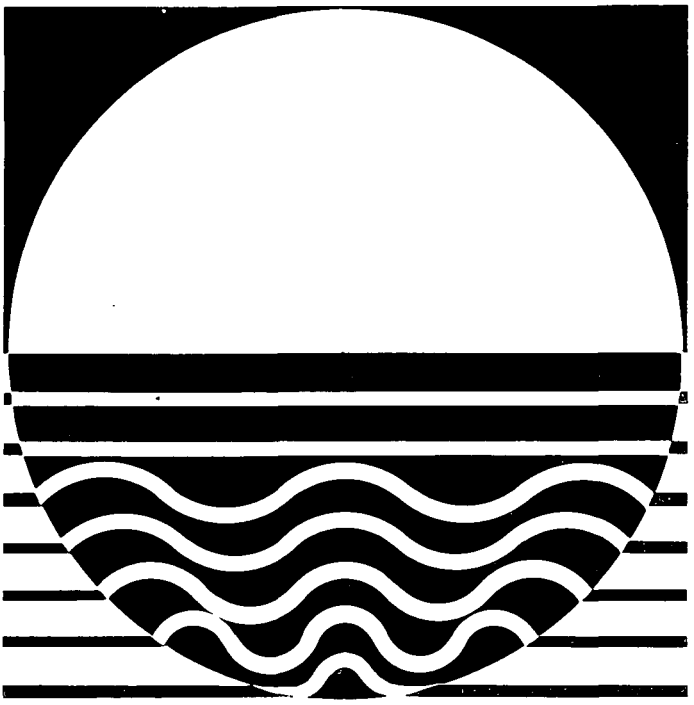
Vers une deuxième génération de véhicules?

les véhicules électriques



ENVIRONNEMENT

Cet ouvrage constitue le trente-troisième volume de la collection « Environnement » dirigée par

MM. Serge ANTOINE et André DURET.

Derniers ouvrages de la collection « Environnement » :

19) Evaluation de l'environnement - recueil de textes.
20) La pollution par le plomb et ses dérivés (Monographies scientifiques).
21) Evaluation du coût de la prévention de la pollution atmosphérique.
22) La pollution par les oxydes d'azote (Monographies scientifiques).
23) La pollution de l'eau en France (Statistiques).
24) Les déchets solides.
25) Le livre blanc de l'eau en France.
26) Guide administratif de la pêche fluviale.
27) La pollution par le mercure et ses dérivés (Monographies scientifiques).
28) La pollution par les composés organo-chlorés (Monographies scientifiques).
29) Prévention et lutte contre les pollutions et les nuisances des porcheries.
30) La lutte contre le gaspillage.
31) Dossier statistique - Environnement. Cadre de vie (Tome 1).
32) Dossier statistique - Environnement. Cadre de vie (Tome 2).

Hors collection : Les paramètres de la qualité des eaux.

Liste complète en fin d'ouvrage.

La rédaction de ce document a été réalisée par MM.

Jean DUCLOS
Chargé de mission au secrétariat général du Haut Comité de l'Environnement jusqu'en juin 1973.

et

Jean-Henri PIERRARD
Chargé de mission au secrétariat général du Haut Comité de l'Environnement.

Ont également participé :

MM. Louis SAULGEOT, Président du groupe interministériel « Véhicules Electriques ».

Gérard CASANDJIAN, Chargé de mission à la Direction de la Prévention des Pollutions et Nuisances.

Jean-Claude OPPENAU, Chargé de mission au Secrétariat Général du Haut Comité de l'Environnement.

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT

Sommaire

Pages

Préface de M. SAULGEOT, Président du groupe interministériel « Véhicules Electriques » 7

Introduction

L'automobile et l'environnement 11

Chapitre 1 - **Historique** 19

1.1. - Les premiers véhicules électriques 19
1.2. - La période 1900-1940 23
1.3. - La période 1939-1945 24
1.4. - Les années 1960-1970 27

Chapitre 2 - **Aspects techniques** 31

2.1. - Principe de la traction électrique 31
2.2. - Les sources d'énergie 32
2.3. - Les moteurs et les commandes 48
2.4. - La structure du véhicule 50
2.5. - Les véhicules hybrides 51

Chapitre 3 - **Le véhicule électrique dans le parc automobile** 55

3.1. - Avantages et inconvénients du véhicule électrique 55
3.2. - Domaines d'utilisation 58
3.3. - Les créneaux 60
3.4. - Stratégie d'introduction sur le marché 61
3.5. - Problèmes de circulation posés par le véhicule électrique 64

Chapitre 4 - **Quelques repères économiques** 65

4.1. - Coûts de construction 65
4.2. - Coûts d'exploitation 67
4.3. - Exemples de bilans globaux 67

Chapitre 5 - **Réalisations et perspectives de développement** 83

5.2. - En France 83
5.1. - Dans le monde 87

Annexes 95

I. Journées internationales de travail d'Arc et Senans en février 1973 97

II. Le groupe de travail interministériel « Véhicules Electriques » (FRANCE). Bilan des travaux 167

III. Compte rendu succinct du troisième symposium du véhicule électrique de Washington (U.S.A.) 179

IV. Bibliographie 185

V. Annexe photographique 187

Vers une deuxième génération de véhicules ?

Le grand public se fait du véhicule électrique une image assez complexe. Pour les plus âgés d'entre nous, pour certains tout au moins, qui l'ont vu paraître et disparaître à plusieurs reprises — temps de paix, temps de guerre — c'est un moyen de circonstance pour les temps difficiles. D'autres, plus ouverts à l'innovation lui prêtent certaines possibilités, mais pas pour maintenant : on en reparlera... dans vingt ans ! En fait, pour une grande majorité, il est difficile d'imaginer une automobile sans moteur à explosion.

Voici que, pourtant, comme dans cet ouvrage de la collection « Environnement » qui lui est consacré, le problème est posé en pleine actualité sous ses deux principaux aspects : celui des nuisances de la circulation automobile dans les villes et celui d'une plus grande indépendance énergétique.

Jusqu'à ces dernières années, l'attention des pouvoirs publics en matière de circulation s'était portée principalement sur les questions de sécurité et d'encombrement qui sont d'ailleurs encore, bien entendu, à l'ordre du jour. Mais, la référence à l'environnement donne, depuis peu, une nouvelle dimension aux problèmes de circulation. L'air des villes est fortement pollué par les véhicules et leur bruit nous assaille d'une façon parfois intolérable et le véhicule électrique est silencieux et non polluant ; son utilisation constituerait une amélioration considérable du point de vue de l'environnement.

La référence à l'énergie plus chère renouvelle depuis peu la question. Si, globalement les véhicules électriques ne procurent pas tellement d'économies de calories, la source primaire risque de changer, du pétrole vers le nucléaire avec ce que cela signifie au plan de l'économie et de la moindre dépendance vis-à-vis de l'extérieur.

Le moment est donc venu de s'interroger au sujet du véhicule électrique. Peut-on fonder un espoir raisonnable sur son développement ? Si oui, à quelles conditions ? Il ressort des indications contenues dans cet ouvrage que l'accumulateur au plomb est, pour plusieurs années encore, la seule source d'énergie utilisable. La faible énergie massique limite l'emploi du véhicule électrique à la ville ; assez vraisemblablement, sous la forme de flottes de véhicules utilitaires dont la recharge peut s'ef-

fectuer sans problème particulier dans les garages de l'exploitant. Depuis la voiturette de liaison jusqu'à l'autobus, en passant par la camionnette de livraison, il y a toute une gamme de véhicules électriques qui pourraient, dès à présent, voir le jour.

Quant à la voiture électrique particulière, tant que des sources d'énergie plus performantes n'auront pas fait leur apparition, elle sortira difficilement du stade de l'expérimentation. Elle ne débouchera sur la fabrication en série que s'il existe des espoirs raisonnables de disposer assez rapidement de nouveaux générateurs : accumulateurs, piles rechargeables ou piles à combustible. Or, ceux-ci existent et sont déjà sortis du stade du laboratoire. Il a été vérifié qu'ils étaient « faisables », comme on dit maintenant. Ils constituent, à n'en pas douter, la véritable chance à courir, non seulement de la voiture particulière, mais de l'ensemble des véhicules électriques.

Cette chance, il faut la saisir. Voici en effet que s'achève la réalisation du programme de développement approuvé il y a deux ans par le Comité Interministériel d'Action pour la Nature et l'Environnement et dont on trouvera le contenu au chapitre V de cette brochure. Il faut passer maintenant à une deuxième étape qui implique un effort financier important et donc la coordination de l'action des pouvoirs publics, afin que cet effort financier soit véritablement fécond.

Les progrès réalisés permettent d'aborder désormais une phase plus concrète et plus active du développement du véhicule électrique. Ne nous leurrons cependant pas. Cette nouvelle étape sera beaucoup plus difficile à mener à terme que la précédente, car des problèmes industriels, logistiques, réglementaires et fiscaux viennent maintenant s'ajouter aux problèmes purement techniques que nous avons tenté de résoudre jusqu'à présent. De plus, l'expérimentation et le passage à la phase industrielle des nouvelles techniques issues de la recherche vont imposer un effort financier très important, précisément au moment où les problèmes d'approvisionnement énergétiques sont plus aigus et conduisent à accélérer le rythme des recherches. Il ne peut plus être question, dès lors, de travaux conduits par des groupes isolés. Pour réussir, pour choisir les opérations dont l'impact sera le meilleur, pour éviter le gaspillage qui résulterait inéluctablement d'un saupoudrage des aides ou de la multiplication des initiatives, il faut que les efforts de tous se concentrent sur des orientations communes et qu'une volonté d'agir ensemble existe à tous les niveaux. C'est l'ensemble des pouvoirs publics qui doit participer à cette phase dans le cadre d'une coordination absolue ; ce sont les constructeurs d'automobiles, les fabricants de composants, les chercheurs, impliqués dans un objectif commun, qui doivent, dès à présent, travailler en étroite collaboration. L'attentisme n'est plus de mise. Ce que chacun perdra en liberté sera compensé par une efficacité accrue.

Le véhicule électrique n'est pas un rêve. Il peut apporter une solution à l'amélioration de l'environnement urbain et une contribution non négli-

geable à notre indépendance énergétique. Il a sans doute aussi d'autres qualités que nous découvrirons à l'usage. Je n'en veux pour preuve que le fait suivant sur lequel j'invite le lecteur à réfléchir.

A l'issue d'un voyage d'études aux Etats-Unis, en mars 1974, à l'occasion du 3e symposium international sur le véhicule électrique, nous avons visité un centre de tri postal où allait être mise en service, quelques jours plus tard, une flotte de trente camionnettes électriques et nous avons demandé au responsable ce qui l'avait incité à tenter cette expérience. Sa réponse a été nette. « J'estime, nous a-t-il dit, que ce sera plus économique ». Je ne suis pas loin de penser comme lui.

Vers une deuxième génération de véhicules ? oui, à condition d'y croire.

Louis SAULGEOT,
Président du groupe interministériel
« Véhicules Electriques »

Introduction

L'automobile et l'environnement

Tout à la fois les données énergétiques (la hausse du prix du pétrole est sans doute plus durable que ne le croient certains qui ont même parlé de « panne politique ») et les données, de plus en plus actuelles d'une politique de l'environnement, dans les villes en particulier, font rechercher des solutions techniques nouvelles pour les transports et étudier les conditions de leur mise en œuvre.

Les transports en commun en site propre renouvellent les solutions des transports de masse et peuvent être développés, en particulier dans les villes nouvelles. Mais, quelle que soit cette intention — que l'on n'aurait jamais dû perdre de vue — le transport individuel et familial autonome est aujourd'hui une donnée de fait qu'il faut prendre en compte. Et c'est là que l'on redécouvre aujourd'hui une technique qui a vu le jour dans les années 1880 et qui a été pratiquement abandonnée pendant près de 75 ans. Sans doute, le véhicule électrique n'est-il pas le seul à devoir être réexaminé ; la traction par l'hydrogène liquide ou la traction par le gaz liquéfié constituent autant de pistes qu'il faut soigneusement laisser ouvertes.

Pourtant, le véhicule électrique constitue bien — en particulier pour certaines utilisations urbaines — un atout qui risque fort d'être joué dans les toutes prochaines années. La relative discrétion des constructeurs ne masquera pas longtemps cette éventualité pour les véhicules urbains, cependant que l'électricité est déjà une réalité et n'a pas tout à fait cessé de l'être pour les transports en commun et les véhicules de services.

Le présent ouvrage s'efforce de faire le point sur ces véhicules électriques en se limitant aux véhicules à « source d'énergie autonome » (accumulateurs ou piles à combustible). Un examen rapide sera, en outre, fait des solutions « hybrides » qui consistent à associer, par exemple, accumulateurs et moteur thermique, bien qu'il s'agisse de solutions plus polluantes, plus bruyantes et plus chères que les précédentes.

Même si actuellement, en France, les effets de l'automobile sur l'environnement n'ont pas encore atteint un niveau aussi préoccupant que dans d'autres pays industrialisés, il n'en est pas moins important d'engager une action dès maintenant, car l'évolution à moyen terme risquerait de poser, ici et là, des problèmes évidents au regard de l'agrément de vie et même de la santé des citadins.

En plus des aspects qualitatifs, les chiffres sont là pour donner la dimension du problème :

a) Le parc automobile, en France, qui comprenait 14 400 000 véhicules fin 1970, est susceptible, d'après les prévisions, d'atteindre plus de 24 millions d'unités en 1985 (soit une augmentation de 66 %).

b) La circulation automobile dans les zones denses est susceptible d'augmenter au plan national d'environ 55 % de 1969 à 1985 selon les prévisions actuelles (pour Paris intra-muros, cette augmentation ne serait toutefois, sans doute, pas supérieure à 20 %).

c) Aux données propres à l'automobile, il convient d'ajouter celles de l'urbanisation croissante d'un pays qui, à la différence de certains voisins comme la Grande-Bretagne, a amorcé plus tardivement sa mutation urbaine ; la population urbaine (au sens des communes de plus de 2 000 habitants) était en 1970 de 70 % ; il est vraisemblable que la population urbaine (au sens, cette fois, de grandes aires métropolitaines et des zones de forte densité) atteindra sans doute un chiffre compris entre 65 et 80 % avant la fin du siècle, avec ce qu'il représente de changements profonds dans les modes et conditions de vie. Des grands ensembles, des villes nouvelles, sont en voie d'être réalisés qui devront mieux tenir compte qu'auparavant des rapports entre l'automobile et l'environnement. Pendant que des formules nouvelles sont envisagées pour les transports en commun, des séparations de circulation permettront une meilleure utilisation du véhicule individuel.

Outre l'aspect quantitatif de l'influence de l'automobile sur l'environnement qui se traduit par l'encombrement des cités, d'autres éléments de notre cadre de vie peuvent être perturbés par l'utilisation croissante des véhicules. L'automobile est, en effet, une source importante de pollution de l'air et de nuisance acoustique.

I - LA POLLUTION DE L'AIR

La pollution atmosphérique, en milieu urbain, est un phénomène particulièrement complexe :

— La pollution n'est jamais due à un seul polluant et, si le seuil de toxicité réelle est très rarement atteint pour chacun d'eux, tous les auteurs s'accordent à penser qu'il existe un effet de cumul intervenant pour rendre l'ensemble des polluants plus nuisibles que paraît nous le faire penser la somme de leurs doses respectives.

— La collectivité intéressée (en l'occurrence la ville), à l'inverse des collectivités d'usines et c'est là un fait capital, comprend des individus de tous âges, enfants et vieillards, dont les antécédents pathologiques peuvent être importants.

— Enfin, la pollution intervient non plus pendant une durée de travail normal de 8 heures, mais en permanence, vingt-quatre heures sur vingt-quatre, empêchant ainsi toute possibilité de récupération.

Le Ministère chargé de l'environnement a, d'ailleurs, lancé un important programme de recherches dans ce domaine articulé autour de trois axes :

- effets et conséquences de la pollution atmosphérique sur l'homme et le milieu ;
- formation, diffusion et évolution des polluants ;
- réduction de la pollution à la source, plus particulièrement en ce qui concerne le véhicule automobile.

Dans un pays comme la France, les véhicules automobiles sont responsables de la pollution de l'air dans des proportions qui diffèrent suivant les polluants :

— presque totalement pour l'oxyde de carbone et les hydrocarbures imbrûlés ;

— à égalité avec les autres sources de combustion pour les oxydes d'azote ;

— pour une part notable en ce qui concerne le plomb ;

— pour un tiers de la pollution totale due à la production d'énergie, en ce qui concerne les particules.

Les études se poursuivent pour mesurer les effets des pollutions et mettre en évidence d'autres produits susceptibles d'être considérés comme des polluants spécifiques des véhicules automobiles : certains hydrocarbures, les produits responsables des odeurs et irritations, les particules d'amiante ou de pneumatiques, etc.

Quant aux décisions des pouvoirs publics concernant la limitation des pollutions émises par les véhicules, celles-ci se renforcent, dans le cadre européen, maintenant.

Ainsi, le « Comité pour l'adaptation au progrès technique des directives visant l'élimination des entraves aux échanges dans le secteur des véhicules à moteur », de la commission des communautés européennes qui étudie les modifications des directives ou les directives nouvelles du conseil des communautés européennes relatives aux émissions de polluants par les véhicules à moteur, a retenu le principe d'un abaissement des émissions = il permettra de réduire les valeurs limites des émissions d'oxyde de carbone et d'hydrocarbures imbrûlés d'un véhicule à 59 % et 57 % des valeurs respectives correspondantes pour un véhicule de 1960 ; cette réduction semble devoir être applicable à partir de 1975.

D'ores et déjà, les constructeurs ont réalisé de gros progrès sur leurs véhicules. Ainsi, la réduction des émissions de polluants, entre 1960 et

1972, a été de 49 % pour les oxydes de carbone et les hydrocarbures imbrûlés.

D'autres instances européennes se préoccupent aussi de ce problème. Par exemple, l'O.C.D.E. a fondé un groupe spécialisé pour l'étude des polluants des véhicules à moteur.

En France, les pouvoirs publics ont déjà montré leur volonté de réduire la pollution due à la circulation automobile. En janvier 1972, le Premier Ministre rappelait que « grâce aux efforts déjà accomplis, un véhicule automobile émet, aujourd'hui, deux fois moins de polluants qu'il y a dix ans ». Puis il a souligné que les pouvoirs publics allaient s'efforcer « de réduire le niveau minimal actuel de pollution autorisée de 20 % d'ici à 1978 ».

En outre, des mesures pratiques de contrôle ont été prises. Ainsi, le ministère chargé de l'environnement a financé l'équipement de trente trois « brigades de contrôle technique des nuisances ». Ces brigades, mises en œuvre par le Ministère de l'Intérieur, sont chargées de contrôler les teneurs en oxyde de carbone des véhicules à essence et l'opacité des fumées émises par les diesels. (Ces brigades vont recevoir, en outre, des moyens propres à effectuer des contrôles de bruit).

En ce qui concerne les émissions de plomb, le Premier Ministre, en janvier 1972, avait indiqué que « la teneur en plomb des essences automobiles serait réduite de 30 % avant 1976 ». Aussi, lors du Comité Interministériel d'Action pour la Nature et l'Environnement du 20 juillet 1972, a-t-il été décidé d'abaisser, à partir du 1er janvier 1976, la teneur en plomb de 0,60 g/l à 0,45 g/l. Depuis, le conseil des communautés européennes étudie une directive tendant à ramener, dès 1976, pour l'ensemble des pays adhérents, la teneur en plomb à 0,40 g/l d'essence et en 1978, à 0,15 g/l pour l'essence ordinaire.

La voie européenne de réduction de la pollution automobile n'est pas la même que celle qui a été choisie par les Etats-Unis (1) d'Amérique.

---

(1) L'Agence pour la Protection de l'Environnement des Etats-Unis d'Amérique avait établi un plan de réduction des émissions d'oxyde de carbone, d'hydrocarbures imbrûlés et d'oxydes d'azote. La décroissance des valeurs maximales des émissions était très rapide puisqu'il était prévu d'atteindre, dès 1975, des réductions de 97 % et 96 % des émissions respectives d'oxydes de carbone et d'hydrocarbures imbrûlés par rapport aux valeurs correspondantes des modèles de 1960. Une réduction de 93 % pour les oxydes d'azote devait être atteinte en 1976.

Depuis, il a été décidé de différer les normes prévues pour 1975, d'un an et de créer des normes intermédiaires qui seraient d'ailleurs plus sévères pour la Californie. Dans le cas de cet état, seules les automobiles équipées d'un moteur à charge stratifiée ou d'un moteur type WANKEL avec réacteur thermique, ou d'un moteur conventionnel muni d'un réacteur catalytique, semblent correspondre aux normes.

La diminution des valeurs limites réglementaires des émissions de polluants est effectuée pas à pas, dès lors que sont connus tous les éléments techniques et économiques permettant d'envisager le franchissement d'une nouvelle étape.

II - LE BRUIT

Le bruit engendré par la circulation automobile est certainement la source prédominante des nuisances acoustiques en milieu urbain et, si aucune mesure n'était prise, la gêne qu'il engendre ne pourrait que croître, compte tenu de l'augmentation du parc et du taux de croissance de l'urbanisation.

Bien que les connaissances physiologiques et psycho-physiologiques en cette matière demandent à être approfondies, on connaît les effets de la perturbation du sommeil et on sait qu'il ne suffit pas de réduire le « fond sonore ». Il convient de réduire aussi, ou d'éliminer, les bruits isolés, ou « crêtes », qui sont provoqués par certains motocycles, certaines voitures de sport, les claquements de portières, etc., et qui perturbent la vie des citadins, de jour et surtout de nuit. Une diminution du fond sonore sera d'autant plus bénéfique qu'elle s'accompagnera d'une réduction au moins équivalente du niveau et du nombre de « crêtes ».

