

CCE

COST

recherche - transport

COST 302 Conditions techniques et économiques de l'utilisation des véhicules routiers électriques

Édité par
F. Fabre, A. Klose, G. Somer
Commission des Communautés européennes

Rapport final

Observatoire Economique
et Statistique des Transports
DOCUMENTATION

CDAT
8942 A

Direction générale Transports
Direction générale Science, recherche et développement

1987

EUR 11115 FR

Publié par
COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

Direction générale
Télécommunications, industries de l'information et innovation

Bâtiment Jean Monnet
LUXEMBOURG

AVERTISSEMENT

Ni la Commission des Communautés européennes, ni aucune personne agissant au nom de la Commission n'est responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations ci-après.

Cette publication est éditée aussi dans les langues suivantes:

DE ISBN 92-825-7430-X

EN ISBN 92-825-7431-8

Une fiche bibliographique figure à la fin de l'ouvrage.

Luxembourg: Office des publications officielles des Communautés européennes, 1987

ISBN 92-825-7432-6

N° de catalogue: CD-NA-11115-FR-C

© CECA-CEE-CEEA, Bruxelles · Luxembourg, 1987

Printed in Luxembourg

P R E S E N T A T I O N

De 1982 à 1986 onze pays européens (R.F. d'Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Finlande, France, Irlande, Italie, Royaume-Uni, Suède et Suisse) ainsi que la Communauté Européenne, ont réalisé dans le cadre COST (1) une action de recherche en coopération sur les conditions techniques et économiques de l'utilisation des véhicules électriques routiers, action appelée COST 302.

Ces pays ont voulu ainsi, compte tenu de l'évolution réelle de la technique et des conséquences socio-économiques prévisibles de l'utilisation des véhicules électriques, disposer des éléments nécessaires à toutes décisions, au niveau national ou européen, sur la mise en oeuvre de ces véhicules.

L'action COST 302 a été exécutée sur la base des orientations fixées dans la Déclaration Commune d'Intention du 16 juin 1982. S'agissant d'une action concertée, celle-ci a consisté à coordonner des travaux nationaux qui ont été regroupés dans un même programme. Il n'y a pas eu de recours à un financement commun.

L'ensemble des travaux a été conduit par un Comité de gestion où étaient représentés les onze Etats participants ainsi que la Commission des Communautés Européennes. Des groupes de travail ont été chargés des différents thèmes de l'action.

Les travaux se sont déroulés en deux phases :

- phase I : étude de l'impact de l'introduction des véhicules électriques et identification des points faibles de la technologie et des opérations de R. et D. et de démonstration nécessaires.

(1) Coopération européenne dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique (19 pays participants).

- phase II : évaluation économique de différentes hypothèses d'utilisation et définition des actions qui pourraient être entreprises pour éliminer les obstacles à l'introduction des véhicules électriques.

Le rapport final présente les résultats des travaux sur les thèmes étudiés par l'action.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
- PRESENTATION	III
- COMITE DE GESTION DU PROJET COST 302	VII
- CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
- CHAPITRE 2 : IMPACT ENERGIE	5
- CHAPITRE 3 : IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT	9
- CHAPITRE 4 : ASPECTS RELATIFS A L'EXPLOITATION	21
- CHAPITRE 5 : PROGRES TECHNIQUES	33
- CHAPITRE 6 : PRODUCTION	49
- CHAPITRE 7 : ASPECTS ECONOMIQUES	55
- CHAPITRE 8 : STANDARDISATION	75
- CHAPITRE 9 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	83
- ANNEXES :	95
- ANNEXES AU CHAPITRE 3 :	
- ANNEXE 3/1 : Evaluation monétaire de l'impact des véhicules électriques sur la pollution de l'air	97
- ANNEXE 3/2 : Bruit du trafic routier	171
- ANNEXES AU CHAPITRE 5 :	
- ANNEXE 5/1 : Caractéristiques des véhicules étudiés par le projet 302	183
- ANNEXE 5/2 : Evaluation des données et des coûts de différents systèmes de propulsion électrique pour véhicules routiers	184
- ANNEXE 5/3 : Etude des systèmes de propulsion destinés à des véhicules à accumulateur électrique	196
- ANNEXE 5/4 : Evaluation d'un système de propulsion basé sur un moteur sans balais à aimants permanents	207
- ANNEXE 5/5 : Evaluation des différents drive de propulsion pour véhicules électriques	213
- ANNEXE 5/6 : Comparaison entre les chaînes de traction à moteur sans collecteur et à moteur à courant continu	223

- ANNEXE A : Les accumulateurs Zinc/Brome	225
- ANNEXE B : Batterie Nickel-Fer Saft	245
- ANNEXE C : Accumulateur Nickel-Fer SAB NIFE	251
- ANNEXE D : Note technique concernant l'accumulateur Ni Zn	261
- ANNEXE E : Batteries Sodium-Soufre CGE	269
- ANNEXE F : Batterie au sodium-soufre de la BBC	289
- ANNEXE G : Batterie au lithium entièrement solide	297
- ANNEXES AU CHAPITRE 7 :	
- ANNEXE 7/1 : Comparaison des couts des véhicules électriques et des véhicules conventionnels	307
- ANNEXE 7/2 : Comparaison des coûts des facteurs de production des véhicules	313
- ANNEXE 7/3 : Comparaison des coûts commerciaux	397
- ANNEXES AU CHAPITRE 8 :	
- ANNEXE 8/1 : Provisions for battery powered vehicles referred to in existing regulations standards and test procedures	465
- ANNEXE 8/2 : Classification des directives et règlements de Genève	467
- ANNEXE AU CHAPITRE 9 :	
- ANNEXE 9/1 : Promotion de l'utilisation des VE dans des endroits privilégiés	485

COMITE DE GESTION

DU

PROJET COST 302

PRESIDENT : M. Gianpiero BRUSAGLINO (I)

VICE-PRESIDENT : Prof. Jos JENSEN (DK)

COMITE DE GESTION

REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE

Mr GABLER
Mr MEETZ
then : Mr REISSIG

Bundesministerium für Verkehr
S.N.V. Studiengesellschaft - BERLIN
Referat A 24
Bundesministerium für Verkehr
Postfach 20 01 00
D - 5300 BONN 2

Mr STAUB

S.N.V.
Auguste Viktorie Strasse 62
D - 1000 BERLIN 33

AUTRICHE

Dr SCHÖTZ

Bundesministerium für Wirtschaft
und Forschung
Abteilung II/5
Freyung 1
A - 1014 WIEN

Dr FABJAN

Technische Universität Wien
Institut für Technische Elektrochemie
Getreidemarkt 9
A - WIEN

Prof. KORDESCH

Institut für Chemische Technologie
Anorganischer Stoffe
Technische Universität Graz
Stremayrgasse 16
A - 8010 GRAZ

BELGIQUE

Prof. G. MAGGETTO

V.U.B.
T.W. - E.T.E.C.
Pleinlaan 2
B - 1050 BRUSSEL

M. CERFONT

Ministère de la Région Bruxelloise
Service de l'expansion économique
Rue Royale 6
B - 1000 BRUXELLES

DANEMARK

Prof. JENSEN

Energy Research Laboratory
Niels Bohrs Allee 25
DK - 5230 ODENSE M

M. RATHMANN

Kloevkaervej 17
DK - 6000 - KOLDING

FINLANDE

Mr ALVESALO

Neste Battery Ltd.
Keilaniemi
SF - 02150 ESP00 15

Mr TIKKANEN

Neste Oy
Research Centre
Department of Physics
SF - 06850 KULL00

Mr SAARIALHO

Helsinki University of Technology
Koneinsinooriosasto
Otaniemi
SF - 02150 ESP00 15

FRANCE

Mr CL. DUPONT

I.R.T.

then : Mr SOULAS

INRETS
B.P. 34
F - 94114 ARCUEIL CEDEX

Mr CL. BASSAC

E.D.F.
23, Av. de Messine
F - PARIS CEDEX 08

ITALIE

Mr G. BRUSAGLINO

Centro Ricerche FIAT
Strada Torino 50
Orbassano (Torino)

ROYAUME-UNI

Dr RUDD

14, Calcokes Road
Banstead
GB - SURREY SM 7 2 EW

SUEDE

Mr RISTBORG

Statens Vattenfallsverk
S - 16287 VALLINGBY

Mr A. JOHANSSON

3 K ENGINEERING AB
Tunnelgatan 17
Box 1326
S - 11183 STOCKHOLM

Mr R. JOHANSSON

Statens Vattenfallsverk
S - 16287 VALLINGBY

SUISSE

Mr J. Ch. AQUARONE

Service d'Etude des Transports
Bubenberglplatz 11
"Gotthardhaus"
1. Stock
CH - 3003 BERNE

COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

200, rue de la Loi
B - 1049 BRUXELLES

M. M. ALLION

Direction Générale Energie

M. F. FABRE

Direction Générale des Transports

M. M. ROMA

Direction Générale Energie

M. P. ZEGHERS

Direction Générale Science, Recherche
et Développement

CHAPITRE I : INTRODUCTION

1.1. Conformément à notre Déclaration Commune d'Intention, nous avons considéré :

- a) les avantages et inconvénients des véhicules électriques routiers équipés de batteries ("véhicules électriques" ou "VE") par rapport aux véhicules classiques équipés de moteurs à combustion interne fonctionnant aux hydrocarbures;
- b) la progression prévisible du nombre de véhicules électriques dans les pays participants;
- c) dans quelle mesure les gouvernements des pays participants auraient intérêt à mettre au point des politiques coordonnées et à arrêter une législation coordonnée, afin de favoriser une progression de ces véhicules plus rapide que celle actuellement prévue.

1.2. Les principaux avantages et inconvénients des VE par rapport aux véhicules classiques étaient déjà connus dans les grandes lignes avant le début de ce projet, à savoir :

- a) la production de masse de véhicules électriques réduirait la demande de pétrole, dont le coût réel devrait (en dépit de la pléthore actuelle) augmenter sensiblement au cours des prochaines décennies;
- b) l'utilisation massive de véhicules électriques diminuerait la pollution atmosphérique, notamment dans les villes, et contribuerait ainsi à l'amélioration de la santé et à la préservation des bâtiments en site urbain;
- c) les véhicules électriques sont beaucoup plus silencieux que les véhicules classiques et à ce titre plus acceptables dans de nombreuses situations;
- d) les véhicules électriques ont généralement une meilleure longévité et demandent moins d'entretien que les véhicules classiques;
- e) à l'heure actuelle toutefois, les coûts de production des véhicules électriques sont toujours plus élevés - et généralement beaucoup plus élevés - que ceux des véhicules classiques;

f) à l'heure actuelle également, un véhicule électrique est beaucoup plus lourd qu'un véhicule classique de charge utile semblable en raison du poids de ses batteries;

g) enfin, l'autonomie des véhicules électriques est limitée par la capacité des batteries qu'il faut échanger ou recharger (pendant plusieurs heures) lorsqu'elles sont déchargées, alors que les véhicules classiques ne sont pas aussi limités.

- 1.3. Notre propos a dès lors été d'essayer d'estimer - et si possible d'évaluer quantitativement - ces avantages et inconvénients et de les pondérer afin de déterminer s'il convient de recommander à nos gouvernements de mettre au point une politique et une législation coordonnées en la matière et, dans l'affirmative, comment il convient de le faire. Nous avons également étudié l'aptitude opérationnelle des véhicules électriques, le mode d'approvisionnement en électricité pour recharger les batteries, la disponibilité des métaux nécessaires à leur fabrication et les effets des V.E. sur la balance commerciale de la Communauté avec l'extérieur.
- 1.4. A l'heure actuelle, le nombre de véhicules électriques est très limité et, à de rares exceptions près, leur prix élevé empêche toute croissance rapide. C'est pourquoi, afin de pouvoir procéder à une étude quantitative de leurs avantages et inconvénients, nous avons dû effectuer des simulations en partant de différents scénarios (nombre de véhicules) de différentes catégories qui pourraient être utilisés s'il était possible de les fabriquer et de les vendre beaucoup moins cher que les véhicules électriques actuels. Les récentes améliorations apportées à la vitesse et à l'autonomie des véhicules électriques ont fortement réduit les problèmes purement techniques et ont ainsi élargi leurs applications. Les estimations qui suivent sont toutefois sujettes à caution, étant donné qu'elles ne tiennent compte ni du coût des véhicules, ni des problèmes que pose la création de réseaux de vente et de service, ni de la psychologie des usagers.
- 1.5. Les véhicules urbains sont moins handicapés par une autonomie limitée et constituent une menace plus grave pour la santé que les autres véhicules.

Les poids lourds doivent conserver une forte autonomie même s'ils circulent en ville mais bien des véhicules de plus faible tonnage pourraient être affectés à des tâches essentiellement urbaines. Les deux catégories de véhicules qui se prêtent le mieux à l'emploi de véhicules électriques semblent être les fourgonnettes et les minibus, notamment ceux qui circulent régulièrement en ville ainsi que les deuxièmes et troisième voitures des ménages.

En partant des données fournies par certains pays participants, nous avons estimé qu'en Europe occidentale :

7 % du parc total de voitures de tourisme - c'est-à-dire 6 millions de petites voitures - et

12 % du parc total de fourgonnettes (c'est-à-dire un million de fourgonnettes) pourraient être remplacés par des véhicules électriques (1.1), bien qu'il soit très difficile de fixer les délais dans lesquels ce potentiel serait réalisable. On pense généralement qu'il sera à court terme plus facile de trouver des débouchés pour les véhicules électriques auprès des sociétés commerciales et des organismes publics qu'auprès des simples particuliers, mais le potentiel d'utilisation individuelle sera nettement meilleur à long terme.

Ce scénario de pénétration ne préjuge en rien du mode de construction des véhicules électriques. Les véhicules électriques pourraient soit être directement dérivés de véhicules thermiques soit être spécialement conçus pour la propulsion électrique avec des matériaux et caractéristiques propres. En outre, il existe certains domaines bien précis - par exemple les livraisons de lait, l'enlèvement des immondices et le transport de touristes dans des zones protégées - où l'on utilise ou pourrait utiliser des véhicules électriques en nombre relativement restreint. Il existe par ailleurs des découvertes assez récentes, notamment les bicyclettes électriques et les véhicules électriques à trois roues qui sont en train d'ouvrir de nouveaux marchés à la propulsion électrique dans certains pays. Nous n'avons toutefois pas procédé à une analyse quantitative de ces applications.

Référence

(1.1) Rapport technique sur les travaux de la phase 1 de l'action COST 302 Projet, AVERE, novembre 1984, annexe 1, chapitre 2.

CHAPITRE 2 : IMPACT ENERGETIQUE

2.1. Economies de pétrole

2.1.1. Les véhicules électriques ne consomment pas directement d'hydrocarbures, exception faite d'une quantité infime pour chauffer l'habitable. En 1984, la proportion d'électricité produite à partir du pétrole essentiellement du fuel lourd, était la suivante en Europe occidentale :

Portugal	46 %	Tous les autres pays : moins de 10 %
Italie	41 %	(sauf en Grande-Bretagne, où ce pourcentage a été anormalement élevé en 1984 à la suite de la grève des mineurs, alors qu'il est retombé à moins de 10 % aujourd'hui).
Grèce	28 %	
Irlande	19 %	

Dans la plupart des pays, ces proportions diminuent et devraient encore diminuer à l'avenir. La Suède toutefois sera largement tributaire du pétrole pour tout accroissement de sa consommation d'électricité.

2.1.2. La consommation énergétique d'un véhicule routier dépend non seulement de sa taille et de l'usage qui en est fait, mais aussi de l'état de la route, du climat et de l'adresse du conducteur. Par ailleurs, la quantité de pétrole consommée pour produire l'électricité destinée au véhicule électrique dépend de la période de production de l'électricité (jour ou nuit, été ou hiver), du pourcentage de centrales nucléaires, thermiques classiques (charbon, pétrole, gaz), hydroélectriques et autres qui alimentent le réseau ainsi que de la conception des raffineries de pétrole. Certains de ces facteurs, en particulier la conception du véhicule et la composition du parc des centrales, dépendent à leur tour du coût des carburants, des combustibles et d'autres matériaux. En partant d'un modèle simplifié (2.1., 2.2.), nous avons estimé que les six millions de voitures électriques et le million de fourgonnettes électriques consommeraient environ 30 Twh d'électricité, ce qui représenterait approximativement une économie de 5,4 millions de tonnes d'essence et de gas-oil par an ou de

3,5 % de la consommation totale du secteur des transports d'Europe occidentale. Certains pays considèrent que les véhicules électriques ont l'avantage de réduire la consommation des produits légers. En effet, la demande de ces produits étant la plus forte, cette réduction permet de rendre moins aigu le problème posé par le besoin d'un équilibre entre les diverses productions des raffineries.

