, donc diminution de la résistance interne et augmentation de l'intensité du courant produit
- fonctionnement à 70°C.

Malgré des possibilités théoriques inférieures à celles de la filière précédente, elle apparaît comme la plus prometteuse et fait l'objet de plusieurs études :

- la DOE travaille sur un prototype (10 kW en laboratoire puis 25 kW sur un véhicule d'essai) qui pourrait faire la preuve de sa faisabilité en 1996-97
- diverses équipes universitaires ont construit une pile de quelques kW et étudié par simulation le comportement d'un VE équipé également de batteries
- le groupe milanais DE NORA effectue des études à Sophia-Antipolis en liaison avec la Régie RENAULT et l'Ecole des Mines pour la R&D.

6. Pile à combustible aluminium-air

La pile à combustible aluminium-air, étudiée depuis 1981, comporte :

- une anode en alliage d'aluminium peu corrodable
- un électrolyte aqueux alcalin (KOH) mis en circulation par une pompe et dans lequel l'aluminium de l'anode est uniformément dissout sous forme de $Al(OH)_4$
- une cathode air, membrane catalytique sur laquelle on souffle un courant d'air servant à évacuer la faible quantité d'hydrogène produit par corrosion de l'anode et à transformer l'oxygène en ion OH.

A la fin de la décharge, il faut remplacer l'anode détruite par le processus électrochimique ainsi que l'électrolyte devenu entièrement saturé en hydroxyde d'aluminium et dont on peut facilement récupérer l'aluminium. Etant donné le faible prix de l'anode (2,5 à 2,7 \$/kg) et la capacité énergétique d'un kilo d'aluminium, on obtient un prix de revient de 8,2 à 14,2 \$ au 100 km pour une fourgonnette.

Des essais ont concerné des Golf carts en 1987 puis à partir de 1989 des fourgonnettes Chrysler fonctionnant en mode hybride (batterie au plomb et pile à combustible Al-Air) dans les conditions suivantes :

pooids : 2649 kg dont 420 pour la pile (180 litres d'électrolytes) et 585 pour la batterie

charge : 75 kWh pour la pile (anode de 35 kg) et 20 kWh pour la batterie.

L'autonomie simulée de 300 km s'est réduite sur route à 211 km (contre 52 km pour la seule batterie). Après remplacement de l'anode et de l'électrolyte, la pile ne fonctionne à pleine puissance qu'au bout de 20 minutes. D'autres essais de simulation avec une fourgonnette Bedford de 2688 kg ont montré que les côtes affectaient davantage les performances de la pile que celles de la batterie.

Les piles Al-air constituent avec les piles Zn-air la seule filière fournissant actuellement une énergie massique d'au moins 200 Wh/kg, réutilisable par remplissage (et non par recharge) et ayant une pollution nulle. Il conviendrait d'étudier leur comportement en association avec une batterie NiCd.

On se fixe comme objectif : 400 Wh/kg, 1000 cycles et 400 km d'autonomie.

7. Piles à combustible zinc-air

De la poudre de zinc, en suspension dans un électrolyte alcalin et mise en circulation, passe devant un collecteur métallique de courant qui sert d'électrode négative. En face, on place une électrode à air classique et on ferme le circuit extérieur. Il se produit la génération d'un courant électrique et l'oxydation du zinc. Après consommation de la réserve de zinc, on procède à une vidange de l'électrolyte usé et à un réapprovisionnement en électrolyte et en zinc. Un nouveau cycle de décharge peut reprendre. Les études arrêtées en 1975 se heurtaient aux difficultés de travailler sur des poudres de zinc très fines et inflammables, de faire circuler la suspension (étanchéité des appareils, dépôt de zinc,...) et surtout d'obtenir des électrodes négatives suffisamment efficaces. Les résultats obtenus, quoique brillants (100-120 Wh/kg), ne permettaient pas d'envisager un nouveau système de distribution.

Après quinze ans d'arrêt, les travaux ont repris dans des laboratoires californiens et israéliens (avec des scientifiques ex soviétiques) et ont donné des résultats remarquables : 240-300 Wh/kg, 800 cycles et (en cas de production de masse) 50 \$/kWh. Les innovations technologiques

semblent concerner la métallurgie des poudres et la fabrication de l'électrode négative par introduction sous pression de la poudre de zinc. Ce progrès, s'il est confirmé au stade industriel, changera beaucoup de choses :

- une énergie stockée de 10 kWh représente 24 kg de pile au zinc et 210 kg de batterie NiCd
- les autonomies de 300 km et plus sont possibles
- l'échange d'électrodes demande seulement trois minutes
- le zinc régénéré dans une station spéciale est utilisé en circuit fermé.

Cela impose toujours la création d'un nouveau circuit de distribution mais dans des conditions économiques plus favorables qu'avant 1975.

Sur un plan général, l'association pile à combustible -batterie de grande puissance massique (NiCd,...) peut être fructueuse. Si la première se distingue par une énergie massique importante et par l'emploi à des fins de chauffage de l'énergie dissipée en chaleur, elle s'adapte mal aux brusques changements de régime (son temps de réponse est trop long), domaine où les batteries, qui permettent aussi de récupérer une partie de l'énergie de freinage, font merveille. En simulation l'autonomie d'un VE équipé de 300 kg de batteries NiCd et d'une pile à membrane polymérique de 10 kW dépasse 400 km à 50 km/h et, de plus, on y gagne en durée de vie de la batterie constamment rechargée de façon douce.

Cette association pourrait provoquer la renaissance de la pile à combustible pour plusieurs de ses filières : zinc-air, aluminium-air, à membrane polymérique et peut-être, mais à plus long terme, à oxydes solides. Mais la percée commerciale ne s'effectuera que si le prix élevé actuel des piles (environ 1000 \$ le kW) est divisé par un facteur 10 ou 20 (la situation étant un peu moins tendue pour les autobus ou fourgons que pour les voitures privées). Cela nécessite de développer des concepts permettant une production de masse et de résoudre plusieurs problèmes techniques. Pour les filières zinc-air et aluminium-air, ils sont d'ordre métallurgique (fabrication de poudres et des électrodes). Pour celle à membrane polymérique, il s'agit de :

- accroître la densité de courant (diminution de l'épaisseur de la membrane électrolyte)
- réduire la quantité de métaux précieux (platine) utilisés comme catalyseur

- en l'absence de progrès dans le stockage de l'hydrogène (hydrures métalliques,...), mettre au point une méthode d'oxydation du méthanol qui évite l'emploi d'un reformeur embarqué, ce qui diviserait par deux le prix du système propulseur tout en diminuant nettement son encombrement
- continuer à progresser sur des points fondamentaux : empoisonnement du catalyseur (CO,...), moindre usage du platine...

Dans tous les cas il faut avoir une activité de guet technologique en ce qui concerne le stockage d'énergie électrique par des bobines supraconductrices miniaturisées.

C'est à l'évidence le problème de la distribution du combustible et de son éventuel recyclage qui soulève un problème de principe pour une application de masse comme le VE.

Différentes filières de piles à combustible

Filière	t° (°C) de fonctionnement	Electrolyte	Application
Alcaline	60	KOH (en milieu aqueux)	Espace (depuis 1968) Autobus hybride (évaluation)
Acide phosphorique	200	PO ₄ H ₃	Petite centrale (1996) Cogénération (1992-1995) Autobus hybride (1994)
Carbonates fondus	650	Carbonates de Li et K	Petite centrale (1996) Cogénération (1996) Centrale au charbon (après 2000)
Oxydes solides	1000	Céramique Y ₂ O ₃ et ZrO ₂	Cogénération (2002) Centrale au charbon (après 2000) VE commercial (date indéterminée)
Membrane solide à échange de proton	70	Membrane en polymère	VH petit et moyen (1996) VE (date indéterminée)
Aluminium-air	20	KOH	VE (essais depuis 1989)
Zinc-air	20	KOH	VE (essais depuis 1992)

C. LES MOTEURS ELECTRIQUES

Depuis la fin du 19ème siècle, les VE étaient tous équipés de moteurs à courant continu (MCC). Les progrès techniques spectaculaires réalisées depuis une dizaine d'années dans différents domaines : électronique de puissance, aimants permanents, informatique (microprocesseur et traitement de données en temps réel), capteur de mesure... ont mis en selle les moteurs à courant alternatif (MCA) déjà dotés de remarquables qualités intrinsèques : robustesse, fiabilité, puissance massique, facilité de maintenance...

1. Le moteur à courant continu

Le MCC est un engin robuste et doté d'un fort couple de démarrage. Sa vitesse, réglable à partir de la tension de l'induit, bénéficie maintenant d'un dispositif d'électronique de puissance, le hacheur (en anglais chopper), qui assure le démarrage et évite l'emploi d'une boîte de vitesse. Il possède aussi des défauts :

- usure des balais malgré une résistance améliorée (d'où problème de maintenance)
- dépôt de poussière de graphite à l'intérieur de la carcasse (risque de courts-circuits)
- non étanchéité de la carcasse (l'effet Joule au niveau du rotor nécessite des ouvertures pour évacuer la chaleur)
- fabrication difficilement automatisable (absence de grandes séries)
- poids relativement élevé.

Tout compte fait, les MCC ne devraient pas résister à la concurrence des MCA car, de plus, leur potentiel de puissance et de vitesse semble limité (45 kW, 700 t/min). Ils pourraient, cependant, conserver quelques créneaux (chariot de manutention,...)

Parmi les MCA les mieux adaptés aux VE, on distingue (figure 1) ceux à alimentation par :

- Ondes sinusoïdales

- moteur asynchrone (dit aussi à induction) à cage d'écureuil

- **moteur synchrone à rotor en aimant permanent**
- Ondes à créneaux
- **moteur brushless continu à rotor en aimant permanent**
 - **moteur à réluctance variable.**

2. Le moteur asynchrone (ou à induction) à cage d'écureuil

Les grands constructeurs automobiles (General Motors, Ford, Renault,...) s'intéressent beaucoup aux moteurs à cage d'écureuil (en cuivre ou en aluminium), qui, effectivement, ne manquent pas de qualités :

- **simplicité de structure (non alimentation du rotor)**
- **robustesse dans un environnement difficile**
- **faible coût de revient (pas d'aimant en terres rares,...)**
- **fiabilité (presque pas de maintenance)**
- **disponibilité sur stock dans la gamme 100 W - 2 MW.**

Deux points faisaient l'objet d'interrogations :

- **la puissance massique supérieure à celle des MCC, était parfois indiquée comme inférieure à celles des autres MCA concurrents; il n'en est rien comme le prouve le tableau I qui compare différents moteurs américains très récents et montre les valeurs records du moteur à induction**
- **le pilotage de la vitesse s'annonçait comme très difficile car il faut agir sur la fréquence du courant d'induit à partir de deux paramètres interagissant : le couple et le flux.**

Sur ce dernier point les progrès sont venus :

- **d'ondulateurs de tension MWP (à modulation de largeurs d'impulsions), fabriqués avec les circuits solides de puissance IBGT et GTO grâce auxquels les démarrages, montés en puissance et réglage de vitesse sont effectués en souplesse (on tient compte des caractéristiques optimales des composants du moteur)**
- **de la méthode de contrôle vectoriel qui tire parti des nouvelles possibilités de mesurer séparément le couple et le flux avec des**

capteurs appropriés et de traiter ces données en temps réels avec des microprocesseurs.

De la sorte, le moteur à cage d'écureuil, fonctionnant sans boîte de vitesse et capable de puissances élevées (150 kW), représente un moteur électrique parfaitement adapté aux VE.

3. Moteur synchrone à aimant permanent

Le moteur synchrone à aimant permanent disposé à l'intérieur du rotor, de préférence par dépôt en mélange avec des matières plastiques, est, par certains côtés, comparable au moteur à cage d'écureuil :

- même complexité de l'électronique de puissance (onduleurs MWP,...) qui règle la vitesse du rotor en agissant sur la fréquence du courant de l'induit
- facilité de maintenance.

Par contre certaines caractéristiques lui sont défavorables :

- puissance massique inférieure
- démarrage exigeant une aide extérieure (structure en cage d'écureuil, variation de la fréquence de l'induit,...)
- rotor en aimant permanent qui évite la présence d'enroulement et bénéficie de récents progrès spectaculaires sur ces matériaux mais qui apporte deux contraintes :
 - limitation à 40-50 kW de la puissance du moteur proportionnel à son moment magnétique (sauf nouvelle avancée importante en matière d'aimant permanent)
 - nécessité de maintenir la température du moteur en dessous du point de Curie (150° pour le FeNeB).

En conclusion ce type de moteur n'apparaît pas comme un concurrent sérieux de celui à cage d'écureuil.

4. Moteur brushless à courant continu

Il s'agit en fait d'un moteur synchrone avec un rotor à aimant permanent et dont l'induit est alimenté en ondes à créneaux. Il présente plusieurs points communs avec le moteur synchrone

précédent (rotor en aimant permanent, pilotage du fonctionnement,...) tout en possédant une meilleure puissance massique et un couple élevé à bas régime. Il rend les VE aptes à grimper les côtes et à s'insérer dans un trafic difficile. Il a été choisi par la société japonaise TEPCO pour la fabrication de l'Iza et par le consortium californien CALSTART pour celle d'un modèle qui, lui aussi, sera équipé des meilleurs composants disponibles sur le marché.

5. Moteur à réluctance variable

Ce moteur, qui fonctionne avec des ondes à créneaux sur un principe pas-à-pas, ne semble pas avoir été expérimenté sur des engins opérationnels depuis l'échec de la petite voiture Jarret en 1967-70. Ses caractéristiques en font un candidat potentiel pour les VE de grande puissance (plus de 150 kW). Il ne manque pas de qualités :

- compacité remarquable
- simplicité de construction
- fort couple à basse vitesse (pas de problème de démarrage)
- faible maintenance
- vitesse de rotation rigoureusement liée à la fréquence de courant d'induit, ce qui limite les besoins en électronique de puissance.

En contrepartie:

- il nécessite une électronique de contrôle bien plus sophistiquée que celle des autres MCA
- il est facilement bruyant
- on ne dispose pas encore de modèle opérationnel.

6. Moteur dans les roues

Cette solution, supprimant tout intermédiaire entre le moteur et la roue, a déjà été expérimentée :

- le LRV (Lunar Roving Vehicle) a roulé sur la Lune avec deux batteries argent-zinc de 27 kilos et dans chacune des roues directrices et motrices un MCC d'un quart de cheval

- **l'IZA de la société japonaise TEPCO doté de batteries NiCd a atteint 176 km/h avec des moteurs brushless continus à aimant Sm Co disposés dans les roues.**

Cependant après l'avoir essayée dans la première version de l'Impact, General Motors l'a abandonnée car elle lui a posé des problèmes de sécurité que la clientèle n'aurait pas acceptés. Par ailleurs une telle conception, qui met le moteur hors du système d'amortissement, fournit un rendement inférieur sur un moteur à induction (l'optimum y est obtenu vers 14 000 t/min, ce qui nécessite un réducteur et un différentiel). Sa commercialisation nous semble improbable.

7. Conclusion

Les tableaux 1 et 2 vont nous aider à tirer des conclusions :

- **le MCC, malgré ses qualités (longue expérience, robustesse, électronique de puissance limitée,...), pêche par sa puissance massique trop faible et par son prix élevé**
- **les MCA nécessitent une électronique de puissance plus importante, donc plus chère, qui d'une part les dote de performances supérieures et d'autre part devrait rapidement devenir meilleur marché avec une fabrication en série**
- **parmi les MCA envisagés on peut éliminer celui à reluctance variable, encore non disponible et bruyant, et le synchrone à aimant permanent inférieur au brushless continu.**

Restent donc en lice ce dernier et l'asynchrone à cage d'écureuil qui l'emporte sur tous les plans :

- **moindre prix du moteur et de l'électronique**
- **efficacité énergétique**
- **robustesse**
- **absence d'aimants permanents**
- **meilleure puissance massique.**

Ce dernier point encore contesté au Congrès de Florence, est devenu évident avec les dernières réalisations américaines (voir tableau 2). En conséquence, sauf progrès notables pour les aimants permanents au niveau du point de Curie et de la densité de magnétisation, le moteur à cage d'écureuil nous apparaît comme le meilleur candidat pour les VE de la prochaine génération. Quant à la solution de mettre des moteurs dans les roues elle devrait être abandonnée sur les VE commerciaux.

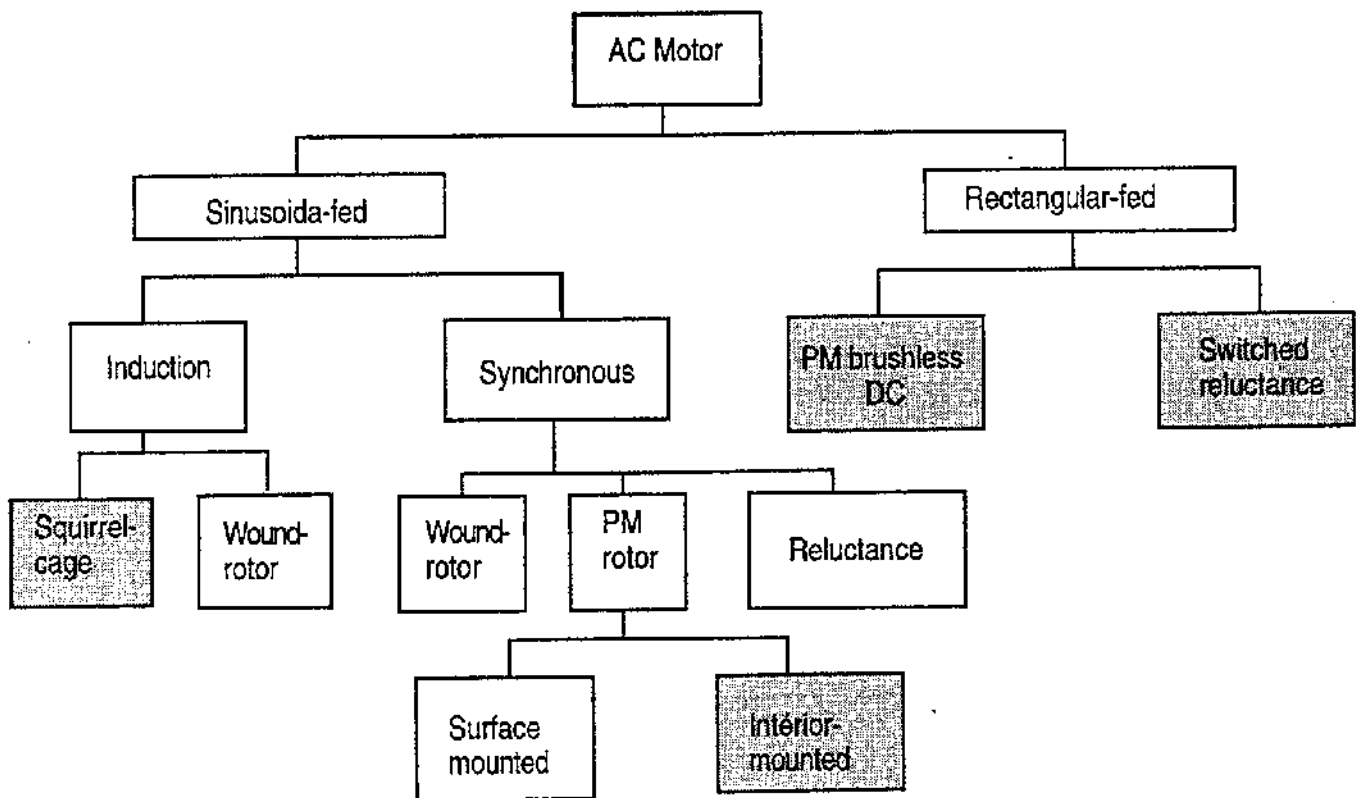


Figure 1

(Source : C.C. CHAN et K.T. CHAV - EVS 11 - Florence - 27-30 septembre 1992)

	DC Brush Type	Brushless DC (PM)	Switched Reluctance*	Induction
Peak Eff. (%)	85-89	95-97	<90	94-95
Eff. @ 10% Load (%)	80-87	73-82	?	93-94
Max RPM	4,000-6,000	4,000-10,000	>15,000	9,000-15,000
Cost/Peak Shaft kw (\$/kw)	20-30	5-20	?	2.75-5.0
Relative Cost of Electronics	1.00	3.7-6.0	4-10	2.5-3.0
Ruggedness	GOOD	FAIR	EXCELLENT	EXCELLENT

* Under Development - Limited Data Available

Tableau 1

(Source : J. DABELS. The Urban Electric Vehicle - OCDE - Stockholm 25-27 mai 1992).