L'application, depuis une quinzaine d'années, d'une réglementation de plus en plus contraignante, les progrès déjà réalisés dans la construction des véhicules et un premier examen des possibilités techniques à attendre dans ce domaine conduisent à penser que le problème ne saurait être résolu au seul niveau de la construction automobile, mais qu'il appelle une politique d'ensemble touchant la production des véhicules, leur état et leur conduite d'une part, la circulation et le revêtement de la chaussée, l'urbanisme et l'habitat, d'autre part. Autrement dit, il importe à la fois de réduire le bruit à la source et d'améliorer la protection à son encontre.

Cette politique, qui elle aussi se poursuit dans un cadre qui est maintenant européen, ne peut être traitée isolément et le programme d'action doit être établi en concordance avec celui qui concerne la pollution et la sécurité.

Le gouvernement français, sur le plan de son action sur les nuisances créées par l'automobile et notamment sur le bruit, est attentif aux mesures qui sont — ou vont être prises — dans d'autres pays, particulièrement dans le cadre de la communauté européenne.

Plusieurs organisations internationales assurent une concertation entre les différents pays européens :

a) La communauté économique européenne a pour objectif de supprimer les entraves techniques aux échanges qui résultent de divergences entre les réglementations nationales. Sa directive du 6 février 1970 a fixé dans de nombreux cas des normes plus sévères que les normes nationales. Introduite dans la réglementation française par l'arrêté du 13 avril 1972, elle s'est traduite par une diminution de 1 dB de la valeur réglementaire du niveau de bruit pour les voitures particulières et les poids lourds ne dépassant pas 200 CV. (Cet arrêté a, par ailleurs, réduit de 3 dB pour les cyclomoteurs et de 2 dB pour les motocyclettes les niveaux de bruit précédemment admis). Une discussion est en cours au niveau européen, afin d'imposer une réduction supplémentaire du niveau de bruit des véhicules, et proposant une réduction de l'ordre de 5 dB, mesurée avec la nouvelle méthode et échelonnée sur cinq ans.

b) A l'O.C.D.E., le jour même de la création du comité de l'environnement, la France a demandé l'inscription, en priorité, de l'examen des problèmes de réduction de la pollution automobile. Des études économiques sont en cours.

c) La commission économique de l'O.N.U. pour l'Europe, à Genève, étudie activement ces problèmes. Les représentants français ont apporté une contribution très importante à l'élaboration du « règlement n° 9 » sur le bruit.

d) D'autres institutions, telles que le Conseil de l'Europe, s'intéressent également à ces problèmes.

Sur le plan pratique, de gros efforts d'étude sont consentis par certains constructeurs de poids lourds. C'est ainsi que des autobus ayant des niveaux de bruit inférieurs d'au moins 8 dB à la valeur réglementaire vont être mis prochainement en circulation.

***

Les progrès en matière de pollution et de bruit, bien qu'étant indiscutables depuis quelques années, ne sont pas encore suffisants pour garantir au public un cadre de vie plus agréable. Chaque nouveau gain en décibel ou en teneur en polluant ne peut être obtenu sur les véhicules « traditionnels » qu'à la suite de recherches technologiques qui seront de plus en plus importantes et par conséquent, lourdes d'un point de vue financier pour la collectivité.

Pour obtenir une amélioration de l'environnement dans les villes, il peut donc être intéressant de concentrer les études sur des véhicules plus spécifiquement urbains qui seraient conçus avec des performances sans doute limitées, mais dont les caractéristiques principales seraient d'être peu polluants et peu bruyants. Dans l'état actuel de la technique, le véhicule électrique semble pouvoir répondre à ces exigences. C'est ce qui

explique les efforts qui se développent, depuis quelques années, dans la plupart des pays industrialisés pour le développement de ce type de véhicule.

Le renchérissement récent des ressources énergétiques et le souci accru d'acquérir pour la France une certaine indépendance vis-à-vis des pays producteurs de pétrole confirment les pouvoirs publics dans leur intention de favoriser les recherches et les expérimentations dans le domaine du véhicule électrique.

Chapitre I

HISTORIQUE

Avant d'aborder les problèmes spécifiques des véhicules électriques, il est bon de rappeler que ces problèmes, bien qu'ils aient évolué, ne datent pas d'aujourd'hui.

1.1. - LES PREMIERS VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Les débuts de l'automobile sont caractérisés par l'apparition de trois types de traction utilisant des énergies bien distinctes, la vapeur, l'électricité et l'essence. La concurrence entre ces trois techniques fut sévère pendant plusieurs années. Les qualités et les défauts de chacune d'entre elles se compensant, il n'était pas possible de deviner la part prépondérante que prendrait le moteur à essence durant le vingtième siècle. C'est ce qui explique l'enthousiasme de certains auteurs de l'époque pour la traction électrique qui, vers la fin du XIXe siècle, semble disposer d'atouts déterminants. Ainsi, d'un ouvrage publié en 1896, nous extrayons les passages suivants :

« La naissance des voitures électro-automobiles date de 1881 (*). A « cette époque, Trouvé fit fonctionner, rue de Valois, au grand ébahisse- « ment des passants, un tricycle actionné par un moteur électrique et

(*) N.D.L.R. — En fait, il semble que la première voiture électrique vit le jour à Edimbourg en 1842. Il s'agissait d'un véhicule de 6 tonnes, de 4,90 m de longueur et 2 m de largeur, propulsé par un système de huit puissants électro-aimants alimentés par des piles et attirant successivement trois barres de fer entourant chaque essieu.

« quelques accumulateurs Planté : c'est donc aux vélocipèdes que l'on a « d'abord tenté d'appliquer l'énergie électrique (**). Il est vrai de dire « que le succès a d'abord peu répondu aux tentatives, même perfection- « nées, qui ont eu lieu dans cet ordre d'idées : cependant, bien que le « tricycle et la bicyclette électriques, comme d'ailleurs le tricycle à pétrole, « commencent à entrer dans une pratique accentuée, nous ne pouvons « pas croire que le plaisir de « manger » du kilomètre sans fatigue puisse « jamais satisfaire complètement les recordmen : ils préféreront toujours « pédaler sur leurs légères machines plutôt que d'adopter un instrument « qui transformerait leur sport tant aimé en une promenade d'invalide.

« Tout autre est la voiture automobile, confortable, offrant de nom- « breuses places et un abri en cas de mauvais temps, présentant une ré- « sistance plus considérable, plus réelle, à la fatigue inséparable des longs « trajets sur route ; aussi l'électricité avait-elle l'espérance de mieux réussir « dans cette application et la suite l'a bien prouvé. Mais, il faut cependant « faire remarquer, avant d'en énumérer les qualités nombreuses, le défaut « de la voiture électrique qui, libre de toute entrave, circule ici et là au « gré de son conducteur, est forcément alimentée par des batteries d'ac- « cumulateurs dont la courte vie a besoin d'être fréquemment entretenue « par des visites répétées à des stations bienfaisantes qui lui rendront force « et santé. Aussi, jusqu'à l'époque où les usines électriques seront assez « nombreuses pour jalonner les routes parcourues par les automobiles « électriques, celles-ci doivent-elles se contenter de fréquenter les grandes « villes ou de faire de courtes apparitions dans la banlieue ; le vol à grande « distance leur est encore interdit.

« Ceci dit, quelle supériorité sur toutes les autres voitures à vapeur « ou à pétrole ! Propreté, facilité de démarrage et de manœuvre, douceur « de roulement, souplesse des conducteurs, et ce dernier avantage permet « d'actionner les roues d'avant de la voiture, tout en conservant la source « d'énergie à l'arrière ou au centre : l'automobile est donc ainsi tirée « normalement, au lieu d'être poussée comme le sont la plupart des voi- « tures à pétrole ou à vapeur ; il n'y a donc plus à craindre des voites « brusques ou des déviations dangereuses provoquées par la présence « d'un léger obstacle qui fait tourner l'avant-train.

« Après plusieurs timides essais, pour la plupart infructueux, à cause « de l'imprévoyance des électriciens qui voulaient entrer en lutte avec les « automobiles à pétrole sur de très longs parcours, la voiture électrique « est rentrée en ville, où elle a vite conquis son droit de cité. Paris, comme « toujours, est arrivé bon dernier : cette brave capitale a voulu, dans sa « prudence, n'adopter les nouveautés qu'après de multiples exemples don-

(**) Les tricycles électriques des Français, Trouvé et Jules Raffard avaient une vitesse de 12 km/h. En 1881, Raffard réalise également un omnibus de 9 tonnes (dont 3 d'accumulation) qui sera utilisé pendant quelques temps sur la ligne Place de la Nation - Versailles, provoquant une très vive réaction de la part des tenants de la traction animale.

« nés par l'étranger. L'Amérique ne compte déjà plus le nombre de ses « fiacres électriques ; il y a maintenant, à New York, une compagnie de « cables électriques qui, paraît-il, accomplit des merveilles ; enfin, en Angle- « terre, les voitures électriques commencent à circuler dans la plupart des « grandes villes, et les constructeurs électriciens fabriquent des types « variés de cabs, de phaétons, de breaks, etc.

« Les constructeurs français sont loin d'être au-dessous de leurs « rivaux anglais et les automobiles électriques Panhard, Krieger, Mildé, « etc., peuvent être considérées comme des modèles bons à imiter. C'est « ainsi que M. M. Mildé et Cie, à Paris, ont construit deux automobiles élec- « triques, l'une, un cab français est caractérisé par l'emploi de l'avant-train « moteur-directeur ; le siège du conducteur est fixé sur l'avant-train et « tourne avec lui. Cette voiture relativement légère, du poids de 950 à « 980 kg à vide, peut fournir un parcours journalier de 70 à 75 km ; l'autre « est un omnibus de huit à dix places dont la batterie d'accumulateurs « peut fournir un parcours journalier de 60 km avec une charge de 800 à « 900 kg, qui peut être sensiblement augmentée au détriment de la vitesse « et de la distance à parcourir. Enfin, le coupé électrique est le suprême « chic et tel prince de la mode qui, en 1830, se contentait d'un tilbury et « d'un groom veut, en 1906, posséder son wattman et son « électrique ». « Certains constructeurs ne reculent même pas devant l'originalité : M. Je- « natzy, par exemple, a voulu dépasser tous ses devanciers et, pour montrer « qu'il était dans le mouvement, il a réalisé un tour de force et construit « une curieuse automobile électrique en forme de torpille qui abat ses « 106 km à l'heure !!! Nous avouons, en toute humilité, que nous préférons « aller plus lentement et que nous sommes loin d'envier le sort du malheu- « reux mécanicien qui se sent emporté par sa « Jamais Contente » à une « vitesse aussi folle ! Cette devise audacieuse est bien française, mais peu « rassurante !! Laissons donc la « Jamais Contente » à son propriétaire en « lui recommandant la prudence et contentons-nous, pour l'instant, de « passer en revue les honnêtes fiacres électriques qui fonctionnent à Lon- « dres et à New York (*).

« Par ces détails, on voit que la station de cabs électriques de New « York présente d'heureux dispositifs, d'ingénieuses combinaisons et se « montre digne de la grande cité américaine. Le succès a d'ailleurs répondu « à l'attente, et depuis les débuts de cette installation, jamais les cabs « n'ont chômé : au contraire, de leurs congénères londoniens, ils font « des affaires d'or et se comportent merveilleusement par tous les temps.

(*) N.D.L.R. — Le 18 décembre 1898, une voiture électrique pilotée par le Comte de Chasseloup Lambat dépasse pour la première fois le 60 km/h devant ses concurrents « à pétrole ». Puis, le belge Jenatzy fait construire chez Rotschild, un bolide d'une tonne en forme de torpille et baptisé « La Jamais Contente » avec lequel il bat, le 1er mai 1898, sur le circuit d'Achères :

— le record du kilomètre lancé : 34 secondes ;

— le record de vitesse : 105,85 km/h.

« Pendant les tourmentes de neige qui ont été si violentes à la fin de « l'année 1898, les cabs, grâce à leur large bandage pneumatique et à « l'énergie développée par leurs chevaux électriques, ont vaincu toute « résistance et ont parcouru la ville, seuls maîtres des communications : « les compagnies des voitures ordinaires, ne pouvant satisfaire aux deman- « des, renvoyaient leurs clients à la station de Manhattan qui, en pleine « activité, ne cessait de remplacer les caisses d'accumulateurs de nom- « breux cabs qui repartaient aussitôt.

« Notre capitale a voulu s'inspirer de ces deux exemples et, en dépit « d'un essai infructueux tenté en 1902, elle est revenue, dès 1905, aux « fiacres électriques munis du fameux taximètre.

« Des coupés confortables, semblables à ceux de Londres, stationnent « maintenant sur les boulevards et permettent au « vulgum pecus » de « s'offrir, pour une modique somme, une promenade en « électrique ». Le « succès semble vouloir enfin récompenser cette persévérance intelli- « gente. **Automobile postale** - Si la question des fiacres reste toujours et « malgré tout en suspens, à cause des résultats financiers, il en est une « qui paraît résolue en faveur de l'électricité, c'est celle des automobiles « électriques publiques ; mais elles sont seulement utilisées pour les ser- « vices intermittents ou dépendant d'administrations importantes et riches ; « telles sont, par exemple, les voitures électriques des postes, des sapeurs- « pompiers, les camions de livraison, les voitures d'ambulance, etc. Les « premières ont été adoptées, en France en 1904, à Milan vers la même « époque ; les secondes à Vienne (Autriche) et à Hanovre en 1905 ; les « dernières en Amérique, à Cleveland.

« Si nous examinons l'aspect du fourgon électrique qui fait, depuis « 1904, le service postal à Paris, nous voyons qu'il rappelle celui des an- « ciennes voitures à chevaux. Le conducteur et le convoyeur de l'admi- « nistration sont assis sur un siège élevé pour bien voir la route et surveiller « en même temps leur chargement. D'ailleurs, la caisse ne peut s'ouvrir « pour le déchargement que par une porte arrière qui est reliée par « encliquetage au siège de l'employé ; ce dernier ne peut s'asseoir que « si la porte est fermée. Cette caisse a une capacité de 1,5 m^3, soit une « charge d'environ 600 kg.

« Quinze voitures électriques sont en service, mais trois servent de « relais. Dès cinq heures du matin, elles prennent leurs batteries chargées « et partent les unes après les autres. Entre douze heures et seize heures, « elles ont cinq minutes pour changer leurs batteries épuisées et continuent « leur service jusqu'à vingt-deux heures. Le parcours moyen de chacune « de ces voitures est de 35 km.

« Quant à l'automobile à pétrole, elle reste, sans contredit, la reine « du boulevard et de la route. Mais ici, une question est encore pendante, « nous voulons parler de l'inflammation du gaz.

« Pourquoi même ne pas faire revivre, modernisée par exemple, cette bonne diligence d'antan ?

« Pourquoi ne pas créer des lignes de diligences électriques ? Elles « porteraient uniquement leur moteur et emprunteraient leur énergie à « des lignes aériennes alimentées par des stations génératrices. Dix, vingt « diligences pourraient, ainsi, se succéder à grande vitesse à la « queue « leu leu » dans une journée, avec un éclairage et un chauffage élec- « trique ! Voilà le progrès. Déjà, en Italie, en Allemagne, en Angleterre et « en Amérique, quelques omnibus électriques font des trajets assez longs « aux environs des grandes villes.

« Aussi, c'est avec confiance que nous présentons aujourd'hui cette « demande : « A quand les diligences électriques ? ». »

1.2. - LA PÉRIODE 1900-1940

L'extrait de l'ouvrage, datant de 1896, qui vient d'être rappelé, montrait que les véhicules à moteur classique étaient comparables, du point de vue performance et service, aux véhicules disposant d'autres types de traction et notamment aux véhicules équipés de moteurs thermiques.

Mais, au début du XXe siècle, ce dernier a pris un avantage décisif sur ses « concurrents », à tel point qu'il a très rapidement acquis un quasi monopole du marché. Les qualités énergétiques des hydrocarbures furent déterminantes dans cette orientation. Par contre, la traction électrique se heurtait aux problèmes de la faible énergie massique des accumulateurs et les recherches, qui auraient pu conduire à des progrès dans ce domaine, ont été très vite découragées par la progression foudroyante du moteur thermique.

La technique de la traction électrique n'a pas été pour autant totalement oubliée, mais elle s'est cantonnée dans des « créneaux » limités :

— les systèmes à captation de courant : la captation de l'énergie, pendant la marche du véhicule, permettait de résoudre le problème de l'autonomie, mais imposait aux véhicules de suivre un trajet déterminé. C'est pourquoi, seuls les tramways, puis les trolleybus, pouvaient utiliser cette technique. Les avantages de ces véhicules étaient dus au mode de traction choisi : le silence d'une part, l'absence de pollution d'autre part. C'est pour ces raisons, que des pays comme l'Allemagne, la Hollande, la Belgique... et certaines villes françaises ont encore conservé, de nos jours, ce moyen de transport. Par contre, la captation du courant présente des inconvénients suffisamment importants pour que cette technique soit en régression. Ce sont d'une part, l'impossibilité pour le véhicule de s'écarter de la voie équipée, d'autre part, une atteinte à l'esthétique des rues des villes, enfin, un coût d'investissement élevé.

— Les véhicules utilitaires urbains qui parcourent une faible distance journalière en ville, à vitesse réduite, et qui doivent fréquemment s'arrêter : c'est le cas des petits véhicules de livraison, tels que ceux qui équipent en grand nombre la Grande-Bretagne, par exemple.

C'est, en France, le cas des bennes à ordures électriques de type SOVEL que le pays possédait déjà en 1940 en grand nombre d'exemplaires et que les Parisiens, en particulier, connaissent bien.

C'est enfin le cas de curieux véhicules de transport en commun, dénommés « Accubus », qui apparurent dans les années 1920 à Lyon. Ils étaient électriques et tiraient leur énergie de grosses batteries disposées sous le châssis.

Ils avaient plus l'aspect de tramways sur pneus que d'autobus urbains, tels qu'on les concevait à l'époque. Ils fonctionnèrent, semble-t-il, à la satisfaction de leurs exploitants et de leurs usagers, jusque vers le milieu des années trente, époque où ils furent retirés de la circulation à cause de leur faible vitesse maximum de translation (environ 30 km/h), qui ralentissait sérieusement le trafic qui avait tendance à accélérer à cette époque, grâce aux progrès continus du moteur thermique.

— Les chariots de manutention : il s'agit-là, d'un aspect peu spectaculaire du véhicule électrique. Cependant, ce marché s'est développé très rapidement et tout le monde a pu remarquer dans les usines ou dans les gares ces engins silencieux. Certains d'entre eux appartenant à des municipalités étaient d'ailleurs utilisés en milieu urbain.

Il est vrai que les performances de ces véhicules ne pouvaient pas, à la veille de la 2e guerre mondiale, être comparées à celles des véhicules à essence qui avaient conquis la totalité du marché des véhicules particuliers.

1.3. - LA PÉRIODE 1939-1945 L'ÉLECTRICITÉ SUBSTITUT DE L'ESSENCE (2) (*)

1939, la guerre... 1940, l'armistice. Bientôt, en France, l'essence manque et doit être sévèrement rationnée. L'électricité, en revanche, ne l'est pas, tout au moins au début. C'est la renaissance momentanée de petits véhi-

(*) Voir bibliographie.

cules électriques pour la construction desquels, on s'efforce d'employer des matériaux échappant au rationnement : le bois, le contre-plaqué, l'aluminium. Malheureusement, les autorités d'occupation limiteront le poids de tels véhicules à 350 kg, avant d'en interdire définitivement la fabrication, le 21 juillet 1942.

De cette période, on se rappelle des Simca 5, des Citroën, des Rosengart, des Licornes, transformées en voitures électriques. Peugeot proposa un minuscule cabriolet, le VLV ; Georges Irat, une petite torpédo ; Paul Arzens, un œuf électrique en forme de bulle dont le dernier exemplaire roulait encore en 1958 ; Amilcar, un coach roulant à 50 km/h avec une autonomie de 70 km. Il était si bien conçu que quelques exemplaires circulent encore aujourd'hui dans Paris après avoir parcouru près de 300 000 kilomètres en 30 ans. Malgré la construction limitée par les règlements draconiens de l'occupant, une conclusion s'impose : il n'est plus nécessaire de posséder des accus pesant plusieurs centaines de kilos comme au début du siècle. Cent soixante kilos suffisent. Les progrès effectués dans l'élaboration et la technologie de montage ont conduit à une progression spectaculaire de la puissance massique des batteries. Mais ces voitures ne survivront pas longtemps au retour à des conditions normales de distribution de carburants.

L'histoire d'un record (3) (*)

Au cours de l'été 1941, une Satam électrique avait couvert 120 km autour de l'hippodrome de Longchamp à la moyenne de 35 km/h. L'ingénieur Grégoire relève le défi le 15 septembre de la même année. Avec une C.G.E. Tudor sans carrosserie, il établit un record absolu : 163 kilomètres autour de Longchamp à 41,130 km/h.

M. Delpeyroux, directeur du Laboratoire de l'Automobile Club de France, contrôle la performance. Le record ne peut toutefois être homologué ; pour gagner du poids, la voiture était dépourvue de carrosserie et le contrôleur n'était pas monté à bord.

Cette performance a réveillé le démon du sport chez Grégoire qui avait beaucoup couru dix ans plus tôt sur ses voitures Tracta.