2.1.3. Compte tenu du fuel lourd utilisé pour produire cette électricité et des pertes enregistrées dans les raffineries de pétrole et en supposant qu'il y ait flexibilité complète des processus de raffinage, l'économie nette de pétrole serait d'environ cinq millions de tonnes par an, ce qui représente à peu près 1 % de la consommation totale. En contre partie, d'autres énergies primaires seraient consommées pour produire les 30 Twh d'électricité.

2.1.4. Le graphique 2.1. illustre les économies réalisées dans sept pays participants. Les économies par véhicule, reprises en ordonnée, se situent plus ou moins dans la même fourchette pour cinq pays, tandis que les chiffres de la Suède et de l'Italie sont inférieurs pour les raisons énoncées au paragraphe 2.1.1.

2.2. Alimentation en électricité

2.2.1. La plupart des parcours des sept millions de véhicules envisagés s'effectueraient le jour (mais pas nécessairement à la lumière du jour) et pourraient se faire sur une seule charge des batteries de traction actuellement disponibles. Les batteries pourraient donc être rechargées la nuit, pendant plusieurs heures, au domicile de l'utilisateur et en utilisant sa propre installation électrique. Le bibe-ronnage resterait toutefois nécessaire pour certains parcours. L'échange des batteries ne serait pas une solution rentable.

2.2.2. Le supplément d'électricité nécessité par ces véhicules électriques n'exigerait pas une augmentation sensible des capacités de production des centrales (les 30 Twh d'électricité visés au paragraphe 2.1.3. ne représentent que 2,5 % de la consommation totale. Il serait nécessaire de renforcer certains réseaux de distribution locaux, mais les programmes d'investissement habituels devraient suffire pour faire

face à la demande. Il ne devrait pas y avoir de problème commerciaux graves.

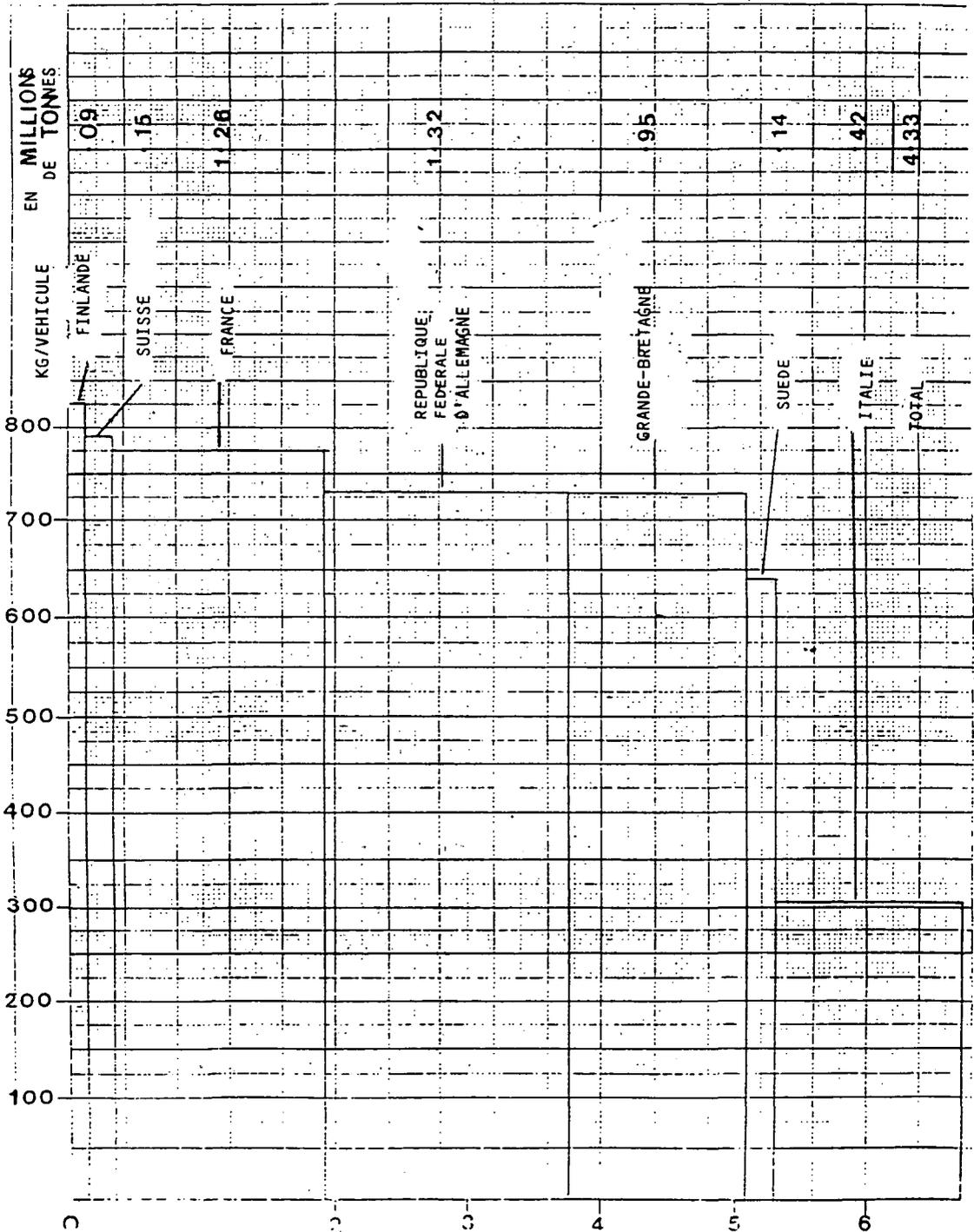
2.2.3. En cas d'introduction massive de véhicules électriques dans une localité donnée, il est à craindre que les chargeurs de batteries ne créent des distortions dans la tension d'alimentation, ce qui aurait des effets néfastes sur les autres appareils alimentés par le même réseau. Ces distortions sont dues aux courants non-sinusoïdaux dans les redresseurs qui convertissent le courant alternatif en courant continu pour le chargement des batteries.

2.2.4. Actuellement, le courant consommé par les chargeurs de batterie des véhicules électriques ne représente qu'un pourcentage négligeable de l'ensemble du courant distribué par les réseaux. Pour situer le problème, si une ville de un million d'habitants venait à acquérir 100.000 véhicules électriques, leurs chargeurs représenteraient environ 2 % de la demande totale de courant et des mesures en vue de réduire les problèmes de tension seraient alors nécessaires ou souhaitables. Des chargeurs adéquats existent déjà dans le commerce, bien qu'à un prix plus élevé en raison du niveau de production actuel. Les fabricants seraient donc en mesure de répondre aux diverses exigences permettant d'éviter les effets négatifs pouvant résulter de l'introduction massive de véhicules électriques.

Références

- (2.1.) Structure énergétique de la production d'électricité et économies de produits pétroliers réalisées grâce aux véhicules électriques, rapport AVERE, janvier 1985, EUCO-COST 302/85/1, révisé.
- (2.2.) Rapport finnois au comité de gestion établi par l'université de technologie d'Helsinki, 28 novembre 1983.

Graphique 2.1. - Economie annuelle de pétrole dans sept pays



CHAPITRE 3 : IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

3.1. Réduction de la pollution atmosphérique

3.1.1. Impact sur le trafic routier

3.1.1.1. Le remplacement d'une partie des véhicules thermiques actuels (V.T.) par des véhicules électriques routiers (V.E.) aurait une série d'effets sur l'environnement à savoir :

- 1° sur la circulation routière,
- 2° sur la production et la distribution des énergies nécessaires à la propulsion des véhicules et,
- 3° sur la production et la mise au rebut des véhicules et des batteries, mais c'est, et de loin, sur la qualité de l'air dans les zones de circulation routière que les effets se feraient le plus sentir.

Alors que les gaz d'échappement des véhicules thermiques s'accompagnent d'émissions de nombreuses substances toxiques et que l'évaporation, les pertes et les fuites sont à l'origine d'émissions supplémentaires d'hydrocarbures, les véhicules électriques n'entraînent aucune émission toxique importante en circulation routière (la pollution provenant de leur système de chauffage est négligeable).

3.1.1.2. Etant donné que les véhicules électriques ne peuvent, en raison de leur manque d'autonomie, être utilisés que sur de courtes distances, c'est surtout dans les agglomérations urbaines qu'ils contribueraient à réduire la pollution atmosphérique. Mais c'est précisément là que la concentration de substances toxiques dans l'air provenant de l'industrie, du chauffage et surtout du trafic peut atteindre des niveaux relativement élevés, ce qui augmente le risque d'effets dommageables sur la santé et sur l'état des bâtiments. Les véhicules électriques, parce qu'ils diminuent sensiblement la quantité de gaz d'échappement dans l'air, pourraient, dans le cas d'une pénétration suffisante du marché, réduire sensiblement les dégâts dus à la pollution dans les zones à forte densité de population.

3.1.1.3. En raison des faibles distances habituellement couvertes en trafic urbain, le nombre de démarrages à froid des véhicules thermiques actuels

est relativement élevé. Les réseaux routiers et urbains, sur lesquels la densité de circulation est souvent élevée aux heures de pointe, ne permettent généralement qu'une circulation ralentie ou entrecoupée d'arrêts multiples. Les arrêts dus à la circulation (par exemple aux feux rouges) entraînent, surtout dans le centre des villes, des immobilisations importantes par rapport au temps de conduite global. Etant donné que les émissions d'oxydes de carbone et d'hydrocarbures d'un moteur à froid et tournant au ralenti sont beaucoup plus élevées que lorsque les conditions de trafic sont normales, l'emploi de véhicules électriques, notamment dans les zones à problèmes (villes), peut réduire de façon très appréciable les émissions dues à la circulation (et réduire aussi la consommation d'essence).

Compte tenu du nombre assez élevé d'accélération et de freinages en trafic urbain, les véhicules électriques peuvent - outre leurs effets sur la consommation de carburant, sur les émissions de gaz et sur le bruit - réduire, grâce au freinage par récupération, la quantité de particules libérées dans l'air au freinage, particules qui contiennent souvent des substances toxiques (fines particules de fibres en particulier).

3.1.1.4. Les progrès prévisibles de la technologie automobile réduiront la pollution due aux véhicules thermiques. Les émissions polluantes peuvent être sensiblement réduites par l'emploi de catalyseurs, de systèmes de recirculation des gaz d'échappement, de moteurs à mélange pauvre ou d'autres mesures concernant le moteur. En se servant d'une commande électronique pour couper le moteur lorsqu'il est à l'arrêt ou presque, on pourrait, dans certaines conditions, éliminer complètement les émissions de gaz d'échappement à ces moments-là. Il ne sera toutefois jamais possible d'arriver avec les véhicules thermiques au même résultat qu'avec les véhicules électriques, à savoir supprimer complètement les gaz d'échappement. De plus, lorsque le matériel vieillit et s'il n'est pas entretenu dans des conditions optimales, l'efficacité des mesures permettant de réduire les émissions (par exemple l'emploi d'un catalyseur) peut se réduire sensiblement à la longue. Un contrôle régulier des gaz d'échappement est possible, comme vient de le prouver l'expérience de certains pays, mais coûteux en temps et en argent. Il est encore très difficile de déterminer à long terme jusqu'à quel point le principal avantage des véhicules électriques (absence de gaz d'échappement) sera réduit par les améliorations techniques des véhicules thermiques. Dans l'ensemble toutefois, même si la technologie des véhicules thermiques progresse considérablement, chaque remplacement d'un véhicule thermique

par un véhicule électrique se traduira par une amélioration de l'environnement.

3.1.2. Impact sur la production d'énergie

3.1.2.1. La production d'électricité nécessaire aux véhicules électriques a des effets sur l'environnement autour des centrales. Par contre l'économie de pétrole réalisée de la sorte se traduit par une réduction des émissions de substances toxiques provenant du raffinage et de la distribution des carburants. Si l'électricité utilisée est produite dans des centrales thermiques classiques, nous sommes en présence d'émissions d'oxydes d'azote et

d'oxydes de soufre. La quantité de monoxyde de carbone dégagée par les centrales est minime : elle est insignifiante dans l'atmosphère au point de n'avoir aucun effet toxique (bien que cet oxyde puisse indirectement contribuer à la formation d'autres substances toxiques dans l'air).

Les oxydes de soufre et d'azote sont aussi beaucoup plus dilués et donc beaucoup moins nocifs pour la santé de l'homme et pour l'état des bâtiments environnants s'ils sont dégagés en altitude loin des zones urbaines que s'ils sont dégagés au niveau de la rue en plein coeur de la ville. Ces émissions peuvent toutefois se déplacer sur de longues distances et subir une transformation chimique, de sorte qu'elles contribuent parfois à endommager la faune et la flore et à aggraver la détérioration de l'environnement dans des zones éloignées.

3.1.2.2. Pour les raisons déjà mentionnées au point 2.1.2., il est difficile d'établir une relation exacte entre les émissions des centrales et la quantité d'électricité consommée.

Les batteries des véhicules électriques seront très probablement surtout chargées la nuit, ce qui permettra d'équilibrer les variations de charge journalière et d'écrêter les pointes; les véhicules électriques devraient, à ce titre, bénéficier d'un tarif plus favorable que les autres consommateurs d'électricité.

Ensuite, en raison de l'équilibrage des variations de charge journalières, il sera possible de transférer de plus en plus la production d'électricité vers les centrales de base qui - dans le cas des centrales nucléaires ou hydroélectriques - n'émettent pas de fumées ou qui - dans le cas des centrales au charbon - peuvent fonctionner avec un meilleur taux de combustion

(et donc moins d'émissions de substances toxiques) grâce à l'équilibrage de la charge. De plus, avec la réduction des variations de charge journalières, il n'est plus nécessaire de distribuer l'électricité sur d'aussi longues distances, ce qui, grâce à la réduction des pertes de transmission, influence favorablement le rapport consommation/émission.

3.1.2.3. La technique des centrales, tout comme la technologie des véhicules, a déjà progressé (et progressera encore) et permet ainsi d'escompter de sérieuses améliorations du point de vue de la compatibilité avec l'environnement. Les techniques de combustion avancées et les méthodes d'épuration des gaz de combustion et de dépolluissage dont on dispose à l'heure actuelle permettent de réduire sensiblement les émissions de substances toxiques des centrales thermiques.

L'électricité produite par les centrales hydroélectriques ou nucléaires n'entraîne aucune production de fumées. Dans le cas des centrales hydroélectriques, il faut toutefois tenir compte des effets possibles sur le paysage et la végétation. D'autre part, l'emploi de l'énergie nucléaire, en raison du risque d'accident toujours possible et du problème de l'élimination des déchets radio-actifs, se heurte de plus en plus aux objections formulées pour des raisons écologiques.

L'emploi éventuel des véhicules électriques n'influencera toutefois la politique énergétique d'aucun pays. Même l'introduction de 7 millions de véhicules électriques en Europe occidentale ne nécessiterait pas de capacités de production supplémentaires, de sorte qu'aucun risque supplémentaire ne peut y être lié.

3.1.3. Impact sur la production et la mise au rebut

3.1.3.1. Le choix du système de propulsion a peu d'importance vis à vis de l'impact de la fabrication des véhicules sur l'environnement. Les conséquences d'une production massive de batteries pourraient être plus importantes.

La fabrication de batteries de démarrage dans de vieilles installations de production a entraîné jusqu'à présent des émissions de poussières de plomb réduites dans certains cas par des mesures techniques visant à un meilleur contrôle de la pollution. La production massive de batteries de traction nécessiterait toutefois la construction de nouvelles usines pour lesquelles le contrôle de la pollution serait beaucoup plus sévère.

3.1.3.2. La mise au rebut des véhicules électriques et de leurs batteries ne pose pas de problèmes majeurs. Dans le cas des batteries au plomb, le plomb peut être recyclé. L'élimination de l'acide ne causera pas de dégâts à l'environnement, pour autant que l'acide soit éliminé par des firmes spécialisées correctement outillées pour ce travail. D'autre part, les véhicules électriques réduiraient le risque de pollution de l'eau par les huiles de vidange par exemple.

3.1.4. Quantification de l'impact sur la pollution de l'air

3.1.4.1. Nous nous sommes efforcés d'évaluer les principales conséquences qu'auraient les véhicules électriques sur l'environnement par un calcul quantitatif à l'aide d'un modèle simplifié semblable à celui utilisé pour l'évaluation des économies de pétrole (3.1., 3.2., 3.3.). D'après ces évaluations les 6 millions de voitures électriques et le million de fourgonnettes électriques cités précédemment réduiraient les émissions des trois principaux polluants d'environ :

2,3 millions de tonnes/an pour le monoxyde de carbone (CO)

0,15 million de tonnes/an pour les oxydes d'azote (NO_x)

0,27 million de tonnes/an pour les hydrocarbures (H_mC_n^x).