Tableau 2. Motor and electronics characteristics for DC and AC systems.

Developer/Type	Motor		Voltage V	Electronics		Transmission Y or N	System Peak Power KW
	kg/Kh (1)	/kW		Kg/kW(1)	/kW		
General Electric D.C. Sep. Exc. (ETV-I)	3.0	0.97	108	15	1.7	N	30
General Electric A.C. Induction (ETX-I)	12	0.13	192	1.3	1.4	Y	40
General Electric A.C. PM Sychr. (ETX-II)	0.98	0.15	192	0.69	0.91	Y	52
General Electric A.C. Induction (MEVP)	0.60	0.14	340	0.55	0.45	N	56
Cocconi Eng. A.C. Induction (Impact)	05	0.17	320	0.35	0.66(2)	N	90-100
Pentastar D.C. Sep. Exc. (TEVan)	15	0.45	176	0.80	1.8(2)	Y	50
(1) All specific power and volume values based on maximum motor power							
(2) Includes DC-DC converter and battery charger							

Source : Document fourni par M. Jean SAFIR - Conseiller commercial de l'Ambassade de France à Detroit.

D. LES VEHICULES ELECTRIQUES HYBRIDES

La limitation de la capacité énergétique des batteries, donc du rayon d'action, des VE restreint l'utilisation de celles-ci à la ville. Pour aller au-delà, le recours fréquent aux distributeurs d'électricité est exclu. D'où la conception des véhicules électriques hybrides (VH) disposant, en plus de leurs batteries utilisées pour la circulation urbaine, d'un moyen supplémentaire de propulsion fonctionnant en série ou en parallèle pour les déplacements routiers :

- dans le premier cas, dit "tout électrique", le moteur, marchant à régime constant optimal, recharge en permanence la batterie
- dans le second cas, dit "bimode", la batterie et le moteur fonctionnent séparément, respectivement en trafic urbain et routier.

Les moteurs à essence et les diesels fonctionnent généralement en parallèle et les turbines à gaz en série.

1. Véhicule hybride avec moteur à essence

Volkswagen a construit plusieurs prototypes dotés de différents types de moteurs électriques : City Taxi (1987), Golf Hybrid (1983), Chico (1992) et collabore au projet Hybrid 3 de l'Institut de Technologie de Zurich (moteur thermique de 53 kW et moteur électrique de 7 kW) qui vise la complète compréhension des possibilités et exigences industrielles de la filière et de ses composants.

Il existe d'autres projets comme le City Car du groupe italien GENESYS qui, lui, marche en série, mais l'activité dans ce secteur nous semble relativement limitée

2. Véhicule hybride à diesel

Voitures particulières et fourgonnettes

Depuis mai 1991, 20 Golfs hybrides à volant d'inertie sont expérimentées à Zurich. Voici leurs principales caractéristiques : poids : 1200 kg (charge utile de 380 kg), diesel : 44 kW, moteur triphasé synchrone : 7 kW, vitesse maximale : 150 km/h (sur diesel) et 60 km/h (sur batterie). En cycle urbain, la consommation aux 100 km a été de 2,5 l de fuel et de 16,3 kWh contre 6,5 l de fuel pour une Golf thermique et la pollution a été très diminuée (70 % pour CO, 55 % pour NOx, 45 % pour les particules et 40 % pour les hydrocarbures

imbrûlés). Cependant, sur le plan économique, ces VH ne s'imposeront pas, en tout cas sans incitation gouvernementale, dans des pays où l'électricité est d'origine fossile.

Parmi les autres réalisations on peut citer :

- la 405 diesel de PSA
- le Taxi Car et le Card Car de GENESYS tous deux à configuration série
- la fourgonnette de livraison de la firme italienne IVECO.

Autobus et bennes à ordures

Les Japonais utilisent déjà dans huit de leurs villes des autobus hybrides et ils en ont extrapolé une benne à ordures peu polluante (28 % de NOx, fumée noire à peine visible), peu bruyante et économe en carburant. Elle devrait être commercialisée en 1993 dans plusieurs villes avec un moteur électrique plus puissant.

IVECO propose de son côté des bennes légères pour la simple collecte des ordures et des bennes lourdes qui effectuent, en plus, le compactage.

Sur le vu de ces différents travaux, l'activité en matière de VH bimode nous semble être plutôt le fait des moteurs diesel, déjà naturellement économes, que des moteurs à essence. Mais rien n'est encore définitif dans ce domaine.

3. Véhicule hybride à turbine

L'emploi de turbine à gaz en propulsion automobile, étudié depuis longtemps, se heurtait à des sérieuses difficultés :

- transmission mécanique avec les roues
- temps de réponse d'accélération incompatible avec la sécurité
- forte consommation à faible vitesse donc en ville.

Par contre, dans un VH à configuration série, la turbine est utilisée au mieux de ses possibilités en couplage avec un alternateur :

- vitesse de rotation constante d'où optimisation de la masse des composants en mouvement et du rendement électrique
- transmission de l'énergie de propulsion sans heurt aux roues motrices en raison de la grande souplesse des moteurs électriques alimentés par une batterie tampon (actuellement NiCd) capable de répondre à de brusques changements de régime (accélération, dépassements, montées en côte,...)
- emploi possible de carburants gazeux de toutes sortes
- fonctionnement peu polluant grâce à des techniques de combustion adaptées (prémélange, prévaporisation,...) et encore améliorables (combustion catalytique, contrôle complet de la combustion ultra-pauvre,...)
- efficacité des alternateurs dotés d'aimants permanents compacts du type néodyme-fer-bore.

Les projets de VH à turbine ne manquent pas chez les grands constructeurs automobiles (Renault, PSA, General Motors, Ford, Volvo,...). Cela montre le grand intérêt de ce concept.

4. Véhicule hybride deux temps

Les récentes améliorations apportées au moteur deux-temps (IAPAC - Injection Assistée par Air Comprimé,...) permettent de tirer parti de tous ses avantages au plan de la puissance développée, de la consommation de carburant, de la compacité et de l'agrément de conduite, tout en respectant les niveaux de pollution les plus sévères et en n'étant pas bruyant.

Il représente donc une solution particulièrement attractive pour l'équipement des VH (y compris les scooters) et les efforts déployés par des organismes comme l'IFP ou Orbital pourraient rapidement aboutir.

Conclusion

On y voit assez clair quant à la répartition des rôles :

- moteurs diesels, de préférence aux moteurs à essence, pour les VH bimodes (à configuration parallèle) avec, peut-être, une percée du deux temps
- turbine à gaz pour les VH "tout électrique" (à configuration série).

On y voit moins clair sur leur intérêt réel :

- dans le domaine des véhicules à pollution zéro, c'est-à-dire circulant dans le centre des villes, les VE à batteries disposent déjà d'une autonomie suffisante (100-150 km) et d'un agrément de conduite acceptable
- dans celui des véhicules peu polluants, le VT actuel (ou du court terme) satisfait (ou satisferont) les sévères normes mises en place.

Il reste donc à savoir, si ces VH, qui risquent de subir à moyenne échéance la redoutable concurrence des véhicules équipés de piles à combustible et de batteries de grande puissance, possèdent des qualités intrinsèques remarquables. Pour de nombreux observateurs ce n'est pas le cas. Disposant de deux systèmes de traction, ces VH ont une partie moteur d'autant compliquée et cumuleront les défauts : peu maniables en ville, ce seront de vrais "veaux" sur la route. Leurs partisans voient parfois leur percée à long terme, en spéculant sur des améliorations potentielles. Mais à cette époque les VE se seront peut-être déjà définitivement imposés.

E. RECENTES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES

1. L'électronique de puissance

Les dispositifs d'électronique de puissance permettent de transformer la nature des sources d'énergie électrique (batteries, secteur,...). Placés entre celles-ci et le moteur à contrôler, ils adaptent la tension d'alimentation à la nature du moteur et agissent sur sa vitesse et son couple.

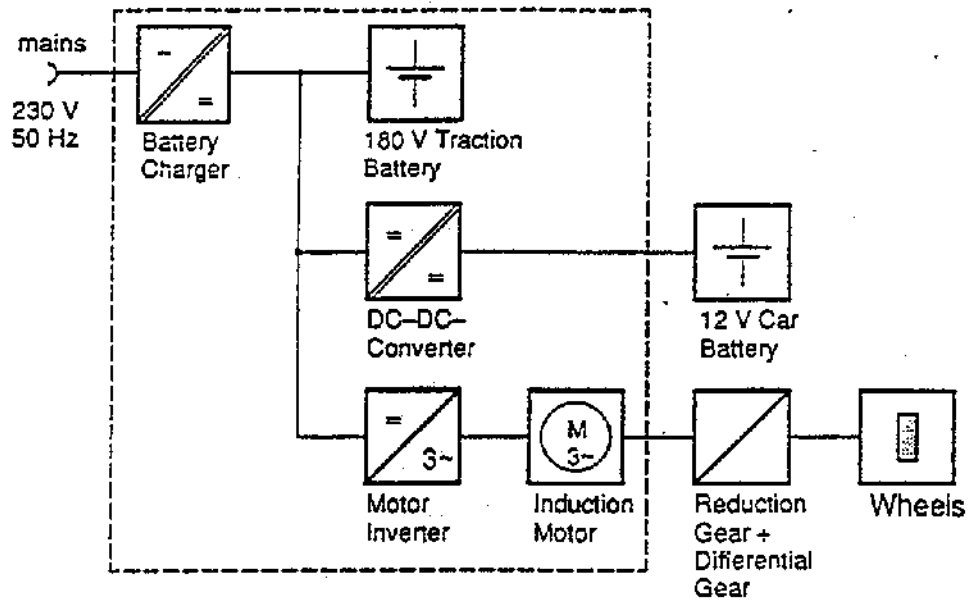


Figure 1: Components of a Drive System for Electrical Cars

(Source : G. JUNGE et U. SCHÄFFER - EVS 11 - Florence 27-30 septembre 1992)

Turn-off-types	GTO thyristor	BJT	IGBT	MOSFET
Features				
Blocking voltage	5000 V	1200 V	1200 V	1000 V
Current-carrying capacity	3000 A	300 A	400 A	10 A
Turn-on time t_{on}	3-5 μ s	2 μ s	200 ns	100 ns
Turn-off time t_{off}	10-25 μ s	15-25 μ s (*)	1 μ s	0.3-0.5 μ s
On-state performance	very good	good	good	moderate
Switching frequency	1 kHz	2-5 kHz	1-30 kHz	10-50 kHz (**)
Gate control effort	high	moderate	very low	low
Utilization of chip surface area	good	moderate	very good	bad
Typical parameters				
Voltage	1200 V	800 V	600 V	500 V
Current	600 A	100 A	25 A	20 A
Frequency	1 kHz	3 kHz	20 kHz	20 kHz
Control power	90 W	52 W	1,8 W	2,7 W
*) monolithic Darlington				
**) depending on parasitic diode				

Table 1

(Source : M. FRACCHIA, T. GHIARA et M. MARCHESONI - EVS 11 - Florence 27-30 septembre 1992)

Items	IGBT	MOS	BJT
Rated voltage	good	good	good
Rated current	good	acceptable - good	good
Switching speed	good	good	unacceptable
Module type	good	good	good
On voltage	acceptable - good	good	good
Drive power	good	acceptable - good	unacceptable - acceptable
Cust	good	acceptable	good
Total evaluation	excellent	good	unacceptable - acceptable

Table 2

(Source : M. FRACCHIA, T. GHIARA et M. MARCHESONI
- EVS 11 - Florence 27-30 septembre 1992)

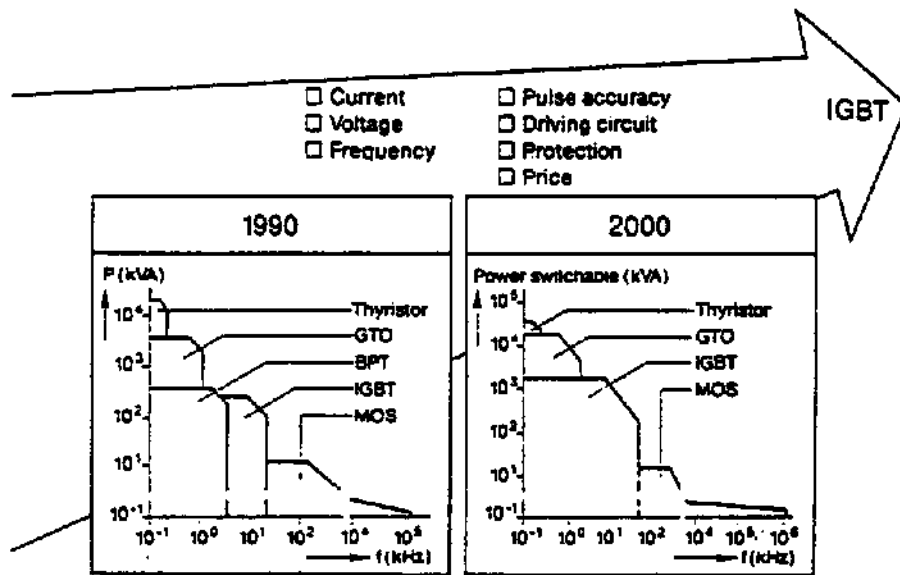


Fig. 2: Development of the power semiconductors up to the years 2000 with indications of the most important tendencies

(Source : L. LORENZ - EPE Journal - juin 1992)

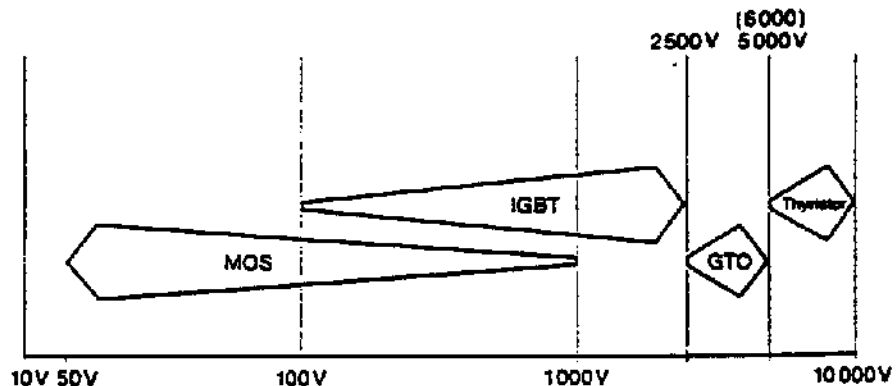


Fig. 3 : Relative importance of the different power semiconductors over the whole voltage range

(Source : L. LORENZ - EPE Journal - juin 1992)

Dans les moteurs à courant continu, le hacheur ("chopper" en anglais) découpe en créneaux plus ou moins régulièrement espacés une tension continue fixe. Cela permet de faire démarrer le moteur en l'alimentant avec une tension croissante (de préférence au contacteur mécanique encore utilisé en 1980) puis de faire varier sa vitesse. Par ailleurs des convertisseurs continu-continu permettent de charger les batteries auxiliaires de 12 volts à partir de la batterie de traction de plusieurs centaines de volts.

Les moteurs à courant alternatif (figure 4) utilisent ce dernier dispositif mais aussi plusieurs autres :

- l'inverseur transforme la tension continue d'une batterie en voltage alternatif (la méthode PWM, Pulse Width Modulation, qui fait varier la largeur des créneaux à fréquence constante, semble s'imposer : non création d'harmoniques, contrôle de la vitesse et du couple...)
- les convertisseurs alternatif-continu (redresseurs) ou continu-alternatif (onduleurs) transforment une tension alternative (secteur) en continu ou vice versa
- les convertisseurs alternatif-alternatif fournissent à partir d'une tension alternative fixe :
 - une tension alternative de même fréquence mais d'amplitude variable pour le démarrage des moteurs asynchrones
 - une tension alternative d'amplitude et de fréquence variables pour le contrôle de la vitesse des moteurs (synchrone ou asynchrone)

L'électronique solide présente dans ces appareils doit :

- effectuer des commutations à des fréquences élevées et sous des voltages et ampérages importants
- contrôler la fonction "porte" sans mettre en jeu une importante énergie
- être fabriquée sous forme de module
- être produite à des coûts raisonnables.

Depuis quelques années une nette évolution a eu lieu dans ce domaine qui est illustrée par une présentation très technique (tableaux 1 et 2) et par une autre (figures 2 et 3) plus claire :

- en raison de leurs moindres performances la désaffection touche les circuits planaires MOS-FET (Metal Oxyde Semiconductor-Field Effect Transistor), bipolaires Darlington et BJT (Bipolar Junction Transistor)
- on note la percée de l'IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor) qui est un transistor bipolaire avec une entrée de type MOS et celle du thyristor GTO (Gate Turn Off) et peut-être plus tard celle du thyristor MCT (MOS Control Thyristor)

Les figures 2 et 3 permettent de comparer les performances et les domaines d'application des IGBT et de GTO :

- manifestement les IGBT capables de commutation plus rapides et économes en énergie l'emportent jusqu'à une tension de 2500 volts, c'est-à-dire grosso modo dans le domaine des VE
- les GTO s'imposent au-delà et équipent en conséquence les TGV au détriment des thyristors classiques qui exigeaient trop d'énergie pour ouvrir et refermer une porte
- les MCT fonctionnant à fréquence plus élevée que les GTO pourraient trouver un créneau dans les VE, mais l'évolution ne s'arrêtera pas là car on parle aussi d'IGBT rendu intelligent par la logique floue.

Ainsi, l'électronique de puissance a révolutionné la technologie des moteurs électriques utilisables sur les VE.

On regrettera que la fabrication de tels composants stratégiques (IGBT, GTO, MCT) se trouve pratiquement entre les mains japonaises (Mitsubishi, Toshiba, Fuji) et américaines (International Rectifier, IXYS Corp, Harris Semiconductor). On espère que la construction d'une usine Motorola à Toulouse modifiera cette situation.

2. Les aimants permanents

Les progrès en matière d'aimant permanent ont été remarquables depuis une douzaine d'années. L'énergie de magnétisation a augmenté de 60 % à la suite d'avancées technologiques (métallurgie des poudres, trempé ultra-rapide) de fabrication. L'ancien champion, le $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, est handicapé, outre sa moindre valeur énergétique, par :

- des ressources naturelles limitées en Sm et Co
- une fragilité rendant son usinage difficile.