Tudor peut donner à Grégoire une batterie de 280 ampères-heures que celui-ci logera sur la voiture. On peut soit couvrir 500 km à 30 de moyenne, soit 250 kilomètres à 40 de moyenne.

La seconde solution est choisie. La lutte contre le poids est menée avec le maximum d'efficacité. La voiture complète sans batteries

(*) Voir bibliographie.

ne pèse plus que 457 kg. Malgré ce record de légèreté, la voiture porte le poids énorme de 720 kg d'accumulateurs : 48 éléments fournissant 280 ampères-heures et il reste encore une place suffisante pour deux personnes.

La tentative a lieu les 11 et 12 septembre 1942, sur le parcours Paris-Tours et Tours-Paris. C'est une entière réussite dûment consignée par le procès-verbal de l'Automobile Club de France (voir ci-dessous). Plus de 500 kilomètres sont parcourus avec une seule recharge à Tours. La moyenne s'établit à 42,32 km/h pour l'aller et 42,88 km/h pour le retour avec des vitesses de pointe de 60 km/h.

Il est à noter que l'essai aller qui constituait le record proprement dit aurait pu être poussé plus loin. En effet, le procès-verbal officiel indique que 231 ampères-heures, seulement, avaient été consommées. Il restait donc environ 50 ampères-heures disponibles. Très probablement, s'il avait été possible de vider complètement la batterie, le véhicule aurait atteint 300 à 310 kilomètres.

Mais, il faut se souvenir que cette performance était effectuée aussi clandestinement que possible. Une voiture remorquée risquait d'attirer l'attention des Allemands qui pouvaient saisir la voiture et inquiéter les passagers. Les dangers de l'expédition étaient déjà suffisants !...

Copie du procès-verbal d'essai de l'Automobile Club de France

Paris-Tours

Essai de : voiture électrique.

Demandé par : la Compagnie Générale d'Electricité.

Exécuté les 11 et 12 septembre 1942.

Mache continue sans recharge de Paris à Tours.

Recharge à Tours.

Marche continue sans recharge de Tours à Paris.

Aller

Kilométrage total parcouru	253,0 km
Kilométrage chronométré .	250,4 km
Temps de marche	5 h 55 mm
Vitesse moyenne	42,32 km/h
Consommation totale	231 Ah

Retour

Kilométrage total parcouru	246,4 km
Kilométrage chronométré .	228 km
Temps de marche	5 h 19 mn
Vitesse moyenne	42,88 km/h
Consommation totale	223 Ah

Observations

Incidents mécaniques : néant.

Incidents électriques : néant.

1.4. - LES ANNÉES 1960-1970 (2) (*)

1950, Mossadegh, premier ministre d'Iran, nationalise les pétroles et menace le monde de « fermer le robinet de l'énergie ». 1956 : guerre des Six-Jours, fermeture du canal de Suez et nouvelle menace sur le pétrole (en France, l'essence est rationnée). 1961 : en avril, le major Gagarine effectue sur Vostok le premier vol dans l'espace, suivi quelques semaines plus tard, de l'envoi d'un « Mercury » américain. Ces trois événements vont rendre toute son actualité à la voiture électrique. Les deux premiers ont fait prendre conscience qu'un jour, le carburant nécessaire à nos véhicules pouvait cesser de couler. Le troisième met en lumière les recherches sur les piles des vaisseaux spatiaux. La conjoncture semble favorable pour l'électricité et les constructeurs se mettent au travail.

La société Chrysler donne alors le coup d'envoi. Au salon de Chicago, en 1959, elle présente une De Soto de 5,50 m et de 165 CV (!). Dans le coffre à bagages, la maquette d'une pile imaginée par Yardney Electric pour le projet spatial « Mercury ». Simple maquette. Rien de technique ; c'est un coup certain de publicité. Mais le problème est mal posé. Pendant des années, les constructeurs d'Outre-Atlantique vont s'efforcer de trouver une source d'énergie pour alimenter les moteurs électriques de leurs confortables « grosses » américaines. Certaines, comme les Cadillac, développent 380 CV. Rien pour les mini-voitures dont on n'a jamais voulu entendre parler aux Etats-Unis. On y a même défini ce que devrait être la voiture électrique américaine : 350 km d'autonomie, vitesse moyenne 110 km/h ; recharge effectuée en deux heures ; prix de revient au kilomètre comparable à celui de l'essence. Dans l'état actuel de nos connaissances, autant vouloir résoudre la quadrature du cercle.

L'habitude voulant qu'une auto soit un engin avec un moteur d'un côté, une transmission de l'autre, des freins, un volant, des pédales, un réservoir, on a uniquement songé à remplacer le moteur à essence sous le capot par un moteur électrique, et le réservoir par des batteries ou des piles. L'ensemble ainsi réalisé sur des dizaines de prototypes est donc quelque peu batard et n'apporte, par rapport à une voiture classique, aucun élément susceptible d'enthousiasmer les usagers.

C'est peut-être la chance de l'Europe (et du Japon) de ne pas concevoir la voiture électrique comme on la conçoit Outre-Atlantique. Parmi les raisons qui militent en faveur de la solution européenne, figure le goût de la mini-voiture (7 millions de mini-voitures construites en Europe depuis 10 ans, 5 millions au Japon), tandis que les Etats-Unis se refusent encore à ce genre de véhicules. Ensuite, des problèmes de circulation et des problèmes de parking dans les villes européennes où les grosses voitures

(*) Voir bibliographie.

ont de plus en plus de mal à se garer. Mais, surtout, le fait que les voitures électriques existent déjà et résolvent les problèmes de silence et de propreté. En Grande-Bretagne, cent-vingt-mille véhicules sont mus par l'électricité, dont soixante-quinze mille véhicules industriels pour la manutention de marchandises, et quarante-cinq mille véhicules commerciaux, principalement des camionnettes. En France, on compte quatre-vingt mille véhicules industriels et commerciaux électriques, d'une longévité presque illimitée.

Au Japon, lors de l'Expo 70, dont le thème était « Progrès et Harmonie pour l'Humanité », les trois cent dix véhicules assurant le transport étaient des voitures électriques munies de classiques accumulateurs au plomb. Moyenne de parcours journalier : 128 km. Vitesse de trafic : 5 à 45 km/h. Recharges effectuées la nuit en six heures. Durant les six mois d'exploitation, aucune batterie, aucun moteur, aucune commande électronique, n'ont été changés et le prix de revient du km parcouru s'est élevé à environ 25 % de celui des véhicules à essence équivalents. Résultats partiels très encourageants. C'est pour rompre avec la routine et l'usage, dans le cadre de la lutte anti-pollution, et sans vouloir attendre comme le font les Américains la source d'énergie idéale, que trois pays se sont lancés dans la construction d'une mini-voiture électrique urbaine :

— En Allemagne, quatre importantes sociétés (Messerschmidt pour la carcasse, Bosch pour le moteur, Varta pour les accumulateurs, Rheinisch Westfaliches Elektrizitätswerk pour financer un réseau de stations-service où les accumulateurs épuisés seront repris pour recharge en échange d'accumulateurs chargés), travaillent ensemble sur ce problème.

— Au Japon, c'est le début de l'offensive avec deux industries sur la ligne de départ : Deitbatsu-Kogyo, la firme de voiturettes de l'Exposition d'Osaka et, Nissam-Datsun, le second au Japon, qui utilisent pour commencer, les classiques accus au plomb et envisagent pour l'avenir la pile révolutionnaire, à base de poudre de zinc, mise au point par la célèbre firme Sony et développant 27 CV pour un encombrement d'un demi-mètre cube. Le roi mondial du transistor la prépare non seulement pour la voiture électrique, mais également pour les canots à moteur, les sous-marins de poche, les balises radio-automatiques et les gros engins de travaux publics.

— En France, Jarret, créateur de la première voiture électronique, présente, en 1968 au Salon de l'automobile de Paris, un prototype.

Depuis 1970, d'autres réalisations ont vu le jour, mais cela n'est plus de l'histoire et nous y reviendrons au chapitre 5. On peut dire cependant que si dans plusieurs pays du monde, le développement du véhicule électrique est plus que jamais sérieusement envisagé, ce n'est pas pour ses performances actuelles, qui ne sont pas tellement meilleures que celles de ses ancêtres, mais parce que c'est le moyen, peut-être de portée limitée, d'une incitation certaine pour améliorer la qualité de l'air des villes pollué

par les véhicules à moteur à combustion et pour réduire le niveau de bruit de la circulation automobile de plus en plus insupportable. C'est aussi parce que les progrès techniques déjà réalisés ou très probables à court ou moyen terme sur l'allègement des moteurs, l'accroissement de fiabilité des commandes électroniques, ainsi que l'amélioration des performances des sources d'énergie, rendent ce développement plus crédible. C'est enfin pour apporter une réponse, même partielle, aux problèmes de l'heure en matière d'indépendance énergétique.

En effet, si l'électricité est produite actuellement par E.D.F. pour une très grande part, à partir du pétrole, les nouveaux choix qui ont été faits conduiront à disposer, d'ici quelques dizaines d'années, d'électricité d'origine exclusivement nucléaire.

La route pour déboucher sur un véhicule électrique « à tout faire » tel que le désire le public sera longue. C'est pourquoi, beaucoup d'efforts sont consentis dès à présent, pour que dans une ou deux décennies, la technique soit prête. De nombreuses études et expérimentations sont actuellement menées. Les pouvoirs publics de tous les pays interviennent plus ou moins directement pour assurer une certaine coordination. En France, un comité interministériel « Véhicules Electriques » a été créé, dont la présidence est assurée par M. Saulgeot, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées.

Chapitre II

ASPECTS TECHNIQUES

2.1. - PRINCIPE DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE

Il a été précisé dans l'introduction que le présent ouvrage ne concernait que les véhicules électriques à source d'énergie autonome.

Dans cette catégorie, on peut distinguer :

Le véhicule à traction électrique dans lequel l'énergie fournie par le générateur **(accumulateurs ou pile à combustible)** est transmise directement aux moteurs actionnant les roues (par l'intermédiaire toutefois de l'appareillage électrique nécessaire). Des hybridations d'accumulateurs ou d'accumulateurs et pile à combustible sont possibles.

Le véhicule à traction électrique renforcé par un groupe électrogène de secours, ce groupe n'intervenant que si la batterie d'accumulateurs est insuffisamment chargée.

Le véhicule à transmission électrique - le moteur est thermique et entraîne une génératrice à courant continu ou courant alternatif qui alimente les moteurs de traction.

Le véhicule hybride comportant un moteur thermique entraînant une génératrice à courant continu qui charge les batteries d'accumulateurs. Ces batteries alimentent le ou les moteurs qui propulsent le véhicule.

Le véhicule à volant d'inertie : le volant d'inertie est un volant tournant à grande vitesse dans une enceinte sous vide ou sous atmosphère d'hydrogène et dans lequel est emmagasinée une grande énergie cinétique. Ce volant est lancé par un moteur (électrique ou thermique). L'énergie cinétique initiale est restituée pour faire rouler le véhicule. Ce système permet, en outre, la récupération de l'énergie au freinage.

⁂

Seuls les véhicules à traction électrique et hybrides seront étudiés dans ce chapitre. Les problèmes suivants seront abordés :

— les sources d'énergie,
— les moteurs et les commandes,
— la structure du véhicule,
— les véhicules hybrides.

2.2. - LES SOURCES D'ÉNERGIE

La lecture du présent chapitre nécessite quelques définitions préalables, tout d'abord en ce qui concerne les types de sources d'énergie, ensuite en ce qui concerne les paramètres qui permettront d'établir des bilans comparatifs.

On distingue deux grands types de sources d'énergie électrochimiques :

— les accumulateurs, qui sont des réservoirs d'énergie, reçoivent de l'énergie électrique, la stockent sous forme d'énergie chimique et la restituent sous forme d'énergie électrique ;
— les piles à combustible, qui sont des générateurs électrochimiques, transforment directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique.

La source d'énergie autonome d'un véhicule peut être caractérisée par différents paramètres tels que :

— sa durée de vie (nombre possible de cycles de charge-décharge pour les accumulateurs) ;
— les conditions de sécurité d'utilisation ;
— ses possibilités de surcharge ;
— son prix de revient ;
— etc.

Mais, pour les accumulateurs notamment, les caractéristiques les plus représentatives, parce que les plus contraignantes, sont celles qui concernent la « densité » de puissance et l'énergie rapportée au poids de la source embarquée.

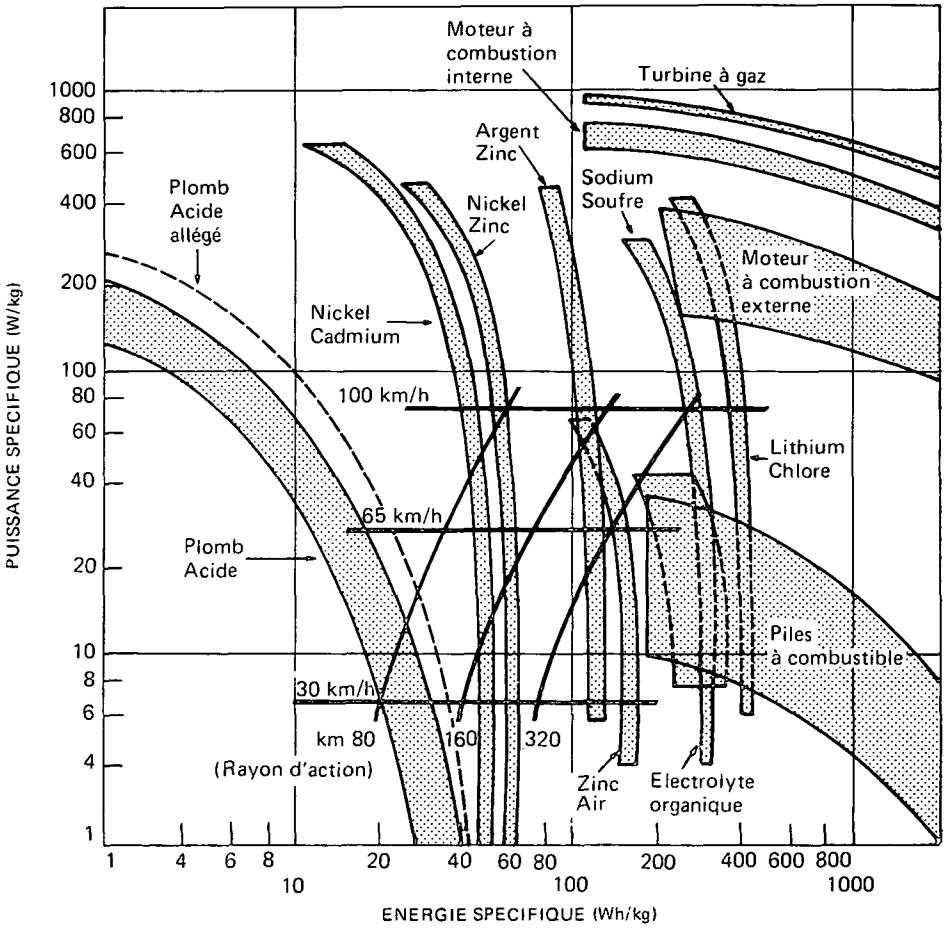
On considère alors les deux paramètres suivants :

— capacité massique ou énergie spécifique exprimée en watt-heure par kg (Wh/kg) ;
— puissance massique ou puissance spécifique exprimée en watt par kg (W/kg).

D'une façon pratique, ces deux paramètres indiqués en abscisse et en ordonnée sur un graphique donnent une bonne image des caractéristiques spécifiques de la source.

Pour assurer à un véhicule électrique un rayon d'action et une vitesse déterminés, ainsi que des possibilités d'accélération compatibles avec une circulation urbaine, la source d'énergie doit avoir des caractéristiques minimales et l'on peut, pour un poids de la source donné, tracer sur le graphique « énergie-puissance » un réseau de courbes « rayon d'action » et un réseau de courbes « vitesses maximales ».

C'est ce qu'ont fait K. H. Koch et D. B. Eames pour un véhicule de 910 kg ayant une source d'énergie de 227 kg. On a le graphique suivant :



On constate notamment que pour ce véhicule, on pourrait obtenir les performances suivantes selon le type d'accumulateur choisi (à poids égal) :

— plomb-acide	: vitesse : 50 km/h	- rayon d'action :	80 km
— nickel-cadmium	: vitesse : 80 km/h	- rayon d'action :	80 km
— argent-zinc	: vitesse : 90 km/h	- rayon d'action :	160 km
— zinc-air	: vitesse : 70 km/h	- rayon d'action :	320 km
— ou	: vitesse : 90 km/h	- rayon d'action :	160 km
— sodium-soufre	: vitesse : 100 km/h	- rayon d'action :	320 km
— lithium-chlore	: vitesse : 100 km/h	- rayon d'action :	600 km.

Quant à la pile à combustible, bien qu'elle permette des rayons d'action importants, la vitesse et les possibilités d'accélération se trouvent limitées par les faibles capacités de surcharge et c'est pourquoi certains envisagent de l'associer à une batterie d'accumulateurs.

LES ACCUMULATEURS ACTUELS ET LEUR AMELIORATION (5) (6) (*)

Il n'est pas question ici de faire la théorie des accumulateurs ni l'historique de leur développement depuis 1860, date à laquelle Gaston Planté a présenté à l'académie des Sciences une communication sur « une nouvelle pile secondaire d'une grande puissance ».

Nous nous attacherons plutôt à examiner les possibilités d'utilisation et les caractéristiques technico-économiques de ces accumulateurs et pour la clarté de l'exposé nous distinguerons :

— les accumulateurs actuellement disponibles sur le marché ;

— *les accumulateurs futurs.*

Les accumulateurs actuellement disponibles sur le marché peuvent être regroupés en 4 catégories : les accumulateurs au plomb, les accumulateurs alcalins, les accumulateurs argent-zinc et argent-cadmium. Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

(*) Voir bibliographie.

	Pb-acide	Alcalin conventionnel Ni-Cd	Alcalin Ni-Cd fritté mince	Ag-Zn	Ag-Cd
Energie massique (Wh/kg)	32	28	25-35	130	55
Puissance massique pratique maximale (W/kg)	70	27	500	100	90
Durée de vie en nombre de cycles à 80 % de profondeur de décharge	500	3 000	1 000	120	500
Coût de première installation					
— rapporté au Wh de capacité installée (F/Wh)	0,20	0,70	2,6	1,65	1,75
— rapporté au kW, pour le régime moyen de décharge en 3 h (F/kW)	600	2 100	7 800	5 000	5 300

L'accumulateur au plomb est évidemment limité en énergie et en puissance massique et son avantage principal réside dans son coût relativement peu élevé, qu'il s'agisse du premier investissement ou du prix du kWh produit. Cet accumulateur doit permettre d'ores et déjà de réaliser économiquement des véhicules et des camionnettes de livraison urbaine de caractéristiques acceptables.

L'accumulateur alcalin a des énergie et puissance massiques voisines de celles de l'accumulateur au plomb. Sa durée de vie est nettement plus élevée mais son prix est également supérieur.

Les accumulateurs alcalins du type fritté ont une énergie massique peu supérieure à celle des accumulateurs au plomb, mais sont capables de délivrer une puissance supérieure. Leur prix est, par contre, nettement plus élevé.

L'accumulateur argent-zinc atteint des niveaux d'énergie et de puissance qui auraient dû lui permettre de trouver des domaines d'application nombreux. Malheureusement sa durée de vie reste très limitée et son coût très élevé.

De plus, la production d'argent-métal est encore très faible.

Quant à l'accumulateur argent-cadmium, l'accroissement de son énergie massique par rapport à celle des autres accumulateurs alcalins ne permet cependant pas d'oublier son prix, environ 10 fois supérieur à celui des accumulateurs au plomb et sa durée de vie encore relativement limitée. En outre, se poserait là aussi le problème des disponibilités en argent-métal.

LES ACCUMULATEURS DANS L'AVENIR (5) (6) (*)

a) Amélioration des accumulateurs existants

Il est courant d'entendre dire que, depuis sa découverte, l'accumulateur au plomb n'a fait que de faibles progrès. Certes, depuis Planté, le principe de son fonctionnement n'a pas évolué, pas plus que celui du moteur à quatre temps depuis Beau de Rochas. Les progrès de l'accumulateur au plomb sont cependant moins évidents que ceux du moteur à quatre temps. Extérieurement, il n'a pas changé, sauf récemment, dans certains cas, en se parant de couvercles, de capots de protection ou de rampes aux couleurs vives, d'étiquettes multicolores, etc. Mais là n'est pas le vrai progrès de l'accumulateur. Si celui-ci est souvent passé inaperçu, c'est que l'on a toujours exigé davantage de la batterie ; que celle-ci a, en général, répondu à ces exigences, et que tout le monde a trouvé cela parfaitement normal et naturel.

Dans le cas de la batterie d'automobile, l'accroissement du taux de compression des moteurs passant en 40 ans de 4 à 10 a augmenté considérablement la puissance nécessaire pour le démarrage. De même, sans parler de l'éclairage, le nombre croissant des accessoires et des perfectionnements : radio, chauffage, conditionnement d'air, allume-cigares, commande électrique des freins ou des embrayages, voire même de l'ouverture ou la fermeture des glaces, ont aggravé les conditions de fonctionnement des accumulateurs.

Il faut que la batterie accomplisse ces tâches, quelles que soient les conditions de fonctionnement, par chaleur extrême ou par les froids les plus vifs, alors que les réactions électrochimiques sont très sensibles aux variations de température. L'usage de la manivelle pour le démarrage est devenu exceptionnel et nombre de modèles de voitures n'en sont d'ailleurs plus équipés.