Toutefois, le complément d'électricité nécessaire à l'alimentation de ces véhicules augmenterait les émissions de deux autres polluants de :

0,12 million de tonnes/an pour l'anhydride sulfureux (SO₂)

0,01 million de tonnes/an pour les poussières.

Tant que les véhicules à essence utiliseront de l'essence au plomb, l'introduction des véhicules électriques réduira également les émissions de plomb très nocives. Il est à prévoir toutefois que la plupart des véhicules à essence utiliseront de l'essence sans plomb avant que n'intervienne l'introduction massive de véhicules électriques.

3.1.4.2. Les réductions ou augmentations de pollution qui en découlent varient d'un pays à l'autre (3.4., 3.5., 3.6.) et dépendent en ville de la composition du parc automobile (taille et type de véhicules) ainsi que des conditions du trafic. Elles dépendent également du niveau de la pollution provenant d'autres sources, mais, d'une manière générale, la circulation automobile est la principale source de pollution de l'air en ville où le niveau de pollution est aussi le plus élevé. Dans des conditions normales en République Fédérale d'Allemagne et au Royaume-Uni et en supposant que

Les véhicules électriques soient concentrés en zone urbaine, l'introduction de véhicules électriques aurait les effets suivants (chiffres exprimés en pourcentage de l'ensemble des émissions dues à la circulation urbaine et en pourcentage de l'ensemble des émissions, toutes sources confondues, dans ces pays) :

	Circulation urbaine (%)		Toutes sources confondues (%)	
	RFA	RU	RFA	RU
Monoxyde de carbone	- 21	- 16	Sans objet	
Anhydride sulfureux	- 2		+ 1	+ 2
Oxydes d'azote	- 12	- 24	- 1	- 1
Hydrocarbures	- 19	- 28	- 4	- 1
Poussières	- 2,5		+ 0,5	

3.1.4.3. Les sept millions de véhicules électriques précités pourraient donc réduire la pollution due à la circulation urbaine de 20 à 30 %. Les effets sur les émissions toutes sources confondues seraient beaucoup plus faibles. Dans ces deux pays, il y aurait une légère augmentation des émissions d'anhydride sulfureux, mais dans les pays ne faisant que peu - ou pas du tout - appel au charbon ou au fuel lourd pour la production d'électricité, cette augmentation serait minime voire inexistante. L'influence des véhicules électriques sur les émissions de dioxyde de carbone est négligeable par rapport aux émissions de CO2 provenant d'autres sources qui peuvent entraîner une modification à long terme du climat.

3.1.5. Evaluation monétaire de l'impact sur la pollution de l'air

3.1.5.1. Afin d'inclure, ne fût-ce qu'approximativement les coûts sociaux de la circulation routière dans notre étude de rentabilité (véhicules électriques > < véhicules thermiques) nous avons essayé de chiffrer monétairement l'impact des véhicules électriques sur la pollution de l'air.

L'évaluation monétaire des dégâts causés à l'environnement par la circulation routière peut se faire par deux méthodes fondamentalement différentes :

- la méthode directe qui consiste à calculer les pertes de revenus et les frais de réparation des dégâts dus à la circulation routière,

- La méthode indirecte qui consiste à calculer les frais d'équipement des véhicules ou d'autres mesures destinées à limiter les émissions à un niveau prédéterminé (estimation des coûts de prévention).

Pour la méthode directe, il est nécessaire de chiffrer les relations de cause à effet qui existent entre émissions, immissions et dégâts subis.

Il faut recueillir à cet effet une multitude de données techniques, routières, urbanistiques et climatiques et disposer de résultats de recherche fiables dans le domaine de la physique, de la chimie, de la toxicologie et de la médecine. Etant donné qu'il était impossible de répondre à ces exigences dans le cadre de l'action COST 302, nous avons opté pour une méthode indirecte.

3.1.5.2. Le point de départ de notre méthode d'évaluation réside dans une comparaison entre l'introduction de véhicules électriques d'une part et l'application de catalyseurs à un nombre déterminé de véhicules thermiques d'autre part (3.7.). Nous nous sommes ainsi demandés quels seraient les coûts résultant de l'achat et du fonctionnement du nombre de catalyseurs à trois voies nécessaire pour arriver en ville à la même réduction de pollution que celle produite par l'introduction de mille véhicules électriques. Ces coûts représentent l'avantage écologique qu'apportent les véhicules électriques grâce à la réduction des gaz d'échappement en circulation urbaine.

3.1.5.3. Afin de tenir compte des émissions dues à la production de l'électricité destinée à recharger les batteries, nous avons déduit de l'avantage écologique que représentent les véhicules électriques en ville le coût des mesures d'épuration des gaz de combustion dans les centrales au charbon ou au fuel. Ce coût dépend essentiellement du type d'énergie utilisée pour la production d'électricité dans le pays où circulent les véhicules électriques. L'impact qu'ont les centrales hydro-électriques et nucléaires sur l'environnement n'a pas pu être pris en considération. Nous avons par contre inclus les émissions provenant du raffinage du pétrole et de la distribution de l'essence et du gas-oil aux stations-service.

3.1.5.4. Le graphique 3.1. illustre l'évaluation monétaire de l'avantage écologique d'une voiture électrique et d'une fourgonnette électrique. L'annexe 3/1 contient des informations plus détaillées sur la méthode et ses résultats. Les résultats de l'évaluation diffèrent sensiblement d'un pays à l'autre, essentiellement en raison des divergences qui existent

dans la composition du parc des centrales, mais aussi parfois en raison des différences de prix du carburant et des variations d'émissions. Les différences entre les types de véhicule (voiture et fourgonnette) sont le résultat de plusieurs influences partiellement contradictoires parmi lesquelles il convient de citer essentiellement les différences au niveau des gaz d'échappement et de la consommation des véhicules et le fait que les voitures électriques ont moins d'impact sur l'environnement lorsqu'elles circulent à la campagne.

3.1.5.5. L'évaluation monétaire montre que l'avantage écologique d'un véhicule électrique est appréciable et qu'il s'agit plutôt d'un avantage profitant à la collectivité que d'un avantage commercial pour l'utilisateur (abstraction faite de certaines réductions fiscales dans certains pays). Les données changeraient toutefois si les véhicules thermiques faiblement polluants pénétraient massivement le marché. En effet, la méthode d'évaluation utilisée ici devient moins évidente à partir du moment où les coûts résultant du contrôle des émissions font partie des coûts commerciaux. L'évolution de la politique énergétique - par exemple un changement de la structure des centrales - peut également influencer l'avantage écologique des véhicules électriques en termes monétaires. Nous avons toutefois essayé de chiffrer cet avantage, afin de disposer d'une estimation sommaire - basée sur les conditions actuelles - à inclure dans nos comparaisons économiques.

3.2. Bruit

3.2.1. Le bruit provenant de la circulation routière perturbe davantage les habitants que toute autre forme de bruit. Les véhicules électriques sont plus silencieux que les véhicules classiques dont le bruit du moteur prédomine en circulation urbaine. Réduire le bruit des moteurs des véhicules classiques serait une opération coûteuse. Le bruit le plus dérangeant provient toutefois des véhicules utilitaires (camion et autobus) que l'on ne pourrait remplacer par des véhicules électriques que dans le cas des autobus urbains et des camions destinés aux services locaux. Le bénéfice de la réduction du bruit des véhicules légers (voitures et fourgonnettes) sera imperceptible dans les zones à forte circulation tant que le bruit produit par une grande partie des camions n'aura pas été atténué, ce qui prendra un certain nombre d'années, car les poids lourds qui circulent en ville ne se prêtent pas à l'emploi de véhicules électriques.

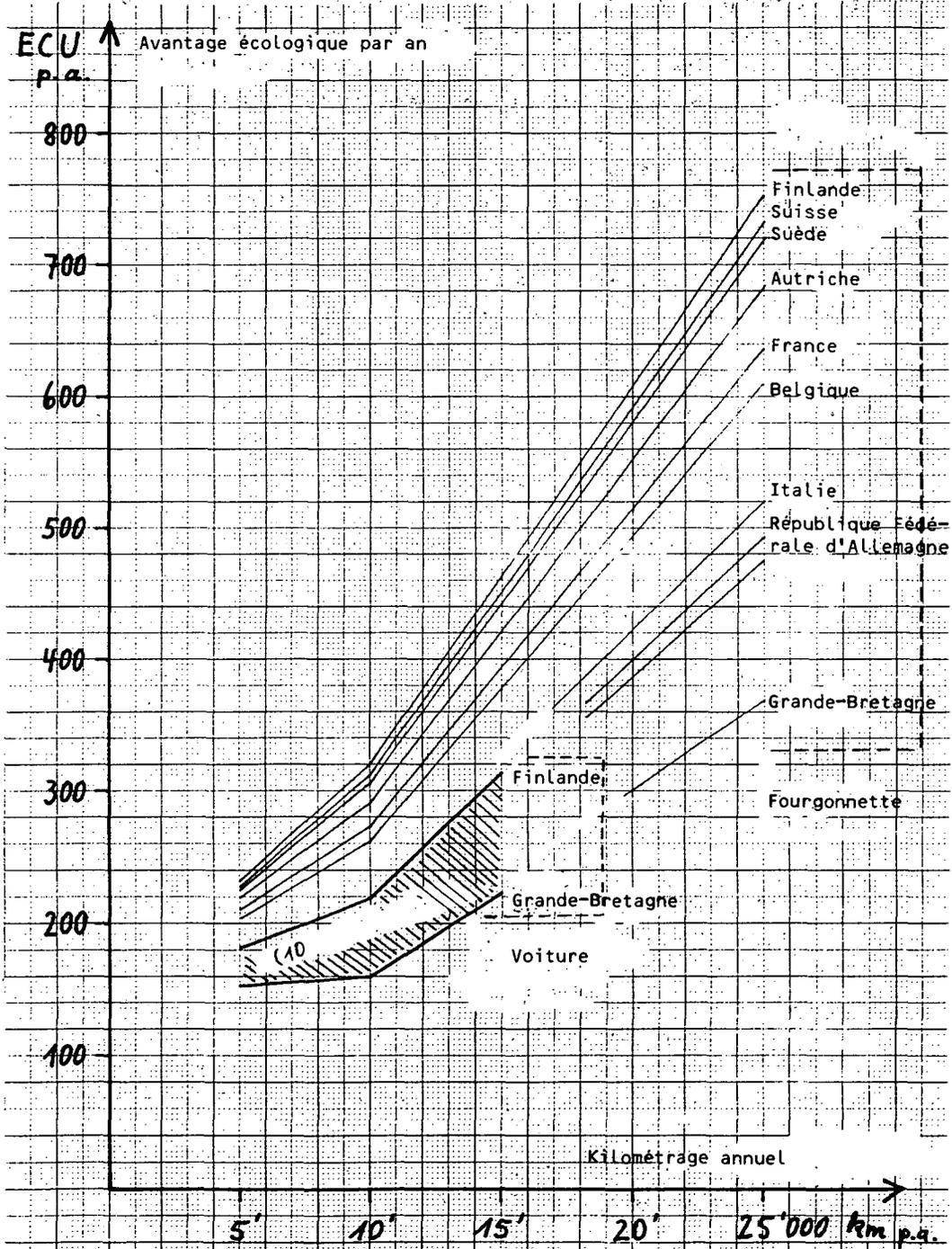


Fig. 3.1 : Avantage écologique que représentent par an une voiture électrique et une fourgonnette électrique dans 10 pays européens.

Il serait dès lors prématuré d'affirmer que l'emploi largement répandu de véhicules électriques permettrait de réduire ce bruit du trafic tellement dérangeant, tant que d'autres mesures ne sont pas prises (par ex. au niveau des véhicules lourds) et que les véhicules électriques ne représentent pas une part importante du trafic.

3.2.2. Par contre, les véhicules électriques conservent leur avantage majeur, dans le centre des villes, les zones piétonnières, les quartiers résidentiels, les secteurs ruraux, et autres zones, qui sont interdites aux véhicules lourds et bruyants et où les camions circulent rarement. Dans ces zones, si les véhicules électriques représentaient plus de 30 % du trafic total, leur emploi se ferait rapidement sentir.

3.2.3. L'annexe 3/2 contient des informations détaillées - et des chiffres - sur ce problème du bruit.

SOURCES

- (3.1.) Auswirkungen des Einsatzes von Elektrofahrzeugen auf die Abgas-Emissionssituation
- Grundlagen und Datenmaterial -
Beitrag aus der Bundesrepublik Deutschland (Februar 1984)
- (3.2.) Calculations of the Impact of Electrically Powered Road Vehicles on the Exhaust Fume Emissions of Road Traffic and Energy Supply
Contribution from the Federal Republic of Germany (May 1984)
- (3.3.) Rapport de Synthèse Technique des Travaux de la Phase I de l'action COST 302
A.V.E.R.E. (Novembre 1984)
- (3.4.) Bedeutung der Abgas-Emissionsentlastung durch Elektrofahrzeuge im Verhältnis zu den landesweiten Gesamtemissionen Beitrag aus der Bundesrepublik Deutschland (Oktober 1984)
- (3.5.) Reductions of Toxic Emissions by Electric Vehicles
Note by United Kingdom (July 1984)

(3.6.) Calculations of the Impact of Electrically Powered Road
Vehicles on the Exhaust Fume Emissions of Road Traffic and
Energy Supply
Contribution from Finland / Neste Oy (June 1984)

(3.7.) Monetäre Bewertung des Einflusses von Elektrofahrzeugen auf
die Luftverunreinigung
Beitrag aus der Bundesrepublik Deutschland
(Teilbeiträge vom Februar 1986, April 1986, Juni 1986)

CHAPITRE 4 : ASPECTS RELATIFS A L'EXPLOITATION

4.1. Expérience pratique

4.1.1. La mise en service d'un véhicule - qu'il soit électrique ou thermique - destiné à être utilisé par un large public doit suivre un cheminement chronologique immuable à toute entreprise d'ordre technique.

Après les études théoriques, la fabrication des premiers composants et leurs essais en laboratoire, il est essentiel de construire un prototype pour vérifier la compatibilité des différents organes qui le composent.

La phrase prototype achevée, il est nécessaire de vérifier la fiabilité des véhicules par des expérimentations en flottes de plusieurs unités en suivant leur comportement dans des cas réels d'exploitation.

4.1.2. Dans le cas des véhicules électriques, en plus des enseignements d'ordre purement technique, les expérimentations doivent apporter des renseignements sur les réactions des usagers face à un produit qui se distingue de son équivalent thermique par quelques particularités (d'un côté facilité de conduite due à l'absence de boîte de vitesse, silence, etc., de l'autre performances plus limitées, nécessité de surveiller l'autonomie, contrainte du remplissage des batteries en eau déminéralisée, etc.). Ces renseignements différeront suivant que les conducteurs sont ingénieurs, techniciens, conducteurs professionnels ou hommes de la rue. Chacune de ces trois phases est cependant nécessaire pour que le feed-back contribue au mûrissement technologique du produit.

4.1.3. Des opérations de démonstration de véhicules électriques ont été réalisées dans plusieurs pays entre 1970 et 1980.

Nous avons dressé une liste non exhaustive des opérations de démonstration des véhicules électriques dans les pays de la Communauté européenne.

Ainsi, de 1970 à 1980, la France a réalisé plusieurs dizaines d'expériences de flottes de véhicules utilitaires sur plusieurs sites, principalement

urbains; 3 millions de km ont ainsi été parcourus par 150 véhicules dans dix villes différentes. A l'heure actuelle, seuls de petits véhicules utilitaires sont commercialisés dans de modestes proportions (quelques dizaines d'exemplaires). Les grands constructeurs ont mis au point des prototypes qui arrivent à présent dans la phase de démonstration.

Depuis 1975, la république fédérale d'Allemagne effectue des expérimentations d'autobus et de véhicules utilitaires dans plusieurs villes : 40 autobus à batteries et 20 autobus hybrides ont totalisé environ 10 millions de km. La poste a mis en service 34 "Elektro-Transporter" (véhicules utilitaires électriques) et 45 autres ont été testés à Berlin de 1980 à 1983 par différents usagers (distance totale parcourue : environ 690.000 km). Une trentaine de voitures électriques ont par ailleurs été testées en Allemagne fédérale, essentiellement par les sociétés d'électricité.

L' Italie teste des véhicules électriques depuis plusieurs décennies en les incluant dans les flottes de grandes sociétés.

Le Royaume-Uni, véritable laboratoire du véhicule électrique avec sa flotte de 40 à 50.000 camionnettes de distribution du lait, expérimente également des véhicules utilitaires dans plusieurs grandes compagnies, notamment la SOUTHERN ELECTRICITY BOARD.