Le Nd₂Fe₁₄B, le nouveau champion, ne manque pas de qualité :

- valeur énergétique supérieure de 40 %
- larges ressources naturelles
- usinage facile en atmosphère inerte
- prix moitié moindre.

En contrepartie il présente deux inconvénients :

- une faible résistance à la corrosion que l'on sait combattre par plaquage de nickel
- une température de Curie (150°C contre 300°C pour le Sm₂Co₁₇) à laquelle on sait remédier jusqu'à un certain point par introduction de gallium mais qui peut nécessiter un refroidissement.

Ces nouveaux aimants permanents permettent de réaliser des moteurs synchrones et brushless continu avec rotor sans enroulement d'une puissance allant jusqu'à 30-50 kW. Pour aller au-delà il faudrait soit surdimensionner les enroulements de l'induit soit trouver un nouvel aimant permanent plus performant en énergie magnétique. Cette limitation n'affecte pas le moteur à cage d'écureuil qui ne comporte pas d'aimant permanent et peut atteindre une puissance de 150 kW avec un poids admissible.

3. Utilisation d'un volant d'énergie

Pour pouvoir s'intégrer dans un trafic normal, un VE doit posséder :

- une autonomie, donc une énergie embarquée, suffisante
- une capacité d'accélération, donc une puissance, elle aussi suffisante.

Or les récents progrès effectués dans le domaine des moteurs et de leur électronique associée ont abouti à la réalisation de chaînes de propulsion plus efficaces mais exigeant des puissances maximales instantanées hors de portée des batteries, même avancées, sous peine d'un surdimensionnement exagéré. D'ou l'idée, qui n'est pas nouvelle, de disposer d'un volant d'énergie afin d'assurer le fonctionnement en pointe du système propulseur. On dispose de trois solutions :

- Le moteur fonctionnant en alternateur

Au cours du freinage le moteur fonctionne en alternateur et envoie le courant produit dans la batterie qu'il contribue à recharger avec un rendement de 30 % légèrement améliorable par freinage électrohydromécanique. N'agissant que sur un essieu, ce système pose un problème de sécurité

- Les volants d'inertie

Ce dispositif a déjà été utilisé en Suisse vers 1959 sur l'autobus Oerlikon, où le volant d'inertie, lancé par l'électricité du réseau lors des arrêts du bus tous les 2-8 km, alimentait un moteur synchrone. Le véhicule pouvait grimper des côtes de 8 %.

Les nombreux travaux entrepris depuis, et récemment par General Motors pour son modèle Impact, concernaient en particulier :

- les matériaux du disque afin d'améliorer :
 - la quantité d'énergie stockée (380 Wh/kg avec le kevlar contre 70 avec l'acier)
 - la sécurité (les composites se détruisent fibre par fibre)
- les paliers magnétiques pour diminuer les pertes par frottement
- les transmissions à variation continue adaptées à l'énergie cinétique.

Les résultats obtenus, assez spectaculaires (vitesse de rotation de 54 000 à 145 000 t/min), permettraient de propulser une Impact sur 193 km à 89 km/h. Mais ils ne devraient pas aboutir car les volants d'inertie, outre un effet gyroscopique éventuellement difficile à maîtriser dans des circonstances critiques, présentent de graves défauts par rapport au supercondensateur apparu depuis quelques années :

- un montage délicat dans le moteur d'un ensemble mécanique lourd
- un rendement inférieur (60 % contre 90 %)
- un prix 30 à 70 fois supérieur.

- Le supercondensateur

Ce "volant électrique" peut fournir une grande puissance d'énergie pendant 20 à 50 secondes à l'occasion de montées en côte ou de dépassement puis de se recharger en profitant d'un freinage ou du fonctionnement en sous-régime de la batterie de traction. Intervenant sous forme uniquement électrique, il s'adapte parfaitement au VE. Ses performances sont encore très améliorables et de nombreux laboratoires y travaillent, étudiant plus particulièrement la technologie DLC (Double Layer Capacity). Voici ce que l'on attend pour un modèle de 1000 \$:

à moyen terme : poids - 100 kg, énergie embarquée - 5 Wh/kg,
puissance - 500 W/kg

à long terme : poids - 50 kg, énergie embarquée - 15 Wh/kg,
puissance - 1600 W/kg.

De la sorte, la puissance massique des batteries (10-13 W/kg en cycle normal, 70-100 W/kg en côte) pourrait être limitée à 30-35 W/kg après l'adjonction d'un supercondensateur adapté; d'où un moindre poids des batteries qui, moins sollicitées, auront une durée de vie plus longue.

Outre le fait d'accroître de 6 % l'autonomie d'un VE, les supercondensateurs présentent d'autres avantages :

- leur emploi particulièrement intéressant avec les batteries au Li dont les durées de vie sont encore courtes (300 cycles)
- leur durée de vie élevée (plus de 1000 000 cycles), leur température de fonctionnement comprise entre - 20 et + 120°C et leur prix inférieur à celui des batteries qu'elles remplacent
- leur utilisation à d'autres emplois demandant par moment une grande puissance instantanée : direction, freinage, réchauffage électrique de catalyseur.

4. Autres innovations techniques

Le VE bénéficie aussi d'innovations qui ne lui sont pas spécifiques :

- L'informatique

Les microprocesseurs de plus en plus petits et puissants, associés à des capteurs de mesures de plus en plus sensibles (tension, courant, température, vitesse,...), permettent d'assurer un fonctionnement

ultra fin du moteur, de déceler toute dépense d'énergie inefficace, de choisir le meilleur algorithme pour la charge d'une batterie,...

- Les télécommunications

Le VE des prochaines générations sera conçu non seulement pour être équipé d'appareils classiques (téléphone, fax, radio,...) mais aussi de systèmes nouveaux permettant le téléguidage, la recherche de parking disponible, la détermination du meilleur trajet,... Pour leur mise en oeuvre on dispose de plus d'électricité que sur les VT.

- L'intelligence floue

L'implantation de logique floue dans les circuits d'électronique solide accroîtra l'efficacité des processus de démarrage, de contrôle du moteur, de freinage, de réglage de la vitesse,.. éventuellement en liaison avec des réseaux neuronaux.

- Les pneumatiques

Le poids actuel des batteries a des conséquences sur les pneus à utiliser. Une diminution de la résistance au roulage d'environ 30 % est obtenue avec un bon choix du gonflage, des sculptures et des matériaux. Le pneu radial semble privilégié, au moins à l'avant.

- Les pompes à chaleur

Une pompe à chaleur thermoélectrique de faible puissance (2-3 kW) réchauffe et refroidit le siège du passager avec un minimum de dépense d'énergie. Sinon il faut disposer d'un chauffage autonome au gas oil, en principe polluant.

- Dessous de caisse

Un dessous de caisse monobloc en plastique ABC, convenablement conçu peut réduire la traînée aérodynamique jusqu'à 20 %.

- Palier magnétique

Ce composant utilisé par l'industrie spatiale est maintenant envisagé sur les VE pour éviter les pertes par frottement.

Tous ces travaux, au-delà des progrès du VE, devraient trouver des applications dans d'autres domaines industriels porteurs d'avenir.

DEUXIÈME ANNEXE

Compte rendu des visites

- | | | | |
|----|---|---|--|
| 1 | - | EDF | M. R. WOLF |
| 2 | - | RENAULT-PREDIT | M. J.-J. PAYAN |
| 3 | - | PSA | M. J.-Y. HELMER |
| 4 | - | CNAM | M. J.-F. FAUVARQUE |
| 5 | - | PREDIT | M. C. PROST-DAME |
| 6 | - | RENAULT | M. C. DELARUE et F. NESPO |
| 7 | - | MATRA | MM. Ph. GUEDON et J.-L. CAUSSIN |
| 8 | - | MAIRIE DE PARIS | Mme C. RECLUS et MM. KAHAN,
de POMPIGNAN et BOUVIER |
| 9 | - | SAGEM | M. G. BENOIST |
| 10 | - | LEROY-SOMMER | M.M. BAUVE |
| 11 | - | SAFT | MM. PIERRE, PUTOIS et CORNU |
| 12 | - | Compte rendu de la mission aux Etats-Unis | |

1. VISITE À EDF (M. R. WOLF, Contrôleur général d'EDF et responsable du programme véhicule électrique depuis 1990)

En 1972, EDF étudiait un programme de VE et avait présenté un prototype au Président POMPIDOU. L'électrification d'une voiture thermique classique n'a pas posé de problème sérieux (la réalisation du projet a pris simplement trois mois) et ce sentiment de facilité constitue un inconvénient dès lors qu'on aborde la fabrication industrielle dont on a tendance à sous-estimer la difficulté.

La crise pétrolière de 1973 a provoqué en 1975 la création du GIVE (Groupement interministériel du véhicule électrique) qui, aux yeux d'EDF, présente l'inconvénient de diluer les responsabilités entre plusieurs ministères. Cette même année, EDF, comprenant que le VE ne se développerait pas, a abandonné le projet, se contentant de faire de la veille technologique sur les batteries.

Depuis la fin 1990, EDF s'intéresse à nouveau au VE compte tenu de l'apparition de signes d'intérêt pour le dossier chez les acteurs essentiels qui sont les constructeurs automobiles et les Pouvoirs Publics.

Voici les vues d'EDF sur le développement du VE :

1990 - Véhicules électrifiés de la première génération

Ces VE, directement adaptés des véhicules thermiques classiques, sont généralement des engins utilitaires. C'est le cas de la flotte EDF déjà assez importante (80 J5, 80 Volta, 60 C15) avec un potentiel de 2 000 unités et qui s'avère utile au plan opérationnel et à celui du retour d'expérience (formation des conducteurs,...). À ce stade le VE est la voiture du précurseur, c'est-à-dire du client qui achète selon sa propre conviction. On est au début de l'innovation, il faut progresser par fertilisation croisée et améliorer le confort. Mais grâce à cette première génération, on peut dire que la commercialisation du VE a démarré.

On notera qu'un de ses domaines privilégiés lui est dorénavant difficile d'accès : celui des bennes à ordures auxquelles on demande maintenant une très grande autonomie en raison du développement des agglomérations et de l'éloignement des usines d'incinération devenues multicommunales.

1995 - Véhicules électriques de la deuxième génération

Ces VE, conçus en tant que tels, bénéficient d'un bon confort et deviennent la deuxième voiture familiale pour les trajets urbains et les déplacements entre le lieu de travail et le domicile.

1998 - Véhicules électriques améliorés de la troisième génération

Ces engins découlent des études avancées actuelles ayant donné lieu à des ruptures technologiques. En raison de leurs performances remarquables, elles s'imposeront comme la voiture d'une clientèle exigeante.

Il existe quatre acteurs principaux dans le domaine du VE :

- les constructeurs automobiles (PSA, RENAULT...);
- les assembleurs qui doivent résoudre plusieurs problèmes délicats (boîte noire pour suivre le fonctionnement des batteries...);
- les collectivités locales favorisant par leur politique et leur infrastructure le développement des VE sur leur territoire ;
- EDF producteur et distributeur d'électricité (implantation de bornes électriques spéciales...) et propriétaire d'une importante flotte de VE.

EDF est évidemment partie prenante dans le développement des VE même si leur marché (3 000 kWh/an et par véhicule et 50 000 VE vendus en quatre ans) n'atteindra jamais 10 % de celui des chauffe-eau électriques.

Plusieurs remarques d'ensemble sur le dossier sont à mentionner :

- l'absence d'études globales du système, certains aspects font l'objet de projets déjà chers :
 - le VE utilisé en système de transport ;
 - le leasing de batteries ;

- un certains nombre de points techniques sont à travailler pour autoriser le développement du marché tels que :

- la résolution de problèmes de sécurité et de standardisation à travers une démarche de normalisation ;
- l'accompagnement d'un changement culturel par la formation (conducteur, maintenance).

Quoi qu'il en soit, pour EDF le VE est un pari asymétrique :

- en cas d'échec, les pertes sont faibles ;
- en cas de succès, les gains sont importants.

2. VISITE À RENAULT-PREDIT (M. J.-J. PAYAN, directeur de recherche Renault et Président du Programme PREDIT)

RENAULT croit au développement en milieu urbain des véhicules électriques (VE), par ailleurs utilisables également en milieu rural sur de petits trajets, pour plusieurs raisons :

- environnement moins pollué
 - le contrôle de la pollution atmosphérique d'une centrale thermique délocalisée est plus facile que celui de milliers de véhicules thermiques ;
 - en phase froide (pendant les trois premiers kilomètres d'un trajet) un VT même muni d'un pot catalytique est polluant,
- le non emploi d'essence ou de fuel et le recours au nucléaire voire au charbon constituent une voie de recours pour les Pouvoirs Publics en cas de nouvelle crise pétrolière ;
- la faible nuisance sonore du VE seulement due aux roulements mécaniques, frottements aérodynamiques, bruits des pneus... peut encore être améliorée ;
- la sécurité sera assurée avec la même sévérité que pour les VT.

Le développement des VE demandera quelques adaptations :

- changement d'habitude de conduite ;
- autonomie limitée compensable par des recharges sur des bornes électriques implantées en ville pour le grand public (les pompes à très grande intensité étant plutôt réservées aux flottes captives des très grandes entreprises ou aux dépannages exceptionnels) ;
- politique incitative des municipalités pour mettre à la disposition du grand public des parkings gratuits dotés de bornes électriques.

Voici maintenant la position de la RENAULT sur :

1. Les batteries

Le choix se limite :

- actuellement aux classiques batteries au plomb encore susceptibles de progrès et aux batteries NiCd deux fois plus

chères mais utilisables successivement sur plusieurs VE et recyclables (on recueille ainsi le cadmium cher et polluant) ;

- pour la fin du siècle aux batteries chaudes (NaS ou autres...) deux fois plus chères que celles au plomb, fonctionnant à 350° et s'autoentretenant à cette température mais dont les capacités de remise en fonctionnement après refroidissement ne sont que d'une dizaine de cycles
- pour un avenir plus lointain (2010) aux batteries Li-polymères.

2. Le programme de recherche

Les phénomènes électrochimiques impliqués dans une batterie sont encore insuffisamment connus et l'électrochimie n'enthousiasme pas les chercheurs (cette discipline attend son "DE GENNES"). Parmi les problèmes dont la solution se fait attendre, signalons celui de la jauge mesurant la quantité d'énergie restant dans la batterie.

3. La commercialisation des VE

La commercialisation vient de commencer pour les véhicules utilitaires (camionnettes) électrifiés, c'est-à-dire adaptés de VT classiques, principalement utilisés en flottes captives par de grandes entreprises (EDF, Postes...). Elle sera suivie par celle de petits VE électrifiés, type Clio. Plus tard on commercialisera des VE spécifiques c'est-à-dire conçus en tant que tels et répondant aux spécifications du cahier des charges :

- répartition des masses ;
- récupération de l'énergie au freinage ;
- autonomie de 120 à 150 km en utilisation normale ;
- accélération suffisante pour s'insérer dans le trafic urbain.

Vers 2005, on verra aussi apparaître des VE hybrides disposant pour la ville de batteries (autonomie 30 km) et pour la route d'un moteur thermique fonctionnant à point fixe (actuellement la turbine à combustion catalytique semble bien placée).

4. La politique industrielle

PSA plus constant dans ses efforts sur le VE a cofinancé le développement du moteur électrique par Leroy Somer et de l'électronique de commande par Sagem. Seul maître de sa stratégie, il peut se montrer très directif avec ses équipementiers. RENAULT coopère avec les meilleurs industriels européens et achète sur "étagères". Cela lui permet d'aller vite au début, au risque d'avoir ensuite des rapports complexes avec ses partenaires qui admettront mal d'être mis en concurrence.

La fabrication de VE, actuellement artisanale, posera des problèmes lorsqu'on arrivera au stade de la série pour les VE spécifiques (quelques dizaines de milliers d'exemplaire par an). Avec les VT, il est difficile de se défaire de vieilles habitudes et d'usines anciennes. Avec les VE on est sur un terrain vierge et cela fournira l'occasion de prendre de l'avance sur les méthodes japonaises.

Le moteur électrique disponible a une durée de vie de 20 000 h donc une autonomie de 500 000 à un million de kilomètres ! On peut se satisfaire d'un produit moins performant, moins cher et moins lourd. Quand aux surcapacités, leur prix devrait notablement diminuer pour être installé sur un VH de série.

Conclusion :

Le marché du VE est en cours de formation. En raison de sa politique électronucléaire, la France est bien placée. Les constructeurs aimeraient pouvoir mieux connaître le taux de pénétration sur le marché et, en conséquence, apprécieraient une politique à long terme des pouvoirs publics en matière de réglementation, comme l'État de Californie a su le faire en imposant dix ans à l'avance un pourcentage minimal de véhicules "zéro émission" aux constructeurs, qui voudront encore vendre dans cet État, à partir de 1998.

3. VISITE À PSA (M. J.Y. HELMER, Directeur de la Division Automobiles PSA)

PSA croit au développement du véhicule électrique (VE) dont il veut assurer le succès commercial en lui donnant une bonne "image" non seulement au plan du design mais aussi de sa commodité d'emploi en plein accord avec les collectivités locales. Voici son plan d'action :

- actuellement construction de véhicules utilitaires de type C15 et J5/C25 (500 commandes en cours) et commercialisation auprès de flottes (administration, collectivités, entreprises) en France et à l'étranger ;
- en 1995, lancement de versions électriques de Peugeot 106 et de Citroën AX (pour les 3/4, marché de la deuxième ou troisième voiture familiale servant à faire les courses ou les trajets au travail) ;
- plus tard, lancement d'un véhicule électrique urbain spécifique optimisé autour de sa vocation urbaine et de sa motorisation électrique.

PSA considère que le développement du VE hybride, doté d'une turbine fonctionnant à point fixe, qui sera plus cher qu'un véhicule uniquement électrique, ne pourra intervenir que dans un contexte de restrictions portées à la circulation du véhicule thermique dans les villes. Par contre, il attache la plus grande importance au succès complet de son action de 1995 qui ciblera des villes (La Rochelle, Tours...), retenues parmi un grand nombre de candidates et bénéficiant d'une infrastructure adaptée (bornes de chargement...) grâce à une collaboration étroite avec les collectivités locales et EDF (il convient d'éviter toute déception à la première clientèle privée).

Sa politique industrielle consiste à s'assurer la maîtrise de l'entreprise en prenant à sa charge les coûts d'étude et de mise au point du moteur électrique (Leroy-Somer) et du contrôle électronique (Sagem). Pour les batteries il a imposé un cahier des charges au constructeur retenu (Saft) et proposé à la RENAULT une collaboration pour l'étude très onéreuse des batteries futures. Il ne fabriquera lui-même, ni l'ensemble moteur électrique-contrôleur électronique ni les batteries. Les premiers VE seront assemblés sur la même chaîne que les VT, ce sera une production marginale dans le flux. À terme un moteur électrique et son contrôle devraient revenir meilleur marché qu'un moteur thermique.

Le prix d'un VE utilitaire (flotte de quelques milliers d'unités) est maintenant supérieur de 20 000 à 30 000 francs (hors batterie) sur son homologue à moteur diesel et s'avère cependant compétitif. Les VE urbains produits à une cadence de 50 000 par an devraient être commercialisés avec une bien moindre différence de prix. Le poids d'un VE hors batterie devrait être optimisé à 500 kg.