Les constructeurs de batteries ont donc été obligés d'améliorer celles-ci dans tous les domaines et en particulier de rechercher le gain maximum de puissance et d'énergie à l'unité de poids et de volume. Comparons à ce sujet deux batteries classiques de démarrage, de même puissance (12 V, 36 Ah en 10 h) construites à 30 ans d'écart :

Années	Dimensions	Poids	
1936	368 × 122 × 255	25 kg	Bac et couvercle en matière moulée.
1966	234 × 134 × 200	14 kg	Bac et couvercle en plastique.

soit : gain en poids : 36 %
gain en volume : 43 %.

(*) Voir bibliographie.

En outre, il a fallu obtenir une plus longue durée de vie, une meilleure tenue à la surcharge, la possibilité de prendre facilement la charge et d'éviter la surcharge. A cela, il faut ajouter l'amélioration de la conservation de la charge en circuit ouvert, permettant à la batterie d'être stockée ou abandonnée au repos pendant longtemps sans entretien.

L'accumulateur au plomb a fait quelques progrès au cours des vingt dernières années : son énergie massique est passée de 18 à 30 Wh/kg, et elle est encore susceptible d'être améliorée : le taux d'utilisation des matières actives peut être augmenté : les grilles et accessoires, actuellement réalisés en plomb, doivent pouvoir être allégés considérablement ; des améliorations de structures doivent pouvoir éviter les pertes de tension ; l'étude approfondie des phénomènes qui se produisent pendant la charge devrait permettre de mettre au point des dispositifs de recharge rapide. La marge disponible pour toutes ces améliorations est encore importante puisque la capacité théorique que peut fournir un accumulateur au plomb est de 166 Wh/kg de matières actives alors que le maximum obtenu jusqu'à présent est, pour des accumulateurs de série et de longue durée de vie, de 30 Wh/kg environ et pour les accumulateurs particulièrement poussés de 40 à 45 Wh/kg.

Il n'est d'ailleurs pas impossible de concevoir des accumulateurs au plomb de structure entièrement nouvelle qui conduiraient à des énergies massiques encore supérieures.

Quant aux **accumulateurs alcalins,** ils sont également susceptibles d'être améliorés. Des perfectionnements technologiques devraient, comme dans le cas du plomb, rendre possible une diminution de l'écart entre l'énergie massique théorique (240 Wh/kg pour le couple Ni-Cd et 300 pour le Ni-Fe) et l'énergie massique pratique (25 à 35 Wh/kg).

Par ailleurs, plusieurs types d'accumulateurs nouveaux sont actuellement à l'étude, en particulier en France.

b) L'accumulateur nickel-zinc

Le zinc est un métal particulièrement intéressant du point de vue électrochimique puisqu'il permet de réaliser des réactions anodiques en milieu basique douées d'une cinétique élevée avec une surtension faible en décharge et que son prix de revient est relativement peu élevé : comparé aux autres métaux traités de façon à atteindre la pureté qui les rend propres à la fabrication des anodes, il est moins cher que le fer, l'aluminium ou le magnésium.

Malheureusement, la réalisation d'anodes en zinc s'est jusqu'ici heurtée à des difficultés très sérieuses : accumulation de la matière active dans la partie inférieure des plaques, naissance et croissance de dendrites dont l'action mécanique conduit à la perforation du séparateur et au court-

circuit avec les électrodes antagonistes. Or, il semble que l'on commence à entrevoir des moyens qui permettraient de résoudre ce problème ardu : les efforts portent principalement sur la nature de l'électrolyte et des séparateurs pour lesquels des matériaux nouveaux pourraient être utilisés.

L'accumulateur nickel-zinc, s'il pouvait être réalisé pratiquement, serait susceptible de délivrer des énergies de l'ordre de 80 Wh/kg tout en étant d'un prix très modéré.

c) Accumulateurs en milieu non aqueux

Tous les accumulateurs actuellement commercialisés utilisent des électrolytes constitués par une solution aqueuse d'un acide, d'une base ou d'un sel, l'eau ayant pour rôle principal de fournir les ions hydroxydes nécessaires à la conduction ionique. Ceci élimine l'emploi comme matériaux d'électrode des métaux très réducteurs comme les alcalins ou les alcalino-terreux et des oxydants très actifs comme le fluor ou le chlore, car ces systèmes oxydo-réducteurs ont une tension supérieure à la tension de décomposition de l'eau. Or, l'on connaît maintenant des corps organiques qui peuvent constituer des solvants d'électrolytes acceptables ; ceci permet d'envisager l'utilisation comme matériaux d'électrodes, de corps figurant à droite et à gauche des premières lignes du tableau de Mendeleïev, les plus remarquables étant le lithium et le fluor. Malheureusement, la réactivité chimique de ce dernier le rend difficilement utilisable en pratique ; c'est pourquoi les premiers essais ont porté sur les couples lithium-soufre et lithium-chlore.

Des générateurs primaires, c'est-à-dire non rechargeables, ont été mis au point et commencent à être commercialisés. Des générateurs secondaires, donc rechargeables, semblent très prometteurs : les premiers essais ont montré que la recharge est possible. L'énergie massique obtenue est d'environ 250 Wh/kg. Des batteries cuivre-lithium ont également été réalisées par Electrochimica Corporation qui donnent une énergie massique de 250 à 350 Wh/kg. L'inconvénient majeur de ces générateurs est qu'ils ne permettent pas de débits de courant élevés, ceci résultant de leur résistance interne assez importante. D'autre part, le lithium est un métal relativement peu abondant et assez coûteux, mais il n'est pas impossible que des progrès soient faits pour réduire son prix.

d) Accumulateurs lithium-chlore à haute température

Une autre façon de mettre en œuvre les couples très oxydo-réducteurs incompatibles avec les milieux aqueux est d'utiliser comme électrolytes des sels fondus, dont la conductivité électrique est généralement élevée, mais qui impliquent naturellement que l'on travaille à haute température.

Certains chercheurs ont misé sur cette voie : ils utilisent, soit le couple lithium-chlore, l'électrolyte étant du chlorure de lithium et la température de fonctionnement étant de l'ordre de 700° C, soit le couple lithium-tellure, associé à un électrolyte composé d'un mélange de plusieurs sels de lithium fondus et fonctionnant à 450° C.

Les performances obtenues en laboratoire sont assez remarquables, mais les problèmes de technologie sont évidemment nombreux et difficiles.

e) **Accumulateurs sodium-soufre**

Cet accumulateur, étudié par certains constructeurs, utilise des électrodes liquides en sodium et en soufre et un électrolyte solide en alumine-bêta. Cet accumulateur serait susceptible de débiter 250 à 300 Wh/kg, mais sa mise en œuvre nécessite des précautions, surtout s'il s'agit de réaliser des systèmes propulseurs pour véhicules routiers pour lesquels la sécurité en cas de collision doit être absolue.

— Un véhicule électrique équipé de ce type d'accumulateur a déjà été réalisé en Grande-Bretagne.

— En France, la Compagnie Générale d'Electricité n'envisage pas de réaliser une telle application avant 1980.

LES PILES RECHARGEABLES

Elles ont fait l'objet, en France, de recherches prometteuses, notamment par la Compagnie Générale d'Electricité et la société Wonder.

Le générateur air-métal résulte de l'association d'anodes métalliques et de cathodes à air. C'est donc une source dont on peut dire qu'elle est moitié accumulateur, moitié pile à combustible. Parmi les métaux utilisables comme anode en milieu alcalin, les principaux sont : le zinc ; le fer et le cadmium. Le couple air-zinc est celui qui est susceptible de donner la meilleure énergie massique théorique (1 230 Wh/kg) ; il est suivi par le couple air-fer (1 050 Wh/kg) puis par l'air-cadmium (500 Wh/kg).

On peut distinguer trois types :

— zinc-air rechargeable par courant électrique ;

— zinc-air rechargeable par remplacement des anodes en zinc ;

— zinc-air rechargeable par zinc pulvérulent.

Le premier est donc assimilable à un accumulateur, le second à une pile « reconstituable » et le troisième à une pile à combustible solide.

a) Zinc-air rechargeable par courant électrique

Ce générateur a déjà donné lieu, au cours des dernières années, à des études importantes, mais restent à résoudre les problèmes concernant l'électrode en zinc.

b) Zinc-air rechargeable par remplacement des anodes en zinc

Différentes réalisations ont été faites à titre expérimental. Aux U.S.A. « Energy Conversion Limited » a commercialisé une batterie 12 volts 24 ampères-heure de dimensions 16 × 16 × 10 cm et pesant 1,6 kg. Elle peut être rechargée en 10 minutes par remplacement des anodes et a une capacité massique de 200 à 250 Wh/kg.

c) Zinc-air rechargeable par zinc pulvérulent

Le zinc finement pulvérisé est dispensé dans l'électrolyte en circulation.

Ce type de pile est le plus prometteur à court terme pour l'équipement des véhicules électriques.

Une application concrète en a été faite en 1971 par le Centre de Recherches de SONY (Japon), mais l'ensemble de l'appareillage monté sur le véhicule est assez compliqué.

Un dispositif plus simple est actuellement étudié par la Compagnie Générale d'Electricité et si l'étude de faisabilité conduite actuellement montre que sur les plans techniques et économiques une réalisation est possible, des véhicules devraient pouvoir fonctionner avant 1980 avec ce type de pile.

La capacité spécifique de 120 à 150 Wh/kg triplerait les possibilités actuelles des véhicules électriques (à poids égal de la source d'énergie).

LES CHARGEURS

a) Les techniques classiques de charge des accumulateurs peuvent se classer en fonction du temps de charge

— Charge en 12 heures par chargeurs à intensité décroissante simple pente — l'intensité varie linéairement de 0,15 C (*) à 0,06 C. La simplicité des chargeurs ne compense pas les risques de surcharge.

— Charge en 8 heures par chargeurs à intensité décroissante double pente. L'intensité varie linéairement de 0,20 à 0,14 C jusqu'à une tension par élément de 2,4 volts environ, suivie d'une deuxième phase où l'intensité décroît jusqu'à 0,06 C. La fiabilité et le prix de ces chargeurs ne compensent pas leurs poids et volumes excessifs. Ils sont notamment inutilisables en « chargeur embarqué ».

— Charge en 5 ou 6 heures ou charge partielle de 50 % en 1 heure avec des systèmes à paliers d'intensité multiple ou à contrôle de dégagement gazeux. Mêmes inconvénients que le précédent.

Toutes ces techniques classiques n'étant pas très satisfaisantes pour les besoins du véhicule électrique, des études ont été engagées sous l'impulsion d'Electricité de France pour la mise au point de matériels mieux adaptés.

b) Les critères recherchés sont essentiellement

Automaticité quasi-totale. Mise en œuvre d'une procédure évitant tout risque de détérioration de la batterie et nécessitant une fréquence des charges d'égalisation aussi faible que possible. Durée d'immobilisation du véhicule inférieure à 8 heures, pour une recharge complète de la batterie, quel que soit l'état préalable de celle-ci ou inférieure à 1 heure environ dans le cas d'une recharge partielle rapide. Utilisation de matériels performants exigeant un entretien très réduit. Prix acceptable pour le domaine automobile.

c) Solutions envisagées

— Les chargeurs embarqués en totalité ou en partie

Différentes possibilités sont explorées actuellement pour accroître les performances des dispositifs de charge tout en réduisant poids, volume et

(*) C : capacité ou intensité théorique pour une charge totale en 1 heure.

prix. Celles qui paraissent les plus séduisantes, sous réserve qu'elles conduisent à un prix acceptable, consistent soit à modifier la fréquence d'alimentation du redresseur, soit à utiliser un ensemble ayant la double vocation : variation de vitesse, recharge de la batterie.

— **Les charges rapides**

Dans l'état actuel de la technique, celles-ci ne pourront s'effectuer qu'avec du matériel à poste fixe dont les prix actuels sont encore excessifs. Une recharge partielle à 80 % en 1 heure devrait être possible, ce qui conduit à prévoir des puissances de l'ordre de 20 kW installées par point de distribution pour une batterie de 350 kg. Mais il ne faut pas sous-estimer les problèmes liés aux limites d'intensité de charge acceptable par une batterie.

La littérature américaine laisse espérer des recharges ultra-rapides à 80 % en quelques minutes.

— **Les échanges**

Solution a priori séduisante car elle règle rapidement les problèmes d'autonomie. Mais l'infrastructure d'échange, les manipulations et surtout les investissements, tant en batteries, qu'en chargeurs impliquent :

— soit de traiter des cas particuliers (flottes spécialisées) ;

— soit une généralisation de l'emploi du véhicule électrique.

LES PILES A COMBUSTIBLE (6) (7) (8) (*)

Une pile à combustible est un générateur électrochimique dans lequel les électrodes, au lieu d'intervenir directement dans la réaction et de se consommer comme dans les accumulateurs, sont alimentées en réactifs stockés à l'extérieur et jouent le double rôle de siège de la réaction électrochimique et de collecteur de courant. Ainsi, une pile à combustible est dimensionnée pour le niveau de puissance maximum souhaité et l'autonomie n'est fonction que de la taille des réservoirs associés, alors que dans un accumulateur l'augmentation d'autonomie ne peut être obtenue que par la multiplication des générateurs. Il est possible d'imaginer un très grand nombre de types de piles à combustible suivant la nature du combustible et du comburant, celle de l'électrolyte, la température et la pression à laquelle on opère, etc.

(*) Voir bibliographie.

Si l'on aborde le problème de la réalisation pratique des piles à combustible, il est indispensable de faire une distinction très nette entre deux grands types d'application :

a) Les applications très spécifiques qui ne nécessiteront que la fabrication d'un petit nombre de piles et pour lesquelles le coût est un facteur relativement secondaire

Il s'agit essentiellement de la recherche spatiale, de l'exploration sous-marine, de certaines stations isolées, etc. L'apparition des piles à combustible ouvre dans ce domaine des possibilités telles qu'elles peuvent rester compétitives malgré un prix particulièrement élevé. Il s'ensuit que l'on peut admettre qu'elles utilisent des combustibles délicats à manipuler et chers, qu'elles comportent des métaux précieux, etc. Ce qu'on leur demande essentiellement c'est, en dehors d'une certaine compacité, une très grande fiabilité.

b) Les applications de grande diffusion parmi lesquelles figure la traction électrique des véhicules

Dans ce cas, la pile à combustible, pour prendre une place sur le marché, doit battre non seulement techniquement mais également économiquement les solutions actuelles. Ceci entraîne presque impérativement :

— que le comburant soit l'air atmosphérique ;

— que le combustible soit facilement manipulable, donc liquide (ce peut être un carburant naturellement liquide ou un gaz liquéfié) qui soit d'un prix aussi abordable que possible ;

— que soit prohibée l'utilisation des matériaux rares et chers, tels que les métaux précieux par exemple ;

— que la technologie soit telle que l'on obtienne le maximum de compacité, de légèreté et de simplicité tout en conservant un bon niveau de fiabilité.

Un travail considérable a été fait dans le domaine des piles à combustible au cours des dernières années et les équipes qui ont attaqué ce problème difficile progressent chaque jour en améliorant les caractéristiques de leurs prototypes et en découvrant de nouveaux procédés permettant de simplifier la construction, d'augmenter le rendement et d'abaisser les prix.

Faire le point de toutes les études menées dans la plupart des pays industrialisés sortirait du cadre de cet ouvrage, et pour se limiter à la

France qui sur le plan de ces recherches se place dans le peloton de tête, on peut rappeler brièvement ci-après l'état des travaux :

En décembre 1965, une exposition entièrement consacrée aux piles à combustible eut lieu à Paris, au Palais de la Découverte et permit de dresser un premier bilan des réalisations françaises après quelques années de recherches.

Les recherches de base se sont orientées, pour les piles à basse température, vers l'étude des diverses solutions envisageables pour la substitution des catalyseurs nobles (C.N.R.S., Alsthom, C.G.E., O.N.I.A., I.F.P.) (*) et pour les piles à haute température vers la poursuite des études relatives à la tenue des électrodes et des électrolytes à température élevée (G.D.F., C.G.E. et Université de Grenoble).

Les actions de développement particulièrement coûteuses nécessitaient une aide importante et accrue de l'Etat et un regroupement des efforts. A partir de 1966, un certain nombre de sociétés qui suivaient la même filière de pile à hydrogène décidèrent de s'associer pour mettre sur pied un programme commun de développement. C'est ainsi que se forme l'association C.I.P.E.L.-C.S.F.-I.F.P.-U.C. (*), à laquelle s'est joint la Régie Renault, naturellement soucieuse de suivre le développement d'une source d'énergie applicable à la traction électrique. D'une façon analogue d'ailleurs, C.G.E. prit contact avec Citroën et Siemens en Allemagne et Alsthom se lia à Peugeot et Rhône-Poulenc.

Quatre groupes de développement ont poursuivi ces recherches : l'O.N.I.A., l'Alsthom, la C.G.E. et le groupe L.C.L.-I.F.P. (*). Ces quatre groupes ayant sollicité et reçu une aide importante de la D.G.R.S.T. (*), celle-ci leur a demandé de soumettre les prototypes, résultats de leurs travaux, au contrôle du L.C.I.E. (*) en vue de les éprouver. A cette occasion, l'intérêt et la valeur relative des résultats français ont pu être clairement mis en évidence.

Les perspectives de développement étant de plus en plus proches, on conçoit que chaque société soit de plus en plus discrète sur les détails de ses travaux. On peut cependant donner de chacune d'elles les indications suivantes :

La société Azote et Produits Chimiques, résultant de la fusion des groupes Potasses d'Alsace et O.N.I.A., a continué les travaux sur les piles à moyenne température (230° C) en accroissant dimensions et performances des électrodes et en les adaptant au fonctionnement à pression atmosphérique et à l'air. Un prototype de pile hydrogène-oxygène ou air de 500 W basse tension (0,85 V) et forte intensité (600 A) a été soumis aux essais du L.C.I.E., essais au cours desquels, et pendant une part importante du temps, un générateur d'hydrogène ex-ammoniac alimenta la pile à combustible. Les recherches sont actuellement suspendues.

(*) Voir définition des sigles page 53.

L'Alsthom, constructeur de matériel électromécanique, qui s'était engagé initialement sur la voie des piles Redox, a mis en sommeil cette solution simple quant au générateur électrochimique lui-même mais complexe quant aux dispositifs de régénération des carburants et combustibles liquides. Toutefois, les excellents résultats, obtenus sur le plan de la puissance massique pour la partie pile proprement dite, ont été mis à profit par cette société pour la conversion de ce générateur en pile à réactifs liquides, hydrazine et eau oxygénée.

Cette pile hydrazine-eau oxygénée offre une bonne compacité en ce qui concerne le générateur électrochimique : de l'ordre de 1 dm^3/kW, mais ceci, non compris les accessoires et en particulier les dispositifs de refroidissement. Cependant, les inconvénients inhérents à des combustibles aussi coûteux et aussi spontanément décomposables que l'hydrazine et l'eau oxygénée n'ont pas échappé à cette société qui s'efforce d'utiliser l'air au lieu de l'eau oxygénée par un dispositif à émulsion, et le méthanol au lieu de l'hydrazine en cherchant une solution économique au problème très difficile du catalyseur. On ne possède que peu de détails sur les résultats de ces dernières recherches menées en collaboration avec ESSO.

La Compagnie Générale d'Electricité, premier constructeur français de matériel électrique, qui vient de prendre le contrôle d'Alsthom et de la C.I.P.E.L., possède de nombreuses filiales dans le domaine des générateurs électrochimiques (Fulmen, Société des Accumulateurs Fixes et de Traction (S.A.F.T., Tudor, etc.).

Sa filiale de recherches, les laboratoires de Marcoussis consacrent depuis plus de 10 ans, d'importants efforts sur les piles à combustible. Après l'exploration des différentes voies possibles (piles hydrazine-air, piles haute température, catalyseurs non nobles pour électrolyte acide ou neutre) la C.G.E. a développé des batteries de pile hydrogène-oxygène (ou air) basse température à électrolyte alcalin de différentes puissances en évitant par principe tout emploi de métaux précieux. Deux types de prototypes ont été soumis aux essais du L.C.I.E. : l'un, alimenté en air de 1 kW de puissance nominale, est capable de fournir 1,4 kW en pointe ; l'autre, alimenté en oxygène de 1,5 kW de puissance nominale, est capable de fournir 3,6 kW en pointe. Un nouveau modèle de piles plus perfectionné et plus compact est à l'étude. Il représente, à performances égales, un gain d'un facteur 3 par rapport au modèle précédent.

L'I.F.P. s'est efforcé, dès le début de ses travaux, de rechercher l'emploi de combustibles liquides bon marché : hydrocarbures ou à défaut méthanol et d'utiliser comme comburant l'air au lieu de l'oxygène.

Une expérience de quelques années sur les piles directes à combustible et la réalisation d'un certain nombre de prototypes a convaincu l'I.F.P. que les problèmes soulevés — remplacement de catalyseurs nobles en milieu compatible avec l'élimination du gaz carbonique — ne seraient probablement pas résolus à court terme.

Certaines sociétés, dont notamment l'I.F.P., décidèrent donc en 1966 de s'attaquer activement à ce problème, tout en développant les piles à hydrogène, seules susceptibles de réalisations industrielles au cours des prochaines années et simultanément de concevoir des unités de fabrication d'hydrogène à partir des combustibles liquides bon marché, adaptables aux piles précédentes. Les travaux de développement sur les piles à hydrogène furent menés en association étroite avec les trois sociétés du groupe L.C.L. (C.I.P.E.L., le Carbone-Lorraine, Ugine-Carbone) qui avaient déjà à leur actif plusieurs années de recherches sur le problème.