Des expérimentations de véhicules électriques ont également eu lieu en Belgique, en Suisse, aux Pays-Bas, etc.

4.1.4. Il ne semble pas y avoir de pays en Europe qui n'ait mis en service des véhicules électriques ces dernières années.

Notre propos ici est de présenter les opérations de démonstration de véhicules électriques réalisées avec le concours financier de la Communauté économique européenne.

A la suite d'appels d'offres lancés par la CEE, un certain nombre de pays ont proposé des expérimentations de leur production de véhicules électriques; la Communauté a retenu plusieurs projets auxquels elle a apporté son concours financier en exigeant en contrepartie que des rapports techniques sur le déroulement de l'opération lui parviennent sur la base d'un calendrier prédéterminé.

4.1.5. Depuis 1980, six opérations ont bénéficié d'aides communautaires, à savoir :

TURIN (1980)

10 fourgonnettes FIAT 900 E/EL utilisées par la compagnie de téléphone S.I.P. pour les opérations d'entretien.

ODENSE (1980)

5 fourgonnettes FIAT 900 E/EL utilisées par la société de distribution d'électricité ODENSE ELFORSYNING.

DUBLIN (1980)

4 camionnettes IVECO DAILY EL et 4 camionnettes DODGE de 2,5 tonnes. Cette opération s'est arrêtée en 1985 et les résultats n'ont pas été publiés.

ROME (1984)

8 minibus IVECO DAILY EL en service dans la flotte de l'A.T.A.C. depuis 1984. L'expérience est en cours.

CHATELLERAULT (1984)

10 véhicules MASTER RENAULT pour les services techniques de la municipalité. Les premiers véhicules ont été livrés en 1986.

LA ROCHELLE - EVELEC (Belgique) (1985)

Dossier accordé à Peugeot pour 13 véhicules électriques 205 répartis comme suit :

- 7 en France
- 6 en Belgique.

Ce dossier est en cours de signature à la Communauté économique européenne.

Un grand nombre d'expériences portant sur un ou plusieurs véhicules électriques sont actuellement en cours et nous ne pouvons pas passer sous silence les efforts importants accomplis par ces industriels souvent très motivés, mais dépourvus des moyens matériels et financiers nécessaires pour mener leurs essais à bien.

4.1.6. Nous avons dépouillé l'ensemble des documents en notre possession concernant les opérations de démonstration et les conclusions auxquelles nous sommes arrivés peuvent se résumer comme suit :

- Dans la majorité des cas, les expérimentations n'ont pas été conduites

avec une rigueur scientifique suffisante pour pouvoir publier leurs résultats.

- Les rapports des expérimentations sont essentiellement consacrés à la recherche de la fiabilité des composants et des véhicules eux-mêmes.
- La plupart du temps, les seules valeurs relevées sont les consommations d'électricité, en vue de définir les dépenses énergétiques des véhicules expérimentés.

Seule l'expérimentation de la SOUTHERN ELECTRICITY BOARD nous apporte quelques précisions sur les coûts d'entretien des véhicules électriques.

4.2. Entretien

4.2.1. La question du coût d'entretien d'un véhicule électrique, notamment par rapport à son homologue thermique, ne peut être abordée ici que sur le plan qualitatif.

Les chiffres que nous avançons, ainsi que l'analyse des résultats obtenus, seront basés sur la seule expérience en notre possession, celle de la SOUTHERN ELECTRICITY BOARD.

Le coût d'entretien d'un véhicule électrique est défini dans la plupart des ouvrages, textes et conférences comme étant de 50 % inférieur à celui de son homologue thermique.

Ce pourcentage, dont nous n'avons pas pu trouver l'origine, est présenté comme un dogme dans l'ensemble de la littérature consultée.

4.2.2. Il nous a paru nécessaire de rechercher et de définir, pour chaque gamme de puissance de véhicule, une valeur du coût d'entretien exprimée en coût par km parcouru.

Le coût d'entretien d'un véhicule peut se décomposer suivant trois critères principaux :

- A - Entretien d'un moteur thermique
(graissage, vidange et main-d'oeuvre)
- B - Réparations et entretien mécanique
(pièces détachées et main-d'oeuvre)
- C - Usure des pneumatiques
(achat et montage des pneumatiques).

4.2.3. Suivant les barèmes actuellement appliqués par les garagistes et mécaniciens français, nous sommes arrivés aux chiffres suivants :

A - En partant d'une vidange tous les 10.000 km, du remplacement du filtre à huile tous les 20.000 km, de 4 à 5 litres d'huile dans le moteur et d'une huile à 5,20 Ecus le litre, nous arrivons au chiffre moyen de 0,446 Ecus/100 km pour tous les moteurs.

B - Nous avons présenté le forfait réparations (remplacement des pièces usées et réparation des accidents statistiquement probables dans la vie d'un véhicule) pour plusieurs types de puissance de véhicules.

Il est à noter que ce forfait peut évoluer avec la durée d'utilisation du véhicule; nous n'avons toutefois pas tenu compte de cette évolution possible et nous avons considéré que le coût annuel était constant durant toute la vie du véhicule aussi bien pour les véhicules thermiques que pour les véhicules électriques.

4.2.4. Nous avons ainsi relevé dans les barèmes professionnels les différentes gammes de puissance de véhicules :

<u>Chevaux fiscaux français</u>	<u>Forfait première année</u>
2	1,48 ECU/100 km
4	1,78 "
6	1,93 "
7	2,08 "
8	2,23 "
9	2,38 "
10	2,52 "
11	2,67 "
12	2,82 "
13	2,97 "

4.2.5.

C - L'usure des pneumatiques dépend du kilométrage accompli par le véhicule mais aussi de sa vitesse moyenne.

Le prix des pneumatiques est celui du barème français en vigueur en 1986 et les coûts de main d'oeuvre ceux de la profession - 17,83 Ecus par heure - pour le remplacement d'un train complet de quatre roues sur un véhicule.

Le kilométrage moyen d'un pneumatique est de 40.000 km.

Les dimensions et par conséquent les prix des pneumatiques sont généralement liés à la puissance du véhicule. Nous avons dès lors retenu les coûts kilométriques moyens ci-après pour les différents types de véhicules :

<u>Type de véhicule</u>	<u>Coût des pneumatiques</u>
2 chevaux fiscaux français	0,446 Ecus/100 km
4 chevaux fiscaux français	0,520 Ecus/100 km
6 chevaux fiscaux français	0,594 Ecus/100 km
7 chevaux fiscaux français	0,743 Ecus/100 km
9 chevaux fiscaux français	0,891 Ecus/100 km
10 chevaux fiscaux français	0,966 Ecus/100 km
11 chevaux fiscaux français	1,040 Ecus/100 km
12 chevaux fiscaux français	1,114 Ecus/100 km
13 chevaux fiscaux français	1,189 Ecus/100 km

4.2.6. Pour déterminer les coûts d'entretien des véhicules électriques, nous avons considéré que les trois critères de base devenaient :

1. - l'entretien du moteur thermique supprimé;
2. - les réparations et entretiens mécaniques réduits de 30 % par rapport aux véhicules thermiques;
3. - l'usure des pneumatiques réduite de 30 % par rapport aux véhicules thermiques.

De nombreux usagers ont signalé que l'usure des pneumatiques des véhicules électriques était inférieure à celle des véhicules thermiques, ce qui peut s'expliquer par le fait que les accélérations et décélérations se font en douceur.

Le tableau ci-après donne les coûts d'entretien comparatifs des différents véhicules retenus dans l'étude COST 302.

<u>Type de véhicule</u>	<u>Thermique</u> Ecu/100 km	<u>Type de véhicule</u>	<u>Electrique</u>
FIAT PANDA 30 L	2,749	ZAGATO 250	1,620
FIAT AUTO 900 E	2,972	FIAT 900 E/E2	1,768
IVECO DAILY 30,8	3,269	FIAT DAILY E/E2	1,976
VW GOLF	2,972	VW Cityströmer	1,768
VW Transporter KOMBI	3,120	VW Electrotransporter 2	1,872
DAIMLER Transporter 207	4,160	DAIMEER Electro-transporter	2,615
BEDFORD CF essence	4,012	BEDFORD CF électrique	2,496

4.2.7. Les chiffres avancés dans le présent rapport en ce qui concerne les coûts d'entretien concordent avec les observations formulées dans la seule expérimentation de véhicules électriques pour laquelle des chiffres sont disponibles.

L'expérimentation de la SOUTHERN ELECTRICITY BOARD, entamée avec 22 véhicules en 1978 et poursuivie avec 73 depuis 1984, nous donne les coûts d'entretien des 3 millions de km parcourus pour les services de la société.

Nous constatons, d'après une communication faite par M. Steele lors d'EVS 7 à Versailles, que les coûts d'entretien des véhicules électriques sont dans l'ensemble inférieurs de 30% à ceux des véhicules thermiques tout en comprenant une augmentation occasionnelle essentiellement due au temps nécessaire au remplissage en eau après chaque recharge de batterie.

Un remplissage centralisé des accumulateurs devrait pallier cet inconvénient.

En conclusion, la proportion dans laquelle les coûts d'entretien des véhicules électriques peuvent être réduits par rapport aux coûts des véhicules thermiques ne peut être évaluée de manière très précise ; nous estimons néanmoins que cette proportion est plutôt d'un tiers que de moitié.

4.3. Recharge

4.3.1. La recharge en énergie est un aspect de l'exploitation où il existe une différence marquée entre le véhicule électrique et le véhicule thermique. Dans le cas du véhicule thermique, cette opération, qui prend quelques minutes, peut se faire en des points de distribution relativement denses situés presque n'importe où. Dans le cas du véhicule électrique

par contre, la recharge des batteries de traction prend généralement plusieurs heures (entre huit et dix heures et souvent au-delà).

En outre, il n'est pas rare de charger la batterie exclusivement à l'aide d'un chargeur fixé situé dans le garage habituel du véhicule. Pour éviter la panne "sèche", le véhicule électrique est donc pratiquement obligé de rentrer au garage.

4.3.2. Certains véhicules électriques sont équipés de chargeurs embarqués. Ceux-ci peuvent être branchés sur n'importe quelle prise accessible d'un voltage et d'un ampérage suffisants. Les chargeurs embarqués actuels sont d'une faible puissance, afin de ne pas être trop lourds et trop encombrants. Ils ne peuvent donc être utilisés qu'en technique de biberonnage et en n'augmentant que légèrement l'autonomie du véhicule par heure de recharge. Le biberonnage sera examiné un peu plus loin dans ce chapitre.

4.3.3. D'une manière générale, le mode d'utilisation d'un véhicule électrique se présente comme suit : recharge pendant la nuit pour avoir une batterie de traction bien chargée le matin, afin que le véhicule électrique soit fin prêt pour toute la journée. Le kilométrage de la journée se limite généralement à de faibles distances par rapport aux distances couvertes par la plupart des voitures particulières et des fourgonnettes de livraison sur longues distances. Il n'est pas rare que les véhicules électriques soient utilisés pour un trajet le matin et un trajet l'après-midi. Entretemps, on peut recourir à la technique du biberonnage. La recharge de nuit ne sollicite le réseau et le chargeur que de façon modérée.

4.3.4. La vie d'une batterie de traction dépend très de charge/décharge. A différents égards, il est utile de calculer la vie d'une batterie de traction respectivement en temps, cycles de charge et kilométrage global. La durée de vie en temps et la durée de vie en kilométrage sont faciles à enregistrer mais très difficiles à prévoir, étant donné qu'elles dépendent très charge, du poids spécifique de la batterie et de son entretien. La durée de vie en cycles est - du moins pour des cycles de charge/décharge standardisés utilisés en laboratoire - un concept assez pratique pour les batteries secondaires. Toutefois, lorsqu'il s'agit de batteries de traction, il peut être très embarrassant de définir le cycle. Lorsqu'on vide la batterie d'une bonne partie de son énergie en roulant le jour et qu'on la recharge la nuit

uniquement, le cycle semble être assez bien défini. Par contre, comment faut-il compter les cycles lorsqu'on a recours à la technique du biberonnage ?

4.3.5. Les batteries utilisées à l'heure actuelle sont presque exclusivement des accumulateurs plomb-acide mais quelques accumulateurs nickel-fer sont également utilisés pour la traction. Ces deux types de batteries ont un électrolyte liquide bien que l'un soit acide et l'autre alcalin. Du point de vue des cycles, les batteries à électrolyte liquide peuvent être considérées comme "enregistrant" un nouveau cycle dès que le dégagement gazeux a commencé lors de la recharge. Ceci semble être également le cas dans une large mesure lorsque la recharge sans arriver au dégagement gazeux est faible par rapport à la capacité totale de la batterie. Par contre, même lorsque la recharge correspond à peu près à la capacité totale de la batterie, mais tout en évitant le dégagement gazeux, la batterie ne ressent pas cette opération comme un nouveau cycle. Dans la pratique, un grand nombre d'experts s'accordent à dire que l'emploi extensif du biberonnage réduit la durée de vie en cycles de la batterie de 10 à 15% pour les batteries plomb-acide et de 10% pour les batteries nickel-fer. Par biberonnage on entend une recharge correspondant à un pourcentage relativement faible de l'énergie totale de la batterie tout en évitant le dégagement gazeux.

4.3.6. La vie d'une batterie rechargée de nuit dépend de plusieurs paramètres. L'intensité de la décharge est un de ces paramètres. Les appels et apports brutaux de courant à la batterie semblent avoir un effet préjudiciable sur la vie de la batterie. Les conditions thermiques de la batterie et l'homogénéité de l'électrolyte ont également une forte influence sur la vie de la batterie. Selon la République Fédérale d'Allemagne, (cf. 4.3.1.), l'immobilisation prolongée sans recharge semble être le facteur qui limite le plus la durée de vie de la batterie.

4.3.7. La réduction de la durée de vie en cycles de la batterie par la technique du biberonnage a un effet analogue sur la durée de vie en temps aussi longtemps que l'on conserve la technique de charge normale pendant la nuit. Toutefois, la durée de vie en kilométrage de la batterie peut être sensiblement plus importante qu'en l'absence du biberonnage. Des expériences faites en Allemagne au moyen de voitures particulières (cf. 4.3.1)

ont permis de conclure que l'utilisation intensive du véhicule en ayant recours au biberonnage (1,2 cycle par jour correspondant à 60-70 km) peut par rapport à une utilisation moins intensive (0,6 cycle par jour correspondant à 30-35 km), doubler voire tripler la durée de vie en kilométrage de la batterie tout en conservant la même durée de vie en temps.

4.3.8. Le biberonnage est indiqué dans plusieurs cas, en particulier lorsque l'on recherche les objectifs suivants :

1. augmentation (occasionnelle) de l'autonomie journalière ;
2. augmentation systématique du kilométrage annuel ;
3. augmentation systématique de la durée de vie (en kilométrage) de la batterie.

Un principe de base à respecter pour l'emploi de la technique de biberonnage semble être le suivant :

- a) utiliser autant que possible le biberonnage (sans dégagement gazeux) tout en veillant à effectuer la recharge principale (avec contrôle du dégagement gazeux) et la régénération des électrodes et de l'électrolyte dans le garage du véhicule.

4.3.9. Une variante très intéressante du biberonnage résiderait dans l'utilisation d'une batterie plus petite, plus légère et moins chère. Il faudrait, à cette fin, connaître en détail l'emploi auquel est destiné le véhicule électrique, afin de pouvoir déterminer les spécifications techniques de cette batterie. D'une manière générale, pour apprécier les avantages éventuels du biberonnage, il convient de connaître les facteurs ci-après :

- a) schéma d'utilisation du véhicule, afin de déterminer les moments auxquels le biberonnage peut se faire
- b) capacité et localisation du chargeur (chargeur embarqué, situé en des points du réseau ou situé dans le garage du véhicule) ;
- c) différence éventuelle de coût de l'électricité entre le biberonnage et la recharge normale (de nuit).

4.3.10. D'après les prévisions, des chargeurs légers, peu encombrants et d'une forte capacité seront disponibles dans un proche avenir. Grâce à ces chargeurs, il serait possible de recharger complètement la batterie de traction rapidement (en moins d'une heure). Il semble qu'une recharge rapide mais contrôlée pourrait être bien acceptée par une batterie secondaire

sans effets préjudiciables (cf. 4.3:2). L'introduction d'une recharge très rapide solliciterait toutefois les réseaux de distribution généraux et locaux. Si l'emploi d'une telle technique de charge se généralisait il pourrait en résulter des frais importants au niveau de l'infrastructure.