Sur le plan technique, voici comment se présentera le VE urbain de la première génération :

- moteur à courant continu (l'intérêt du courant alternatif n'est pas évident) ;
- chargeur embarqué avec électronique de contrôle permettant des recharges rapides dans des bornes EDF spécialisées (2 à 4 km à la minute) ;
- indicateur d'état de charge (l'utilisateur devra prendre le réflexe de faire le "plein" plus souvent).

Le bon emploi du VE urbain nécessite l'implantation de bornes électriques EDF à recharge rapide (100-200 A) sur son trajet (routes, parkings, stations-service...) ou son lieu de travail. Cela requiert une bonne concertation avec EDF et les collectivités locales. La consommation d'un VE étant de l'ordre de celle d'un deux pièces, il est raisonnable de doter les bornes d'un compteur, de définir un système de facturation...

On emploiera les batteries au plomb pour les usages captifs ou utilitaires, puis les batteries au nickel-cadmium et seulement à l'horizon 2010 celles au lithium. PSA précise que le cadmium :

- n'est pas dangereux sous la forme alcaline utilisée ;
- sera après usage, non pas jeté, mais recyclé (une usine est prévue pour ce travail) ;
- pourra faire l'objet d'une location mensuelle après paiement d'une caution de l'ordre de 5 000 F à 10 000 F.

En France, malgré les lourds investissements industriels requis (de l'ordre de 350 MF) le VE dispose de sérieux atouts : soutien des Pouvoirs publics et de nombreuses villes, politique nucléaire d'EDF heureuse de trouver un marché de nuit pour ses centrales (une tranche nucléaire de 900 MW suffit à la charge d'un million de VE qui consomment de 2000 à 3 000 kWh en moyenne par an) et d'excellents industriels dans le domaine des batteries et des moteurs électriques (Leroy Somer, premier constructeur mondial). Certains autres pays ne disposant pas d'électricité nucléaire craignent la délocalisation de la pollution atmosphérique sur les centrales thermiques (charbon...). Cela explique la relative réserve des Allemands dont les tendances écologiques s'étaient déjà signalées lors de l'affaire des pots catalytiques. Par contre, en Californie et dans quatorze autres États américains, la nouvelle législation impose aux constructeurs la commercialisation de 2 % de VE. Les Japonais sont actuellement en retard dans le développement des VE.

4. VISITE AU CNAM (M. J.F. FAUVARQUE, Professeur d'électrochimie industrielle au Conservatoire National des Arts et Métiers)

M. FAUVARQUE a passé en revue les différentes batteries envisageables pour la traction des véhicules électriques (VE), dont la technologie et la faisabilité industrielle sont très différentes de celles des batteries de démarrage.

I. BATTERIES ACTUELLES

1. Batteries au plomb

La batterie industrielle de traction au plomb est généralement de type dit "tubulaire", en raison de la forme de l'électrode positive. Non étanche, elle nécessite un entretien régulier. Aussi envisage-t-on pour le véhicule électrique individuel la batterie au plomb "étanche" sans entretien, la seule à être disponible sur le marché avec une capacité de production suffisante pour répondre rapidement à une demande importante. Elle fonctionne correctement de -20°C à $+60^{\circ}\text{C}$. Par rapport à la batterie au plomb "tubulaire", l'avantage de maintenance réduite est compensé par quelques aspects moins performants :

- prix un peu plus élevé (1500 F/kWh au lieu 1000 F/kWh)
- capacité un peu plus faible (au mieux 30 Wh/kg au lieu de 35)
- nombre de cycles en régime normal nettement inférieur (500 à 700 au lieu de 1500)
- décharge complète déconseillée (ne pas aller au-delà de 80% de la capacité)
- dégradation rapide en cas de mauvais traitement
- fragilité au gel à l'état déchargé (risque d'éclatement et de mise hors service).

Les potentiels de progrès résident dans :

- l'allègement des collecteurs au plomb
- la mise au point, envisagée depuis longtemps, de batteries bipolaires étanches (un côté de la plaque de plomb porte une électrode positive, l'autre côté une électrode négative)

- une meilleure fabrication, qui, en diminuant les inhomogénéités de fonctionnement, accroît le nombre de cycles et améliore la durée de vie.

2. Batterie au nickel-cadmium

Cette batterie n'est pas encore disponible industriellement en fabrication de série pour le V.E. mais les chaînes de montage sont en construction et la cadence de fabrication pourra répondre à la demande dans 1 à 2 ans. (1994-1995).

La batterie nickel cadmium de traction pour V.E. présente certaines qualités :

- capacité de 52 Wh/kg (contre 35 pour la batterie au plomb)
- puissance continue de 200 W/kg (meilleure que celle des batteries au plomb)
- cyclabilité importante supérieure à 2000 cycles à 80% de profondeur de décharge
- très robuste aux surcharges, surdécharges, impulsions de tension ou de courant,...
- fonctionnement correct à basse température (jusqu'à -40°C).

C'est la seule batterie suffisamment robuste et performante pour garantir une durée de vie aussi grande que celle du véhicule.

Ses inconvénients sont assez importants :

- prix élevé de 5000 F/kWh (prix client), mais les constructeurs indiquent 3000 F/kWh avec une baisse à 2000 F en cas de grande série
- absence de phénomènes permettant la fabrication d'un indicateur de charge
- maintenance contraignante (remplissage d'électrolyte,...) qui demandera 2 à 3 ans pour être améliorée
- autodécharge rapide au-delà de 50°C
- utilisation du cadmium.

Le cadmium est en effet interdit depuis peu pour certaines applications : cadmiage anticorrosion (sauf cas particuliers comme les navires de guerre), pigment rouge-orangé au sulfure de cadmium dans les objets combustibles,... car l'incinération des déchets contenant du cadmium provoque l'évacuation dans l'atmosphère d'oxyde de cadmium toxique. Cette interdiction a provoqué une chute des cours du cadmium, dont la quantité disponible est très suffisante pour assurer la fabrication de 50.000 batteries de V.E. par an en France, d'autant que le cadmium des batteries de V.E. sera recyclé. Cependant sa production mondiale assez limitée (18700 t/an) ne saurait satisfaire la demande d'un million de V.E. par an. Le cadmium est un élément rare (abondance 0,15 g/t dans la lithosphère) issu du traitement des minerais de zinc, dont la production mondiale est stable.

Voici les améliorations dont sont susceptibles les batteries nickel-cadmium :

- batteries bipolaires étanches (études en cours)
- emploi de mousse de nickel au lieu de plaque de nickel fritté (la capacité passerait à 60 Wh/kg)
- remplacement du cadmium par des hydrures métalliques.

3. Batteries nickel-hydrures métalliques

Etudiés il y a une dizaine d'années pour le stockage de l'hydrogène, les hydrures métalliques n'ont été envisagés en électrochimie industrielle que depuis cinq ans. Les progrès du couple nickel-hydrures métalliques ont été rapides.

On a récemment commercialisé de petits éléments, en particulier pour les caméscopes. Voici ses principales caractéristiques (en plus de l'absence d'éléments polluants) :

- coût bien supérieur à celui des batteries nickel-cadmium, avec des perspectives d'amélioration, sans toutefois baisser en dessous de celui des batteries Ni-Cd
- capacité massique future : 70-75 Wh/kg (60-65 pour Ni-Cd)
- capacité volumique future : 180-200 Wh/l (140-150 pour Ni-Cd)
- puissance : 200 W/kg
- nombre de cycles : 600
- autodécharge assez rapide, surtout à chaud (50°C).

II. BATTERIES DU FUTUR

1. Batteries au lithium

Elles mettent à profit le caractère très électropositif de l'élément lithium, la petite taille de l'ion Li^+ qui s'insère réversiblement dans de nombreux composés chimiques, et sa grande mobilité dans de nombreux électrolytes liquides ou solides.

Plusieurs types de batteries au lithium sont développés à l'heure actuelle, tous utilisent un composé d'intercalation pour l'électrode positive (MoS_2 , MnO_2 , NiO_2 ...), l'ion Li^+ s'insérant réversiblement dans la structure hôte, par exemple:



Les principales filières sont :

- lithium - électrolyte solide polymère (à base de polyoxyde d'éthylène)
- lithium - électrolyte organique liquide
- lithium/carbone (l'électrode négative est un composé d'insertion du lithium dans le carbone).

La filière lithium-électrolyte solide polymère est basée sur un brevet de Michel ARMAND (CNRS-Grenoble) qui date de 1978 et entrera donc dans le domaine public en 1998. Elle repose sur la mise en oeuvre commode des matériaux polymères, permettant de fabriquer facilement des feuilles minces multicouches comportant les couches cathode, électrolyte et anode, suffisamment minces pour compenser la faible conductivité du milieu.

Plusieurs groupes étudient cette filière dans la perspective du V.E., notamment :

- Hydroquébec, détenteur du brevet Armand
- Bolloré - EDF-CEA
- un groupe basé sur les travaux d'un laboratoire danois, qui bénéficie de l'aide communautaire.

Voici les caractéristiques prévues d'après les essais en petit élément :

capacité : 100 à 120 Wh/kg
puissance : 100 W/kg
cycles : 500
température de fonctionnement : 60 à 120°C

La filière lithium métal-électrolyte liquide organique a été développée en petits éléments pour des besoins militaires. Elle fonctionne de -40°C à + 70°C, présente une forte capacité massique (150 Wh/kg) mais n'est pas susceptible de recharge rapide et sa cyclabilité est limitée (200 cycles).

La filière lithium-carbone est une modification de la précédente, utilisant pour l'électrode négative un composé d'insertion du lithium dans du carbone graphitique. Cette filière et en particulier développée en France par SAFT pour le V.E. L'addition de carbone fait tomber la capacité massique à 100-120 Wh/kg, mais augmente la cyclabilité (très supérieure à 500 cycles) et autorise une recharge relativement rapide sans nuire à la cyclabilité. Elle est également considérée comme beaucoup plus sûre. En cas d'ouverture accidentelle de la batterie à l'air, il n'y a pas l'inflammation spontanée, qui se produit avec les batteries utilisant du lithium métal. L'électrolyte liquide, plus conducteur, permet une plus grande puissance (200 W/kg) que l'électrolyte solide polymère (200 W/kg).

Un compromis entre ces deux filières, étudié par le laboratoire danois, consiste à utiliser un électrolyte solide polymère réticulé, gonflé par un électrolyte liquide (électrolyte hybride).

La filière lithium/carbone-électrolyte liquide semble la plus proche de l'industrialisation (an 2000) en France alors que celle à base d'électrolyte solide polymère semble plus lointaine, bien que très étudiée sur le continent américain.

2. Batteries à haute température

Les batteries fonctionnant à "haute température" présentent l'avantage potentiel d'une bonne puissance grâce à la bonne conductivité des électrolytes à chaud (300-500°C). Il existe deux filières principales :

La filière sodium soufre

Elle est caractérisée par l'existence d'un électrolyte solide ionique, l'alumine bêta (ou bêta seconde), contenant des ions sodium intercalés et mobiles devenant bons conducteurs ioniques vers 350°C.

L'accumulateur sodium-soufre a été envisagé pour plusieurs applications : effacement des heures de pointe, espace, V.E. Des éléments pour le stockage de l'électricité ont atteint 250 Wh/kg (décharge en 5 h). Les batteries actuelles pour V.E. ont une capacité voisine de 120 Wh/kg et une puissance encore faible voisine de 80 W/kg en continu. Une telle capacité porte à plus de 160 km l'autonomie d'un V.E. Ce sont des chiffres prometteurs. Mais il faut encore maîtriser à l'échelle industrielle des techniques sophistiquées et garantir la fiabilité et un coût suffisamment bas. Un avantage remarquable de l'accumulateur sodium-soufre, parfaitement faradique, est de pouvoir connaître avec précision son état de charge.

Une variante sodium-chlorure de nickel est à l'étude également en ce moment.

La filière lithium-sulfure de fer

Cette filière, mise au point au laboratoire National américain "ARGONNE", est développée par SAFT America Inc. pour l'application au V.E. Elle utilise comme électrolyte un sel de type eutectique (Li Cl, KCl) fondu à 450°, pour l'électrode négative un alliage lithium-aluminium et pour l'électrode positive du sulfure de fer. Les résultats préliminaires sont bons (plus de 120 Wh/kg et 150 W/kg), mais les problèmes technologiques sont considérables, notamment ceux qui ont trait à la corrosion des collecteurs de courant.

Conclusion

Le fait que la batterie au plomb étanche soit actuellement la seule disponible pour le développement du V.E. pourrait laisser penser que les progrès en électrochimie sont très lents. Cependant ce domaine a montré des vitesses d'exécution très rapides conduisant à de nouveaux types d'accumulateurs, par exemple nickel-hydrures métalliques, lithium-carbone..., inconnus ou presque il y a 5 ans et déjà en début de commercialisation pour de petites batteries. Le V.E. a toujours été depuis 1900 le moteur du progrès scientifique et technique des batteries d'accumulateur. On ne doit donc pas écarter l'idée de rapides percées scientifiques puis technologiques, notamment la mise au point de nouveaux électrolytes liquides, solides ou polymères pour les accumulateurs au lithium. L'émergence de meilleures batteries est, sans conteste, possible d'un point de vue technique. Leur succès commercial dépendra aussi de leur prix !

5. VISITE AU PREDIT (M. C. PROST-DAME, Président du Comité des Technologies des Véhicules Routiers du PREDIT)

Le thème "Technologies des véhicules routiers" du PREDIT (Programme de Recherche pour l'innovation et la technologie dans les transports terrestres) comporte quatre sous-thèmes :

- véhicule propre et économe ;
- sécurité et enrichissement des fonctions ;
- interaction production/conception ;
- poids lourds - transports en commun ;

le premier sous-thème étant lui-même subdivisé en :

- moteur propre et économe ;
- moteur deux-temps ;
- carburants de substitution ;
- turbine à gaz ;
- véhicule électrique routier (VER) ;
- filière hydrogène ;
- générateur électrochimique.

La vocation du PREDIT est d'étudier un vaste programme de recherche et de désigner aux Pouvoirs publics les sujets à privilégier. La suite du processus, c'est-à-dire le financement de la phase développement, lui échappe.

L'importance à court terme des véhicules non polluants, c'est-à-dire pratiquement des véhicules électriques (VE), découle des consommations de carburant d'automobile en ville et sur route : actuellement égales, elles s'accroîtront en France dans les dix prochaines années respectivement de 50 % et de 10 %. Aussi a-t-il été créé, dans le cadre du PREDIT, le GTVE (Groupe de travail véhicule électrique) dont l'activité est très concrète :

- appel à proposition de chaîne cinématique électrique pour véhicule urbain ;
- projet d'appel d'offre pour le contrôle d'état de charge ;

- moteur électrique de traction pour véhicule urbain, spécifications préliminaires établies par le GIE PSA-Renault ;

- recommandations concernant les batteries de traction destinées aux véhicules électriques de troisième génération par MM. FAUVARQUE, MARQUET et MILLET ;

- appel à proposition de chaîne cinématique pour le véhicule hybride (VER) ;

- exploration des potentialités des supercapacités.

Les industriels devront répondre à ces appels d'offre avant le 30 juin 1992 et les meilleures propositions seront subventionnées par le PREDIT au regard des préoccupations du GIVE : VE électrifiés de 1995 et VE optimisés à l'horizon 2000-2010.

Voici maintenant un rapide compte rendu des principaux sujets évoqués lors de l'entrevue.

1. Les batteries

Des progrès sont encore possibles avec les batteries actuelles Pb et Ni Cd (versions étanches et bipolaires) dont on connaît les points faibles :

- pour la filière Pb : performance insuffisante (30-40 Wh/kg) ;

- pour la filière Ni Cd : coût élevé (4 à 6 000 /kWh), disponibilité insuffisante et toxicité du cadmium.

Aussi étudie-t-on de nouveaux couples :

a) les solutions issues d'extrapolation du couple Ni Cd :

- nickel-hydrogène haute pression, très onéreux (adaptation au domaine spatial) et performant (50-70 Wh/kg) ;

- nickel-hydrures métalliques plus performant que Ni Cd (de 20 à 30 %).

b) les batteries à haute température dont la plus avancée est celle au soufre-sodium. Étudiée depuis 1965 et fonctionnant à 350°C, elle est dotée de bonnes performances (actuellement 70-90 Wh/kg avec un potentiel de 120-150 Wh/g). La pièce clé en céramique réputée fragile doit être maintenue chauffée (cycle de réchauffement limité à 5-10). La société allemande ABB en fabrique et il conviendrait de les

essayer (nous avons appris par la suite que cela se faisait au centre technique de La Rochelle avec un résultat décevant : panne au bout de 17 000 km).

c) les batteries au lithium comportent deux filières. Celle à électrolytes solides (projet Bolloré-CEA-EDF) séduisante par sa constitution en couches minces, par sa probable robustesse et par sa possibilité de production en grande série est moins avancée sur le plan de la faisabilité que celle à l'électrolyte liquide (projet SAFT). Des travaux fondamentaux sont encore nécessaires pour lever les incertitudes de base. Les brevets français d'Armand (CNRS) déposés en 1978 ont été vendus à la société canadienne Hydro-Québec associée à un groupe japonais. La Communauté Européenne (DG 12) finance les recherches de Harwell (groupe danois) et en France l'association Bolloré-EDF-CEA pourrait déboucher sur un module de 1 kW d'ici 2-3 ans. Devant cette preuve de faisabilité, les Pouvoirs Publics pourraient être sollicités pour financer la phase pilote ultérieure (80 MF).

La France ne doit pas disperser ses efforts mais faire de la veille technologique sur l'ensemble du secteur et essayer tous les prototypes sur étagère. Son domaine d'action privilégié pourrait être les systèmes au lithium à température modérée.

2. État de charge et boîte noire des batteries

L'emploi de batteries sur les VE nécessite de bien connaître :

- son état de charge non par une simple mesure des Ah débités mais grâce à des phénomènes physiques bien connus (tension variable au cours de la décharge dans le cas des batteries au lithium) et sur ce plan la filière NiCd est désavantagée.

- l'évolution chronologique de certains paramètres (température, état de l'électrolyte...) indispensable pour assumer le pilotage, grâce à une boîte noire, d'une recharge très rapide auprès de bornes spécialisées, le problème ne se pose pas pour les recharges lentes effectuées généralement la nuit, mais devra être résolu avec l'apparition d'ici 2-3 ans de flottes captives banalisées.

3. Électronique de puissance

Il y a peu d'intervenants dans ce domaine : Siemens, une filiale italienne de Thomson, des sociétés japonaises... Les seules initiatives à prendre éventuellement sont de :

- réunir un petit groupe de travail - constructeurs automobiles, Thomson et Ministère de l'Industrie (M. Darcourt) - pour étudier les éventuelles synergies du produit avec d'autres besoins et en accroître le marché ;

- tenter peut-être par ailleurs un rapprochement avec Siemens, qui a repris des activités de Renault, dans le cadre d'une recherche concertée.

4. Voiture électrique routière (VER)

Le VE semble être destiné au seul trafic urbain en raison d'une autonomie limitée à une centaine de km vers l'horizon 2000-2010 mais cela n'empêche pas d'envisager un VE hybride en demandant aux constructeurs un cahier des charges pour sa chaîne cinématique, étant entendu que les progrès techniques induiront un décalage par rapport aux solutions proposées.