La société C.I.P.E.L. Mazda, spécialiste des piles à air, est bien connue par ses piles sèches et ses piles chimiques Zn-air à forte capacité ; le Carbone-Lorraine, par sa compétence en produits carbonés, avait poursuivi la mise au point d'électrodes à base de carbone ; Ugine-Carbone, spécialiste du frittage des métaux, avait entrepris l'étude des électrodes frittées.

Un prototype, présenté par l'I.F.P. et soumis en 1969 aux essais du L.C.I.E., pesait de l'ordre de 35 kg pour permettre l'alimentation d'une pile de 500 W. Son rendement était d'environ 40 % en 1970, grâce aux améliorations introduites sur le réacteur de conversion dont l'efficacité a été sensiblement multipliée par 4, la puissance du nouveau générateur a été accrue dans ce rapport (alimentation électrique d'une pile de 2 kW) sans que son poids soit sensiblement modifié (45 kg au lieu de 35). Son rendement a été également amélioré et atteint environ 44 %.

En conclusion, on peut dire que la technique de la pile à combustible est pratiquement maîtrisée, mais des progrès importants restent à faire pour :

— augmenter sa durée de vie ;

— réduire le volume et le poids des accessoires à embarquer ;

— amener son prix à un niveau compétitif avec les autres sources d'énergie.

Il ne paraît pas impossible d'atteindre ces objectifs aux environs de 1985.

HYBRIDATION (6) (*)

Les générateurs, électrochimiques ou non, dont on dispose actuellement pour la propulsion des véhicules peuvent :

— soit délivrer des quantités d'énergie importantes par unité de poids,

(*) Voir bibliographie.

sans pouvoir dépasser sensiblement leur puissance nominale ; c'est le cas, en particulier, pour les moteurs thermiques et ce sera celui des piles à combustible et de certains accumulateurs : ces générateurs doivent être calculés pour la puissance de pointe, et sont donc le plus souvent mal utilisés ;

— soit emmagasiner des quantités d'énergie peu élevées par unité de poids tout en étant capables de fournir des pointes de puissance fort importantes. C'est le cas des accumulateurs conventionnels au plomb ou alcalins et de certains accumulateurs en cours de développement.

Ces générateurs, utilisés séparément, ont dans le premier cas de mauvais rendements, ou bien, dans le deuxième cas, ne permettent pas d'atteindre des autonomies suffisantes.

Il serait donc intéressant de coupler deux générateurs appartenant à chacune des catégories ci-dessus. Le premier, doué d'une grande énergie massique, serait calculé pour le débit énergétique moyen nécessaire et débiterait en permanence à sa puissance nominale, donc avec un excellent rendement. Le second aurait la dimension juste nécessaire pour assurer les pointes de la demande (démarrages, reprises et côtes) et serait rechargé immédiatement par prélèvement d'énergie sur le premier générateur. C'est ce qu'on appelle l'hybridation.

Elle peut se concevoir :

— soit avec deux accumulateurs de nature différente : un accumulateur plomb-acide, nickel-zinc ou, plus tard, au lithium, assurant le stockage de l'énergie, et un accumulateur alcalin, par exemple du type fritté mince, assurant les pointes de courant ;

— soit avec une pile à combustible dont les dimensions seraient calculées de façon à débiter en permanence à son régime nominal, et un accumulateur dont la taille serait juste nécessaire pour assurer les pointes de puissance ;

— soit encore avec un groupe thermique, diesel ou à essence, fonctionnant en permanence à son point de rendement optimum, associé à un accumulateur capable de fournir les appels de courant nécessaires aux démarrages, accélérations et gravissements des côtes. La théorie montre d'ailleurs que, dans ce cas, l'hybridation est d'autant plus intéressante, que la taille du véhicule est plus importante, ce qui donne le maximum d'espoir aux moyens de transport de masse.

Ce dernier mode d'hybridation sera étudié plus en détail en paragraphe 2.5.

2.3. - LES MOTEURS ET LES COMMANDES

On est généralement tenté de considérer que les moteurs et les commandes des véhicules électriques ne posent pas de problèmes particuliers et que l'on trouve dans le commerce tout le matériel adapté à cette technique.

En fait, il n'en est rien et ces dernières années, les efforts des constructeurs ont porté en grande partie sur cette « chaîne de traction » qui ne cesse de s'améliorer.

Pour un véhicule donné, la définition de cette « chaîne de traction » dépend des performances minimales que l'on souhaite obtenir pour une bonne intégration du véhicule électrique au trafic urbain : accélération au démarrage, vitesses maximales en palier et en côte, récupération de l'énergie ou non au freinage et en descente, etc.

On a alors le choix entre les différentes techniques suivantes :

MOTEURS (9) (*)

a) Moteurs à courant continu

C'est le moteur de traction par excellence ; les conditions normales de fonctionnement peuvent être temporairement dépassées, ce qui permet de choisir pour le dimensionnement du moteur, une puissance inférieure à la puissance de crête admissible.

Les caractéristiques mécaniques sont excellentes, le domaine de fonctionnement couple-vitesse est vaste et le couple de démarrage est très important. Par contre, la puissance massique est comprise entre 200 et 250 W/kg. Une amélioration de cette caractéristique par une augmentation de la vitesse de rotation est en cours d'étude, mais elle pose des problèmes délicats dûs au collecteur et aux roulements du rotor.

Par ailleurs, ces moteurs sont d'une robustesse superflue pour les véhicules de transport urbain et, déjà, diverses améliorations ont été réalisées pour les alléger.

Les moteurs à courant continu peuvent être associés à une commande électromécanique ou à une commande électronique.

(*) Voir bibliographie.

b) Moteur à induction

Pour lutter contre le facteur poids, l'idée est née d'utiliser le moteur à induction. Il est simple et robuste, peu onéreux ; sa vitesse de rotation peut être importante, ce qui permet d'atteindre des puissances massiques de 1 kW/kg pour des moteurs à carcasse ALPAX, alors que les moteurs à courant continu les plus performants n'ont qu'une puissance massique de 250 W/kg, pour un prix double. Son inertie est faible et seuls l'entretien et l'usure des paliers subsistent. Sa caractéristique couple-vitesse de rotation n'est pas adaptée à la traction, mais actuellement des dispositifs de commande électronique (onduleurs) permettent de l'utiliser dans ce domaine. L'étude d'onduleurs de puissance plus économiques devrait permettre le développement de cette filière.

c) Moteurs spéciaux

On peut envisager également l'emploi de moteurs spéciaux pour lesquels l'électronique de puissance assurera l'adaptation à la source et à la traction. Citons parmi eux :

— le moteur à courant continu sans collecteur, qui appartient encore au domaine de la recherche ;

— le moteur homopolaire qui est mal adapté aux sources de courant classiques ;

— le moteur à entrefer axial et bobinage lamellaire.

Ce dernier, de construction récente, possède une puissance massique comparable à celle du moteur de traction classique ; une faible inertie, une ventilation aisée à réaliser et un rendement élevé ;

— le moteur à réluctance variable Jarret ou moteur à fer tournant, particulièrement apte à l'utilisation de la commutation électronique par transistors ou thyristors à fréquence élevée ou basse, pourrait prendre le relais des réalisations plus classiques.

COMMANDES (9) (*)

La tension délivrée par une cellule élémentaire d'une pile ou d'un accumulateur est faible (quelques volts). La production d'une tension de distribution de quelques dizaines de volts nécessite donc la mise en parallèle et en série d'un grand nombre d'éléments, accompagnée d'un dispositif de régulation ; ces problèmes, bien que technologiques, sont assez délicats.

(*) Voir bibliographie.

Par ailleurs, avec un moteur série à courant continu, diverses solutions peuvent être adoptées pour le démarrage et le réglage de la vitesse :

1) Emploi du rhéostat classique qui est un dispositif simple mais peu économique.
2) Montage en série parallèle des moteurs dans le cas où la chaîne de traction comprend plusieurs moteurs. Cette solution manque de souplesse.
3) Commandes électromécaniques utilisant, soit des contacteurs industriels relativement bon marché mais lourds, encombrants et bruyants ; soit des contacteurs du type « aviation » qui sont légers, fiables et de volume réduit, mais d'un prix élevé. La mise au point de contacteurs qui réunissent dans la mesure du possible les qualités des deux types de matériel est en cours.
4) Utilisation de courants pulsés délivrés par un dispositif électronique où sont exploitées les propriétés des thyristors en matière de commutation.

Les possibilités de souplesse et surtout la protection de l'ensemble des organes de traction par la limitation de courant d'appel, les possibilités de récupération d'énergie, l'effet de ralentisseur, et l'utilisation de la commande comme organe de recharge à l'arrêt en font la solution d'avenir. Dès aujourd'hui, trois à quatre réalisations originales sont opérationnelles.

Dans le cas du moteur à induction, il est nécessaire de lui associer un dispositif permettant de transformer le courant continu en courant alternatif de fréquence variable. La conversion courant continu-courant alternatif est obtenue par l'emploi soit d'un onduleur à fréquence variable, soit d'un onduleur fixe associé à un cyclo-convertisseur. Ces dispositifs permettent également de produire un couple de freinage alimentant le moteur à fréquence nulle. L'inconvénient majeur de ces ensembles qui comportent thyhristors et transistors de puissance est leur prix qui représente un gros investissement dont l'importance ne pourra être réduite que par une fabrication en série.

2.4. - LA STRUCTURE DU VÉHICULE

Le type de moteur et le système de commande étant choisis, restera à déterminer notamment :

— le nombre de moteurs — Pour supprimer le différentiel, l'emploi d'au moins deux moteurs semble s'imposer ;

— le principe de montage des moteurs : suspendus ou non suspendus.

Pour la structure proprement dite, des études théoriques démontrent :

— pour les unes, que les aspects spécifiques au véhicule urbain sont liés aux faibles vitesses, au faible encombrement et aux parcours réduits ;

— pour les autres, qu'il existe des ratios constants poids/volume et poids-puisance. Elles estiment que la marge d'innovation reste faible, ce qui justifierait certaines tentatives de modifications de véhicules existants. La recherche de la diminution du poids n'entraîne pas, dans ce cas particulier, d'économie sur le coût, mais elle permet de développer des technologies mieux adaptées :
  — utilisation du verre résine,
  — utilisation des matériaux plastiques,
  — utilisation des alliages légers,
  — adaptation des formes à l'échange des batteries,
  — conception nouvelle du chauffage,
  — diminution des bruits de roulement qui deviennent prépondérants,
  — etc.

2.5. - LES VÉHICULES HYBRIDES (10) (11) (12) (13) (*)

On appelle « véhicules hybrides » des véhicules alimentés par deux sources d'énergie distinctes, l'une thermique, l'autre électrique et ayant la possibilité de fonctionner en n'utilisant que la source d'énergie électrique.

Si l'hybridation résulte de l'utilisation de deux sources d'énergie électrique (accumulateurs et pile à combustible par exemple) comme évoqué au paragraphe 2.1., le véhicule reste purement électrique.

La plupart des véhicules hybrides fonctionnent de la manière suivante.

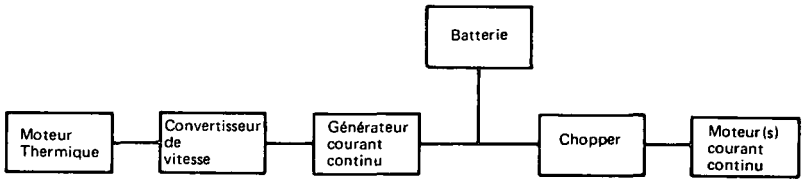
Un moteur thermique actionne une génératrice qui charge des batteries. Ces batteries alimentent un ou plusieurs moteurs électriques qui propulsent le véhicule. Ce véhicule peut fonctionner selon deux modes distincts :

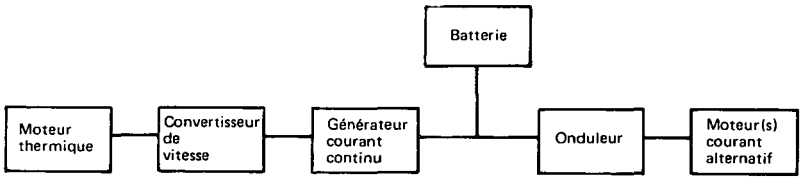
- le mode électrique, où toute la puissance provient des batteries ;

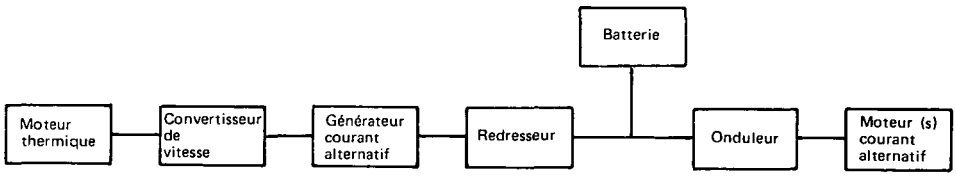
(*) Voir bibliographie.

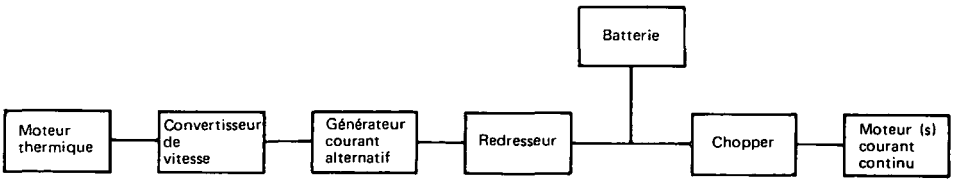
- le mode hybride, dans lequel l'origine de la puissance dépend du type de couplage des deux sources d'énergie : la puissance peut provenir des batteries qui se chargent grâce au fonctionnement de la génératrice ; elle peut provenir des deux sources d'énergie à la fois, l'une d'elles servant à fournir une puissance constante et l'autre une puissance fluctuante (par exemple lors des accélérations).

L'étude paramétrique sur le véhicule électrique faite aux U.S.A. par Arthur D. Little (13) distinguait quatre filières pour le véhicule hybride, représentées par les schémas suivants.









L'étude indique que la quatrième filière présente beaucoup d'intérêt en raison des avantages du générateur à courant alternatif (absence de balais d'où entretien simplifié, possibilité de grandes vitesses de rotation, encombrement réduit, technologie avancée de sa production en grande série), et du fait que le moteur à courant continu est généralement préféré pour la traction.

Les moteurs utilisables pour entraîner la génératrice peuvent être de cinq types :

- moteur à explosion, à piston ou rotatif, à essence ou à gaz ;
- moteur diesel ;
- turbine à gaz ;
- moteur à vapeur ;
- moteur Stirling.

Annexe :

C.N.R.S.	:	Centre National de la Recherche Scientifique.
C.G.E.	:	Compagnie Générale d'Electricité.
O.N.I.A.	:	Office National des Industries de l'Azote devenu l'A.P.C. (Azote et Produits Chimiques).
I.F.P.	:	Institut Français du Pétrole.
G.D.F.	:	Gaz de France.
C.I.PE.L.	:	Compagnie Industrielle des Piles Electriques.
C.S.F.	:	Compagnie Générale de Télégraphie sans Fil.
U.C.	:	Ugine-Carbone.
L.C.L.	:	Le Carbone-Lorraine.
D.G.R.S.T.	:	Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique.
L.C.I.E.	:	Laboratoire Central des Industries Electriques.

***

Chapitre III

LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE DANS LE PARC AUTOMOBILE

3.1. - AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE

La traction électrique ne semble pas être généralisable, tout au moins à court terme, pour l'ensemble du parc automobile. Cependant, certains créneaux, pour lesquels les avantages l'emportent (ou l'emporteront dans un avenir proche) sur les inconvénients, peuvent être envisagés dans le cadre d'une diffusion commerciale de véhicules électriques.

L'importance et la nature des créneaux évolueront, bien entendu, avec la progression de la technique. On peut ainsi espérer que, lorsque la pile zinc-air à circulation d'électrolyte, puis la pile à combustible deviendront opérationnelles et commercialement viables, d'autres catégories de véhicules pourront accéder à la traction électrique.

LES AVANTAGES

Pour en revenir à un horizon moins éloigné, et par conséquent à la batterie au plomb, on peut citer, en faveur de la traction électrique pour les véhicules urbains, les avantages suivants :

— Longévité supérieure des organes de traction

Les entreprises possédant des parcs de camionnettes électriques estiment généralement que la durée de vie d'un véhicule est à peu près le double de celle d'un véhicule analogue à moteur classique.

— **Coût d'exploitation réduit**

Les exploitants de flottes de véhicules utilitaires électriques ont généralement souligné ce facteur, dû à la fois à la réduction du coût de l'entretien et de celui de l'énergie.

Par exemple, la société britannique MORRISON ELECTRICARS a indiqué qu'un parc de 50 véhicules électriques peut être facilement entretenu par 2 personnes dont une non qualifiée, ce qui n'est évidemment pas le cas pour un parc de cette dimension constitué par des camionnettes à moteur diesel ou à essence.

(L'absence d'opérations de vidange, la solidité du matériel électrique, les nettoyages réduits au minimum, sont des facteurs qui contribuent à cette réduction du personnel d'exploitation.)

Le bilan énergétique est également intéressant, pourvu que l'on fasse les recharges de nuit et que l'on opère avec des chargeurs bien adaptés.

— **Silence**

Le bruit dû à un véhicule électrique est pratiquement limité au bruit de roulement, ce qui fait une différence très sensible avec le véhicule thermique.

Ce facteur est apprécié par les conducteurs ainsi que par les passagers s'il s'agit d'un véhicule de transport de personnes. Il le sera également par les riverains, qui sont de plus en plus sensibles aux nuisances de la vie urbaine. En particulier, le fait que le véhicule électrique ne fasse aucun bruit aux arrêts — (feux rouges, etc.) car son moteur ne tourne pas à l'arrêt — et aux démarrages, ne peut manquer de séduire le piéton.

— **Absence de pollution urbaine**

Il est inutile d'insister sur cet avantage évident, auquel les habitants des villes seront très sensibles. C'est, semble-t-il, un avantage décisif pour que la promotion du véhicule électrique reçoive une aide substantielle de la part des pouvoirs publics.

— **La facilité de conduite**

Elle est due à l'absence d'embrayage et de changement de vitesse, ainsi qu'à la vitesse limitée. La conduite est d'ailleurs si simple que l'on peut en conclure que, d'une part, un permis de conduire simplifié devrait pouvoir être instauré pour les véhicules électriques et que, d'autre part, la voiturette électrique se prête particulièrement bien à une exploitation en véhicule banalisé.

LES INCONVENIENTS

Parmi les inconvénients que l'on peut attribuer au véhicule électrique, nous citerons :

— L'autonomie limitée et la grande durée de recharge

Cet inconvénient est de taille, puisqu'il interdit au véhicule électrique de circuler en rase campagne. C'est également un frein au développement de la voiturette privée urbaine. Par contre, les flottes spécialisées qui disposent de techniciens pouvant s'occuper des opérations de contrôle et d'entretien (niveaux de batteries...) et dont les véhicules reviennent tous les jours au garage pour la recharge sont beaucoup moins sensibles à cet inconvénient.

On peut d'ailleurs envisager, pour l'avenir, une logistique coûteuse permettant de réduire certaines contraintes et notamment la durée de recharge ; par exemple, une infrastructure spécialisée constituée par des stations-services de recharge et d'échange rapide de batteries standardisées mises en location. On peut mentionner ici, les travaux remarquables faits en Allemagne, dans ce domaine, par la société SELAK (filiale de la R.W.E.). Des études du même genre sont en cours en France.

— Coût élevé à l'achat

Le prix de revient d'un véhicule électrique est très supérieur à celui d'un véhicule classique et le restera tant que le véhicule électrique ne sera produit qu'en petites séries. La différence de prix de revient entre ces deux types de véhicules qui, dans le cas de petites séries, peut être évaluée entre 80 et 130 % du prix du véhicule thermique correspondant, pourrait ainsi être ramenée à 20 % en cas de production de masse.

En ce qui concerne les cadences de production, on peut estimer que pour produire une voiturette à un prix raisonnable, il faudrait une cadence de production de 400 véhicules/jour.

Le surcroît de coût à l'achat sera un handicap très sérieux pour le véhicule électrique et surtout pour le véhicule individuel, car il est probable qu'en raison du comportement économique actuel de l'automobiiste, celui-ci sera beaucoup moins sensible que le propriétaire d'un parc de véhicules utilitaires, au fait que le coût d'exploitation joue en sens inverse du coût à l'achat.

— Nécessité d'infrastructures spécialisées pour la recharge ou l'échange de batteries

Cette infrastructure est assez coûteuse. A titre d'exemple, une étude faite, en France, à la demande d'E.D.F. a évalué le prix d'une installation

de recharge équipant un parking privé à 2 000 F environ la place équipée, qui vient s'ajouter à un coût d'investissement du véhicule déjà élevé pour une fabrication en petites séries. Ce coût supplémentaire pourrait être évité par la mise en place d'un réseau de stations-services de recharge rapide ou d'échange de batteries.

3.2. - DOMAINES D'UTILISATION

Nous avons vu que l'utilisation du véhicule électrique est, au moins à court terme, conditionné par des contraintes techniques et économiques assez impératives :

— faible rayon d'action ;
— vitesse limitée ;
— coût élevé à l'achat ;
— poids important : ce qui conduit à un rapport $\frac{\text{charge utile}}{\text{poids total en charge}}$ défavorable ;
— recharge des batteries très lente.

On voit tout de suite que ces contraintes ne permettent pas au véhicule électrique de supporter la concurrence du véhicule thermique utilisé dans ses performances optimales.