Bibliographie

- 4.3:1 Requirements for traction batteries for sufficient application in electric road vehicles and ways for solutions, R.von Courbière and F.H. Klein, GES, Essen, Germany, June 1983
- 4.3:2 Optimum charging of lead-acid batteries, D. Simonsson, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1985 (project report to the National Swedish Board for Technical Development ; to be published)
- 4.3:3 Private communication with Dr.Ing. H.G. Mueller in Amsterdam 1982-10-28 (Drive Electric '82)
- 4.3:4 AGIP PETROLI and energy recharges for electric vehicles, A de Majo, AGIP Petroli, Rome, 1985 (presented at Drive Electric '85 in Sorrento, Italy ; paper n° 1.11 of the proceedings)

CHAPITRE 5 : PROGRES TECHNIQUES

5.1. Systèmes embarqués de conversion et de stockage de l'énergie

La mise au point de nouveaux systèmes embarqués de conversion et de stockage de l'énergie permet d'utiliser de l'énergie non pétrolière dans les transports. L'électricité est le principal de ces autres vecteurs d'énergie : elle est utilisable pour propulser des véhicules à accumulateurs ou pour produire de l'hydrogène destiné à alimenter des piles à combustible. Le gaz naturel et le biogaz en sont d'autres qui peuvent servir à produire des carburants liquides, tels que le méthanol et l'éthanol, destinés à alimenter des moteurs à combustion interne et des piles à combustible sophistiquées.

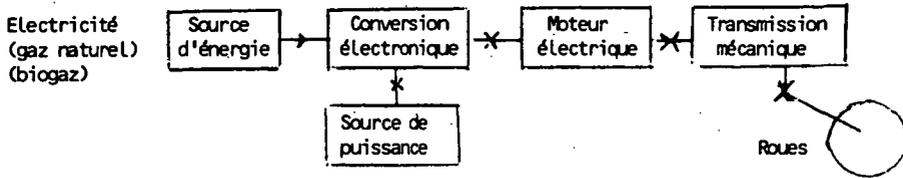
Les accumulateurs sont des sources d'énergie qui ne conviennent que pour les transports urbains tandis que les systèmes qui font appel à des combustibles, avec à terme conversion de l'énergie au moyen d'une pile à combustible embarquée, ouvrent la voie aux transports lourds à longue distance.

5.1.1. Chaîne de traction des véhicules électriques

L'étude des exigences auxquelles doivent répondre les systèmes de conversion et de stockage de l'énergie a été effectuée pour des véhicules à moteur (s) électrique (s) alimenté (s) par de l'énergie stockée à bord. Ces véhicules englobent, comme le montre le tableau 5.1., des VE dont la source d'énergie est constituée par des accumulateurs, des piles à combustible ou un groupe générateur thermique et qui peuvent avoir un accumulateur ou un volant comme source complémentaire d'énergie utilisable pour les besoins de pointe (accélération, etc.) ou un stockage accéléré (exemple : freinage). Comme elle porte essentiellement sur les véhicules "tout" électriques, l'étude ne comprend pas les véhicules à groupe générateur thermique et n'aborde que brièvement les piles à combustible.

ENERGIE PRIMAIRE

CHAINE DE TRACTION



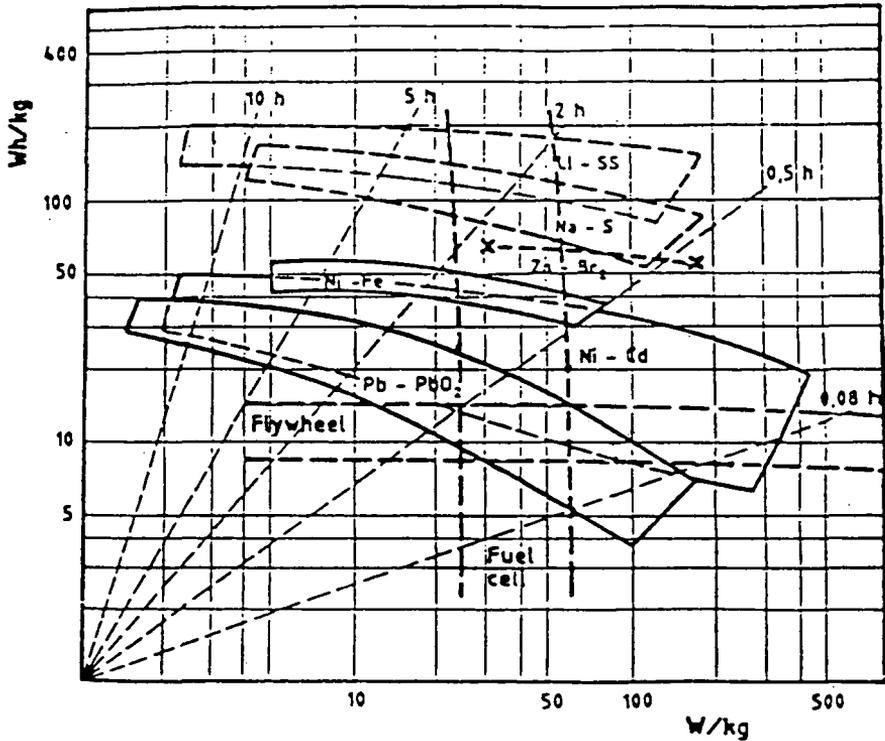
Accumulateurs :	Accumulateurs :
Plomb/acide	Plomb/acide
Nickel/fer	Nickel/fer
Zinc/brome	Nickel/cadmium
Sodium/soufre	Volant
Nickel/zinc	Electromécanique
Lithium solide	
Piles à combustible	
Alcool /air	
Hydrogène/air	
Groupe générateur thermique	

ERL-86 I F1069c

Tableau 5.1. - Chaîne de propulsion d'un véhicule électrique avancé

5.1.2. Possibilités actuelles, perspectives à court et à long terme

L'analyse des sources d'énergie des VE montre que les accumulateurs offrent des perspectives non seulement immédiates, mais également à court et à long terme. L'accumulateur plomb/acide est à l'heure actuelle le seul qui soit disponible sur le marché en quantités commerciales. Les accumulateurs nickel/fer et zinc/brome devraient quant à eux être disponibles à court terme, c'est à dire d'ici trois à cinq ans, parce qu'ils existent déjà sous forme de prototype et sont actuellement testés sur des véhicules électriques; Les accumulateurs Nickel/fer équipant même des flottes de démonstration. Les accumulateurs sodium/soufre et nickel/zinc sont les formules envisageables à moyen terme, c'est à dire d'ici quatre à six ans. A long terme, les piles à combustible à température ambiante ou moyenne et les accumulateurs entièrement solides, par exemple les accumulateurs entièrement solides au lithium devraient devenir les meilleures sources d'énergie pour VE. Le graphique 5.2 donne les rapports énergie/puissance des différents systèmes.



Graphique 5.2. - Energie et puissance spécifiques des différents systèmes de conversion et de stockage de l'énergie.

Les accumulateurs nickel/cadmium, métal/air et zinc/chlore sont des sources d'énergie électrochimiques qui n'ont pas été étudiées parce que leur prix reste prohibitif ou qu'elles ne sont pas produites en Europe.

5.1.3. Performances et coûts

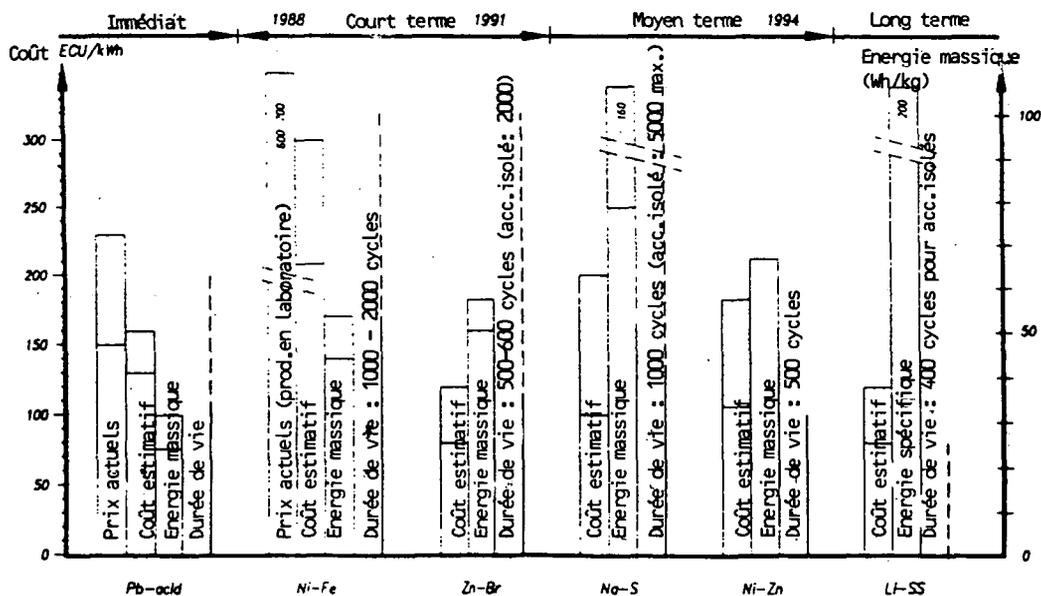
Nous avons évalué et comparé les performances techniques des couples électrochimiques précités et leurs possibilités d'utilisation sur les VE, c'est à dire leur :

- énergie massique (Wh/kg)
- puissance massique (W/kg)
- rendement

ainsi que leurs caractéristiques économiques, c'est à dire

- leur prix actuel en Ecus/kWh pour les accumulateurs plomb/acide et
- leur coût prévisible pour des productions de l'ordre de 100 000 kWh par an et les coûts estimatifs des accumulateurs avancés.

Les principales caractéristiques des accumulateurs étudiés sont illustrées dans le tableau 5.3 et analysées dans les paragraphes 5.1.4. à 5.1.9.



Graphique 5.3 : Coûts (*) et caractéristiques techniques les plus importantes des différents accumulateurs.

(*) Tous les prix, autres que ceux des accumulateurs plomb/acide, sont des estimations.

5.1.4. Accumulateur plomb/acide

L'accumulateur tubulaire plomb/acide est le seul accumulateur de traction actuellement disponible sur le marché européen si l'on met à part les batteries Nickel-Fer commercialisées en petites quantités. D'énergie massique relativement faible, il se caractérise en outre par le fait que l'augmentation de la puissance appelée fait diminuer très rapidement l'énergie stockée (les grandes vitesses et les côtes réduisent considérablement l'autonomie). Il s'ajoute à cela qu'il est difficile de contrôler son état de charge, que l'accumulateur est sensible à la profondeur de décharge et que la polarité des cellules peut facilement s'inverser (il reste alors possible de faire avancer le VE, mais l'accumulateur est irrémédiablement endommagé). Il faut aussi rappeler qu'il faut à ces accumulateurs des régimes de charge sophistiqués, un entretien minutieux et des systèmes coûteux d'approvisionnement en eau. Les données techniques et commerciales ci-après sont des moyennes fournies par les constructeurs et obtenues au terme de plusieurs programmes de démonstration :

- énergie massique : 23-28 Wh/kg (conduite urbaine)
- rendement : 70-80%
- durée de vie : 600-1.200 cycles
- prix : 150-230 ECUS/kWh
- coût estimatif : 130-160 Ecus/kWh pour des productions d'électricité supérieures à 100.000 kWh/année.

Les constructeurs européens ont engagé des programmes de recherche et de développement sur les accumulateurs de traction plomb/acide avancés ainsi que sur les accumulateurs plomb/acide à plaques. Ces études mettent l'accent sur les accumulateurs bipolaires à circulation d'électrolyte, la régulation des températures et la surveillance des cellules.

5.1.5. Accumulateur nickel/fer

Ce type d'accumulateur, conçu et produit en petites quantités par SAFT en France et SAB NIFE en Suède, est considéré comme une possibilité à moyen terme. Les accumulateurs nickel/fer, utilisés depuis le début du siècle, sont appréciés pour leur durée de vie, leur robustesse et leur résistance à la décharge profonde. Leur puissance massique et leur rendement énergétique sont en revanche faibles.

Diverses innovations, notamment l'utilisation d'électrodes en oxyde de nickel fritté, d'électrodes en fer fritté ou plastifiées et de séparateurs spéciaux, ont permis de remédier à ces désavantages et de créer un accumulateur techniquement utilisable sur des V.E. Le dernier handicap à surmonter est celui du prix des électrodes d'oxyde de nickel. Des études ont été entreprises en vue de diminuer le coût du composant. La longévité de l'accumulateur permet d'arriver à un coût par cycle acceptable.

Les coûts et performances indiqués ci-après sont des moyennes tirées des chiffres fournis par les constructeurs :

- énergie massique : 45-55 Wh/kg en 3 heures
- densité énergétique : 95-110 Wh/litre
- puissance massique : 100-180 W/kg à mi-charge
- rendement : 60 %
- durée de vie : 1000 - 2000 cycles
- prix : 600-700 Ecus/kWh (production en laboratoire)
- coût estimatif : 200-300 Ecus/kWh pour une production d'électricité 100.000 kWh par an

5.1.6. Accumulateur zinc/brome

L'accumulateur zinc/brome d'Exxon étudié par SE A en Autriche semble être un candidat possible à la commercialisation à court terme. Cet accumulateur, qui présente des traits communs avec la pile à combustible, a pour principal avantage d'autoriser une décharge complète, une maîtrise facile des températures grâce à la circulation de l'électrolyte et une mesure très précise ($\pm 2\%$) de l'état de charge. Le recours massif aux matières plastiques offre des possibilités de production à bon marché en grande série. Les expériences effectuées en laboratoire et sur le terrain, avec un accumulateur de 16 kWh sur une VW Golf électrique, ont été couronnées de succès.

	<u>Accumulateur</u>	<u>Cellule unique</u>
- Energie massique	52 - 58 Wh/Kg	
- Densité massique	60 - 74 Wh/litre	
- Intensité en pointe	60 -135 W/litre	
- Rendement	environ 60 %	
- Durée de vie	500-600 cycles	2.000 cycles
- Coût estimatif	80 - 120 Ecus/kWh	

5.1.7. Accumulateur sodium/soufre

L'accumulateur sodium/soufre est étudié en Europe par les sociétés CGE en France, BBC en Allemagne et Chloride Silent Power au Royaume-Uni.

Les principaux avantages présentés par ce couple électrochimique résident dans l'utilisation de matières premières qui permettent d'envisager la production d'un accumulateur peu coûteux et dans son rendement élevé imputable à l'absence de réactions secondaires parasites entraînant une décharge spontanée. Toutefois, les températures de fonctionnement élevées (310-330°C) et divers problèmes, dont le craquage de l'alumine β utilisé comme électrolyte, l'étanchéité et le cyclage (vieillesse) thermique, ont retardé la commercialisation des accumulateurs sodium soufre.

Diverses innovations récentes, notamment le système britannique à mini-tubes, et améliorations des méthodes de fabrication, celle notamment de l'alumine, en France, permettent désormais d'envisager une commercialisation de ces accumulateurs d'ici les cinq à six prochaines années.

Les données fournies par les fabricants sont tirées de mesures effectuées sur des batteries complètes d'accumulateurs d'essais réalisés avec des accumulateurs isolés et de divers autres calculs. Les performances moyennes devraient se présenter comme suit :

	<u>Batterie</u>	<u>Accumulateur isolé</u>
- Energie massique	80 - (160) Wh/kg	(235 Wh/kg)
- Densité énergétique	65 - 120 Wh/litre	
- Rendement	65 - 75 %	(80 %)
- Durée de vie	1.000 cycles	(jusqu'à 5.000 cycles)
- Coût estimatif	100-200 Ecus/kWh	

5.1.8. Accumulateur nickel/zinc

L'accumulateur nickel/zinc récemment mis au point par SEREGIE en France offre également de bonnes perspectives de commercialisation à moyen terme. La grande rapidité de la dissolution et de la redéposition du zinc laisse envisager des puissances massiques élevées. Les accumulateurs nickel/zinc classiques présentent de sérieux problèmes de formation de dendrites de zinc qui provoquent des déformations, des court-circuits internes et des défaillances de certains éléments. Le nouvel accumulateur nickel/zinc français surmonte ces problèmes en faisant circuler l'électrolyte et en remplaçant le zinc métallique par du zinc oxydé.

Les performances des accumulateurs prototypes de 80 Ah seraient les suivantes :

énergie massique	70 Wh/kg en deux heures
densité énergétique	100 Wh/l
durée de vie	500 cycles
coût estimatif	100 - 180 Ecus/kWh

5.1.9. Accumulateur entièrement solide au lithium

Ces accumulateurs sont les derniers à avoir été examinés. Harwell en Grande-Bretagne et ERL au Danemark étudient actuellement, avec des partenaires industriels, un accumulateur de ce type dans le cadre d'un projet anglo/franco/danois subventionné par la CEE.