En raison de l'arrêt des subventions, BMW et Mercedes ont quitté le projet européen, où seuls demeurent les participants français (majoritaires) et suédois, de turbine céramisée AGATA capable d'atteindre 1300°C à la sortie par combustion catalytique interne. Embarqué sur une voiture, fonctionnant à point fixe et entraînant un générateur électrique à grande vitesse, elle pourrait concurrencer le moteur diesel sur les VE hybrides.

5. La position française en matière de VE

La France, assez bien placée dans le domaine des VE, peut envisager de fortifier sa position, par exemple en finançant les recherches des industriels de la batterie : SAFT (Ni Cd), UCAR et CEAC (plomb) pour améliorer les couples classiques et surtout les projets à base de lithium évoqués plus haut ainsi que ceux des industriels du moteur électrique qui participent aux actions promotionnelles du PREDIT (Vales, GEC Alsthom, Auxilec/Thomson, Leroy-Somer). Elle peut tirer profit de certaines actions ou manifestations :

- flotte banalisée de 300 VE de PSA à La Rochelle en 1993 ;

- progrès dans la recharge rapide de batterie (une heure pour 20 kWh) ;

- études en sécurité et en normalisation.

La politique de nos deux grands constructeurs diffère quelque peu. S'engageant à fond dans la commercialisation de VE électrifiés (50 000 en 1995), PSA donne la fausse impression de ne pas s'intéresser aux VER en particulier hybrides. Renault joue plus ouvertement la carte européenne : projet Eurêka, lien avec Siemens après la vente de sa société Bendix et l'activité de Siemens-Toulouse... La coopération européenne se réalisera peut-être lors de la phase de recherche industrielle selon l'exemple américain d'ABC (recherche sur les batteries avancées). Une loi française inspirée de la réglementation californienne servirait de guide à nos constructeurs et leur faciliterait la prise d'une part de marché.

6. VISITE À RENAULT (MM. C. DELARUE, Chef du département "Énergie de substitution", et F. NESPO, Ingénieur à ce même département)

Renault finance sur ses fonds une étude menée par le CNRS sur l'impact du VE en milieu urbain car il y a trop de publications partiales et contradictoires. L'emploi urbain du VE devrait s'imposer à la fois par l'absence de pollution, qui est délocalisée au site des centrales parfois non polluantes (nucléaires, hydrauliques...) parfois plus ou moins polluantes (thermiques au charbon, pétrole, gaz naturel...), et par son faible bruit (avantage cependant diminué en mesures normalisées). Dans le cas où l'interdiction de circuler en ville s'étendrait aux véhicules non polluants, le domaine des VE devrait encore être celui des zones périurbaines.

La partie propulsive d'un VE comprend essentiellement une batterie, de l'électronique de puissance et un moteur électrique. Les constructeurs automobiles ne fabriqueront certainement pas les deux premiers éléments et ont tout intérêt à laisser le troisième aux sous-traitants qui font un excellent travail.

La Régie Renault a pour objectif de présenter à la clientèle un VE qui lui convienne sous peine de porter un préjudice long et durable à ce concept se justifiant rarement sous l'aspect économique seul : au mieux un VE coûtera, hors batterie, autant qu'une voiture classique. Pour atténuer le prix élevé de la batterie on peut recourir à un système de leasing. Comme pour le diesel, plus cher à l'achat, l'avantage d'un carburant meilleur marché se fera sentir avec le temps.

Batteries

En plus de la classique batterie au plomb, on utilise maintenant la batterie Ni-Cd dont on cherche à combattre les défauts : rareté relative (donc recyclage nécessaire ensuite pour éviter la mise en décharge de déchets toxiques) et non connaissance de l'état de charge et à tirer parti des avantages énergétiques (meilleure capacité de charge, excellente puissance instantanée, meilleur comportement à basse température ; possibilité de recharge rapide) et économique (prix au kilomètre et surtout à la tonne transportée). Parmi les batteries du futur, on distingue celle au Na-S étudiée initialement par Ford en 1965 et fabriquée par ABB à l'état de prototype auquel Renault reproche des défaillances multiples (surtout au niveau de la céramique chauffée à 350°) et une puissance instantanée limitée, et celle au Li dont les performances potentielles sont prometteuses mais qui demandent encore beaucoup de travail de recherche pour passer

du stade des petites puissances à celui de prototype à puissance moyenne (on parle de deux ans au moins).

Électronique de puissance

Contrairement à PSA qui semble imposer ses normes à ses sous-traitants (Leroy Somer, Sagem) et a cherché à le faire avec Renault, la Régie préconise la recherche d'un maître d'oeuvre unique fournissant un produit optimisé au meilleur prix.

Moteur électrique

Comparé au moteur thermique, il se distingue par un investissement de production plus faible et une durée de vie plus grande. Pour le futur, Renault écarte le choix de PSA d'investir dans le développement de la technologie du moteur à courant continu : le moteur à courant continu est plus cher que son électronique de puissance et présente peu de baisse potentielle tandis que le moteur à courant alternatif peu cher et doté d'une électronique coûteuse au départ est susceptible de baisses substantielles. Un appel d'offre PREDIT a été rédigé par Renault et PSA, pour un véhicule urbain.

Recharge des batteries

On distingue trois types de recharge :

- la recharge normale de nuit peu chère et très lente (8 h) ;
- la recharge de dépannage sur borne électrique spéciale à l'aide d'un chargeur léger embarqué et d'un système monétique approprié plus chère et d'une durée de l'ordre de l'heure ;
- la recharge de grande puissance (1/4 h pour une Nissan).

Ce dernier cas, qui exige de fortes puissances, par exemple un courant de 900 A sous 120 V, apparaît déraisonnable sauf pour des ateliers spécialisés (EDF...) et entraîne des problèmes très délicats comme ceux de refroidissement, de réduction des performances et de durée de vie.

Renault préconise la recharge pilotée depuis le VE (courant, tension, temps).

Au plan de la puissance instantanée, la batterie Ni-Cd est meilleure que celle au NaS.

Échange standard de batteries

Après étude, cette solution n'a pas été retenue car :

- le poids moyen des packs de batteries de puissance à changer étant en moyenne de 300 kg, il faut disposer de moyens de manutention lourds et immobiliser le VE quelque temps (ça n'est pas une opération immédiate) ; la surface de stockage est importante ;

- on ne connaît pas la capacité énergétique (pas seulement l'état de charge) de la batterie que l'on facture et sur ce point on en revient à l'époque des diligences où il était difficile d'apprécier l'état de fraîcheur des chevaux de remonte. Une connaissance du fonctionnement antérieur de la batterie (boîte noire) améliorerait ce point ;

- Actuellement, il faut stocker environ 20 types de batteries de démarrage pour satisfaire l'essentiel de la demande pour les véhicules conventionnels. Dans le cas de stations-service, il suffit de quelques exemplaires en stock destinés au dépannage. Dans le cas des batteries de traction, compte tenu des diversités d'incorporation, de dimensionnement, de refroidissement, des performances, il paraît très difficile de standardiser les packs de batteries complets, même s'il est souhaitable et prévu qu'ils soient réalisés à partir de monoblocs standardisés.

Seule une flotte captive peut envisager une telle solution, qui pose aussi des problèmes de sécurité et de maintien en charge des batteries.

Flotte de VE en libre-service

Cette solution est envisagée sous plusieurs aspects :

- principe de location automatique de courte durée en milieu urbain ;

- concept nouveau de complémentarité avec les transports publics :

• en zone hyper centre urbain,

- en zone périurbaine à faible densité dans les villes nouvelles,

- ou encore en zone périphérique de banlieue à banlieue,

- flottes spécialisées pour certaines activités professionnelles, en milieu urbain (médecins, infirmiers...).

Renault croit que ces flottes et en particulier les deux dernières peuvent être de matière à promouvoir le VE auprès du public dans une politique de la ville concertée (contacts : Rouen-Grenoble-Saint-Quentin en Yvelines-Nantes).

Véhicule hybride

La solution du véhicule hybride est supérieure à celle du véhicule bimode sur le plan de la mobilité et de la nervosité. Le projet VER (PSA, Renault) avec turbine serait très peu polluant sur route et totalement non polluant en ville. Le véhicule hybride pourrait s'imposer, en cas de mesures réglementaires très sévères au centre des villes, pour les voitures routières circulant aussi en ville.

Politique de Renault

Un modèle de MASTER électrifié, dérivé du véhicule classique, sera produit à l'automne 1992, suivi de l'Express. Le VE pour la clientèle des particuliers pose un double problème :

- le raisonnement d'amortissement à long terme y est peu répandu ;

- il y a concurrence d'une deuxième voiture de bas de gamme ; une incitation telle que la prime de 15 000 F de l'AFME n'est pas suffisante ;

- l'amorce de marché peut-être se faire par une VE de luxe ; Matra et Renault ont des contacts à ce sujet.

La commercialisation de véhicules hybrides ne peut s'envisager que plus tard (environ 2000) pour des véhicules de milieu ou haut de gamme ou utilitaires.

7. VISITE À MATRA (MM. Ph. GUEDON, président directeur général, et J. L. CAUSSIN, directeur technique)

La position de Matra Automobile (MA) sur les véhicules électriques (VE) peut être ainsi résumée :

- MA est un petit constructeur vivant de la vente (64.000 unités par an) de son modèle Espace commercialisé par Renault avec un potentiel de production maximal limité à 100.000 voitures ;

- En revanche, MA possède sur les grands constructeurs les avantages de sa petite dimension : faible délai pour la sortie d'un nouveau modèle (32/36 mois contre 45 pour le Japon et 62 pour la France), investissements sept fois moindres;

- Pour des raisons impérieuses (législation sévère contre les nuisances urbaines, clientèle aisée écologiste ...) les grands constructeurs se doivent d'avoir un VE spécifique dans leur future gamme.

Aussi MA travaille-t-il depuis 4 ans sur la définition d'un VE qui sera peut-être commercialisé par Renault dont l'approche "grand constructeur" est différente (flottes captives ...) et dont la gamme se trouverait complétée par ce modèle "élitiste".

En effet, MA après avoir constaté :

- l'absence sur le marché de VE dignes de ce nom (impact lamentable des engins électrifiés proposés à la clientèle),
- le manque actuel de séduction des VE qui n'attirent pas les acheteurs,

visait le haut de gamme du marché de la seconde voiture (28 % en France), avec un modèle doté de caractéristiques brillantes et capable de séduire les amateurs de petites séries du genre Clio Baccara :

- véhicule tout électrique de 2 (+ 2) places
- poids (hors batteries) de 500 à 550 kg
- vitesse de 120 km/h
- accélération équivalente à celle de la Clio diesel (0 à 50 km/h en 6 s)
- autonomie de 120 à 150 km.

Cette opération requiert deux types d'action :

- Sur le plan socio-culturel, bien cibler la clientèle "cadre supérieur écolo" intéressée par un modèle cher, innovant et sans concurrents sérieux pendant quelques mois.

- Sur le plan technique, "grignoter du rendement" à tous les niveaux : matériaux (légers ...), architectures et fonctions, et rechercher des solutions nouvelles éventuellement "choquantes" qui, au-delà d'un VE repensé, pourraient aussi contribuer à la mutation des véhicules non électriques.

Batteries :

On utilise ce qu'il y a sur le marché : batteries au plomb pour la version de base et au Ni-Cd pour le haut de gamme. On attend que les batteries au sodium-soufre (NaS) fassent leur preuve. Les prometteuses batteries au lithium, susceptibles de déboucher à un horizon plus lointain, font l'objet d'une veille technologique.

Moteur électrique :

De nombreux types de moteurs électriques, dont la série n'excède jamais 3000 exemplaires, existent "sur étagère". Aucun d'eux ne convient, même après adaptation aux besoins de MA. Celui-ci a donc adopté une démarche volontariste en développant sa propre chaîne de traction. Il a choisi le moteur électrique alternatif synchrone autopiloté du même type que celui qui équipe le TGV Atlantique car il constitue la solution optimale (meilleur compromis performance/prix) pour une production de 50.000 par an et possède d'intéressantes caractéristiques :

- dissipation de la chaleur dégagée au niveau du stator et non du rotor ;
- couple massique élevé (2 N.m/kg contre 1 N.m/kg pour un moteur C.C.)
- régime de rotation élevé (10.000 t/min contre 6000 pour un moteur C.C.).

Recharge de la batterie :

Il existe trois façons d'opérer :

- recharge normale (8 h) sur secteur pendant la nuit (faible coût), grâce au chargeur embarqué ;
- recharge normale (8 h) sur des bornes électriques spéciales mises en place par les municipalités (paiement du parking et de la recharge par des cartes à puce ...) grâce à un chargeur embarqué ;
- recharge rapide (2 à 5 km/mn) dans des garages et stations-services équipés en conséquence, apportant la sécurité de ne pas tomber en panne.

Les deux dernières méthodes, généralement effectuées de jour, permettent de désangoisser le client.

Changement standard de batteries :

Envisagée un instant, cette solution a été repoussée car elle n'était pas réaliste :

- l'état de la batterie (vieillesse) qui dépend des conditions d'emploi antérieures, est mal connu ; on ne peut donc rien garantir au client ;
- les modèles de batteries et leur configuration d'usage sont trop nombreux pour permettre un stockage opérationnel.

VE en libre service :

Les tentatives précédentes avec des véhicules thermiques ont toutes été autant de fiascos en raison des nombreuses contraintes rencontrées : parking spécial, maintenance, dépannage, ravitaillement... Peut-être les villes nouvelles conçues à cet effet apporteront-elles un terrain plus favorable. De toute façon, les loueurs de voiture restent les mieux placés pour la mise en commun de véhicules.

VE bimodes et hybrides :

MA repousse ces deux options :

- le bimode (moteur électrique en ville et moteur thermique sur route) trop lourd (1800 kg) entraîne un mauvais écobilan et fonctionne mal aussi bien dans le mode électrique que dans le mode thermique ;
- l'hybride (moteur thermique, diesel ou turbine, fonctionnant en point fixe et générant de l'électricité) a un faible niveau de pollution mais son prix est élevé (surtout avec une turbine) ; sur ce point MA est en contradiction avec Renault et PSA qui soutiennent le programme VER (Véhicule Electrique Routier).

Gestion de l'énergie :

Pour améliorer la gestion de l'énergie embarquée (un VE représente une Clio avec 6 litres d'essence dans le réservoir) on agit sur :

- le facteur humain (apprentissage d'une conduite économe) ;
- le matériel.

Les progrès obtenus sont cependant insuffisants pour fournir un confort haut de gamme à une grande voiture de fonction avec chauffeur. Les applications sont donc limitées aux petits VE, les camionnettes utilitaires (postes ...) échappant aux options de grand confort. Voici quelques points de comparaison de performance de chauffage et climatisation :

- l'Espace dispose de 10 kW pour le chauffage et de 9000 frigori pour la climatisation ;
- la Clio consacre 4 à 5 kW pour le chauffage.

MA utilise pour son VE un chauffage de 1 kW pour entretenir le confort thermique. Pour la climatisation, il utilise des conditionneurs chimiques dont les réserves de froid sont régénérables.

La mise en température est réalisée par programmation du chauffage qui chauffe le véhicule avant son départ utilisant ainsi l'énergie du secteur (le véhicule étant branché pour sa recharge).

8. VISITE À LA MUNICIPALITE DE PARIS (Mme RECLUS, sous-directeur de la protection de l'environnement, MM. KAHAN, de POMPIGNAN et BOUVIER)

Plusieurs problèmes ont été soulevés au cours de la discussion :

1. Pollution atmosphérique :

Paris et sa banlieue connaissent dans l'année, lorsque certaines conditions météorologiques existent (forte stabilité, mauvaise dispersion des polluants), des épisodes de pollution correspondant à des dépassements des seuils inscrits dans les directives européennes. A l'origine de ces épisodes, on trouve de façon prépondérante les émissions polluantes de l'automobile.

Ainsi, fin juillet et début août 1992 et pendant quatre jours, la pollution atmosphérique au dessus de Paris a dépassé les seuils de dioxyde d'azote à ne pas dépasser plus de 2 % du temps dans l'année selon les directives européennes admises. Durant cette période correspondant à des congés, l'activité industrielle était plus faible et le trafic automobile était plutôt inférieur à la moyenne, à l'exception du 31 juillet correspondant aux chassés-croisés des départs et retours de vacances. Par contre, un anticyclone tenace empêchait l'évacuation des polluants, notamment les dioxydes d'azote et l'ozone produit par photochimie sous l'effet d'un fort rayonnement solaire.

Si les véhicules électriques entraînent une amélioration de la qualité de l'air très localement (en raison de l'absence des émissions), cet avantage tend à disparaître rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du véhicule, en raison du brassage intense de l'atmosphère. D'où la question : à partir de quelle diminution de la pollution automobile, ou de quelle pénétration du véhicule électrique (VE), constaterait-on une amélioration sensible et durable de la pollution atmosphérique en hauteur ? *A priori*, et bien qu'aucune étude n'ait été menée sur ce sujet, le chiffre de 10 %, pénétration prévue du VE en 2005 - 2010, semble faible (on a avancé ceux de 15 à 30 %). Il ne s'agit pas d'un problème typiquement parisien. On peut dénombrer bien d'autres agglomérations à cuvette ou à anticyclone tenace dans le monde (Mexico, Los Angeles, Athènes...) et en France (Lyon, Grenoble, Lille, Nice, Strasbourg...).

2. Limitations du véhicule électrique :

La ville de Paris, qui gère une flotte de 4500 véhicules dont 350 bennes à ordures, est très sensible aux limitations du VE (elle a exploité dans les années 1980 jusqu'à 180 bennes à ordures électriques (BOE) et aujourd'hui encore 5 BOE modernes et plus d'une dizaine de laveuses de trottoirs et de chaussées) :

- surcoût d'au moins 30 % par rapport aux engins thermiques équivalents, voire beaucoup plus (1.200.000 F pour une BOE contre 600.000 F pour une benne classique à moteur diesel) ;

- vitesse : certains VE ne sont pas assez rapides. A part le cas des BOE dont la vitesse limitée à 30 km/h n'est pas trop contraignante, il faut que les VE atteignent les vitesses maximales de 70/80 km, avec une accélération correcte pour ne pas avoir de problèmes d'intégration dans le trafic, y compris de proche banlieue. Ces vitesses sont toutefois insuffisantes pour l'accès aux boulevards périphériques et aux autoroutes proches de la capitale. Une vitesse maximale d'au moins 90 km/h semblerait correcte ;

- autonomie : une autonomie comprise entre 60 à 100 km avec l'objectif à moyen terme de parvenir réellement à ce 2e chiffre dans des conditions urbaines de trafic semble tout à fait exploitable en ville. En ce qui concerne les BOE, elles apparaissent handicapées par les trajets en "haut de pied" : garage à la périphérie, collecte des ordures au centre ville, transport des ordures en banlieue à l'usine d'incinération, réalisation d'un second tour et retour au garage de la périphérie ;

- droit : le développement des VE urbains pose le problème de la réservation du stationnement (bornes de rechargement, parkings réservés ...), ce qui est difficile à assurer sur l'espace public ;

- pollution par les métaux lourds (plomb, cadmium) : cette crainte est sans doute exagérée en raison des mesures de recyclage prévues, mais les édiles redoutent les problèmes de déchets ultimes.