Mais, fréquemment, les véhicules thermiques ne sont pas utilisés au mieux de leurs performances, en particulier dans les zones urbaines, où de nombreux véhicules effectuent des trajets quotidiens compatibles avec les contraintes de charge utile, les limitations de vitesse et les possibilités d'autonomie évoquées ci-dessus pour les véhicules électriques. Il faut ajouter à ces constatations, que les soucis de l'environnement sont précisément prédominants dans les villes.

Il semble alors évident que le champ d'utilisation privilégié du véhicule électrique soit restreint à la ville. Sauf peut-être pour le long terme avec l'apparition d'une pile à combustible opérationnelle, le véhicule électrique sera d'abord un véhicule spécifiquement urbain.

Précisons les domaines d'utilisation que l'on peut envisager pour le véhicule électrique :

Transport de marchandises

Les utilisations envisageables dans ce domaine ont été explorées par les constructeurs qui ont à leur actif un certain nombre de réalisations

et qui s'attendent à un développement considérable — et dans un délai très rapproché — du véhicule électrique utilitaire. On peut citer :

— les véhicules de petite livraison urbaine (en particulier, les livraisons qui nécessitent des arrêts fréquents) ;
— le transport des marchandises à l'intérieur des usines ;
— la distribution des journaux ;
— la camionnette de transport utilisée en location ;
— le transport à l'intérieur des hôpitaux ;
— etc.

Le véhicule utilitaire semble d'ailleurs être le plus facile à convertir à l'électricité, car un grand nombre de ces véhicules circulent pendant les horaires usuels de travail, à l'intérieur d'un périmètre limité — celui de l'agglomération urbaine — et reviennent passer la nuit au dépôt. Dans ces conditions d'utilisation, l'autonomie et la durée de la recharge ne constituent plus des contraintes. De plus, le véhicule fait généralement un arrêt prolongé au milieu de la journée correspondant au temps de repos du conducteur ; ce temps pourrait, au besoin, être utilisé à échanger les batteries déchargées contre des batteries chargées, ou à recharger partiellement ses batteries, ce qui permettrait d'augmenter le rayon d'action journalier du véhicule. L'histoire du véhicule électrique confirme d'ailleurs que les véhicules utilitaires constituent le « créneau » privilégié des véhicules électriques : les productions en séries les plus importantes ont été constituées par des véhicules de livraison, dont le meilleur exemple est fourni par les 60 000 véhicules circulant en Grande-Bretagne, utilisés pour la livraison du lait et du pain ou comme véhicules municipaux.

En France également, ce sont les véhicules électriques pour flottes spécialisées qui se sont développés, à une échelle toutefois moindre qu'en Grande-Bretagne : les bennes à ordures qui circulent depuis 40 ans sont les plus connues ; il existe également des camions électriques employés par des entreprises de brasserie.

Véhicules de service

Les flottes importantes des services publics constituent un marché non négligeable. La flotte la plus fréquemment évoquée est celle des véhicules postaux effectuant le ramassage et la distribution du courrier. Le ramassage des ordures se fait déjà, en partie, avec des véhicules électriques. Les véhicules de releveurs des compteurs d'électricité, d'eau, et d'une façon générale les véhicules de liaisons des grandes administrations pourraient également être remplacés par des véhicules électriques sans que le fonctionnement de ces parcs soit particulièrement bouleversé.

Véhicules de transport en commun

Des recherches et des expérimentations ont été menées sur l'autobus et le minibus électriques.

En France, le minibus SOVEL a été essayé en transport en commun dans les villes de Carhaix, Clermont-Ferrand et Evry. Ce minibus semble avoir donné satisfaction aux usagers qui en appréciaient le silence et à l'exploitant, en raison du faible prix de revient et de l'entretien très réduit nécessité par ce véhicule ; au conducteur, enfin, qui appréciait la facilité de conduite et la souplesse du véhicule. Cette expérience sera suivie par la mise en service dans les villes nouvelles de la Région Parisienne de minibus conçus spécialement pour le transport en commun (Evry - Saint-Quentin-en-Yvelines - Marne-la-Vallée).

Des expériences similaires se déroulent actuellement en Angleterre et aux U.S.A. avec des minibus et en Allemagne avec des autobus de type standard. Il serait intéressant de confronter ces expériences et, en particulier, d'engager un débat pour savoir si le minibus est plus apte que l'autobus à être converti à la traction électrique.

Un autre domaine d'utilisation possible pour cette catégorie de véhicules est constitué par le remassage scolaire, le transport de touristes (visites à l'intérieur des villes) et le transport du personnel.

Transport individuel

Deux formes peuvent être envisagées pour le développement du petit véhicule électrique urbain :

a) le véhicule particulier qui, très probablement sera utilisé comme véhicule d'appoint par les ménages, le véhicule principal restant propulsé par un moteur à essence ;

b) le véhicule banalisé — ou taxi sans chauffeur — mis à la disposition du public.

3.3. - LES "CRÉNEAUX"

Les différents domaines d'utilisation évoqués au chapitre précédent ont permis de classer les véhicules en différents « créneaux d'utilisation » dont les caractéristiques sont approximativement les suivantes :

Type	Usage	Charge transportée kg	Puissance nominale kW	Vitesse km/h
Mini véhicules A	loisirs golf-cars tondeuses handicapés tricycles	2 personnes	1	30
B 2 places	véhicules spécifiquement urbains à 2 places et bagages	200	3/5	40/50
C services	interventions petites livraisons démarchages en ville taxi	200 à 350	5/10	50/60
D livraisons	livraisons en ville ou microbus	800 à 1 200	15/20	50
E utilitaires	véhicules lourds de petit gabarit benne à ordures minibus	2 000 à 3 000	30/50	50

3.4. - STRATÉGIE D'INTRODUCTION SUR LE MARCHÉ

MESURES INCITATIVES

La plupart des réflexions actuelles sur le développement du véhicule électrique s'accordent pour dire que, dans une première étape, c'est le véhicule électrique utilitaire qui aura le rôle principal ; c'est le créneau qui semble, en effet, s'accomoder le plus facilement des contraintes imposées par la technique actuelle. Par contre, il ne semble pas possible d'envisager à court terme une diffusion grand public de véhicules électriques privés.

Cependant, en tout état de cause, même dans le cas des utilitaires, un « environnement » doit être créé pour inciter les entreprises à s'équiper de matériels à traction électrique. Cet « environnement » sera, en particulier, constitué par un ensemble de mesures réglementaires ou financières et par l'existence d'une infrastructure technique appropriée.

En ce qui concerne les mesures réglementaires et fiscales, il serait d'un grand intérêt que les autorités compétentes des divers pays aient un échange de vue sur la question, afin que les pouvoirs publics des pays intéressés ne prennent pas des mesures trop différentes les unes des autres. En France, certaines idées ont été avancées qui pourraient faciliter l'introduction sur le marché des véhicules électriques, notamment utilitaires :

— création d'un permis de conduire simplifié pour les véhicules électriques (mesure justifiée par la grande simplicité de conduite de ces véhicules) ;

— aménagement de la réglementation des livraisons urbaines dans un sens favorable aux véhicules électriques de livraison ;

— réduction du coût ou gratuité de la vignette pour les véhicules électriques ;

— réduction du tarif des assurances ;

— etc.

Ces mesures sont données à titre purement indicatif, car l'étude des conséquences de celles-ci sur le marché potentiel du véhicule électrique reste encore à faire.

ÉTUDES DE MARCHÉ

En France, à notre connaissance, aucune étude du marché potentiel du véhicule électrique n'a été faite d'une façon systématique. L'Institut de Recherche des Transports, avec le concours de la Régie Renault, a toutefois entrepris une intéressante étude paramétrique sur le véhicule urbain. Cette étude vise à examiner s'il existe des possibilités de développer un véhicule destiné plus particulièrement à la circulation urbaine, son marché potentiel étant examiné en fonction de divers paramètres. A ce véhicule, seraient assignés les deux objectifs prioritaires suivants :

— diminuer les nuisances (bruit et pollution atmosphérique),

— intéresser un industriel à sa production en série.

L'étude examinera la taille du marché potentiel en liaison avec les avantages pour la collectivité (réduction du bruit, de la pollution, influence sur le stationnement et la circulation).

A l'étranger, des études de cette catégorie ont déjà été entreprises :

— Aux U.S.A., une étude prospective a été faite pour le compte du « National Center for Air Pollution Control ».

Cette étude a défini le véhicule-type avec un cahier des charges pour chacune des classes de véhicules ci-dessous :

— autobus,
— taxi,
— livraison,
— utilitaire,
— voiturette urbaine,
— voiture 5-6 places.

Sur la base de ces cahiers des charges, une étude prospective de l'application de la propulsion électrique (à batteries, à pile à combustible et à système hybride) a été faite et, pour chaque cas, elle a essayé d'identifier la filière la plus intéressante.

— Aux U.S.A. également, une étude, menée à la demande de l'Electric Vehicle Council, a évalué le marché des différentes catégories de véhicules pouvant être remplacées par des véhicules électriques, compte tenu d'une part, du mode d'utilisation habituel des véhicules envisagés, et, d'autre part, des hypothèses de performances des véhicules électriques compatibles avec l'utilisation envisagée.

Ces études ont réussi à mettre en évidence que, parmi toutes les catégories de véhicules, le véhicule utilitaire urbain avait un marché facilement accessible, particulièrement pour le véhicule léger de livraison et que les minibus et les taxis constituaient des créneaux possibles. Ces résultats ont eu une certaine influence sur la politique de développement du véhicule électrique aux U.S.A. qui, actuellement, développent le minibus et la camionnette de livraison, alors qu'avant 1970, les prototypes réalisés étaient presque uniquement des voitures individuelles.

— En Belgique, une étude prospective générale a été faite en tenant compte :
  — des besoins de transport ;
  — des caractéristiques fondamentales des moyens de transport existants ;
  — de la structure des axes urbains de transport et de stationnement ;
  — des caractéristiques raisonnablement prévisibles de la voiture électrique et des contraintes imposées pour la protection de l'environnement ;

Les résultats de cette étude n'ont malheureusement pas été rendus publics.

— En Allemagne, il a été indiqué, lors d'une conférence de presse faite en 1971 par la R.W.E. que, en 1980, 10 % de tous les véhicules circulant en R.F.A. seraient propulsés par l'électricité.

3.5. - PROBLÈMES DE CIRCULATION POSÉS PAR LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE

Deux problèmes sont généralement considérés :

— **Sécurité**

Dans ce domaine, deux facteurs jouent en sens inverse :

a) le fait que le véhicule électrique ait, d'une part, une vitesse limitée et d'autre part, une bonne stabilité, joue en faveur de la sécurité ;

b) mais, en ce qui concerne la voiturette urbaine, le poids pris par les batteries amène à concevoir des véhicules de carrosserie ultra-légère et l'on peut se demander si l'on ne va pas exposer l'usager d'un tel véhicule à des risques accrus en cas de collision.

— **Circulation et stationnement**

Pour que la circulation urbaine ne soit pas gênée par les véhicules électriques, il faut que les performances de vitesse et d'accélération (en particulier au démarrage aux feux) soient équivalentes à celles des véhicules à moteur thermique. Mais la vitesse en agglomération étant limitée à 60 km/h (sauf exception), cette contrainte ne doit pas poser de gros problèmes, sauf pour certains mini-véhicules.

Ceci étant admis, les véhicules électriques ne peuvent avoir d'influence sur la circulation et l'encombrement que par leur aspect « faible encombrement » qui n'est toutefois pas l'apanage du véhicule électrique. On peut, alors, se poser les questions suivantes :

— **influence sur la circulation :** le développement de petits véhicules urbains incitera-t-il les usagers à les préférer à des véhicules plus encombrants, ce qui pourrait faciliter la circulation ou au contraire, ce développement risque-t-il d'augmenter le parc de véhicules (bimotorisation des ménages), ce qui aurait l'effet inverse ?

— **influence sur le stationnement :** il est bien évident que des petits véhicules stationneront plus facilement que des grands, mais là également, l'amélioration escomptée peut être annulée par l'accroissement du parc.

Chapitre IV

QUELQUES REPÈRES ÉCONOMIQUES

Il est très difficile et aléatoire de se prononcer sur les problèmes de coûts de construction et d'exploitation, et de chercher à faire des comparaisons entre des véhicules éprouvés et construits en série et des prototypes encore hésitants dans leur technologie.

Les pages qui suivent ne constituent même pas une tentative à cet égard ! Elles veulent simplement garder quelques traces de renseignements encore très fragmentaires.

4.1. - COUTS DE CONSTRUCTION

La plupart des véhicules électriques construits dans le monde à ce jour l'ayant été uniquement en quelques exemplaires et le plus souvent à titre d'expérimentation, leur prix de revient réel et, par conséquent, leur prix de vente éventuel au public, sont très mal connus.

Quelques types de véhicules sont commercialisés, mais il s'agit généralement, soit de petits véhicules correspondant aux créneaux des « golf-car » ou des véhicules urbains à deux places, soit de véhicules de livraison très spécialisés qui ne permettent pas de trouver l'équivalent à moteur thermique pour faire une comparaison.

Il est certain, en tout cas, que l'effet de série est d'une importance primordiale et, faute de renseignements plus précis, nous admettrons l'évaluation donnée par les spécialistes aux journées de Bruxelles (13 et 14 mars 1972) :

— pour une fabrication en petite série, le véhicule électrique serait de 80 à 130 % plus cher que son homologue thermique ;

— pour une fabrication en grande série (mais encore très en-dessous des séries habituelles de véhicules classiques) il serait 20 % plus cher que son homologue thermique.

Ces ordres de grandeur sont assez bien corroborés par des exemples connus pour des types de véhicules réalisés en petites séries, aussi bien dans la version thermique que dans la version électrique.

On peut citer notamment en Europe :

— **Les bennes tasseuses pour le ramassage des résidus urbains :**

— version thermique (SAVIEM - SM 13 BOM) .... 79,300 F H.T. (1972)
— version électrique (SOVEL - AS 19) ..... 103,000 F H.T. (1972)

— **Minibus de 20 places** (référence 1972)

— version thermique (Daimler Benz - carrosserie Amiot) .. 80 000 F H.T.
— version électrique (SOVEL - AS 9) ..... 85 000 F H.T.

Toutefois, il faut ajouter pour la version électrique, le poste de charge des batteries évalué à : 10 000 F H.T.

Le coût des batteries :

— 17 100 F H.T. pour les bennes tasseuses,

— 18 500 F H.T. pour le minibus,

peut être, selon les calculs, incorporé aux investissements ou considéré comme une charge d'exploitation (produit consommable).

Une autre comparaison peut être tentée avec des véhicules classiques adaptés à la traction électrique : c'est, par exemple, le cas des Renault 4 et 5 transformées par Electricité de France. On bénéficie alors, dans une certaine mesure, de la grande série pour la partie mécanique et la carrosserie, mais on doit adopter des solutions qui ne sont pas toujours les meilleures et utiliser la place au mieux, pour loger batteries, moteur et équipement électrique. (Certains « accessoires », boîte de vitesses, différentiel, inutiles pour un véhicule électrique ont été conservés).

Les coûts d'investissement sont alors (1972) :

— **Pour la R 4 :**

— 8 540 F pour le véhicule à moteur thermique ;
— 15 700 F pour le véhicule électrique (*).

— **Pour la R 5 :**

La version « électrique » présente des avantages que la version « thermique » n'a pas : non polluante, peu bruyante et pas de changement de

(*) Estimations.

vitesse. La version « thermique » de la R 5 a été évaluée avec boîte automatique et dispositifs anti-pollution et anti-bruit : ce qui a permis une comparaison plus valable :

— 13 500 F pour le véhicule à moteur thermique ;
— 20 400 F pour le véhicule électrique (*).

4.2. - COUTS D'EXPLOITATION

Pour les « flottes » de véhicules, bennes tasseuses et minibus que nous avons pris pour exemple, nous distinguerons :

— la consommation d'énergie électrique comptée au tarif de nuit (8 c/kWh) ;
— l'entretien (matières) ;
— le personnel d'entretien et de réparation considéré pour 10 véhicules.

Les chiffres retenus pour les comparaisons dans les tableaux ci-après ont été communiqués par différentes sociétés utilisant ces matériels et notamment les bennes tasseuses pour le ramassage des résidus urbains.

Pour les Renault 4 et 5, la consommation d'énergie a été calculée pour une utilisation de 10 000 km par an ; les frais d'entretien et de réparation ont été évalués par Renault et E.D.F. sur la base de l'exploitation de leurs propres véhicules.

4.3. - EXEMPLES DE BILANS GLOBAUX D'EXPLOITATION

(cf. tableaux - pages 70 à 81).

Il s'agit de bilans faits en 1972 à l'occasion des journées internationales d'Arc et Senans (1973) sur le véhicule électrique. Il est évident que ces calculs expriment une certaine tendance valable avant les récents

(*) Estimations.

problèmes d'approvisionnement énergétique. Le renchérissement du prix de l'essence est très défavorable au véhicule thermique et majore notablement son coût d'exploitation. Par contre, l'augmentation du loyer de l'argent pénalise le véhicule électrique, puisque cet élément financier accroît l'importance relative de l'investissement de départ. C'est pourquoi, ces deux effets, tendant à se compenser mutuellement, ne doivent donc pas remettre en cause fondamentalement les conclusions énoncées au début de 1973.

Il y a différentes manières d'établir une comparaison économique :

— on peut comparer des **coûts totaux actualisés** ramenés, par exemple, à la date d'achat du véhicule — on ajoute ainsi les coûts d'investissement et les charges d'exploitation durant la vie du véhicule « rapportées » à la date d'achat par affectation d'un coefficient d'actualisation choisi ;

— on peut, pour une durée de vie et une utilisation annuelle données, ramener les coûts totaux actualisés précédents **au km parcouru** ;

— on peut enfin, faire le **bilan annuel d'exploitation,** prenant en compte l'amortissement des sommes investies et les charges annuelles réelles.

C'est ce dernier mode de comparaison que nous avons retenu, car il est celui des sociétés d'exploitation qui nous ont communiqué leurs chiffres.

Les paramètres suivants ont été adoptés :

— taux d'intérêt annuel : 8 % ;

— coût de l'énergie électrique : 8 c/kWh ;

— durée de vie des batteries : 4 ans ;

— durée d'amortissement des véhicules :

	Moteur thermique	Moteur électrique
— Bennes tasseuses pour ramassage des résidus urbains	10 ans	15 ans
— Minibus de 20 places	6 ans	10 ans
— R 4 et R 5	5 ans	5 et 10 ans

Ces durées d'amortisement dont le choix est très important pour la comparaison économique, résultent pour les bennes tasseuses de l'expérience de l'exploitant. Des durées plus courtes mais sensiblement dans le même rapport ont été retenues pour le minibus 20 places.

Par contre, pour les véhicules R 4 et R 5 une fourchette très large de 5 à 10 ans a été prise pour la version électrique, car pour un véhicule

électrique issu d'un véhicule classique, deux hypothèses peuvent être envisagées (*) :

— si la durée de vie est limitée par la partie active : moteur, boîte de vitesse, etc., on estime qu'il faut prendre 5 ans pour la version thermique et 10 ans pour la version électrique ;

— si la durée de vie est limitée par la « caisse », identique dans les deux cas, il faut prendre 5 ans pour les deux versions.

Les coûts mensuels d'exploitation étant sensiblement identiques pour cette dernière hypothèse pessimiste, on peut donc en conclure qu'à coup sûr, le bilan est favorable au véhicule électrique.

Mais il ne faut pas manquer de souligner que le véhicule électrique reste un **véhicule urbain** alors que le véhicule à moteur thermique a des performances (vitesse et rayon d'action) bien meilleures qui lui permettent de circuler sur routes à grande circulation.

Cet avantage est très important dans la mesure où les dispositifs anti-pollution et anti-bruit dont il sera muni seront suffisamment efficaces pour qu'il puisse aussi être considéré comme un véhicule urbain.

(*) Dans leurs comparaisons économiques, les représentants de la Grande-Bretagne qui exploitent déjà 60 000 véhicules électriques admettent :

— 5 ans pour le véhicule à moteur thermique ;

— 15 ans pour le véhicule à moteur électrique, mais il s'agit dans ce cas d'un véhicule spécialement conçu pour la propulsion électrique.

Véhicule électrique	
RENSEIGNEMENTS DE BASE	COUT D'EXPLOITATION ANNUEL
Prix d'achat H.T. (1972) ..... 103 000 F Amortissement en 15 ans à 8 %	**Annuités :** $103\,000 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^{15}}{(1{,}08)^{15} - 1} = 12\,000$ F
Achat batterie FULMEN 96 volts, 768 A/H Prix H.T. ..... 17 600 F Reprise au bout de 4 ans ..... 500 F Coût batterie ..... 17 100 F	**Annuités :** $17\,100 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^{4}}{(1{,}08)^{4} - 1} = 5\,163$ F
Poste de charge de la batterie Prix H.T. ..... 10 000 F Amortissement en 30 ans	**Annuités :** $10\,000 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^{30}}{(1{,}08)^{30} - 1} = 650$ F
Consommation d'énergie électrique 23 Ah/km en moyenne — Rendement batterie ..... 0,8 — Rendement chargeur ..... 0,8 — Rendement global ..... 0,64 — Prix moyen du kWh ..... 0,08 F	**Annuités** pour 20 km/jour : $\dfrac{23 \times 96 \times 20}{1\,000 \times 0{,}64} \times 0{,}08 \times 312 = 1\,720$ F
Entretien (matière) — Contacteurs (semestriel) — Collecteur moteur (annuel) — Charbons moteurs (annuel) — Graissage (mensuel)	**Annuités** = 2 000 F
Personnel d'entretien et de réparation pour 10 véhicules — 1 technicien électricien (chef d'équipe) — 1 aide-technicien électricien — 1 mécanicien auto — 1 manœuvre (charge et niveau batterie) — 1 tôlier — 1 aide-tôlier Soit 0,6 homme/véhicule/an	**Annuités** = 14 700 F
	Coût total d'exploitation annuel ..... **36 233 F**

Remarque : Chaque coût total d'exploitation n'est cependant pas le coût total réel d'exploitation annuel, car dans ce calcul de comparaison, il n'a pas été tenu compte des charges identiques pour les deux types de véhicules, à savoir :

— les salaires et charges sociales des chauffeurs, les frais de pneumatiques, ainsi que les frais d'amortissement et d'entretien des bennes tasseuses elles-mêmes qui sont équivalents dans les deux cas considérés et se neutralisent donc dans le calcul.