Par ailleurs, Les Laboratoires d'énergétique de Grenoble, la Société nationale Elf Aquitaine et l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec étudient également ensemble un accumulateur solide au lithium. Le lithium est un métal intéressant pour la fabrication des anodes parce qu'il est léger et a un potentiel négatif élevé (moins 3,5 V), une équivalence électrochimique élevée et une bonne conductivité. Le nouvel accumulateur entièrement solide au lithium fonctionne à des températures de 100-160°C, fait appel aux polymères pour l'électrolyte, à une cathode feuilletée avec lithium interstitiel et est conçu comme une pile à film mince de 0,1 mm d'épaisseur au maximum. Cela permet de construire des batteries de traction bipolaire de tension élevée.

Quoique leurs performances n'aient jusqu'ici pu être étudiées que sur de petites unités : en laboratoire, ces tests ont donné les résultats suivants :

énergie massique	200 Wh/kg
densité énergétique	250 Wh/Litre
durée de vie	400 cycles
coût estimatif	80 - 120 Ecus/kWh

5.1.10 Piles à combustible et volants

La combinaison d'une pile à combustible fournissant le courant de base avec un volant électromécanique fournissant le courant de pointe (voir figure 5.2) est particulièrement bien indiquée pour les VE sur lesquels les variations de charges sont énormes. Les deux systèmes, qui fournissent de l'électricité directement, sont étudiés en Europe.

Les trois types de pile étudiés sont la pile alcaline, la pile directe méthanol-air et la pile indirecte méthanol-air. Comme la pile alcaline doit être approvisionnée en hydrogène pur, sa généralisation dans les transports est conditionnée par l'existence de postes d'approvisionnement en hydrogène pur produisant cet hydrogène par électrolyse. L'hydrogène est à l'heure actuelle stocké à bord des VE dans des réservoirs à haute pression ou sous forme liquide, à très basse température. Des unités de stockage d'hydrures métalliques devraient être commercialisées d'ici quelques années. Les piles à combustibles alcalines sont réalisées en laboratoire par plusieurs laboratoires et sociétés industrielles européennes. La société ELENCO, Belgique, a bâti une usine pilote de production d'électrodes dans laquelle elle produit des modules de piles en petites séries. Une camionnette électrique ainsi équipée est actuellement testée sur route. La commercialisation des piles alcalines peut donc être considérée comme une perspective à moyen terme.

Le nouveau programme communautaire de recherche et de développement englobe la mise au point d'une pile indirecte méthanol-air. Le programme anglo/franco/danois de recherche "Etude des matériaux pour piles avancées à combustible solide" est axé sur la mise au point d'une pile à combustible solide bon marché. Cette pile est une pile hydrogène-air qui n'a pas besoin d'hydrogène pur comme combustible. Les problèmes de stockage de l'énergie sont les mêmes que pour la pile alcaline. Une version modifiée transforme du méthanol dans un "reformer" qui fait partie intégrante de la pile. La mise au point d'une pile directe méthanol/air utilisable sur des véhicules routiers électriques a été étudiée par Shell (Royaume-Uni) au cours des années 1970 et au début des années 1980. La CEE a lancé cette année un projet franco-britannique de mise au point d'une pile directe méthanol-air à électrolyte liquide. Les piles directes et indirectes méthanol-air présentent en principe l'avantage de consommer du combustible liquide à haute énergie massique et haute densité énergétique. Elles devraient donc pouvoir être utilisées sur des véhicules électriques lourds destinés à effectuer des transports à longue distance. Etant donné que les deux projets de recherche et de développement en sont encore à leurs débuts, la commercialisation ne peut être envisagée qu'à long terme.

Le volant électromécanique, boîte noire avec bornes électriques de stockage de courant de pointe, est un système qui a été étudié dans plusieurs pays européens, notamment au Danemark, en France et au Royaume-Uni. La formule qui semble avoir la préférence est celle de l'unité scellée avec machine homopolaire tournante. Le volant, utilisé comme unité tampon, présente l'avantage de supporter un nombre très élevé (en principe illimité) de cycles. L'utilisation de la technique du volant, avec rotors réalisés en alliages d'acier conventionnels, ne peut toutefois s'envisager que dans le cas où le volume d'énergie peut rester faible, c'est à dire là où il sert de réservoir-tampon d'énergie appelable en accélération ou récupérable au freinage ou encore utilisable pour des parcours très courts (trolleybus bimodes). L'électronique de puissance à semi-conducteurs actuelle pourrait, avec des crédits suffisants, laisser envisager la commercialisation à moyen ou même court terme de ces volants électromécaniques.

5.1.11. Conclusion

Les performances des accumulateurs de traction actuellement mis au point en Europe donnent à penser qu'ils pourraient satisfaire d'ici trois à six ans les besoins d'énergie et de puissance de véhicules électriques utilisés à grande échelle en milieu urbain. L'électrification des transports routiers à longue distance postule cependant le recours aux systèmes à combustibles (liquides) et, à terme, la commercialisation de piles à combustible appropriées. Dans l'intervalle, on pourrait voir circuler des véhicules hybrides avec groupe thermique électrogène. Ceux-ci pourraient également conserver à long terme des possibilités d'utilisation spécifiques.

Pour ce qui est du court terme, les accumulateurs plomb/acide améliorés ainsi que les accumulateurs nickel/fer et zinc/brome présentent des performances satisfaisantes. Les améliorations récentes apportées à la production de l'alumine- β et à la conception des cellules font des accumulateurs sodium/soufre des sources d'énergie prometteuses à moyen terme. Le nouvel accumulateur nickel/zinc avec circulation d'électrolyte pourrait également être amélioré au point de devenir intéressant comme accumulateur de traction. Les accumulateurs entièrement solides et les piles à combustible, ces dernières combinées avec un dispositif de stockage de l'énergie de pointe, devraient à l'avenir trouver leur place parmi les meilleures sources embarquées d'énergie pour les VE.

Il ne faut toutefois pas perdre de vue que ces accumulateurs améliorés ne sont actuellement produits qu'en petites séries et qu'il n'y a pas d'usines capables de les produire, surtout pas les accumulateurs entièrement solides qui ne se trouvent actuellement qu'en laboratoire. Leur commercialisation à grande échelle ne peut donc être envisagée d'ici les quatre prochaines années. Il convient en outre de préciser que le consommateur ne les acceptera que si le rapport prix/performances soutient la comparaison avec celui des accumulateurs plomb/acide.

Longévité et fiabilité ne vont pas nécessairement de pair avec des coûts par cycle peu élevés si les investissements sont trop importants. Les recherches devraient donc aller dans le sens tant de la réduction des coûts que de l'amélioration des performances.

Le biberonnage peut être un facteur important de réduction des coûts parce que l'énergie fournie par l'accumulateur est alors notamment plus élevée pendant toute sa durée de vie et qu'il est possible de se contenter d'un accumulateur plus léger de plus petites dimensions.

5.2. Chaînes de traction

5.2.1. La technologie actuelle des chaînes de traction des VE à accumulateurs se fonde sur le moteur à courant continu (et à excitation indépendante dans la plupart des cas) contrôlé électroniquement par des hâcheurs. Ce type de moteur donne, s'il est bien conçu et construit, des performances satisfaisantes, une accélération régulière et des possibilités de récupération de l'énergie de freinage.

Les chercheurs s'appliquent aujourd'hui à améliorer les paramètres ci-après :

- poids et dimension ;
- souplesse de conception et d'utilisation ;
- rendement
- coût.

5.2.2. Il convient de souligner que le véhicule hybride, dont le moteur électrique est combiné ou intégré à un moteur alimenté par une autre source d'énergie primaire (généralement un moteur thermique), permet de dépasser les limites imposées à l'autonomie par les accumulateurs.

La formule hybride peut présenter un intérêt particulier pour les autocars et autobus souvent appelés à parcourir des distances supérieures à ce qu'autorise l'autonomie offerte par les accumulateurs et qui peuvent, par ailleurs, plus facilement embarquer des équipements complexes.

L'analyse comparative des chaînes de traction électrique s'étend également aux véhicules hybrides puisqu'ils comprennent une telle chaîne et à la récupération de l'énergie de freinage qu'elles autorisent, en tenant compte du niveau de puissance approprié.

5.2.3. Les systèmes qui semblent pouvoir avoir un impact vis à vis des quatre paramètres précités sont ceux qui se basent sur les moteurs sans collecteur avec électronique de puissance combinant les fonctions de commutation cyclique des enroulements d'induit et de contrôle des performances mécaniques.

Sur la base de l'expérience acquise par les constructeurs et les chercheurs qui s'intéressent à la traction électrique, les possibilités des moteurs à courant continu ont donc été comparées avec celles des moteurs

- asynchrones (à induction) ;
- synchrones à excitation électrique ;
- synchrones excités par des aimants permanents (Sm-Co ou Nd-Fe-B).

Tous ces moteurs sont alimentés par des onduleurs dont les électroniques de puissance sont de structure assez semblable et dont les logiques de commande varient selon le type de moteur.

5.2.4. L'analyse comparative s'est effectuée sur les trois catégories de véhicules pris comme référence dans la présente étude, à savoir la voiture particulière, la fourgonnette, la camionnette (voir annexe 5.1) dont les moteurs sont censés avoir une puissance nominale de 10,15 et 40 kW et des accumulateurs de 96, 96-144 et 144-216 V.

Tous les systèmes sont analysés dans l'état actuel de la technique. Les résultats peuvent se résumer comme suit.

5.2.4.1. Poids et dimensions

Les moteurs sans collecteur sont beaucoup moins lourds dans un rapport 0,5 à 0,6 que les moteurs à courant continu. Cette légèreté relative s'explique par l'absence du collecteur et, surtout, par la disparition des limites imposées à la vitesse de rotation et à la densité du courant par la commutation mécanique.

Pour ce qui est du convertisseur (électronique de puissance), le poids du convertisseur sans collecteur est, dans l'état actuel de la technique, supérieur à celui du convertisseur d'un moteur à courant continu (le rapport peut être de 1 à 1,5). Etant donné toutefois que le poids de cet élément ne représente qu'une partie relativement minime du poids total du système, les moteurs sans collecteur restent fortement avantagés sur ce plan.

Le rapport entre le poids total des chaînes de traction avec moteur sans collecteur, d'une part, et moteur à courant continu, d'autre part, varie entre 0,6 et 0,8 selon le type de chaîne et la catégorie de véhicules. Les systèmes à haute densité de courant peuvent également tirer avantage du fait qu'il est plus facile de refroidir (au moyen d'un liquide par exemple) les enroulements du stator.

Le progrès technique prévisible dans le domaine de l'électronique et des aimants permanents permettra sans aucun doute d'alléger encore les chaînes de traction, et celles qui comprennent un moteur sans collecteur davantage que celle qui font appel aux moteurs à courant continu.

5.2.4.2. Souplesse de conception et d'utilisation

L'absence de collecteurs permet d'adapter très facilement la conception - tant en termes de forme que d'équilibre entre les paramètres de la puissance (couple et vitesse) - à l'utilisation envisagée. Il est en principe tout aussi possible d'avoir des moteurs conçus pour tourner très vite que des moteurs conçus pour délivrer un couple très élevé à basse vitesse.

5.2.4.3. Rendement

Les chaînes de traction à moteur sans collecteurs ont un rendement un peu meilleur que celles qui recourent aux moteurs à courant continu. Cela est vrai plus particulièrement pour les moteurs synchrones, à excitation électromagnétique ou à aimants permanents, qui peuvent améliorer de 5 à 6 % des rendements proches de 80 % et avec lesquels les variations de la puissance de sortie et de la vitesse sont plus faibles.

5.2.4.4. Economie

Le coût généralement plus élevé de l'électronique des chaînes de traction à moteur sans collecteur est compensé dans une certaine mesure par le coût moins élevé du moteur lui-même explicable par son allègement et la simplification de sa construction.

La comparaison des chaînes à moteur sans collecteurs avec celles qui utilisent un moteur à courant continu et des hâcheurs a révélé que dans l'état actuel de la technique (voir annexe 5.2, 5.3, 5.4 et 5.5) :

- le coût du système associant moteur asynchrone et onduleur est comparable à celui du système à courant continu ;
- la chaîne de traction composée d'un moteur synchrone à excitation électrique et d'un onduleur est plus coûteuse, le rapport de coût variant entre 1 et 1,2 selon la catégorie de véhicule ;
- le coût des chaînes à moteur synchrone excité par des aimants permanents est comparable à celui des chaînes à moteur à courant continu ou un peu plus élevé (le rapport oscille entre 1 et 1,2) à cause des aimants en Samarium-Cobalt. L'utilisation des aimants en Neodymium-Fer-Bore actuellement en cours de mise au point pourrait réduire légèrement le coût du moteur.

Si l'on fait entrer en ligne de compte les progrès qui devraient pouvoir être réalisés dans un laps de temps suffisant pour la mise à l'épreuve de ces nouveaux systèmes, la comparaison économique devient favorable aux chaînes de traction qui utilisent les moteurs sans collecteurs. Ceci s'explique par la diminution prévisible du coût de l'électronique (tant de la micro-électronique que de l'électronique de puissance) par rapport aux composants électromécaniques ainsi que par le poids de cette électronique dans le coût total des chaînes à moteur sans collecteur dont elle représente de 67% (moteur synchrone) à 80% (moteur asynchrone) alors qu'elle représente moins de 50 % du coût des chaînes avec moteur à courant continu.

5.2.5. En conclusion, il semble indiqué, en ce moment où les véhicules électriques font appel à la technique des moteurs à courant continu, de poursuivre l'étude des machines sans collecteur eu égard aux avantages techniques qu'elles semblent devoir présenter. Si le moteur à courant

continu semble être à l'heure actuelle la formule la moins coûteuse, le développement de l'électronique devrait améliorer la compétitivité des machines sans collecteur qui pourraient ainsi devenir la technologie la meilleure pour les VE du futur. L'annexe A 5.6 contient une comparaison globale des chaînes à moteur sans collecteur et des chaînes à moteur à courant continu.

REFERENCES : Rapport "Recherches Amont sur les véhicules électriques" ;
PSA études et recherche, 75 avenue de la Grande Armée, 75016 PARIS.

CHAPITRE 6 : PRODUCTION

6.1. COÛTS DE PRODUCTION

6.1.1. Il est difficile d'estimer les possibilités de réduction des coûts de production parce que les constructeurs considèrent ces coûts comme confidentiels et que le prix de vente des véhicules diffère profondément d'un pays à l'autre. Les estimations fournies par des constructeurs italiens, allemands et britanniques confirment néanmoins ce que le simple bon sens laissait deviner, à savoir que la production des véhicules électriques en grande série permettrait de réaliser des économies considérables.

6.1.2. Ces constructeurs ont estimé le prix de sept VE existants (trois italiens, trois allemands et un britannique) et de leurs accumulateurs pour trois volumes différents de production annuelle, à savoir 100, 1.000 et 10.000 unités. Certains ont également donné des chiffres valables pour des productions annuelles de 100.000 unités et pour quelques volumes de production intermédiaires. Ces chiffres ont servi à établir les courbes des figures 6.1. et 6.2. dans lesquelles l'évolution des prix entraînée par l'augmentation des volumes de production est comparée à celle des prix des véhicules thermiques équivalents, quoique dans la pratique ces augmentations de volume n'entraînent pas nécessairement une baisse continue des prix.

6.1.3. En Grande-Bretagne, le montage de petits utilitaires électriques sur des chaînes dont sortent également des véhicules conventionnels a permis d'obtenir certains des avantages inhérents à la grande série avec des volumes de production peu importants. Comme les constructeurs n'ont toutefois pas explicité leurs méthodes de calcul, il est impossible de juger l'exactitude de leurs estimations ou d'expliquer l'importance des écarts observés entre elles.