3. Autres sujets abordés :

- la solution du leasing pour atténuer le coût d'achat de la batterie (100.000 F dans le cas d'une benne, 15.000 à 40.000 F dans celui d'une voiture) ;

- la motivation et la formation des chauffeurs ;

- l'emploi futur de VE hybrides avec une batterie nickel-cadmium ou équivalent rechargée en permanence par une pile à combustible (du type acide phosphorique) qui, elle, est incapable de fournir de brusques accélérations mais peut débiter un courant pendant un temps très long ;

- les progrès encourageants constatés sur les moteurs électriques embarqués.

4. Clientèle des VE :

Le développement commercial du VE passe par l'objectif d'une production de 50.000 unités par an et par constructeur à l'horizon 2000. La clientèle ciblée des cadres supérieurs écolos et relativement indifférents au surcoût n'y suffira pas. Il faudra aussi compter sur celle des mères de famille conduisant les enfants à l'école, faisant les courses au supermarché voisin ... et, plus généralement, sur les personnes se rendant à leur travail et ne bénéficiant pas de transport public efficace. Cette catégorie concerne davantage les villes de province et la banlieue parisienne que Paris *intra muros*. On se rend compte qu'un VE utilisé constamment pour de petits trajets, devient en fait la première voiture au détriment de la grosse berline servant moins fréquemment pour les seuls grands déplacements (vacances, week-end ...). De plus, on peut imaginer que la sévérité croissante des normes imposées aux véhicules thermiques lui imposant des surcoûts, alliée aux progrès constants des VE aboutiront un jour à un point où le bilan avantages-inconvénients de chaque type d'engin s'équilibrera.

Les indications données par les responsables techniques parisiens sur les domaines où une amélioration des performances des véhicules électriques est nécessaire ne constituent pas des obstacles définitifs. Il s'agit plutôt de pistes pour la recherche et le développement technologique. D'ailleurs, la ville de Paris s'engage avec plusieurs grands partenaires (EDF, PSA, Renault ...) - le maire de Paris l'a annoncé lors de sa conférence de presse du 5 mars 1992 et l'a réaffirmé le 15 février 1993 devant le conseil de Paris - à prendre des initiatives pour que les VE se développent significativement tant au niveau de sa flotte que du parc de véhicules privés qu'utilisent les parisiens pour leurs déplacements urbains.

9. VISITE À SAGEM (M. G. BENOIST, directeur du département automobile)

1. Avantages du VE :

- *Amélioration de la qualité de la vie en ville (pollution atmosphérique, bruit ...)* : le VE constitue une solution envisageable qui, comme les autres se paie, mais s'accompagne de quelques avantages, par exemple, possibilité de faire des livraisons la nuit.

- *Consommation d'énergie* : le VE est exempté, jusqu'à maintenant, d'une taxe du genre TIPP et ne consomme de l'énergie qu'en déplacement (pas de perte au ralenti).

- *Autonomie actuelle (environ 100 km)* : elle est suffisante pour la presque totalité du personnel de SAGEM (ou de l'IFP) désirant faire quotidiennement le trajet domicile - travail.

2. Inconvénients du VE :

- *Prix élevé* : on sait extrapoler la diminution de prix avec les grandes séries (au moins 50.000 VE par an et par constructeur) d'après les données concernant les véhicules thermiques (VT) et les circuits électroniques. M. BENOIST semble rassuré sur ce point.

- *Jauge de batterie* : sa réalisation est plus difficile que celle des jauges à essence (difficulté pour trouver de bons algorithmes).

- *Pollution radioélectrique* : un VE fonctionne sous 200 A et 130 V, de plus il sera doté de moyens de télécommunications donc d'antennes. Son rayonnement radioélectrique devrait être élevé et devra faire l'objet de soins particuliers pour réduire les émissions parasites. Le problème est d'autant plus important que la carrosserie en plastique ne fera pas cage de Faraday et n'offrira pas de protection contre les radiations électromagnétiques. Les normes à respecter seront certainement très sévères.

- *Implantation de réseaux (maintenance, réparation ...)* : les investissements seront élevés pour un parc initial faible. Les garagistes, dont la culture est mécanique, ne sont pas prêts. L'effort à accomplir permettra de démystifier l'électronique aux yeux du grand public (comme Minitel l'avait fait pour l'informatique) et de faire prendre au pays un virage technique.

• **Installation de bornes à recharge rapide sur la voie publique :** ces bornes rassureront les utilisateurs toujours anxieux de tomber en panne loin de leur domicile (crainte certainement injustifiée en raison des alertes d'épuisement de batterie sur le tableau de bord). Elles auront aussi des applications induites :

- chauffage et dégivrage des VE en parking (normalement ces servitudes utilisent 20 % de l'énergie embarquée) ;

- alimentation du compresseur (climatisation, réfrigération ...) de cars à l'arrêt qui sont souvent forcés de faire tourner les moteurs à l'arrêt pour remplir ces fonctions.

3. Mise en place d'un leasing pour l'utilisation de batteries :

Le leasing peut constituer un passage obligé pour remédier au prix élevé des batteries (on n'achète pas son essence à vie en même temps qu'un VT). Comme l'utilisateur n'en est pas propriétaire, il faut constamment estimer (outre la charge stockée) l'état de la batterie dont la dépréciation dépend de l'emploi du VE (livraison, trajet de travail ...) et des recharges effectuées. on doit donc connaître la vie antérieure de la batterie (carnet de santé) et son état de charge (contrôle technique). Ce travail débouche sur la mise au point de "boîtes noires" (interface entre la batterie et le chargeur) permettant d'optimiser les recharges rapides.

4. Options techniques :

La SAGEM travaillant dans une optique à court terme (1995-2000) se préoccupe uniquement des batteries au plomb jugées encore améliorables) et au Ni-Cd. Elle sous-estime peut-être l'émergence industrielle des batteries au NaS mais n'a pas d'*a priori* à ce sujet (le marché est le maître).

Quant au moteur électrique, la SAGEM vient de terminer en juin 1992, une étude pour le PREDIT effectuée en collaboration avec LEROY SOMER. Cela lui permet d'affirmer qu'il est actuellement impossible de se faire une religion sur ce sujet. Les progrès de l'électronique sont tels qu'ils peuvent remettre en selle une solution précédemment abandonnée. L'étude cherchait à classer dans différents domaines (couple au démarrage, perte de chaleur, refroidissement, récupération d'énergie, surface de silicium ...) les principaux types de moteurs électriques (à courant continu, asynchrone polyphasé, synchrone à aimants permanents, à reluctance variable). Aucun d'eux ne se détache du lot. Actuellement, le moteur à courant continu semble d'un

usage plus commode mais des facteurs nouveaux risquent de jouer en faveur de ceux à courant alternatif. Une étude complémentaire d'un an semble nécessaire.

Parmi les autres informations fournies, on retiendra celles-ci :

- l'électronique permet de se passer de boîtes de vitesse pour certains types de moteurs ;
- les balais ne constituent pas un handicap majeur pour les moteurs à courant continu (maintenance ...) ;
- la période actuelle est aux "effets d'annonces" mais il faudra définir des organes communs si l'on veut bénéficier de l'avantage des grandes séries qui n'empêchent pas de construire des VE différenciés.

5. Créneaux de la SAGEM dans le VE :

Pour la SAGEM, qui travaille actuellement en collaboration avec PSA et LEROY SOMER, le VE offre plusieurs créneaux :

- contrôle technique des batteries dans le cadre du leasing,
- occasion de pénétrer dans le domaine des courants forts,
- électronique de pilotage.

Plus concrètement cela concerne, entre autres :

- les chargeurs embarqués sûrs, sophistiqués et satisfaisant de sévères contraintes ($\cos \varnothing = 1$) ;
- la coupure nette et rapide d'un courant de 1500 ampères sous 130 volts ;
- l'agrément de conduite (création de l'effet du frein moteur ...) que le pilote doit ressentir sans apprentissage ;
- les fonctions intégrées (diagnostic, refroidissement ...).

L'objectif est d'obtenir des prix de 9000 F (électronique et moteur électrique) par véhicule.

6. Conclusions :

Le VE, loin d'être une aberration technique, devrait trouver sa place comme moyen de déplacement urbain malgré son coût un peu élevé (c'est le prix à payer pour bénéficier d'une qualité de la vie améliorée). Mais il doit éviter deux écueils :

- ne pas être rejeté par la clientèle qui pourrait se trouver stressée par ses contraintes ou déçue par un niveau de confort insuffisant, d'où les efforts à effectuer pour remédier à cette situation :

- aide à la conduite (téléguidage, information sur les parkings libres ...) primordiale compte-tenu de l'importance du temps de recherche du parking ;

- contact constant du conducteur avec l'extérieur (bureau, famille ...) grâce aux télécommunications (téléphone, fax, modem ...);

- qualité de conduite et de confort (chauffage ...) de premier ordre ;

- satisfaire aux mêmes normes sévères de sécurité que les VT (répartition des masses, résistance aux chocs ...).

La SAGEM s'oriente donc vers des VE haut de gamme sur le plan de la technique comme sur celui de l'agrément de conduite et adopte une attitude réservée envers la politique de libre service de VE. Par contre, elle est favorable au marché d'accompagnement de scooters électriques dotés de caractéristiques suffisantes (vitesse de 40 à 50 km/h, autonomie d'environ 50 km). Enfin, sans rejeter l'idée d'échange standard de batterie, elle préfère la solution du leasing où ses compétences techniques pourraient être utilisées.

10. VISITE À LEROY-SOMER (M. M. BAUVE, Directeur des Relations industrielles)

La Société Leroy-Somer (LS) qui emploie (6000 personnes) a été rachetée il y a deux ans par le groupe américain EMERSON (70.000 personnes) - leader mondial pour les moteurs électriques, climatiseurs, appareils frigorifiques, onduleurs (informatique), systèmes de control process ... - qui a pour principe de ne pas s'ingérer dans la politique industrielle des filiales bénéficiaires. Ses sites de production sont regroupés dans la Charente (autour d'Angoulême) avec des usines à Orléans, Belfort et Lyon. Son chiffre d'affaire annuel est de 4 GF et LS comporte 8 départements. Sa vocation est la fabrication de machines tournantes (y compris les réducteurs et variateurs de vitesse) transformant l'énergie électrique en mécanique ou l'inverse (alternateurs). Il en produit de 12.000 à 15.000 par jour d'une puissance maximale de 1 MW pour les moteurs et de 20 MW pour les alternateurs. L'usine de Lyon sort chaque jour 5000 moteurs électriques (ME) de différents modèles. Sauf cas particuliers (quelques types de motopompes), LS n'intervient pas comme assembleur. Il se borne à fournir le groupe moteur à ses clients.

Son action dans le domaine du VE est double :

1. Moteurs de chariots électriques :

LS fabrique chaque année 50.000 ME pour chariots électriques à un prix relativement élevé, à cause de la faible série, qu'il cherche à accroître en ratissant large. Cet article "sur étagère" équipe déjà des VE comme la VOLTA et le microcar JEANNEAU et servira peut-être à électrifier la Panda de Fiat (des pourparlers sont en cours). Par ailleurs, LS produit aussi des ME pour bennes à ordures (la compression de celles-ci pose des problèmes) et pour petits engins urbains de nettoyage.

2. Association avec PSA :

Depuis une quinzaine d'années, PSA poursuit une politique délibérément favorable au VE (il présentait déjà une 205 électrifiée au congrès de Versailles en 1984). En comparaison, celle de Renault semble "intempestive" (abandon du projet par M. BESSE, reprise récente, annonce de la possible fabrication de ME maison ...). Après avoir établi un cahier des charges très complexe sur le ME et son électronique associé, PSA s'est associé à LS pour le moteur et à SAGEM pour l'électronique et leur a financé de très onéreuses études de recherche. Il est donc devenu seul propriétaire de cet ensemble de propulsion dont une petite série, n'ayant pas demandé de gros investissements, équipe des véhicules J9, J9 variante Tours (avec une

remorque électrique), J5 et C15 dont le ME est le plus élaboré. Sa production devrait atteindre 50.000 unités par an en 1996 - 1997 pour un prix variant, selon la montée en cadence, de 4000 à 5000 F (moitié pour le moteur et moitié pour la partie réducteur-différentiel).

PSA a retenu un ME de type à courant continu qui représente l'option la plus connue et la plus sûre. Cela ne constitue pas un rejet définitif du moteur à courant alternatif (le seul critère impérieux est le prix) que d'ailleurs, Matra, à la recherche d'une solution innovante et prometteuse, a retenu pour son récent modèle ZOOM.

Voyons maintenant l'avenir du VE chez LS :

Son président actuel (M. Claude HENRY), échaudé par les expériences des années 1970 sur les énergies nouvelles (photovoltaïque ...) et les pompes à chaleur, qui ont rapporté, certes, des connaissances techniques, mais aussi des déboires, adopte une attitude prudente en matière de VE :

- ne pas sortir du domaine des ME en ne s'engageant pas dans celui de l'électronique associée (LS en avait pourtant les moyens techniques et le fait de ne pas pouvoir présenter un produit complet constituera peut-être un handicap dans la compétition internationale qui s'annonce) ;

- continuer sa collaboration de sous-traitant avec PSA ou à travers PSA, ce qui l'amène à refuser les offres de Matra et de Renault en l'absence d'accord avec PSA et d'accepter celle de Fiat en raison de l'accord PSA-Fiat dont PSA est le leader ;

- accroître la commercialisation de ses ME de chariot.

Malgré cette politique très sage, le VE présente pour LS plusieurs avantages :

- disposer d'un marché de remplacement (60.000 à 70.000 ME par an) dans le marché décroissant du moteur à courant continu ;

- apprendre, au contact de PSA, le métier très spécial et nouveau pour lui d'équipementier automobile que SAGEM connaît déjà ;

- améliorer son image de marque ;

- ne pas engager d'investissements trop lourds dans une activité qui représentera au mieux 10 % de son chiffre d'affaire (pas de nouvelle usine prévue pour le moment, mais construction d'une unité de bobinage automatique afin de diminuer sensiblement le temps de fabrication des ME).

Sur le plan technique, quelques éclaircissements ont été fournis :

- on ne sait pas faire de ME économiques, leur durée de vie (quelques millions d'heures) reste très supérieure à celle des véhicules (quelques deux milles heures) ;

- le domaine des ME et de leur électronique associée est bien connue, il n'y a pas de mur de compétences comme dans le cas des batteries ;

- en ce qui concerne la pollution radioélectrique, il faudra tenir compte des normes ;

- le cahier des charges impose un ampérage nominal maximal de 270 ampères, mais l'ampérage de crête pourra atteindre 1500 ampères (lorsque le système produit du courant électrique ...) ;

- le microcar JEANNEAU apparaît comme un VE élaboré alors qu'on sent le prototype dans la Citéla de PSA ;

- les ingénieurs de LS proviennent en particulier des Arts et Métiers et de l'Ecole d'électronique de Toulouse.

En conclusion, une incitation affirmée des Pouvoirs Publics sera nécessaire pour faciliter le démarrage industriel des VE.

11. VISITE À SAFT (MM. PIERRE, Président Directeur Général de SAFT, PUTOIS, Directeur Général du groupe Batteries Industrielles, et CORNU, Directeur du Développement Batteries industrielles)

La société SAFT, filiale d'Alcatel Alsthom, qui occupe une position dominante dans le domaine des batteries nickel-cadmium et des piles au lithium, s'intéresse depuis 1978 aux batteries de véhicules électriques (VE) :

- 1984 : présentation d'une 205 électrifiée au congrès mondial de Versailles sur le VE ;

- fin des années 1980 : exploitation à Châtelleraut d'une flotte municipale de 9 camions Masters Renault électrifiés qui a fourni de précieuses informations sur le bilan économique favorable des batteries Ni-Cd et sur la conduite par des non-spécialistes, anticipant celle par le grand public ;

- plus récemment : équipement par des batteries Ni-Cd de divers types de VE (bennes, minibus, bus bimodes) - par exemple à Tours - ... ;

- en 1992, SAFT a conclu avec PSA un accord pour le développement des batteries nickel-cadmium devant équiper les Peugeot 106 et Citroën AX en version électrique ;

- en 1993, Renault participe à ce développement en vue d'utiliser cette batterie pour son projet de Clio électrique.

Par souci de clarté, nous exposerons les propos impromptus des dirigeants de la SAFT en adoptant le plan suivant :

- point de vue technologique,
- point de vue économique,
- autres problèmes.

1. Point de vue technologique :

Le problème est de trouver la bonne filière pour compléter puis, éventuellement, remplacer les classiques batteries au plomb bien implantées dans le secteur des chariots et engins de levage électriques mais un peu justes pour celui des VE malgré de possibles améliorations. Voici les différentes phases de l'action entreprise par la SAFT :

- 1978 : étude des couples électrochimiques Ni-Fe, Ni-Zn, Ni-MH, Ni-Cd et LiAl-FeS ;
- 1988 : abandon, après des essais en laboratoire et sur route, des filières Ni-Fe et Ni-Zn ;
- 1990 : renforcement de l'intérêt pour les couples LiAl-FeS et Li-Al-FeS₂ ;
- 1992 : après dix ans d'études des systèmes C-LiMO₂ émergence de la filière lithium-carbone grâce à la mise au point d'une matrice apte au cyclage.

De son côté, la CGE-Marcoussis a beaucoup étudié (essais sur le terrain), le couple chaud Na-S avant de l'abandonner vers 1988, à la différence de la société ABB arrivée maintenant au stade prototype pour VE de démonstration.

Enfinement la SAFT table :

- pour le court terme sur Ni-Cd, très bien placé au plan technique et dont il est le leader mondial avec la compagnie allemande VARTA ;
- pour le moyen terme sur Ni-MH et pour le long terme sur les couples lithium, Li(C)/MO₂ et LiAl-FeS₂ dont l'industrialisation devrait se situer respectivement vers 1998, 2002 et 2005, dans ces deux derniers cas en concurrence avec Na-S et d'autres couples à base de lithium. L'autonomie des VE atteindra alors 300 km.

Les efforts français en matière de R-D pour batteries de VE (PREDIT, VERT ...) sont très faibles et souffrent de la comparaison avec ceux des :

- Américains : effectués dans le cadre de l'ABC (Advanced Batteries Consortium) regroupant sous l'égide du DOE les trois grands de l'automobile (General Motors, Ford et Chrysler) et des sociétés invitées (dont SAFT America) ;
- Japonais : regroupés par le MITI après le refus de leur candidature à l'ABC.

Dans les deux cas, l'effort est de l'ordre de 100 millions de dollars par an pendant plusieurs années.

Les recherches financées partiellement par l'ABC portent en particulier sur les couples Ni-MH, LiAl-FeS₂ et lithium polymère. La filiale nord-américaine de SAFT a ainsi été retenue par l'ABC pour développer des batteries Ni-MH et LiAl-FeS₂ (financement partiel).

Les recherches ne portent pas sur Na-S, peut-être en raison des difficultés techniques rencontrées et non résolues depuis 1965 : fragilité aux chocs thermiques de la pièce centrale en céramique, absence de données fiables sur le vieillissement et la durée de vie ... Depuis un an, la crédibilité industrielle de cette filière semble même remise en question.