En ce qui concerne les charges annuelles propres à chaque véhicule, nous voyons donc que celles entraînées par le véhicule électrique sont environ 32 %, soit presque un tiers, inférieures à celles du véhicule thermique équivalent.

MASSAGE DES RESIDUS URBAINS
VEL AS 19 ET UN CHASSIS THERMIQUE EQUIVALENT SAVIEM SM 13 - BOM

Véhicule thermique			
RENSEIGNEMENTS DE BASE		COUT D'EXPLOITATION ANNUEL	
Prix d'achat H.T. (1972) ..... 79 300 F Amortissement en 10 ans à 8 %		**Annuités :** $79\,300 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^{10}}{(1{,}08)^{10} - 1}$	= 11 812 F
Achat tous les 2 ans d'une batterie de démarrage de 300 F H.T.		**Annuités :** $\dfrac{300}{2}$	= 150 F
Consommation de fuel-oil en zone urbaine : 39 l aux 100 km haut le pied à vide 50 l aux 100 km haut le pied en charge 150 l aux 100 km en collecte Consommation moyenne : 110 l aux 100 km Prix du fuel-oil : 0,80 F le l		**Annuités :** $22^{1} \times 0{,}8 \times 312$	= 5 490 F
Entretien (matières) — Moteur diesel — Pompe d'injection et injecteur — Filtres — Embrayage — Boîte de vitesse — Pompe à eau — Graissage mensuel		**Annuités**	= 6 000 F
Personnel d'entretien et de préparation pour 10 véhicules — 1 technicien dieséliste (chef d'équipe) — 1 mécanicien motoriste — 1 aide-mécanicien — 2 mécaniciens auto — 1 électricien auto — 2 manœuvres (visites cycliques) — 1 tôlier — 1 aide-tôlier Soit 1 homme/véhicule/an		**Annuités**	= 24 500 F
		Coût total d'exploitation annuel	**47 952 F**

MINIBUS DE VISITE TOURISTIQUE OU

BILAN COMPARATIF D'EXPLOITATION ENTRE UN MINIBUS ELECTRIQUE SOVEL AS 9 B ET

Véhicule électrique	
RENSEIGNEMENTS DE BASE	COUT D'EXPLOITATION ANNUEL
Prix d'achat H.T. (1972) ..... 85 000 F Amortissement en 10 ans à 8 %	**Annuités :** $85\,000 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^{10}}{(1{,}08)^{10} - 1}$ = 12 662 F
Achat batterie FULMEN T. LP 9 144 volts, 576 Ah Prix H.T. ..... 19 000 F Reprise après 4 ans ..... 500 F *Coût batterie* ..... 18 500 F	**Annuités :** $18\,500 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^{4}}{(1{,}08)^{4} - 1}$ = 5 591 F
Poste de charge de la batterie Prix H.T. ..... 10 000 F Amortissement en 20 ans	**Annuités :** $10\,000 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^{20}}{(1{,}08)^{20} - 1}$ = 1 017 F
Consommation d'énergie électrique en zone urbaine 7 Ah/km en charge — Rendement batterie ..... 0,8 — Rendement chargeur ..... 0,8 — Rendement global ..... 0,64 — Prix moyen du kWh ..... 0,08 F	**Annuités** pour 50 km/jour : $\dfrac{7 \times 144 \times 50}{1\,000 \times 0{,}64} \times 0{,}08 \times 312$ = 1 964 F
Entretien (matières) — Contacteurs (semestriel) — Collecteur moteur (annuel) — Charbons moteur (annuel) — Graissage (mensuel)	**Annuités** = 2 000 F
Personnel d'entretien et de réparation pour 10 véhicules — 1 technicien électricien (chef d'équipe) — 1 aide-technicien électricien — 1 mécanicien auto — 1 manœuvre (charge et niveau batterie) Soit 0,4 homme/véhicule/an	**Annuités** = 9 800 F
	Coût total d'exploitation annuel ..... **33 034 F**

Remarque I : Chaque coût total d'exploitation n'est cependant pas le coût d'exploitation annuel, car dans ce calcul de comparaison, il n'a pas été tenu compte des charges identiques pour les deux types de véhicules, à savoir les salaires et charges sociales de chauffeurs, les frais de pneumatiques, ainsi que les frais d'entretien et de réparation des carrosseries, qui sont équivalents dans les deux cas considérés et se neutralisent donc mutuellement dans le calcul.

En ce qui concerne les charges annuelles propres à chaque véhicule nous voyons donc que celles entraînées par le véhicule électrique sont environ 17,6 % inférieures à celles du véhicule thermique équivalent.

ASSAGE SCOLAIRE (20 places assises)

IBUS DAIMLER-BENZ A MOTEUR-THERMIQUE TYPE L P 608 A CARROSSERIE AMIOT DE DINAN

Véhicule thermique	
RENSEIGNEMENTS DE BASE	COUT D'EXPLOITATION ANNUEL
Prix d'achat H.T. (1972) ..... 80 000 F Amortissement en 6 ans à 8 %	**Annuités :** $80\,000 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^6}{(1{,}08)^6 - 1}$ = 17 247 F
Achat tous les 2 ans d'une batterie de démarrage de 300 F H.T.	**Annuités :** $\dfrac{300}{2}$ = 150 F
Consommation de fuel-oil en zone urbaine : 25 l aux 100 km Prix du fuel-oil : 0,80 F le l	**Annuités** pour 50 km/jour : $\dfrac{25 \times 50 \times 0{,}80 \times 312}{100}$ = 3 212 F
Entretien (matières) — Moteur diesel — Pompe d'injection et injecteur — Filtres — Embrayage — Boîte de vitesse — Pompe à eau — Graissage mensuel	**Annuités** = 6 000 F
Personnel d'entretien et de réparation pour les véhicules — 1 technicien dieséliste (chef d'équipe) — 1 mécanicien motoriste — 1 mécanicien auto — 1 électricien auto — 1 manœuvre (visites cycliques) Soit 0,5 hommes/véhicule/an	**Annuités** = 12 250 F
Coût total d'exploitation annuel ..... **38 859 F**	

Remarque II : Le minibus à moteur thermique choisi pour la comparaison de prix avec le minibus à propulsion électrique, compte parmi l'un des cher de la gamme. I s'agit d'un autobus Mercedes-Benz, type LP 608. Ce choix a été motivé pour équilibrer les chances du minibus électrique dont le prix de vente a été déterminé par SOVEL sur une base de fabrication de **trois** prototypes seulement.

RENAULT R 4

BILAN COMPARATIF D'EXPLOITATION ENTRE U
ET UNE BERLINETTE IDENTIQ

calculé sur une base d'utilisation de 250 jo

Véhicule électrique		**10 ans**
RENSEIGNEMENTS DE BASE		COUT D'EXPLOITATION ANNUEL
Prix de revient H.T. (1972) ..... 15 700 F T.V.A. récupérable Amortissement en 10 ans avec intérêt de 8 % Récupération possible de la partie mécanique ..... 500 F et de la moitié de la partie électrique ..... 2 000 F 2 500 F **Valeur résiduelle** ..... 13 200 F		**Annuités :** $13\,200 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^{10}}{(1{,}08)^{10} - 1}$ = 1 960 F
Consommation d'énergie pour 10 000 km/an 2 500 kWh à 8 c. ..... 200 F et consommation d'une batterie à .. 3 920 F tous les 4 ans		**Annuités :** $200 + \dfrac{3\,920}{4}$ = 1 180 F
Entretien et réparations Matière et main-d'œuvre		**Annuités** = 775 F prise par convention égale à la moitié de celle du véhicule thermique
Assurance		**Annuités** = 500 F prise par convention égale à celle du véhicule thermique
Coût d'exploitation annuel ..... **4 415 F**		
d'un véhicule électrique R 4 E.D.F. dans la région parisienne pour 10 000 km/an, soit : **0,44 F le km**		
LES DEUX COUTS D'EXPLOITATI(		

(1) D.R.I.F. - Direction Régionale Ile-de-France d'E.D.F. qui supervise les six Centres de Distribution Mixte Ile-de-France Nord, Sud, Est et Ouest, les Centres Mixtes de Versailles et de Melun et le Centre gazier de la proche banlieue de Paris (C.C.P.B.P.).

LINETTE RENAULT R 4 S ELECTRIQUE
IOTEUR THERMIQUE

ables à 40 km/jour, soit 10 000 km/an

Véhicule thermique		5 ans
RENSEIGNEMENTS DE BASE		COUT D'EXPLOITATION ANNUEL
Prix d'achat T.T.C. (1972)	8 540 F	
T.V.A. non récupérable		**Annuités :**
Amortissement en 5 ans avec intérêt de 8 %		$7\,540 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^5}{(1{,}08)^5 - 1}$ = 1 890 F
Récupération possible de la partie mécanique	1 000 F	
Valeur résiduelle	7 540 F	
Consommation d'essence		**Annuités :**
en zone urbaine de la région parisienne		$\dfrac{12{,}5 \times 40 \times 1{,}12 \times 250}{100}$ = 1 400 F
12,15 au 100 km × 1,12 le l		
pour 40 km/jour - 250 jours par an		
Entretien et réparations		
Matière et main-d'œuvre		**Annuités** = 1 550 F
Valeur moyenne sur le territoire de la D.R.I.F. (1) en 1971		
Assurance		**Annuités** = 500 F
Valeur de la prime contrat général E.D.F.-G.D.F. pour Renault R 4 en 1972		
Coût d'exploitation annuel		**5 340 F**

d'un véhicule thermique R 4 E.D.F. dans la région parisienne pour 10 000 km/an, soit : **0,534 F le km**

NT DONC PRESQUE IDENTIQUES

BILAN COMPARATIF D'EXPLOITATION ENTRE U
ET UNE BERLINETTE IDENTIQ

calculé sur une base d'utilisation de 250 j

Véhicule électrique		**5 ans**
RENSEIGNEMENTS DE BASE		COUT D'EXPLOITATION ANNUEL
Prix de revient H.T. (1972) ..... 15 700 F T.V.A. récupérable Amortissement en 5 ans avec intérêt de 8 % Récupération possible de la partie mécanique ..... 500 F et de la moitié de la partie électrique ..... 2 000 F 2 500 F **Valeur résiduelle** ..... 13 200 F		**Annuités :** $13\,200 \dfrac{0{,}08\,(1{,}08)^5}{(1{,}08)^5 - 1}$ = 3 300 F
Consommation d'énergie pour 10 000 km/an 2 500 kWh à 8 c. ..... 200 F et consommation d'une batterie à .. 3 920 F tous les 4 ans		**Annuités :** $200 + \dfrac{3\,920}{4}$ = 1 180 F
Entretien et réparations Matière et main-d'œuvre		**Annuités** = 775 F prise par convention égale à la moitié de celle du véhicule thermique
Assurance		**Annuités** = 500 F prise par convention égale à celle du véhicule thermique
Coût d'exploitation annuel ..... **5 755 F**		
d'un véhicule électrique R 4 E.D.F. dans la région parisienne pour 10 000 km/an, soit : **0,575 F le k**		
LES DEUX COUTS D'EXPLOITAT		

(1) D.R.I.F. - Direction Régionale Ile-de-France d'E.D.F. qui supervise les six Centres de Distribution Mixte Ile-de-France Nord, Sud, Est et Ouest, les Centres Mixtes de Versailles et de Melun et le Centre gazier de la proche banlieue de Paris (C.C.P.B.P.).

LINETTE RENAULT R 4 S ELECTRIQUE
MOTEUR THERMIQUE

rables à 40 km/jour, soit 10 000 km/an

Véhicule thermique		**5 ans**
RENSEIGNEMENTS DE BASE		COUT D'EXPLOITATION ANNUEL
Prix d'achat T.T.C. (1972)	8 540 F	
T.V.A. non récupérable		**Annuités :**
Amortissement en 5 ans avec intérêt de 8 %		$7\,540 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^5}{(1{,}08)^5 - 1}$ = 1 890 F
Récupération possible de la partie mécanique	1 000 F	
Valeur résiduelle	7 540 F	
Consommation d'essence		**Annuités :**
en zone urbaine de la région parisienne		$\dfrac{12{,}5 \times 40 \times 1{,}12 \times 250}{100}$ = 1 400 F
12,15 au 100 km × 1,12 le l		
pour 40 km/jour - 250 jours par an		
Entretien et réparations		
Matière et main-d'œuvre		**Annuités** = 1 550 F
Valeur moyenne sur le territoire de la D.R.I.F. (1) en 1971		
Assurance		
Valeur de la prime contrat général E.D.F.-G.D.F. pour Renault R 4 en 1972		**Annuités** = 500 F

Coût d'exploitation annuel ..... **5 340 F**

d'un véhicule thermique R 4 E.D.F. dans la région parisienne pour 10 000 km/an, soit : **0,534 F le km**

NT DONC PRESQUE IDENTIQUES

BILAN COMPARATIF D'EXPLOITATION EN
ET UN VEHICULE IDENTI

calculé d'après des prix toutes taxes compr
et des prix de revient E.D.F. en ce qui conc

Véhicule électrique			**5 ans**
RENSEIGNEMENTS DE BASE		COUT D'EXPLOITATION ANNUEL	
Prix de revient T.T.C.	20 400 F		
Amortissement en 5 ans avec intérêt à 8 %		**Annuités :**	
Récupération possible de la partie mécanique ..... 500 F		$17\,900 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^5}{(1{,}08)^5 - 1}$	= 4 475 F
et de la moitié de la partie électrique ..... 2 000 F			
	2 500 F		
Valeur résiduelle	17 900 F		
Consommation d'énergie pour 10 000 km/an			
2 500 kW × 8 c	200 F	**Annuités :**	
et consommation d'une batterie 280 Ah 500 cycles à	4 000 F	$200 + \dfrac{4\,000}{4}$	= 1 200 F
en 4 ans			
Entretien et réparations		**Annuités**	= 750 F
Matière et main-d'œuvre		prise par convention égale à la moitié de celle du véhicule thermique	
Assurance			
Valeur prise par convention égale à celle du véhicule thermique		**Annuités**	= 1 300 F
Coût d'exploitation annuel			**7 725 F**

d'une R 5 à moteur thermique en conduite urbaine pour 10 000 km/an, soit **0,77 F le km**

E RENAULT R 5 ELECTRIQUE
MOTEUR THERMIQUE

nis par la Régie Renault
uipement des véhicules électriques

Véhicule thermique	5 ans
RENSEIGNEMENTS DE BASE	COUT D'EXPLOITATION ANNUEL
Prix de vente T.T.C. ..... 13 500 F comprenant boîte automatique, dispositif anti-pollution et anti-bruit Amortissement en 5 ans à 8 % d'intérêt Récupération possible du véhicule .. 1 000 F **Valeur résiduelle** ..... 12 500 F	**Annuités :** $12\,500 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^5}{(1{,}08)^5 - 1} = 3\,125$ F
Consommation d'essence *en zone urbaine de la région parisienne* 10 l au 100 km × 1,19 F le l	**Annuités** pour 40 km/jour : $\dfrac{10 \times 40 \times 1{,}19 \times 250}{100} = 1\,190$ F
Entretien et réparations Matière et main-d'œuvre	**Annuités** = 1 500 F prise par convention égale à celle du véhicule thermique R 4 en exploitation dans les centres E.D.F. de la région parisienne
Assurance *Valeur relevée pour ce type de véhicule sur le barême 1972, calcul prix de revient kilométrique de l'auto-journal*	***Annuités*** = *1 300 F*
Coût d'exploitation annuel ..... **7 115 F**	

d'une R 5 électrique en conduite urbaine pour 10 000 km/an, soit **0,71 F le km**

BILAN COMPARATIF D'EXPLOITATION EN
ET UN VEHICULE IDENTI

calculé d'après des prix toutes taxes compr
et des prix de revient E.D.F. en ce qui conc

Véhicule électrique		**10 ans**
RENSEIGNEMENTS DE BASE		COUT D'EXPLOITATION ANNUEL
Prix de revient T.T.C.	20 400 F	
Amortissement en 10 ans avec intérêt à 8 %		**Annuités :**
Récupération possible de la partie mécanique ..... 500 F		$17\,900 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^{10}}{(1{,}08)^{10} - 1}$ = 2 660 F
et de la moitié de la partie électrique ..... 2 000 F		
	2 500 F	
Valeur résiduelle	17 900 F	
Consommation d'énergie pour 10 000 km/an		
2 500 kW × 8 c	200 F	**Annuités :**
et consommation d'une batterie 280 Ah 500 cycles à	4 000 F	$200 + \dfrac{4\,000}{4}$ = 1 200 F
en 4 ans		
Entretien et réparations		**Annuités** = 750 F
Matière et main-d'œuvre		prise par convention égale à la moitié de celle du véhicule thermique
Assurance		
Valeur prise par convention égale à celle du véhicule thermique		**Annuités** = 1 300 F
Coût d'exploitation annuel		**5 910 F**

d'une R 5 électrique en conduite urbaine pour 10 000 km/an, soit **0,59 F le km**

NE RENAULT R 5 ELECTRIQUE
MOTEUR THERMIQUE

urnis par la Régie Renault
quipement des véhicules électriques

Véhicule thermique		5 ans
RENSEIGNEMENTS DE BASE		COUT D'EXPLOITATION ANNUEL
Prix de vente T.T.C. ..... 13 500 F comprenant boîte automatique, dispositif anti-pollution et anti-bruit Amortissement en 5 ans à 8 % d'intérêt Récupération possible du véhicule .. 1 000 F **Valeur résiduelle** ..... 12 500 F		**Annuités :** $12\,500 \dfrac{0{,}08\ (1{,}08)^5}{(1{,}08)^5 - 1}$ = 3 125 F
Consommation d'essence en zone urbaine de la région parisienne 10 l au 100 km × 1,19 F le l		**Annuités** pour 40 km/jour : $\dfrac{10 \times 40 \times 1{,}19 \times 250}{100}$ = 1 190 F
Entretien et réparations Matière et main-d'œuvre		**Annuités** = 1 500 F prise par convention égale à celle du véhicule thermique R 4 en exploitation dans les centres E.D.F. de la région parisienne
Assurance Valeur relevée pour ce type de véhicule sur le barême 1972, calcul prix de revient kilométrique de l'auto-journal		**Annuités** = 1 300 F
	Coût d'exploitation annuel	**7 115 F**

d'une R 5 à moteur thermique en conduite urbaine pour 10 000 km/an, soit **0,71 F le km**

Chapitre V

RÉALISATIONS ET PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT

5.1. - DANS LE MONDE

Nous ne pouvons, dans le cadre de cet ouvrage, donner la liste complète des véhicules électriques réalisés dans le monde.

L'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Parisienne (I.A.U.R.P.) et le Service Régional de l'Equipement (S.R.E.) ont publié, en juin 1971, une étude intitulée « Où en est le véhicule électrique » qui donnait déjà la description d'une centaine de réalisations récentes (dont 29 pour les U.S.A., 23 pour le Japon, 18 pour la Grande-Bretagne, 5 pour la France).

Nous tenterons donc plutôt de définir la situation actuelle du véhicule électrique, son état d'avancement et les perspectives de développement dans quelques pays où le problème a été sérieusement abordé.

Dans cet énoncé, nous serons malheureusement très incomplets, car tous les pays n'accordent pas une publicité suffisante à leurs travaux dans ce domaine et souvent, les réalisations les plus intéressantes faites par des constructeurs d'automobiles restent secrètes pour des raisons inhérentes aux conditions de concurrence qui règnent dans la profession.

Certains congrès, comme le « Third International Electric Vehicle Symposium » qui s'est tenu à Washington du 19 au 21 février 1974, permettent cependant de comparer les efforts consentis dans les différents pays. Un compte rendu succinct de cette manifestation est donné en annexe.

ETATS-UNIS

Au départ, le problème est mal posé du fait des caractéristiques demandées pour les véhicules américains et, malgré les efforts des constructeurs pour mettre au point de nouveaux accumulateurs ou une pile à combustible, aucune issue ne semble possible.

On tente alors la transformation de modèles plus petits : « Opel Kadett » et « Renault 16 » par exemple, mais dont le poids est porté à 2 tonnes par la charge de batterie. Quelques constructeurs même se lancent dans la réalisation de mini-voitures 2 places dont certaines ont des performances intéressantes, mais qui n'ont pratiquement pas été commercialisées.

Mais tout récemment, un constructeur de Détroit a annoncé qu'il envisageait de lancer sur le marché l'« Electricar », réalisé avec une carrosserie de voiture compacte « Gremlin » de l'American Motors dans laquelle seront installées des batteries au cobalt d'un nouveau modèle.
Performances : 160 km à 100 km/h.
Prix : 4 000 dollars (env. 18 000 francs).

Mille commandes seraient déjà enregistrées, dont plusieurs de la Compagnie « Avis » de locations d'automobiles. Les premiers modèles étaient promis pour le courant de l'été 1973. Au 1er mai 1974, il ne semble pas que des véhicules de ce type aient encore été livrés.