6.1.4. Le tableau 6.3. réunit les principales caractéristiques techniques de ces VE ainsi que des véhicules thermiques équivalents. L'aptitude du VE à remplacer un véhicule conventionnel dépend de l'usage qui doit en être fait. Il semble ainsi que les capacités moindres des VE conviendraient

FIGURE 6.1 : ESTIMATED PRICE RATIOS OF EVs

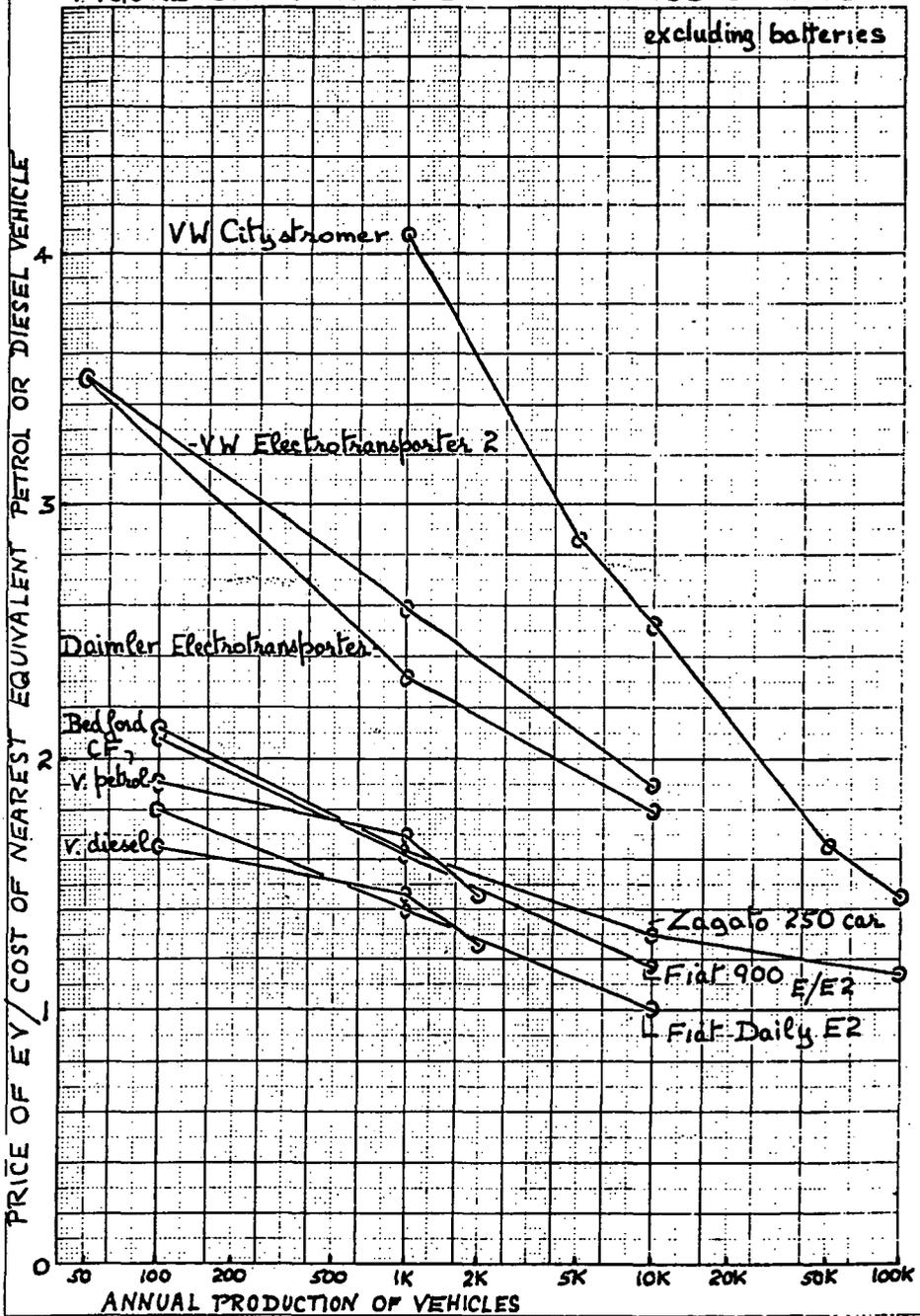


FIGURE 6.2 : ESTIMATED BATTERY PRICES

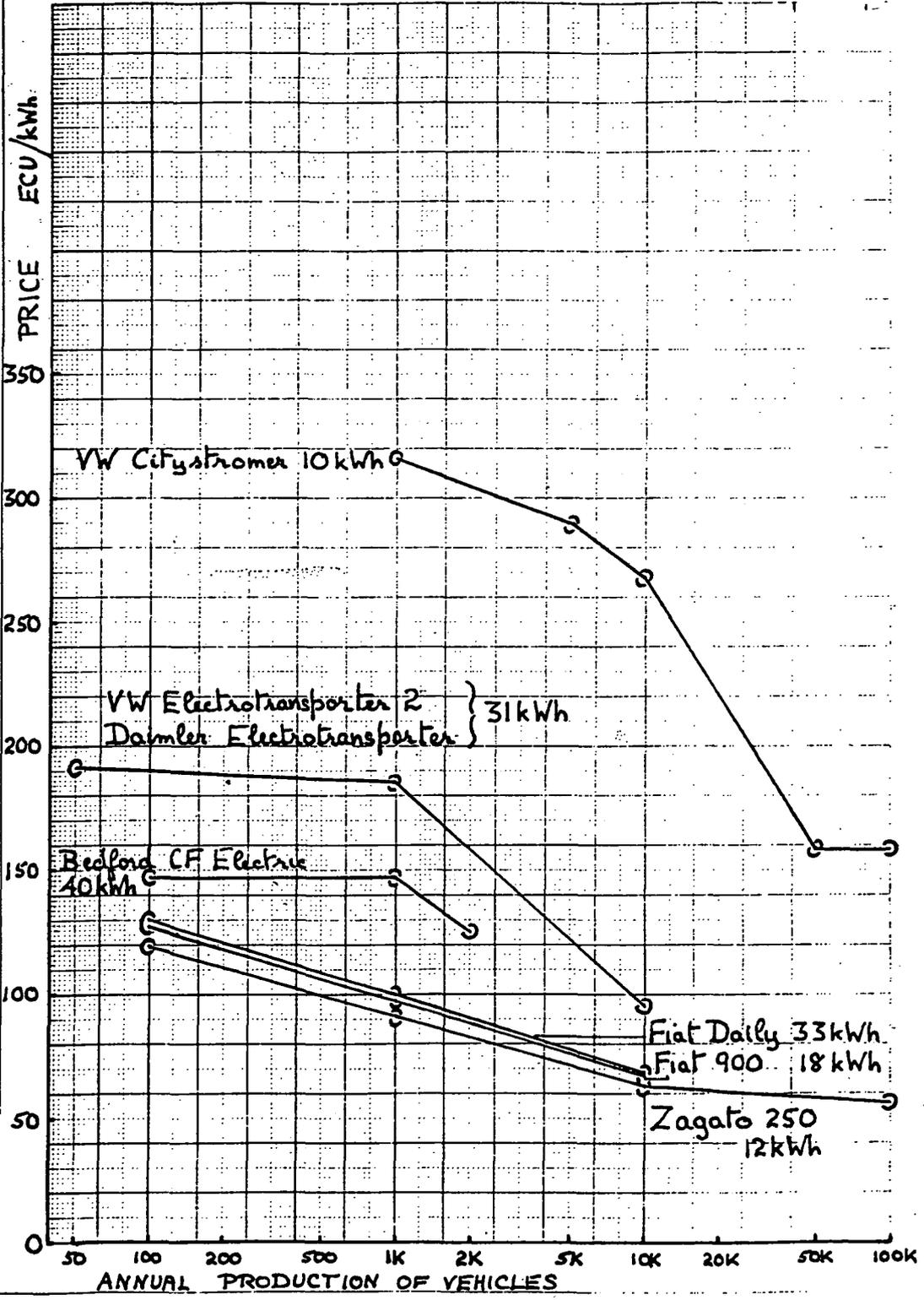


FIGURE 6.3 - LEADING TECHNICAL PARTICULARS OF EVs AND PETROL OR DIESEL VEHICLES

Vehicles	+	Pay- load ps+kg	Range of EV km	Batt wght kg	Gross wght kg	Turng circl m	Maxmm speed km/h	Acceln 50km/h secs	Clmbg abltty %
Zagato 250 car	E	4+60	55	310	1165	6.6	55*	>20*	30
Fiat Panda 30L	P	5+50			1050	10.0	115	6.8	
Fiat 900 E/E2	E	570	70	480	1900	9.0	65*	12.5	18
Fiat Auto 900E	P	670			1500	9.0	105	8.5	
Fiat Daily E2	E	950	80	900	3750	10.5	65*	14.5	18
Iveco Daily 30.8	D	1300			3000	10.5	110	11.0	
VW Citystromer	E	330	60	400	1650	10.5	100	13.0*	30
VW Golf	P	515			1360	10.5	151	5.5	
VW Electrnsprtr 2	E	700	60	1000	3000	10.7	80	14.0	25
VW Transporter Kombi	D	935			2400	10.7	110	9.0	
Daimler Electrnsprtr	E	1000	50	1000	4200	11.8	63*	15.0	15
Daimler Trnsprtr 207	D	1060			2800	11.8	112	11.3	
Bedford CF Electric	E	950	80	1200	3500	11.2	80*	11.0	16
Bedford CF Petrol	P	1000			2570	11.2	127	8.2	
Bedford CF Diesel	D	1000			2570	11.2	116	9.6	

+ Electric, Petrol or Diesel

* Substantially lower maximum speed or poorer acceleration than petrol or diesel counterpart

parfaitement dans les cas, connus, où la charge utile des véhicules traditionnels n'est jamais ou n'est que rarement exploitée intégralement. Il serait sans doute possible d'estimer le nombre de ces VE de substitution si un constructeur envisageait sérieusement de les produire en grande série. Il est également possible d'évaluer leur rayon d'action ainsi que leur aptitude en côte mais il est en revanche plus difficile, sinon impossible, d'estimer la qualité de leur vitesse maximum et de leur pouvoir d'accélération.

L'étalement sur dix années de la construction des 6 millions de voitures particulières électriques et du million de camionnettes électriques considérées comme envisageables et sa répartition à parts égales entre quatre constructeurs européens permettraient à chacun de sortir annuellement 150.000 voitures et 25.000 camionnettes en moyenne et les besoins de remplacement deviendraient ensuite importants. Il semble donc réaliste de penser que plusieurs constructeurs européens pourraient produire des séries suffisantes pour entraîner une baisse du coût de production des véhicules et leur permettre, partant, de supporter la concurrence des véhicules conventionnels correspondants. Cette possibilité est examinée dans le chapitre 7.

6.2. MATIERES PREMIERES

6.2.1. Les 7 millions de véhicules précités et leurs accumulateurs "consommeraient", s'il s'agissait d'accumulateurs plomb-acide, des quantités de cuivre et de plomb représentant, en moyenne annuelle, environ 0,7 et 6 % de la production minière mondiale actuelle pendant dix ans. Les accumulateurs nickel-fer ou nickel-zinc nécessiteraient évidemment des fournitures de ces métaux au lieu du plomb. Si les accumulateurs étaient pour moitié des accumulateurs plomb-acide, pour un quart des accumulateurs nickel-fer et pour le quart restant des accumulateurs nickel-zinc, les consommations annuelles moyennes de plomb, de nickel et de zinc représenteraient respectivement 3 %, 5 % et 0,2 % de la production minière mondiale (6.1.).

Il ne devrait pas être difficile de trouver le cuivre et le plomb, mais certains des gisements de nickel et de zinc sont loin de l'Europe. Le recyclage des métaux, qui commencerait après quelque cinq années, réduirait d'autant le volume des importations nécessaires.

6.2.3. Ces consommations provoqueraient une sortie considérable de devises européennes à laquelle ferait évidemment pendant l'incidence favorable de la diminution des importations de pétrole. Le solde net dépend des prix mondiaux des métaux et du pétrole, mais il devrait être favorable à long terme à la balance commerciale européenne.

BIBLIOGRAPHIE

(6.1.) Rapport technique sur la phase I du projet COST 302, AVERE, novembre 1984, pages 14 à 16.

CHAPITRE 7 : ASPECTS ECONOMIQUES

7.1. Coûts commerciaux et "coûts de ressource"

7.1.1. Le présent chapitre est bâti sur l'hypothèse, envisagée dans le chapitre 6, que les VE pourraient, sur le plan économique, soutenir la comparaison avec les véhicules conventionnels comparables s'ils étaient construits et vendus en beaucoup plus grand nombre qu'à l'heure actuelle. Toute comparaison des coûts des VE et des véhicules conventionnels doit opérer une distinction entre les coûts commerciaux, c'est à dire ce que les acheteurs ou les usagers payent, et les coûts des facteurs de production ou "coûts de ressource". Ces derniers représentent les coûts des ressources naturelles c'est à dire des terrains, des matières, de la main-d'oeuvre et du capital (y compris le capital à risques), consommés, utilisés ou nécessités pour la construction et l'exploitation des véhicules. La différence entre les deux coûts résulte des taxes prélevées sur les constructeurs et les utilisateurs des véhicules, des subventions qui leur sont accordées et de la faculté donnée aux utilisateurs de consommer des ressources et de générer des coûts sans contrepartie financière (7.1.).

7.1.2. Le facteur important dans l'évaluation des possibilités futures d'augmentation du nombre des VE est constitué par les coûts commerciaux. Les VE sont privilégiés dans ce type de comparaison par le fait qu'ils échappent, dans la plupart des pays, à la taxe sur les carburants due par les véhicules conventionnels, sont exonérés, dans certains pays, des taxes indirectes sur les véhicules et voient, en Grande-Bretagne, leur construction subventionnée pendant une période limitée. Par ailleurs, les utilisateurs de véhicules routiers ne doivent pas couvrir le coût de la pollution atmosphérique (coûts médicaux, coûts de réparation des bâtiments, coûts des dommages causés aux plantes et aux animaux) et du bruit (double vitrage, barrières anti-bruit, etc.) qu'ils causent et ne payent aucune compensation pour ces nuisances.

7.1.3. Les taxes et les subventions varient selon les pays. La Grande-Bretagne et le Danemark sont seuls à privilégier ainsi certains V E suffisamment pour les rendre commercialement compétitifs. Les subventions ne sont

toutefois accordées que pour une durée limitée en Grande-Bretagne. Toute augmentation importante du nombre de VE est donc conditionnée par l'amélioration de leur conception, la réduction de leur coût, la modification de la législation ou une combinaison de ces facteurs.

7.1.4. L'évaluation des avantages et des inconvénients présentés par les VE pour le pays dans lequel ils circulent passe nécessairement par celle du "coût de ressource", coût qui doit donc être quantifié avant de proposer aux Etats une réorientation de leur politique ou une modification de leur législation. Le "coût de ressource" comprend les coûts directs payés par les usagers, c'est-à-dire les coûts commerciaux après déduction ou addition des taxes et subventions, et les coûts indirects, tels que le coût de la pollution atmosphérique causée par les véhicules, qui ont été évalués dans le chapitre 3.

7.1.5. Afin de pouvoir comparer valablement différents types de véhicules taxés différemment dans des pays différents, nous avons convenus d'une méthode uniforme de calcul des coûts directs des VE et des véhicules conventionnels correspondants. Etant donné qu'un des avantages attendus des VE est constitué par leur durée de vie utile plus longue, la méthode la plus simple est une variante de la méthode des flux actualisés dans laquelle les coûts annuels équivalents des composants des coûts des véhicules (rapportés à leur durée de vie utile) sont calculés et comparés directement. La méthode retenue est décrite dans l'annexe 7/1 qui précise également comment les coûts indirects de la pollution atmosphérique ont été pris en compte dans le calcul des "coûts de ressource" totaux. La même méthode peut, à quelques réserves près, être adaptée à la comparaison des coûts commerciaux.

7.2. Comparaison des "coûts de ressource"

7.2.1. Nous avons comparé les "coûts de ressource" des sept VE mentionnés dans le chapitre 6 avec les coûts correspondants des véhicules thermiques comparables dans dix pays en partant des prix correspondant aux volumes de production les plus élevés pour lesquels les constructeurs ont fourni des estimations. Ces dernières tiennent compte des économies réalisables en produisant des VE en grande série, mais non des effets des progrès qui seront réalisés à l'avenir dans la conception et la production des VE ou

des véhicules conventionnels. La comparaison porte uniquement sur les composants des coûts qui diffèrent profondément entre les VE et les véhicules conventionnels, à savoir :

- a) le coût annuel équivalent du coût d'investissement du véhicule (figure 6.1.);
- b) le coût annuel équivalent du coût d'investissement des accumulateurs (figure 6.2.);
- c) le coût annuel de l'énergie consommée par le véhicule;
- d) le coût annuel d'entretien du véhicule et de ses accumulateurs;
- e) le coût annuel de la pollution atmosphérique causée par le véhicule.

Les quatre premiers sont des coûts directs, hors taxes et subventions, tandis que le cinquième est un coût indirect. La date retenue pour le calcul de tous les coûts et pour la conversion des monnaies des dix Etats membres en Ecus est celle d'octobre 1985.