2. Point de vue économique :

SAFT, qui se présente comme le leader mondial de la propulsion électrique, pense posséder une bonne avance technologique dans le domaine des batteries de VE et aimerait en tirer avantage. Une production de 100.000 VE/an assure un chiffre d'affaires de 2 GF/an dont 6 % (environ 100 MF/an) consacrés à la recherche industrielle, peut assurer le développement des batteries futures dont l'efficacité serait accrue à chaque nouvelle génération de 30 à 50 % (doublement possible pour celle du modèle actuel Ni-Cd). Aussi SAFT envisage-t-il de s'engager dans un marché prometteur en étroite collaboration avec les constructeurs automobiles.

En fait, le problème essentiel est celui du démarrage :

- le marché n'existe pas encore, on parle de 50.000 VE/an en 1995, mais aucune usine pour batteries de VE n'a encore été construite, ni même prévue ;
- les investissements sont élevés (600 MF pour une usine de 30 à 40.000 unités par an) ;
- seules les filières au Pb et au Ni-Cd connaissent un début d'industrialisation ;
- les chercheurs français ne disposent pas d'une aide adaptée du type américain (ABC) ou japonais (MITI) pour l'étude des 2e et 3e générations de batteries qui devrait commencer dès maintenant ;
- aussi longtemps que l'autonomie des VE n'atteindra pas 300 km (3e génération), les usagers - hors contraintes réglementaires - préféreront un véhicule thermique (VT) tous usages et moins cher, à un véhicule limité aux trajets urbains (cependant à terme le prix des VE devrait être inférieur à celui des VT en raison de leur simplicité technique et de l'effet progressif des grandes séries) ;
- le chiffre d'affaire de l'industrie automobile étant très supérieur à celui de l'industrie des batteries, cela crée des rapports stricts entre elles, alors qu'une batterie de VE est un produit nouveau nécessitant un travail en symbiose.

SAFT propose plusieurs solutions pour faciliter le règlement de ces difficultés :

- créer une sorte de GIE rassemblant les partenaires scientifiques et industriels du projet, mieux placé pour discuter avec les Pouvoirs Publics des mesures à prendre et des aides à fournir ;
- mesures coercitives pour la circulation des VT au centre des villes, y compris celle des camions de distribution ;
- réglementation favorisant les VE (parkings réservés ...) ;
- achat de VE par l'administration et les grandes sociétés ou municipalités.

3. Autres problèmes :

Il s'agit principalement des problèmes concernant la disponibilité du cadmium et l'échange standard des batteries.

3.1 Disponibilité au cadmium :

Les 20.000 t/an de cadmium produites dans le monde sont suffisantes pour les applications actuelles, mais pourraient ne plus l'être avec l'arrivée du nouveau marché des batteries de VE. En fait, ces craintes ne semblent pas justifiées :

- les emplois classiques du cadmium sont en régression à cause des réglementations sur les produits toxiques ;
- le recyclage du cadmium concernera seulement 25 % des petites applications (aspirateurs portables, pigments de peinture ...) mais 90 % des applications industrielles (les plus importantes en quantité) ;
- la demande en zinc, dont le cadmium constitue un sous-produit, augmente de 2,5 à 4 % par an ;
- il faut compter 40 kg de cadmium par VE et estimer à 7-10 ans la durée de vie de la batterie Ni-Cd.

Finalement, le point d'équilibre se situe autour de 2 M de VE par an, étant donné qu'au delà, l'émergence des batteries Ni-MH soulagera la situation.

3.2 Echange standard de batteries :

Cette idée est séduisante à première vue. PSA, après avoir envisagé un système à coussin d'air, l'a vite abandonné pour plusieurs raisons :

- poids à manipuler (300 - 400 kg),
- variété des packs nécessitant des volumes importants de stockage,
- annexes associées aux batteries (refroidisseurs ...) variables avec le type de VE,
- répartition des charges pour optimiser le freinage (implantation de plusieurs morceaux de batteries dans plusieurs endroits du véhicule), elle aussi variable avec le type de VE.

Il existe des exceptions. Pour les bennes à ordures de Bordeaux qui effectuent 150 km/jour, on utilise trois jeux de batteries de 4 tonnes (chargement opéré en trois heures).

3.3 Divers :

a) *Moteur électrique* : il s'agit d'industrialiser une gamme de moteurs électriques (10 - 40 kW) qui jusqu'à présent n'avait pas été très demandée sur le marché.

b) *Limitation d'autonomie due à la recharge* : pour les véhicules de particuliers qui ne disposent que de 3 kW pour recharger leurs batteries (220 V/16 A), la recharge en une nuit (10 heures) ne permet l'emploi que de batteries limitées à 30 kWh soit une autonomie correspondante de l'ordre de 300 km. Bien entendu, cette limite peut être dépassée si EDF modifie sa distribution.

c) *Intérêt des scooters électriques* : comme la SAGEM, SAFT voit dans les scooters électriques un marché d'accompagnement du VE. Cela pose des problèmes techniques (positionnement des batteries sur l'engin pour assurer une bonne sécurité ...) et économiques. Ce véhicule doit, pour être compétitif, utiliser au maximum les composants automobiles, en particulier les batteries, ce qui peut au stade de la conception poser quelques problèmes d'adaptation.

d) *Stockage inertiel* : l'emploi de volants d'inertie à palier magnétique fonctionnant dans le vide a fait ses preuves dans les engins spatiaux, en particulier pour le stockage d'énergie. Une telle application dans les VE, malgré l'avantage d'une recharge rapide, se heurte à des problèmes de prix.

	Pb/PbO ₂		Ni/Cd	Ni/MH	Na/S	LiAl/Fes ₂	C/LiMO ₂	Li/POE/MO ₂
	P	T						
ENERGIE MASSIQUE Wh/kg	30	40	65	80	100	120	140	150
ENERGIE VOLUMIQUE Wh/dm ³	70	90	120	160	150	180	300	50
PUISSANCE MASSIQUE W/kg	100	90	200	200	100	220	250	100 ?
DUREE DE VIE Nb cycles à 80 %	600	1000	2000	1500	?	1000	1200	300

Sources : *Actualité chimique* 01-02/92 JF.FAUVARQUE
ANL Battery tests 8/92 - W.H. de LUCA
ECC R & D Report 9/92 - P.ZEGERS

SAFT

UNE PERSPECTIVE D'AVENIR POUR LA PROPULSION DES VEHICULES ELECTRIQUES

En 1992, deux types d'accumulateurs seulement sont commercialisés pour assurer la propulsion des véhicules électriques le plomb acide et le nickel-cadmium.

Malgré des performances somme toute modestes au égard à celles obtenues avec un véhicule conventionnel, un véhicule électrique équipé de l'une ou l'autre de ces batteries, est susceptible de satisfaire une bonne partie des applications.

	Pb/PbO ₂	Ni/Cd 1992	Ni/Cd 1998
Energie spécifique (Wh/kg)	40	55	65
Puissance spécifique (W/kg)	100	200	200
Prix OEM de série (± 10%)	1000 F/kWh utile	4000 F/kWh utile	2000 F/kWh utile
Durée de vie (cycles)	300-600	2000	2000

ce qui, traduit en performances véhicules, donne respectivement

	Pb/PbO ₂	Ni/Cd
Autonomie	60 km	120 km
Vitesse max.	80 km/h	100 km/h
Accélération 0-50 km/h	11 sec	8 sec
Durée de vie	~ 30 000 km	~ 200 000 km

Pour augmenter les performances des véhicules électriques et leur permettre une pénétration plus importante du marché du transport urbain, il est nécessaire d'utiliser d'autres générateurs électrochimiques, le Pb/PbO₂ et le Ni/Cd atteignant le maximum de leurs possibilités.

SAFT a donc lancé un programme moyen terme avec le nickel-hydrure métallique et moyen/long terme avec deux couples à base d'anode de lithium (lithium carbone et lithium/disulfure de fer).

Ces trois nouveaux couples seraient susceptibles d'offrir le niveau de performances indiqué ci-après :

	Ni/MH 65	Ni/MH 80	LiAl/FeS ₂ 120	C/LiMO ₂ 140
Wh/kg	65	80	120	140
W/kg	200	200	240	250
Durée de vie (cycle)	1000-2000	1000-2000	1000	1000
Coût estimé (F/kWh)	2000-2400	> 2000		~ 1000

et les performances des véhicules pourraient être :

	120	150	220	250
Autonomie (km)	120	150	220	250
V max (km/h)	100	100	110	110
Accélération (0-50)	7	7	6	6
Durée de vie (km)	200 000	200 000	> 200 000	> 250 000

La mise à disposition de l'ensemble des couples "SAFT" est prévue selon l'échancier ci-dessous, étant entendu qu'il existe aujourd'hui une incertitude sur la date de sortie, d'autant plus élevée que les enjeux sont importants. Ces dates sont établies dans la perspective d'un financement à partir de début juillet 1993.

	Programme					
	Ni/Cd 55	Ni/Cd 65	Ni/MH 65	Ni/MH 80	LiAl/FeS ₂ 120	C/LiMO ₂ 140
Prototype sur véhicule	1987	1994	1995	1997	1997	1996
Pilote	1991	1996	1997	1998	2000	1998
Industrialisation	1995	1999	2000			

12. MISSION AUX ETATS-UNIS

Au cours d'une mission aux États-Unis du 16 au 22 mai 1993, trois pôles de décisions ont été visités :

- le gouvernement fédéral : Washington,
- l'Etat de Californie : Sacramento et la ville de Los Angeles
- l'industrie automobile américaine : Detroit

I. Washington

A Washington les responsables des grandes administrations (Office of Science and Technology Policy, Department of Energy, General Accountment Office) ont été décevants (cela sera aussi le cas de l'Environmental Protection Agency à Detroit) en développant des idées générales et connues :

- les crédits fédéraux de R-D, affectés à la défense et à l'espace et annulés depuis la fin de la guerre froide, susceptibles d'être déplacés pour financer de nouveaux grands programmes technologiques (VE,...)
- la nécessité de trouver du travail à la classe moyenne
- la forte pression de fermiers américains auprès de leurs parlementaires pour créer un marché des biocarburants absorbant leur surproduction agricole (blé,...)
- l'action coopérative de l'industrie automobile et du gouvernement (USCAR et USABC)
- les problèmes posés par la recharge rapide de batteries (infrastructure urbaine,..)
- les caractéristiques américaines (villes très étendues et sans centre, impliquant des déplacements importants, faible prix de l'essence) défavorables aux VE citoyens préconisés en Europe
- l'existence de plusieurs centres de développement des VE en Californie et au Michigan (ce que nous avons pu vérifier) et aussi dans d'autres Etats comme le Maryland (ce qui nous semble moins fondé).

Deux dirigeants dynamiques ont apporté un ton nouveau aux discussions :

- Mme Lesly CORDES, représentant le sénateur J. Bennett JOHNSTON (Louisiane), a répondu franchement aux questions posées et en particulier à celle de savoir si le règlement californien sur le VE sera maintenu, abandonné ou retardé. Pour elle il sera appliqué à temps malgré :

- des problèmes d'infrastructure (pose de prise pour recharge rapide)
- la concurrence japonaise que Detroit ne semble pas redouter (nous l'apprendrons plus tard)
- la difficulté de faire acheter un engin dont la clientèle ne ressent pas le besoin (cela suppose la mise en place de mesures incitatives)
- l'influence du puissant lobby des biocarburants.

- En matière de lobby, celui du VE était représenté par Mme Kateri CALLAHAN, Executive director, de l'Electrical Transportation Coalition qui comprend 79 membres industriels dont seulement deux européens (Asea Brown Boveri et PSA). L'ETC, qui s'intéresse aussi au train à grande vitesse très controversée aux Etats-Unis, effectue toutes sortes d'actions médiatiques en faveur du VE (expositions, conférences, publications,...).

Le dossier très complet qu'elle nous a remis, comporte en particulier (voir annexes 1 à 3)

- la législation fédérale depuis 1990 et en particulier le programme HR 776 (octobre 1992)
- l'emploi programmé de VE en Californie, au Massachussetts et à New-York.

II. La Californie, Etat initiateur de la notion de ZEV en fait du VE

Le Clean Air Act fédéral de 1990 a donné à la Californie le droit de choisir des normes plus sévères que les fédérales en matière de pollution automobile et aux autres Etats celui de les adopter. De la sorte la Californie a pris la tête de la croisade en faveur des automobiles à émission très faible puis nulle, donc des VE.

Cette politique est soutenue par :

- les sénateurs de l'Etat (MM. ROSENTHAL, HART, HAYDEN, POLANCO,...) dont les initiatives législatives concernent :
 - l'exemption provisoire de taxes
 - la formation de personnel pour la maintenance, la réparation,...
 - la constitution de flottes captives
 - l'installation de chargeurs dans les garages et les parkings,...
- la Californian Energy Commission qui, depuis 1978, assiste les industriels au plan de la technique et de l'étude de marché et suit différents modèles : G-Van (General Motors), Force EV (Solectria),... dont trois à batterie NaS: TE Van (Chrysler), Ecostar (Ford) et Golf Jetta (Volkswagen).

Le but est de créer des emplois (1300 tout de suite et 55000 en 2003) pour compenser ceux perdus par les industries de l'espace et de la défense depuis la fin de la guerre froide. Plusieurs organismes se préoccupent de développer des voitures particulières et des autobus navettes électriques. En particulier le CALSTART et le SMUD.

Le CALSTART est un consortium à but non lucratif (droit d'entrée : 50 000 \$) réunissant une quarantaine d'organismes publics et de sociétés privées à haute technologie (voir annexe 4) pour développer des VE à l'échéance 1998 et prendre une part de ce marché.

On a prévu pour ces engins les meilleurs composants possibles :

- semiconducteurs IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) pour l'électronique de puissance (contrôle du moteur, chargeur de batterie, freins électriques,...)
- moteur de type brushless continu (efficace, léger, économique)

- batterie au plomb bipolaire (amélioration du rayon d'action, de l'accélération, de la rapidité de recharge)
- pneu spécial Pirelli Armstrong (30 % de diminution de frottement et 15 % de poids en moins)
- système de recharge par induction (plus sûr et efficace)
- sièges conditionnés thermiquement...

Lors de l'exposé oral on a aussi parlé de palier magnétique. De toute évidence la panoplie des techniques sélectionnées par CALSTART est de premier ordre. Cela suffira-t-il pour assurer le succès en Californie d'une production en série, sinon de VE, du moins de certains de ses composants? On peut être sceptique car :

- la fabrication du modèle LA 301 de la société suédoise "Clean Air Transport" sélectionné par l'Etat de Californie a été abandonnée pour des raisons financières
- les industriels de Detroit ont la volonté et les moyens de prendre ce marché.

Le SMUD (Sacramento Municipal Utility District) veut faire de la capitale Sacramento un pôle du VE. Son activité est multiple :

- flotte de 30 VE et de 1 bus navette de 22 passagers
- implantation de 71 stations de recharge en ville
- création d'un Electric Vehicle Service Center pour la maintenance et la réparation de VE particuliers
- programme incitatif (voir annexe 5).

Une documentation très importante nous a été remise comportant en particulier :

- une étude de marché
- un sondage de la clientèle privée
- les matériaux pour VE légers
- les autobus électriques (constructeurs, programmes,...)

A Los Angeles nous avons aussi visité une petite entreprise (6 personnes) indépendante, l'AC Propulsion Inc. (High - Performance Electric Vehicle Propulsion), qui, après avoir travaillé pour l'Impact

de General Motors, a mis au point un moteur électrique de grande qualité :

- moteur à induction (cage d'écureuil en aluminium) très compact (2 kW par kg)
- emploi de transistors IGBT de préférence aux thyristors GTO (Gate Turn Off) pour le contrôle du moteur
- puissance de 150 kW donnant aux VE un coté très sportif
- autonomie de 210 km à 88,5 km/h avec une consommation de 75 Wh/km avant que la capacité de recharge ne diminue de 50 %.

Le directeur de cette PME, M. Alan COCCONI, cherche, en protégeant ses innovations, à vendre son savoir faire et à trouver des commanditaires.

III. Le Michigan (Detroit, Dearborn)

Les rencontres avec diverses personnalités de l'industrie automobile américaine ont permis d'éclaircir un certain nombre de points :

- La Californie n'est plus l'Etat locomotive qu'il a été. Abandonnée par les industries de l'espace et de la défense, financées par le gouvernement fédéral depuis la fin de la guerre froide, elle a adopté une législation antipollution très sévère qui fait fuir les éventuels investisseurs (vers l'Arizona et d'autres Etats...)
- Ses efforts pour retenir les industries de haute technologie en les orientant, entre autres, vers le VE sont partiellement infructueux (la branche spécialisée de Hughes a émigré à Detroit, le projet suédo-californien du VE LA 301 a été abandonné,...)
- Le règlement contraignant du CARB (California Air Resources Board) sur la pollution automobile, qui concerne les constructeurs vendant plus de 35 000 automobiles par an en Californie (les sociétés françaises ne sont donc pas impliquées), ne sera pas appliqué en 1998 sauf offensive commerciale très peu crédible des Japonais. Les industriels américains font des efforts sérieux (on sent leur orientation au fait que l'on ne peut plus visiter facilement un laboratoire comme celui d'Argonne). Ils en seront récompensés par l'octroi d'un délai de quelques années.

- La production du VE Impact de General Motors a été arrêtée au bout de 50 modèles en raison du manque de débouché commercial. La conception initiale de moteurs dans les roues a été abandonnée à la suite d'un accident et par crainte des futurs procès avec la clientèle.
- Plusieurs mesures défavorisent le VE aux Etats-Unis par rapport à la situation européenne :
 - l'essence est plus de trois fois moins chère
 - les villes ne comportent pas de centre, les moindres déplacements se comptent en dizaines de km et demandent une grande autonomie des automobiles d'au moins 100 miles (160 km)
- les modèles proposés actuellement sont trop chers.

L'USCAR

L'United States Council for Automotive Research a été créé en 1992 par les trois grands de l'automobile (General Motors, Ford et Chrysler) pour faire de la recherche précompétitive et renforcer ainsi leurs technologies de base. Qualifiée de parapluie ("umbrella"), cette organisation comporte actuellement dix consortiums sur les structures en composite, la lutte antipollution (carburant, moteur), les batteries avancées (USABC), l'environnement (impact de la pollution automobile), le multiplexage dans les nouveaux véhicules, le recyclage de l'automobile, la réduction des coûts de fabrication (moindre complexité de l'outil industriel), le contrôle des émissions, la sécurité, les peintures peu polluantes.

L'USCAR comporte un minimum de bureaucratie avec une présidence tournante (le président actuel est M. WALKOWICZ de General Motors) et maintient de bons rapports avec les associations d'ingénieurs et les sociétés savantes. A propos du VE on nous a précisé :

- les objectifs à long terme de l'USABC pour les batteries (400 W/kg, 200 Wh/kg, 10 ans de vie, moins de 100 \$ le kWh) mais sans préciser les filières les plus prometteuses (on trouvera la liste des contrats dans l'annexe 6)
- la création d'un groupe étudiant les systèmes et sous-systèmes susceptibles de prendre place dans la production de VE de chaque société

- le respect des dates pour la réglementation californienne (véhicule à émission nulle) grâce aux progrès techniques effectués d'ici 1998.