JAPON

Après les Etats-Unis, le Japon est probablement le pays qui a réalisé le plus de prototypes de véhicules électriques.

Parmi des réalisations intéressantes en petites voitures et minibus, citons la « Subaru-Sony » 2 places, charge utile 100 kg, autonomie 250 km à 80 km/h équipée d'accumulateurs à poudre de zinc.

Nous manquons malheureusement d'informations sur les travaux qui se poursuivent actuellement au Japon, mais il semble que des programmes importants soient envisagés.

GRANDE-BRETAGNE

Plusieurs prototypes de petits véhicules électriques ont été réalisés depuis 1966 en Grande-Bretagne et au moins l'un d'entre-eux est actuellement commercialisé. Il s'agit de l'Enfield 465, véhicule urbain 2 places + 2 enfants, confortable et élégant, performances : vitesse 55 km/h, autonomie max. : 80 km, en milieu urbain : 60 km.

Mais ce sont surtout des camionnettes électriques de livraison qui se sont répandues en Angleterre notamment pour les livraisons nocturnes de lait et de journaux.

La Société HARBILT a fabriqué plusieurs milliers de camionnettes de 1 250 à 2 250 kg de charge utile (poids total de 2 600 à 5 000 kg) et dont les performances varient de :

— 19 à 35 km/h pour la vitesse,

— 28 à 80 km pour l'autonomie.

Aux journées d'Arc et Senans, en février 1973, les représentants de la Grande-Bretagne ont annoncé que plus de 60 000 véhicules électriques circulaient dans leur pays et qu'ils expérimentaient un véhicule équipé d'une batterie d'accumulateurs sodium-soufre.

Le perfectionnement de ce type d'accumulateurs qui ne fournit actuellement que 75 Wh/kg — soit le double des batteries au plomb — conduira certainement à un important développement des véhicules électriques.

REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE

La presque totalité des efforts en R.F.A. a porté sur la réalisation de camionnettes de livraison et d'autobus, créneaux considérés comme les plus intéressants pour la traction électrique à accumulateurs.

Les sociétés GES et SELAK de Düsseldorf ont été créées par la société de distribution d'électricité R.W.E. (Rheinisch Westfaliches Elektrizitätswerk) en janvier 1971 pour développer et promouvoir, en collaboration étroite avec les constructeurs intéressés, des véhicules à propulsion électrique et ces deux sociétés ont une activité très efficace.

Sous leur impulsion, la société Volkswagen a construit 20 véhicules utilitaires qui sont en cours d'essai à Düsseldorf et Essen. Selon les résultats de cette expérimentation, des pré-séries de 200 puis 2 000 véhicules pourraient être lancées. Les firmes Messerschmidt, Bölkow et Blohm ont mis au point un autre type de véhicule utilitaire et des minibus ont été également construits par Volkswagen et Messerschmidt.

Deux réalisations intéressantes pour les autobus électriques :

— **Autobus MAN :** (Société MAN-BOSCH-VARTA et R.W.E.) mis en service et exploité à Coblence en 1970.

Les accumulateurs sont disposés dans une remorque et l'échange peut s'effectuer rapidement.

Performances :

autonomie : 50 km en utilisation normale,

vitesse : 60 km/h.

— **Autobus MERCEDES-BENZ :** réalisé par Daimler-Benz en collaboration avec Bosch et Varta. Il s'agit d'un véhicule hybride diesel-générateur-batteries au plomb — prévu pour transporter 66 personnes à 70 km/h.

ITALIE

Quelques réalisations en 1967-1968 dont les plus intéressantes ont été :

— l'Urbanina : petit véhicule urbain 2 places ;

— la Rowan : véhicule urbain 2 places + 2 enfants — carrosserie très élégante et rationnelle (performances : 200 km à 60 km/h).

Le véhicule « Urbanina » a été expérimenté en France par E.D.F. et des défaillances importantes sont apparues dans le fonctionnement de certains éléments mécaniques et électriques.

Depuis, l'Italie, par l'intermédiaire de FIAT, a annoncé qu'une voiture particulière et un autobus hybride étaient en cours d'étude.

U.R.S.S.

Très peu de renseignements sur les réalisations soviétiques. Dix exemplaires d'une petite voiture ayant une autonomie de 100 km à 60 km/h devaient être expérimentés à Moscou en 1971.

AUTRES PAYS

Quelques prototypes ont été construits par les pays suivants : Australie, Belgique, Canada, Pays-Bas, République Populaire de Chine, Suède, mais aucun programme important ne semble prévu dans ces pays.

5.2. - EN FRANCE

Le véhicule électrique est suivi avec de plus en plus d'attention, en France, par les laboratoires d'étude et, maintenant, par les grands constructeurs, les fabricants de moteurs électriques ou d'accumulateurs, cependant que quelques sociétés spécialisées n'ont jamais « perdu la main » dans ces domaines.

Les pouvoirs publics, du fait notamment des préoccupations d'environnement multiplient depuis quelques années leur marque d'intérêt pour les véhicules non polluants et non bruyants.

Depuis 1965, des crédits de l'Etat ont été accordés par le canal de la Délégation générale à la Recherche scientifique et technique à des laboratoires pour faire progresser les accumulateurs classiques, mettre au point des accumulateurs nouveaux et des piles à combustible, dont la principale application serait l'utilisation sur des véhicules électriques. Ces cinq dernières années, les crédits accordés étaient, en moyenne, de l'ordre de cinq millions de francs par an, soit environ 15 % des crédits de recherche destinés aux transports.

Les efforts entrepris dans le domaine des sources d'énergie ont déjà permis d'obtenir des résultats très intéressants sur des accumulateurs classiques au plomb, dont les performances ont été sensiblement multipliées par deux.

Par ailleurs, les études sur les accumulateurs sodium-soufre progressent régulièrement.

Il est aussi nécessaire de mentionner l'avancement des recherches sur les piles zinc-air et d'indiquer les espoirs que cette technique fait naître. Les expérimentations qui vont être entreprises montreront si la confiance actuelle est justifiée.

En ce qui concerne les piles à combustible, après plusieurs études préliminaires sur diverses filières, les efforts d'aide à la recherche ont été concentrés plus particulièrement sur une pile au méthanol.

Néanmoins, des recherches se poursuivent aussi avec succès sur une pile à hydrogène, et les pouvoirs publics ont décidé récemment de financer des travaux sur les problèmes de stockage de l'hydrogène.

Quelques efforts sont, d'autre part, consentis dans le domaine des sources d'énergies hybrides électriques.

Enfin, des études de faisabilité, d'un caractère plus prospectif, vont être engagées à l'initiative des pouvoirs publics dans d'autres domaines ; c'est le cas, par exemple, de l'effet thermo-ionique.

EXPERIMENTATIONS ET REALISATIONS SEMI-INDUSTRIELLES

Ce n'est qu'en 1969, que la France voit réapparaître sur le marché un véhicule électrique de conception nouvelle, réalisé par les frères Jarret. Il s'agit d'un engin à trois roues, piloté au moyen d'un levier remplaçant à la fois volant, frein et accélérateur. Conçu essentiellement pour la desserte d'enceintes couvertes, il permet de transporter deux passagers à la vitesse de 25 à 30 km/h (autonomie : 50 km).

De même, la société BERTIN et Cte réalise un petit véhicule urbain à trois roues — 2 places — vitesse : 50 km/h — autonomie : 70 à 110 km.

A cette même époque, les constructeurs de matériel électrique et les distributeurs d'électricité (E.D.F.) commencent à se préoccuper sérieusement du problème.

La Compagnie Générale d'Electricité met au point, avec l'ingénieur Grégoire, un véhicule de petites livraisons spécialement conçu pour la traction électrique — châssis en alliages légers — carrosserie plastique à portes latérales coulissantes — suspension pneumatique par pistons et coussins d'air à basse pression (brevet J.-A. Grégoire).

Vitesse :

— en mode économique : 60 km/h ;
— en mode rapide : 80 km/h.

Autonomie :

130 km.

Batterie au plomb de 96 volts en bacs polyéthylène et d'un poids de 400 kg.

Moteur : 14,6 kW (20 ch.) à 1 000 tr/mn.

Electricité de France suit une autre voie, celle de l'équipement en traction électrique de véhicules classiques. Après avoir expérimenté différents prototypes étrangers, E.D.F. équipe 6 véhicules Renault 4 L avec différents systèmes batteries-moteurs-commandes.

La version électrique est conçue comme voiture de liaison ou véhicule de petites livraisons (2 places + 50 kg ou 1 place + 125 kg). Vitesse de pointe : 70 km/h. Autonomie : 70 à 100 km.

La faisabilité de petits véhicules urbains ou de voitures de liaison ou de petites livraisons est ainsi démontrée, mais ni la Compagnie Générale d'Electricité, ni E.D.F., ni Bertin n'ont pour vocation de construire des véhicules automobiles et un relais doit être assuré pour permettre le développement, d'abord à un stade pré-industriel, puis à un stade industriel de tels véhicules.

Etant donné les avantages que présente ce type de transport urbain pour l'environnement, E.D.F. propose un programme de développement portant sur une centaine de véhicules électriques.

Ce programme financé en grande partie par E.D.F. est soumis au Comité Interministériel d'Action pour la Nature et l'Environnement du 27 janvier 1972 qui accorde un crédit de 1 750 000 francs sous réserve de l'attribution d'un montant équivalent en crédits de recherches et de recherche-développement.

Le Service Régional d'Equipement de la Région Parisienne accorde pour sa part, une contribution financière de 750 000 francs à ce programme.

Les véhicules ont tout d'abord été expérimentés en « champ clos », c'est-à-dire, dans des centres E.D.F. où ils ont été exploités et mis au point par des techniciens.

Les premiers résultats d'exploitation ont été assez satisfaisants (taux de disponibilité situé entre 0,9 et 0,95 %) et ont permis entre autres :

— de préciser les consommations spécifiques de tels véhicules dans des conditions réelles d'exploitation : 0,45 kWh/km pour un arrêt tous les 500 m environ et avec un taux de décharge de batterie de 50 % ;

— de montrer la nécessité d'améliorer le fonctionnement des auxiliaires : indicateur de charge, alimentation des auxiliaires, relayage de sécurité ;

— de faire un choix concernant les composants de la chaîne de traction des futures réalisations de véhicules utilitaires légers.

Une deuxième phase d'expérimentation dite « en champ ouvert » permettra de mettre à la disposition d'utilisateurs non spécialisés les véhicules qui seront ainsi testés dans des conditions normales de service.

Pour suivre et coordonner les travaux de ce programme, un groupe de travail interministériel sur les véhicules électriques, dont M. Saulgeot, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées, assure la présidence, a été mis en place.

Ce groupe comprend des représentants des différents ministères chargés :

— de l'Equipement ;

— des Transports ;

— de l'Industrie ;

— de l'Environnement ; ainsi que les représentants des constructeurs concernés.

Un sous-groupe a été constitué pour étudier spécialement les sources d'énergie dont les progrès conditionnent le succès des véhicules électriques.

Ce groupe et ce sous-groupe ont permis des confrontations utiles et fécondes entre les représentants de l'Administration et ceux des différents constructeurs.

Par ailleurs, un accord a été signé entre E.D.F. et TREGIE (groupement d'intérêt économique constitué par Renault, Saviem et SERI). Cet accord a fixé trois orientations principales au programme de travaux :

- recherches pour l'amélioration des composants de la chaîne de traction ;
- conception, réalisation et expérimentation de prototypes ;
- traction électrique des systèmes de transports en milieu urbain.

Les créneaux sur lesquels devrait porter l'effort d'E.D.F. et de TREGIE sont les suivants :

— autobus de 20 à 100 places et véhicules urbains lourds ;

— camionnettes de livraison urbaine et minibus de 6 à 20 places ;

— véhicules urbains de service et de petites livraisons ou privés.

Dans ce cadre, la construction de 10 R 5 électriques a été décidée. Une pré-série d'une cinquantaine de R 5 destinées à une utilisation par les services d'E.D.F. devrait être lancée prochainement.

En outre, le Ministère chargé de l'Environnement a accordé à TREGIE une subvention de 500 000 F pour la réalisation expérimentale de deux « Estafettes » électriques, l'une pour le transport de personnes, l'autre pour le transport de marchandises. Ces deux prototypes qui devraient être construits en avril 1975 seront testés pendant l'été suivant et la faisabilité d'une réalisation industrielle sera étudiée.

D'autres constructeurs ont réalisé et mis sur le marché de petits véhicules électriques, on peut citer notamment :

— **La société « La Voiture Electronique »** qui propose :

- le « Cob » véhicule de livraison qui doit être commercialisé courant 1975 :
  charge utile : 200 kg (+ chauffeur) ;
  vitesse : 50 km/h ;
  autonomie : 70 km.

— **La société TEILHOL** qui propose :

- la « Citadine » petit véhicule 2 places à trois roues :
  vitesse : 50 km/h ;
  autonomie : 60 km.

— **Les établissements CEDRE** construisent un petit véhicule à 3 roues :

- 1 place + 50 kg de bagages ou 2 enfants de moins de huit ans ;
- en 3 modèles :

vitesses :	18 km/h	25 km/h	45 km/h
autonomies :	35 km	25 km	40 km

— En outre, Citroën a lancé, depuis quelques années, des études importantes dans le domaine des véhicules électriques. Cependant, à ce jour, *aucune expérimentation officielle n'a été annoncée.*

— Un autre grand de l'automobile en France, Peugeot, vient de présenter les résultats de ses travaux. Il s'agit de camionnettes électriques de type J 7 qui ont des performances leur permettant de s'insérer parfaitement dans le trafic.

Vitesse maximum : 80 km/h.
Aptitude en côte : 20 % à 25 km/h.
400 m départ arrêté : 25 secondes.
1 000 m départ arrêté : 55 secondes.
Autonomie en ville : 60 km.
Charge utile : 900 kg.

En outre, Peugeot a transformé un coupé 104 en véhicule électrique.

— Enfin, dans une autre gamme de véhicules, la société Sovel, qui réalise depuis longtemps des bennes de ramassage d'ordures ménagères électriques, propose un autobus électrique :

- 19 places assises + 30 debout + chauffeur :
  vitesse : 60 km/h ;
  autonomie : 60 à 70 km.

6 exemplaires ont été commandés par Electricité de France et 3 d'entre eux ont été mis en service durant le premier semestre 1974 sur des lignes de transport en commun dans les villes nouvelles de Saint-Quentin-en-Yveline, Evry et Marne-la-Vallée.

PERSPECTIVES POUR L'AVENIR

Les efforts entrepris depuis quelques années commencent à porter leurs fruits. Les recherches progressent. Les constructeurs automobiles, les fabricants de composants sont décidés à résoudre les problèmes techniques et à aborder une phase beaucoup plus active.

De leur côté, les pouvoirs publics interviennent et donnent leur appui aux recherches et expérimentations. Les réunions du groupe interministériel « Véhicules Electriques » suscitent de plus en plus d'intérêt et permettent de mettre en présence les différents secteurs concernés. Un colloque (*), organisé au Centre International du Futur, à Arc et Senans (« Véhicule Electrique, promesse ou réalité »), a permis de réunir les responsables de l'administration, les urbanistes, les constructeurs de matériels électriques et les constructeurs automobiles, les chercheurs des différents pays d'Europe et des Etats-Unis.

Le groupe interministériel « Véhicules Electriques » prépare maintenant l'étape suivante, en tenant compte des résultats technologiques déjà obtenus, des études en cours et des événements récents. Le rapport qui servira de conclusion à ce travail permettra de mieux définir les orientations à donner aux efforts des pouvoirs publics et de mieux coordonner les actions.

Tout un ensemble de mesures est envisagé par les pouvoirs publics pour promouvoir le véhicule électrique, articulé autour des principes suivants :

— L'Etat doit rester neutre par rapport à la technologie en soi ; il n'a pas à se faire « in se » l'avocat du véhicule électrique. Il doit, en tout état de cause, laisser libres les évolutions et ne pas les bloquer.

La collectivité publique doit donc laisser les techniques diffférentes évoluer à l'intérieur de la loi, des textes et des réglementations. C'est dire qu'elles ne doivent pas s'attacher à une technologie déterminée avec le risque de la fixer.

— La mission de la puisance publique consiste à accélérer les processus plutôt qu'à créer. Les innovations finissent toujours par faire leur chemin lorsqu'elles correspondent à une utilité sociale. Mais, il est bon, souvent, de gagner quelques années et de préparer une sorte « d'accouchement sans douleur ».

Il peut être intéressant d'accélérer l'évolution, même sur un créneau limité pour permettre aux décideurs de se mettre mieux en phase avec la technique. Il en est ainsi, par exemple, pour la voiture électrique non seulement des professions induites (réparateurs, etc.) mais surtout des responsables de l'aménagement urbain qui auront à prévoir, en temps utile, des structures d'accueil ; ces dernières, on le sait, présentent des contraintes d'hystérésis considérables. Paris ne peut pas changer sa structure de transport en moins de 20 ans. C'est une raison pour aller plus vite.

L'intervention de la collectivité, en accélérant le processus d'innovation, peut permettre de préparer une évolution sans heurts ou de la pro-

(*) Voir annexe n° 1.

voquer. L'évolution technologique doit s'intégrer au mieux, sans trop d'à-coups, dans les structures économiques, sociales, juridiques. Le rôle de l'Etat est alors analogue à celui d'une chaîne de régulation.

— Les décideurs devront agir en tenant compte de l'imbrication économique du monde. L'Europe, en ce qui concerne l'automobile, constitue un milieu complexe où les décisions ne peuvent être prises dans un pays sans tenir compte du contexte de voisinage. A ce titre, accepter quelque part en Europe une technique nouvelle, qui pourrait se révéler incompatible avec les solutions retenues par les autres grands pays européens, serait extrêmement néfaste. Les véhicules franchissent les frontières et les constructeurs exportent chez les voisins. Si les techniques, pour autant qu'elles appellent des infrastructures parfois différentes, n'étaient pas harmonisées, nous assisterions, de fait, à l'introduction de barrières d'échanges qui ne seraient pas sans inconvénients.

***

Quant aux moyens d'action mis à la disposition des pouvoirs publics, ils sont nombreux :

- l'aide financière à la recherche ;
- la modulation de la fiscalité ;
- l'aménagement des structures de prix autorisés par la puissance publique ;
- l'aide à l'expérimentation et la création de « milieux d'accueil » favorables ;
- la fixation de normes de pollution et l'annonce anticipée des objectifs à cet égard ;
- la modification des réglementations de toutes natures sur les assurances, la sécurité... ;
- l'aide à l'exportation, etc.

Grâce à ces différents moyens d'action, qui ne sont d'ailleurs pas tous indépendants les uns des autres, l'Etat peut, ainsi, aider à l'éclosion d'une nouvelle technique en portant un soin tout particulier, non sur l'objet mais sur le milieu favorable. Pour cela, il lui faut porter une très grande attention à toutes les « interfaces » qui peuvent, ou faciliter cette éclosion, ou la bloquer.

Ainsi, pour en rester aux véhicules électriques, il lui faudra d'abord examiner les problèmes des ressources à long terme de l'énergie sous ses différentes formes et, compte tenu de cette évolution à long terme, envisager les raretés croissantes ou les disponibilités comme aussi le rendement des différents moteurs. Il lui faudra également examiner avec soin le problème de toutes les pollutions en amont et en aval et, par

exemple, ne pas se contenter de dire que l'énergie électrique est « plus propre ». Il lui faudra d'ailleurs ne pas se satisfaire de l'analyse des choses en l'état, mais tenir compte des évolutions probables ou souhaitées. Il est évident, d'une manière générale, que plus l'action sera forte dans l'antipollution, plus les Etats seront favorables au véhicule électrique.

En aval, il faudra faire attention (et ceci est sous-estimé) aux déchets, à l'utilisation du plastique léger. Il faudra donc veiller à la qualité de ce plastique au moment de la destruction des véhicules et ne pas créer ainsi, en aval, de nouveaux problèmes de déchets difficiles à détruire.

Il faudra également revoir le problème de la sécurité. Il convient d'être attentif ici aux situations évolutives et ne pas se bloquer sur les normes absolues d'aujourd'hui. Celles-ci peuvent évoluer en fonction notamment du tissu urbain et peut-être d'un parc automobile urbain spécialisé. La rencontre brutale d'un parc ancien et d'un parc nouveau pose évidemment des problèmes qu'il faudra résoudre avec doigté dans le temps. Les « interfaces » sécurité-environnement sont complexes.

Il y a aussi le problème de la fiscalité et des prix. L'Etat peut moduler les prix pour faire apparaître, au bon moment, telle ou telle technologie. Il a autorisé en France, en 1972, des augmentations sur les prix des automobiles pour permettre l'éclosion des recherches anti-pollution. Moduler la fiscalité est en général plus difficile. Toutefois, ce n'est pas à exclure. A l'heure actuelle, par exemple, plusieurs ministères, dont le Ministère des Finances, étudient la répercussion de la fiscalité sur les effets du bruit.

Les spécialistes voudraient être attentifs à éviter des répercussions du type de celles qui ont joué, au cours des siècles derniers, sur « les portes et fenêtres » : ils ne veulent pas dénaturer la valeur d'une fiscalité toujours générale : ils savent cependant, qu'elles n'est jamais parfaitement « neutre ».

En conclusion, les points de rencontre entre l'Etat et les véhicules électriques ne peuvent se concentrer uniquement sur des relations univoques. Ce qui est important, c'est que l'Etat situe bien toutes les connexions qui relient l'innovation avec les autres structures, elles-mêmes en évolution et donc qu'il les situe bien dans le temps.

⁂