M. David E. COLE (Office for the Study of Automotive Transportation)

M. COLE (fils d'un ancien président de General Motor), est le directeur de l'OSAT (Université de Michigan) qui est un véritable "think tank" automobile, reconnu mondialement. Il nous a exposé sa position sur le VE en termes simples et même abrupts :

- la Californie est en perte de vitesse au plan industriel et son programme sur le VE rencontre de sérieuses difficultés (personne ne vient y investir)
- la lutte contre la pollution automobile s'avèrerait beaucoup plus efficace en diminuant celle des véhicules thermiques (VT) par élimination des automobiles anciennes tout au moins dans une première phase
- les électrochimistes très pessimistes sur le développement des batteries redoutent les risques de commercialisation trop hâtive (il est difficile de discerner le modèle qui va s'imposer)
- les nouveaux VT sont très peu polluants et les efforts pour attendre le niveau zéro coûteraient trop cher face au modeste résultat obtenu
- les coûts de productions de VE peuvent se révéler excessifs pour un seul constructeur et M. COLE envisage une production commune des trois Grands.

Après s'être montré favorable au véhicule hybride (VH) pour le long terme et indiqué que de nombreux problèmes techniques restent à résoudre sur la turbine, il a rappelé la bonne position du Michigan par rapport à ses concurrents :

- la Californie (déclin des industries de haute technologie, chômage, règlement contraignant sur l'environnement)
- le Japon dont la position s'est affaiblie depuis 5 ans pour des raisons économiques (rapport yen-dollar) et techniques (amélioration des voitures américaines)
- la Corée du Sud (main d'oeuvre peu chère mais technologies peu avancées).

Il conclut en déclarant que le développement du véhicule électrique constitue à moyen terme un thème de R & D important et indiscutable.

Responsables de FORD

Les responsables de Ford ont une position plus mesurée. Membres de l'USCAR et de l'USABC, ils s'intéressent aux VE et envisagent d'aller au-delà de la recherche précompétitive, mais ils aimeraient être soutenus par un financement fédéral ou de l'Etat totalement justifié à leurs yeux par des arguments de sécurité de ravitaillement énergétique en faisant la démonstration pratique et crédible d'une reconversion possible à l'électricité des transports automobiles américains en cas de crise.

V. Conclusions

Cette mission a permis de rencontrer les interlocuteurs les mieux placés pour rendre compte du problème des VE mais pas toujours bien informés (en particulier dans les grandes administrations) et nous avons eu parfois l'impression de leur en apprendre autant qu'ils nous ont apporté. Nous avons aussi pas mal circulé en automobile ce qui nous a permis de faire des observations simples mais importantes (mauvais état des routes, urbanisation étendue,...). De toute cette expérience il est possible de tirer quelques conclusions :

- le développement du VE est confronté à des conditions très différentes aux Etats-Unis et en Europe (le VE urbain trouvera plus facilement sa place chez nous que là-bas).
- l'Etat de Californie en déclin perd son rôle de leader technologique au profit du Michigan où les trois Grands déjà associés au niveau précompétitif pourraient envisager une production en série commune
- la concurrence asiatique est moins redoutée qu'il y a 5 ans.

Sur le plan technique la moisson a été assez maigre :

- comme prévu la relève du moteur électrique à courant continu sera assuré soit par le moteur à induction soit par le moteur brushless continu
- en matière de batterie la situation est moins claire : la filière NaS utilisée sur quelques prototypes semble abandonnée, celle

au plomb équipe tous les autres modèles d'ailleurs très confortables et Calstar préconise la batterie au plomb bipolaire, mais les systèmes avancés étudiés dans le cadre de l'USABC (hydrure de métal, lithium,...) n'ont pas quitté le stade du laboratoire et les piles à combustible bien financées ne déboucheront que plus tard

- l'électronique de puissance (IGBT) s'impose pour les VE et aussi les VT
- le concept de moteurs dans les roues semble abandonné
- les pneus spéciaux économiques font l'objet de recherche.

La grande question sur l'application du règlement californien (2 % de VE en 1998, 10 % en 2003) n'a pas reçu de réponse définitive:

- les industriels américains assurent qu'ils feront les efforts nécessaires pour respecter les délais
- des observateurs français bien au courant des pratiques locales affirment que ces efforts seront mis en avant auprès des autorités afin d'obtenir un délai ou des aides fédérales

Le programme de VE s'insère dans d'autres programmes liés au transport comme celui sur le TGV, sur les biocarburants soutenu par le puissant lobby agricole, le gaz comprimé ... etc.

Annexe 1

FEDERAL LEGISLATION AND APPROPRIATIONS IMPACTING ELECTRIC VEHICLE PROGRAMS

ENVIRONMENTAL REGULATIONS

Clean Air Act Amendments of 1990

- Establishes minimum fuel emission standards and definition of clean-fuel vehicles.
- Establishes California Pilot Test Program
- Requires EPA, NASA, and DoE to conduct a study and test program on the hydrogen fuel cell EV to be completed in 1993.

RESEARCH AND DEVELOPMENT

Intermodal Surface Transportation Efficiency Act of 1991

- Establishes grants for EV R&D consortia, including issues of infrastructure, marketing, training, and development and application of safety standards.

Federal Highway Transit Act

- Provides funding at \$12 million for ISTEA grant programs

Department of Energy FY 1993 budget

- Battery R&D \$32 million
- Fuel Cell R&D \$12 million
- Systems R&D \$16 million

National Defense Authorization Act for FY 1993

- Establishes defense dual-use critical technology partnerships in 14 areas, including projects in EVs and fuel cells. Total funding available for all partnerships is \$100 million.

DEMONSTRATION PROGRAMS

Energy Policy Act of 1992 (no funds yet appropriated)

- Establishes EV commercial demonstration programs to be funded over 10 years at \$50 million.
- Establishes EV infrastructure and support systems development programs funded over 5 years at \$40 million.
- Allows advanced recovery of expenses by electric utilities for R&D and demonstration activities by EPRI for EV projects.
- Requests \$51.5 million FY 1993 and \$56 million FY 1994 for fuel cell R&D

National Defense Appropriations Act for FY 1993

- Provides \$25 million to explore the potential of EVs in the armed services. Of this amount, \$2.5 million is dedicated to a demonstration project in Sacramento, Ca. and \$5 million to a demonstration in Hawaii.

H.R. 1392 (17 March 1993)

- Proposes to rescind funds dedicated to Sacramento, Ca. and Hawaii based on non-competitive nature of the awards.

Annexe 2

ELECTRIC VEHICLE FEDERAL PROGRAMS CREATED UNDER H.R. 776, THE NATIONAL ENERGY POLICY ACT OF 1992

FEDERAL PROGRAM	PROGRAM AUTHORITY AND DESCRIPTION	INDUSTRY REQUIREMENTS FOR PARTICIPATION	EFFECTIVE PROGRAM DATES
Electric Motor Vehicles and Associated Equipment Research and Development Program	Authorizes a multi-year (1993-1996), \$485 million EV and battery research and development program within the Department of Energy to be conducted in cooperation with the electric utility, automotive, battery and other industries.	Secretary will develop a 5-year comprehensive plan in consultation with industry and submit to Congress within 180 days. Industry must provide at least 50% of funds directly related to cooperative agreements under this program.	Solicitation for cooperative agreement proposals must be issued within 12 months of date of enactment. Additional solicitations are allowable.
Electric Motor Vehicle Commercial Demonstration Program	Authorizes a 10 year, \$50 million electric vehicle demonstration program. 10 demonstration projects, with a minimum of 50 vehicles to be included in a project.	Industry must propose to provide at least 50% of overall project funds. No one project can receive more than 25% of total available funding. Per vehicle subsidy capped in several ways, but can be no more than \$10,000.00 per vehicle.	Solicitation for project proposals to occur within 18 months of date of enactment. Projects must be selected within 120 days of solicitation closing date.
Infrastructure and Support Systems Development Program	Authorizes a 5 year, \$40 million program to enter into joint ventures with industry to demonstrate the infrastructure required to operate and maintain EVs.	Non-federal participant must provide at least 50% of the overall project costs. No one project may receive more than \$4 million.	Solicitation for proposals within 12 months of enactment. Projects must be selected within 240 days after proposals have been solicited.
State and Local Incentives Program	Authorizes a 5 year, \$50 million program to assist state governments in developing and implementing incentive programs for alternative fuels and alternative fueled vehicles.	States must provide 20% of the cost of activities for which federal assistance is sought.	Secretary must establish guidelines for state incentives plan within 12 months of enactment. Within 12 months of issuance of guidelines establishing the program, the Secretary must invite the Governor of each State to submit an proposal.

Annexe 3

Overlap Between CAA of 1990 and the ZEV Standards for California, Massachusetts and New York as Mandated in their Low Emission Vehicle Programs

Model Year	Nationwide Implementation - CAA ²	Implementation - California LEV ¹	Implementation - Mass. LEV ^{1*}	Implementation - NY LEV ¹	Model Year	Nationwide Implementation - CAA ²	Implementation - California LEV ¹	Implementation - Mass. LEV ¹	Implementation - NY LEV ¹
1998	Fleet Program - (30% new light duty fleet mkt. in 22 areas must be LEV)	ZEV (2% new vehicles - 35,000 vehicles)	ZEV (2% new vehicles - 5,000 vehicles)	ZEV (2% new vehicles - 14,000 vehicles)	2001	Fleet Program - (70% new light duty fleet market in 22 areas must be LEV)	ZEV (5% new vehicles - 87,500 vehicles)	ZEV (2% new vehicles - 5,000 vehicles)	ZEV (5% new vehicles - 35,000 vehicles)
1999	Fleet Program - (50% new light duty fleet mkt. in 22 areas must be LEV)	ZEV (2% new vehicles - 35,000 vehicles)	ZEV (2% new vehicles - 5,000 vehicles)	ZEV (2% new vehicles - 14,000 vehicles)	2002	Same as 2001	ZEV (5% new vehicles - 87,500 vehicles)	ZEV (2% new vehicles - 5,000 vehicles)	ZEV (5% new vehicles - 35,000 vehicles)
2000	Fleet Program - (70% new light duty fleet market in 22 areas must be LEV)	ZEV (2% new vehicles - 35,000 vehicles)	ZEV (2% new vehicles - 5,000 vehicles)	ZEV (2% new vehicles - 14,000 vehicles)	2003	Same as 2001	ZEV (10% new vehicles - 175,000 vehicles)	ZEV (10% new vehicles - 25,000 vehicles)	ZEV (10% new vehicles - 70,000 vehicles)

¹ Number of vehicles in Transitional Low Emission Vehicle (TLEV), Low Emission Vehicle (LEV) and Ultra Low Emission Vehicle (ULEV) categories are illustrative only and based on an estimate of 1,750,000 new vehicles in California each year; 250,000 new vehicles in Massachusetts each year; 700,000 new vehicles in New York each year. ZEV numbers are mandatory. CARB standards will be averaged over manufacturer's fleet.

* Source: Laurel Carlson and Tom Denormandie of the Massachusetts Department of Environmental Conservation.

² Affected areas include: Atlanta, Baltimore, Baton Rouge, Boston, Chicago, Denver, El Paso, New York City and surrounding areas in New York, Connecticut and New Jersey, Houston, Los Angeles, Milwaukee, Philadelphia and surrounding areas in New Jersey and Delaware, Providence, Sacramento, San Diego, Springfield, MA and Washington, DC.

I. INTRODUCTION

A. Mission and Goals

CALSTART is a non-profit consortium of over 40 public and private entities mobilized to create an advanced transportation industry in California. Its participants are listed in the following table.

CALSTART Participants and Sponsors				
California Electric Utilities	U.S. Businesses	U.S., State, or Local Government Agencies	U.S. Public or Private Educational and Research Institutions	Federal Laboratory
Los Angeles Department of Water & Power Pacific Gas & Electric Company Sacramento Municipal Utility District San Diego Gas & Electric Company Southern California Edison Company	Amerigon, Inc. Aerojet APS Systems ASHA Corp. Audio Navigation Systems Inc. Avery Dennison Bus Manufacturing USA, Inc. The Coddington Companies Clean Air Transit Composites Automation Consortium Dowty Aerospace Fairchild Manufacturing General Motors Group IX Systems Hub Engineering Hughes Aircraft Co. IBM ITT Cannon Intel International Automotive Design International Rectifier Lockheed Corp. Pavlics Engineering Pirelli Armstrong Tire Corp. Specialty Vehicle Manufacturing Translumin International Inc. Trojan Battery Co.	Bay Area Rapid Transit District The City of Burbank John Wayne Airport (Orange County) Los Angeles County Transportation Commission Los Angeles Harbor Department Los Angeles International Airport Ontario Airport Sacramento Municipal Airport Santa Barbara Air Pollution Control District Santa Barbara Metropolitan Transit District South Coast Air Quality Management District The State of California	California Institute for Energy Efficiency Electric Power Research Institute International Association of Machinists University of California-Davis, The Institute for Transportation Studies University of California-Los Angeles, Lewis Center for Regional Policy Studies	Lawrence Livermore National Laboratory

Annexe 5
ELECTRIC VEHICLE INCENTIVE PROGRAMS
IN
SACRAMENTO COUNTY

PROVISION	DESCRIPTION	EFFECTIVE DATE	CONTACT
Federal Income Tax Credit	10% tax credit, based on total purchase price of an electric vehicle. Allowable credit cannot exceed \$4,000 per vehicle	Available for property purchased after June 30, 1993 and prior to December 31, 2004. Credit phased out; 10% tax credit is reduced by 25% in 2002; 50% in 2003; and 75% in 2004.	Kateri Callahan Electric Transportation Coalition (202) 508-5995
Federal Tax Deduction	\$100,000 tax deduction for investments made in electric vehicle recharging property	Available to businesses only; for property placed in service after June 30, 1993 and prior to December 31, 2004.	Kateri Callahan Electric Transportation Coalition (202) 508-5995
State Sales Tax Exemption	Based on portion of the cost which exceeds cost of comparable gas vehicle. Vehicle must be certified by CARB as a low emission vehicle.	Available as of July 1, 1992. Subject to 200% cap, which applies to pure and and hybrid electric vehicles.	Jennifer Allen California Energy Commission (916) 653-0291
State Income Tax Credit	Can be claimed for 55% of the cost differential between a CARB-certified low emission vehicle and comparable gas car; or for 55% of the cost of any retrofit device to convert to low emission. Maximum credit of \$1,000 per auto, 2 - person passenger vehicle, or motorcycle. Maximum credit of \$3,500 for vehicle weighing over 5,750 lbs.	Available as of January 1, 1991. Subject to statewide cap of \$750,000 per year.	Jennifer Allen California Energy Commission (916) 653-0291
SMAQMD Rebate	\$1,000 rebate for purchase of a dedicated low emission, light duty, OEM vehicle.	Available as of January 1, 1992	Tim Taylor Sacramento Metropolitan Air Quality Management District (SMAQMD) (916) 386-7001
SMUD Incentives	To be determined	To be determined	Michael Wirsch Sacramento Municipal Utility District (916) 732-6754

COMMISSION
DES AFFAIRES ÉCONOMIQUES
ET DU PLAN

Paris, le 22 mai 1991

Le Président

Monsieur le Président.

Au cours de sa réunion du 22 mai 1991, la commission des Affaires économiques et du Plan a décidé de saisir, en application de l'article 6 ter, paragraphe V, 2°, de l'ordonnance n° 58-1100, du 17 novembre 1958, relative au fonctionnement des Assemblées parlementaires, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques que vous présidez, des deux questions suivantes :

- le rôle déterminant joué par l'absence de certaines décisions stratégiques sur la dévitalisation des zones rurales fragiles françaises ;

- l'intérêt du véhicule électrique au regard de la protection de l'environnement.

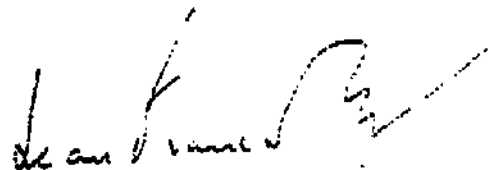
Concernant la première de ces questions, la commission des Affaires économiques et du Plan souhaite notamment, dans le prolongement des travaux de la mission d'information sur l'avenir de l'espace rural français, que l'office effectue des investigations sur les conséquences :

. de l'absence de concertation entre les différents ministères en matière de fermeture de services publics,

. des décisions contribuant au développement économique de la région Ile-de-France au détriment de la province,

. de l'insuffisante desserte des zones rurales par les réseaux modernes des télécommunications.

Je vous prie de croire, Monsieur le Président, à l'assurance de ma considération distinguée.



Jean-FRANCOIS-PONCET

Monsieur Jean-Yves LE DEAUT
Député
Président de l'Office parlementaire
d'évaluation des choix scientifiques
et technologiques
ASSEMBLÉE NATIONALE
126. rue de l'Université
75355 PARIS

Annexe 6

USABC

Four-year, \$260 million battery development effort cost-shared 50-50 with Dept. of Energy
1992 Budget - \$27 million; 1993 Budget - \$28.7 million
Consortium Members: Big 3, Electric Power Research Institute, Dept. of Energy

CONTRACTS AWARDED TO DATE

Lithium-Polymer Electrolyte

- **W.R. Grace** (Boca Raton, FL) world's largest producer of battery separators and largest specialty chemicals company, its partner **Johnson Controls Battery Group** (Milwaukee, WI) largest domestic supplier of automotive batteries, and their affiliates - **\$24.3 million**, three-year contract to develop a thin-film lithium-polymer bipolar battery utilizing solid polymer electrolytes.
 - **SRI International** (Menlo Park, CA) - Fundamental solid-polymer electrolyte technology
 - **EIC Laboratories** (Norwood, MA) - Cathode-materials development along with solid polymer electrolyte expertise
 - **UCAR Carbon Company Inc.** (Parma, OH) - Carbon-based materials

Sandia National Lab (Albuquerque, NM) - **\$3 million** - research on materials and fundamental studies related to lithium-polymer batteries. Also conduct tests of elevated temperature batteries provided by USABC contractors

Lawrence Berkeley Laboratory (Berkeley, CA) - **\$1.1 million** - develop technology for lithium polymer batteries

Ambient-Temperature Lithium-Polymer System

- **Delco Remy Division** of General Motors (Anderson, IN) technology to integrate the devices into battery systems and **Valence Technology** (San Jose, CA) processing materials into battery cells - Contract specifics pending.

Long Term Lithium (Aluminum)-Iron Disulfide Battery

- **Saft America Inc.** (Cockeysville, MD) - Three-year **\$17.3 million** contract to pursue a bipolar form of the lithium (aluminum)-iron disulfide battery

Argonne National Laboratory (Chicago, IL) - **\$8.3 million**, develop lithium iron disulfide batteries and test nickel/metal hydride and sodium beta batteries

- **Ovonic Battery Company** (Troy, MI) - **\$18.5 million** - development of mid-term nickel/metal hydride batteries.
- **National Renewable Energy Laboratory** - **\$3.3 million** - study advanced insulation technology for high temperature batteries
- **Idaho National Engineering Laboratory** (Idaho Falls, ID) - 24-months, **\$900,000** contract - nickel-metal hydride and high-temperature battery pack testing

USABC Funding

Public Funding provided by Department of Energy.

Private: Automotive partners, EPRI and its participating utilities, and from contracted battery developers and their subcontractors. Participating utilities: Southern Company Services Inc. (Atlanta, GA), Southern California Edison Company (Rosemead, CA), Public Service Electric and Gas Company, Inc. (Newark, NJ), Pacific Gas and Electric Company (San Francisco, CA) and Empire State Electric Energy Research Corp. (NY, NY)

Advanced Research Projects Agency (ARPA)
1993 Budget: \$25 million for EV/Infrastructure Program