7.2.2. Ces comparaisons dépendent évidemment des kilométrages annuels, variables selon les types d'utilisation. (Il semble que dans certains pays, les kilométrages annuels des voitures particulières vendues d'occasion tendent à diminuer à mesure que l'âge augmente (7.2) et qu'il puisse jusqu'à un certain point en être de même pour les véhicules affectés au transport de marchandises. Le kilométrage moyen des véhicules ne varie toutefois guère d'une année à l'autre, sauf si le type d'utilisation se modifie rapidement. Pour simplifier les calculs, nous sommes partis de l'hypothèse que le kilométrage annuel reste inchangé pendant toute la durée de vie du véhicule, bien qu'il varie évidemment d'un type d'utilisation et d'un véhicule à l'autre).

7.2.3. Si la recharge du VE s'effectue uniquement de nuit et à son point d'attache, son kilométrage journalier, et donc annuel, est limité par la capacité de ses accumulateurs, mais il peut être augmenté si l'on recourt au biberonnage, c'est-à-dire à des recharges partielles et rapides des accumulateurs là et au moment où l'occasion s'en présente. Le biberonnage n'est toutefois possible que s'il existe un nombre suffisant de postes de recharge autres que le point d'attache du véhicule. L'électricité est alors plus chère parce qu'elle est produite et distribuée de jour à des moments

où la demande totale est plus élevée. Comme ces recharges immobilisent également le véhicule, la formule convient donc mal pour de petites flottes de véhicules long-courriers dont les coûts d'immobilisation sont élevés mais convient particulièrement bien pour les grandes flottes de véhicules à faible rayon d'action surtout si le coût de leur immobilisation est nul ou minime. Les cinq camionnettes nous semblent appartenir à la première catégorie et nous avons posé comme hypothèse qu'elles parcourent leur kilométrage journalier sans biberonnage. Les rayons d'action des deux voitures particulières sont plutôt faibles pour le type de déplacement qu'elles pourraient être amenées à effectuer si leur parc atteint les 6 millions d'unités. Nous avons donc considéré qu'il y aurait biberonnage dans leur cas (voir annexe A7/1). Comme les VE ne seront pas utilisés pour effectuer des kilométrages extrêmement faibles et ne peuvent réaliser des kilométrages journaliers correspondant à leur rayon d'action maximum (éventuellement augmenté par biberonnage) nous avons comparé les coûts pour des kilométrages correspondant à 10, 30, 50, 70 et 90 % de leur rayon d'action possible (éventuellement augmenté), en fixant à 250 le nombre de jours ouvrables par an.

7.2.4. Les formules utilisées pour calculer les coûts annuels équivalents des véhicules et des accumulateurs de leur coût d'investissement sont décrites dans l'annexe 7/1. Les coûts d'investissement des véhicules thermiques représentent les prix, après déduction des ristournes habituelles, des véhicules conventionnels à boîte de vitesse manuelle dans les pays où ils sont construits. Les constructeurs pratiquent en fait des prix qui diffèrent selon les pays, mais nous n'avons pas tenu compte de ces différences parce que cela compliquerait les calculs et rendrait (à notre avis) peu compréhensibles les conclusions que nous tirons des comparaisons. Comme les constructeurs de VE feront probablement de même, l'effet de ces différences sur les comparaisons s'en trouvera réduit. Les coûts d'investissement sont donc, dans nos calculs, les mêmes dans tous les pays.

7.2.5. Les coûts annuels de l'énergie dépendent en revanche de facteurs qui varient selon les pays pour des raisons physiques ainsi que pour des raisons économiques dont les effets se font sentir à long terme, par exemple l'existence d'hydroélectricité ou la part prise par le charbon, le pétrole et l'énergie nucléaire dans la production d'électricité. Nous avons pris des prix représentatifs de l'électricité, de l'essence et du gazole dans chaque pays afin de montrer l'incidence de ces variations sur les comparaisons.

7.2.6. Les coûts d'entretien des véhicules ont été calculés dans le chapitre 4. Ils sont par hypothèse censés être identiques dans tous les pays.

7.2.7. Les coûts indirects de la pollution atmosphérique ont été calculés dans le chapitre 3. Ils varient évidemment selon les pays pour des raisons assez similaires à celles qui expliquent les variations des coûts de l'énergie. Les estimations ont été faites pour les voitures particulières (deux petites voitures), les fourgonnettes (FIAT 900 E de moins de 2 tonnes de poids total en charge) et les 4 camionnettes restantes, mais la méthode retenue part du principe que les véhicules conventionnels correspondants aux VE ont des moteurs à essence dont des pots catalytiques pourraient réduire les émissions nuisibles. Il n'y a pas sur le marché de dispositif permettant de réduire dans les mêmes proportions les émissions des moteurs diesel, mais trois des quatre camionnettes conventionnelles ont des moteurs diesel tandis que les "coûts de ressource" directs de la version diesel de la quatrième (Bedford Cf) sont moins élevés que ceux de la version à essence. Nous pouvions donc soit exclure ces VE de nos comparaisons, soit formuler une hypothèse arbitraire au sujet du coût de la pollution qu'ils causent. Nous avons opté pour la deuxième solution et considéré qu'il serait possible de concevoir des dispositifs capables de ramener les gaz d'échappement des moteurs diesel à des niveaux approximativement identiques à ceux des moteurs à essence correspondants et à des coûts approximativement identiques par véhicule.

7.2.8. Nous avons expliqué dans le chapitre 3 pourquoi nous n'avons pas tenu compte dans nos comparaisons des coûts indirects du bruit produit par les véhicules conventionnels. Nous avons également laissé dans l'ombre d'autres facteurs de coûts tels que les coûts directs des conducteurs, des garages ou autres bâtiments et des formalités administratives ainsi que les coûts indirects des accidents et de la construction, de la réparation, de la surveillance et de l'éclairage des routes parce que ces coûts sont, ceux des réparations routières en particulier, minimes pour ces petits véhicules ou quasi égaux pour les VE et les VT et n'affectent donc pas les comparaisons.

7.2.9. Les principaux facteurs de coûts ignorés dans nos comparaisons sont probablement :

- a) l'équivalence technique relative : La figure 6.3 du chapitre 6 montre à quel point les VE n'arrivent pas à égaler les caractéristiques techniques des véhicules thermiques correspondants, mais la valeur accordée par les utilisateurs à ces caractéristiques varie considérablement d'un utilisateur à l'autre et ne peut être évaluée par chacun d'eux qu'en fonction de l'usage qu'il veut en faire. Cette évaluation est souvent subjective;
- b) la fiabilité relative : les VE actuels sont généralement moins fiables que les véhicules thermiques correspondants, quoique cet écart puisse être attribué au fait que les utilisateurs connaissent mal les VE, à la mauvaise qualité des réseaux de stations service et à quelques erreurs de conception, autant d'imperfections auxquelles il pourrait être remédié dès que le nombre de ces véhicules aura augmenté. Il n'y a aucune raison pour que les VE produits en nombre suffisant ne soient pas aussi fiables ou même plus fiables que les véhicules thermiques correspondants.

7.3. Résultats des comparaisons des coûts des facteurs

7.3.1. L'annexe 7/2 comprend un jeu complet de comparaisons pour chaque VE. La camionnette Bedford CF électrique a été comparée aux camionnettes Bedford CF à essence et diesel, ce qui donne 8 comparaisons dans chacun des 10 Etats ou 80 comparaisons au total. Elles sont destinées aux lecteurs avertis des différents pays ainsi qu'aux constructeurs des véhicules et des accumulateurs plutôt qu'au grand public. La différence entre le coût annuel équivalent d'un VE et d'un VT est l'"avantage financier" du VE (ou son désavantage si la différence est négative).

7.3.2. Cette masse d'informations ne peut être digérée que si elle est présentée sous forme de moyennes des coûts correspondant aux différents kilométrages annuels. Le coût moyen de chaque composant de chaque véhicule, l'avantage moyen présenté par les véhicules électriques sur le plan du coût du composant en cause et les totaux pour cette comparaison sont indiqués sur chaque feuille de calcul. La figure 7.1 schématise l'avantage financier moyen des véhicules électriques dans 10 pays. Les moyennes sont pondérées par les facteurs 0,2,3,3 et 1 pour des kilométrages annuels représentant respectivement 10, 30, 50, 70 et 90 % du kilométrage théoriquement réalisable (le cas échéant avec biberonnage) par chaque véhicule électrique.

7.3.3. Etant donné que ces moyennes camouflent l'incidence des variations du kilométrage annuel, nous avons également présenté, dans le tableau 7.2, les écarts types de l'avantage financier sous forme de pourcentage des moyennes non pondérées. Ces écarts sont parfois importants (l'écart maximum est de 1.000 %), mais faible dans de nombreux autres cas (l'écart minimum ne dépasse pas 4 %) où l'utilisation n'influent donc guère sur la relation existant entre les coûts des VE et ceux des VT.

7.3.4. Les moyennes pondérées varient quant à elles considérablement selon les véhicules et, dans une moindre mesure quoique toujours de manière importante, selon les pays comparés. Le tableau 7.1 a été établi de telle sorte que les avantages financiers augmentent de bas en haut et de droite à gauche. A quelques rares exceptions près, le classement horizontal ne dépend pas des pays tandis que le classement vertical (des pays) ne dépend pas des véhicules comparés. Le classement horizontal ne vise pas à établir un classement des VE eux-mêmes parce que chacun d'eux est comparé avec le VT qui lui correspond le mieux et non avec d'autres VE parcourant le même kilométrage moyen, ni avec un seul et même VT. La comparaison des VE entre eux nécessiterait une procédure fort différente.

7.3.5. La méthode utilisée facilitant les analyses de sensibilité, nous avons étudié la sensibilité des moyennes pondérées aux variations ci-après des données :

- a) baisse du taux d'intérêt en termes réels de 5 à 0 %, puis hausse jusqu'à 10 % (tableau 7.3);
- b) passage du nombre de jours ouvrables de 250 à 300 par an (tableau 7.4);
- c) hausse de 100 % du coût des carburants liquides et de 20 % seulement du coût de l'électricité (tableau 7.5);
- d) modification du rapport entre les coûts d'entretien des VE et des VT : coût des VE représentant 100 % puis 50 % du coût des VT au lieu de 60 % (tableau 7.6)
- e) alignement de la durée de vie utile des VE sur celle des VT équivalents (tableau 7.7)
- f) allongement de moitié de la durée de vie utile des accumulateurs (tableau 7.8)

TABLEAUX 7.1 et 7.2 : COMPARAISON DES "COUTS DE RESSOURCE" TOTAUX

Comparaison (voir clé) ZvP FvI FvF CvG BvP BvD EvK DvD

TABLEAU 7.1 : AVANTAGE FINANCIER MOYEN PONDERE DES VE (Ecu/année)

Finlande	530	430	360	150	-370	-660	-1160	-1280
Suède	430	480	280	40	-570	-600	-1110	-1230
Suisse	360	300	230	-40	-680	-800	-1250	-1370
Danemark	330	240	200	-60	-750	-860	-1300	-1390
Grande-Bretagne	300	230	160	-100	-840	-870	-1300	-1400
Autriche	280	220	180	-130	-770	-880	-1310	-1410
France	280	170	150	-120	-880	-930	-1350	-1490
Belgique	250	140	150	-150	-850	-970	-1370	-1490
RFA	110	40	60	-300	-1080	-1100	-1460	-1550
Italie	20	-90	40	-400	-1140	-1250	-1560	-1640

TABLEAU 7.2 : ECARTS TYPES EN POURCENTAGE DES MOYENNES NON PONDEREES

Finlande	60	60	70	300	70	20	6	7
Suède	60	60	80	1000	40	30	8	8
Suisse	60	60	80	200	30	10	5	5
Danemark	60	60	90	100	20	10	5	4
Grande-Bretagne	60	60	100	80	20	10	5	4
Autriche	60	60	90	70	20	10	5	4
France	60	60	100	60	10	9	6	5
Belgique	60	60	100	50	20	10	6	5
RFA	70	90	300	6	9	10	8	6
Italie	100	70	500	10	8	20	10	8

Clé :

ZvP	Zagato 250 car	v.	Fiat Panda 30L
FvI	Fiat Daily E2	v.	Iveco Daily 30.8
FvF	Fiat 900E/E2	v.	Fiat Auto 900E
CvG	VW Citystromer	v.	VW Golf
BvP	Bedford CF Electric	v.	Bedford CF Essence
BvD	Bedford CF Electric	v.	Bedford CF Diesel
EvK	VW Electrotransporter 2	v.	VW Transporter Kombi
DvD	Daimler Electrotransporter	v.	Daimler Transporter 207

* Un signe moins indique qu'il y a désavantage financier, c'est-à-dire que le coût annuel équivalent moyen du VE est supérieur à celui du VT.

**TABLEAUX 7.3 A 7.8 : SENSIBILITE DES COMPARAISONS DES "COUTS DE RESSOURCE"
TOTAUX**

Comparaison (clé p 7.5) : ZvP FvI FvF CvG BvP BvD BvK DvD

TABLEAU 7.3 : EFFETS DU PASSAGE DU TAUX D'INTERET DE 0 A 10% SUR LES MOYENNES PONDEREES (Ecu/année)

Tous pays	0 %:	+40	+70	+60	+130	+260	+230	+340	+390
confondus	10 %:	-40	-80	-110	-150	-310	-250	-380	-470

TABLEAU 7.4 : AVANTAGE MOYEN PONDERE AVEC 300 JOURS OUVRABLES PAR AN (Ecu/année)

Finlande	650	490	420	210	-350	-730	-1220	-1340
Suède	550	540	320	80	-600	-670	-1170	-1280
Suisse	450	330	270	-20	-720	-910	-1340	-1450
Danemark	440	260	220	-40	-800	-970	-1380	-1480
Grande-Bretagne	380	240	170	-90	-910	-970	-1410	-1490
Autriche	370	260	210	-110	-840	-1000	-1400	-1510
France	360	160	160	-130	-990	-1080	-1450	-1600
Belgique	330	130	170	-150	-930	-1110	-1490	-1590
RFA	150	20	50	-340	-1210	-1250	-1570	-1670
Italie	50	-130	20	-450	-1290	-1450	-1700	-1770

TABLEAU 7.5 : MOYENNES PONDEREES EN CAS D'AUGMENTATION DE 100% DU COUT DES CARBURANTS LIQUIDES ET DE 20% DE L'ELECTRICITE (Ecu/année)

Finlande	940	820	730	630	520	-270	-890	-930
Suède	400	860	550	390	80	-190	-830	-890
Suisse	660	600	500	300	-30	-490	-1040	-1100
Danemark	640	560	480	290	-100	-520	-1070	-1110
Grande-Bretagne	560	570	410	200	-250	-520	-1050	-1110
Autriche	570	540	450	200	-160	-570	-1090	-1140
France	460	310	320	80	-500	-790	-1260	-1360
Belgique	510	360	390	140	-300	-760	-1220	-1290
RFA	320	300	260	-60	-600	-820	-1270	-1310
Italie	270	190	290	-110	-560	-980	-1370	-1390

TABLEAU 7.6 : EFFETS* DE LA VARIATION DU COUT D'ENTRETIEN DES VE : COUT D'ENTRETIEN DES VE EGAL A 100% OU 50% DU COUT D'ENTRETIEN DES VT (Ecu/année)

Tous pays	100%	-140	-140	-120	-170	-170	-170	-100	-120
confondus	50%	+40	+40	+30	+40	+60	+60	+30	+30

TABLEAU 7.7 : EFFETS DE L'EGALISATION DE LA DUREE DE VIE UTILE DES VE ET DES VT (Ecu/année)

Tous pays	-100	-350	-240	-210	-310	-310	-460	-620
confondus								

TABLEAU 7.8 : EFFETS* D'UNE AUGMENTATION DE MOITIE DE LA DUREE DE VIE UTILE DES ACCUMULATEURS (Ecu/année)

Tous pays confondus	+60	+200	+100	+140	+390	+390	+250	+250
---------------------	-----	------	------	------	------	------	------	------

* + = augmentation, - = diminution

TABLEAUX 7.9 ET 7.10 : SENSIBILITE DES COMPARAISONS DES COUTS DE RESSOURCE"
TOTAUX (suite)

Comparaisons (clé p 7.5) ZvP FvI FvF CvG BvP BvD BvK DvD

TABLEAUX 7.9 : MOYENNES PONDEREES EN CAS DE REDUCTION DE MOITIE DE L'AVANTAGE
ECOLOGIQUE NET DES VE

Finlande	380	240	240	-10	560	-840	-1300	-1420
Suède	300	300	160	-110	-750	-780	-1260	-1360
Suisse	220	120	100	-200	-860	-980	-1400	-1500
Danemark	320	120	100	-190	-870	-980	-1400	-1490
Grande-Bretagne	200	130	70	-220	-940	-970	-1390	-1480
Autriche	140	50	60	-280	-940	-1050	-1450	-1540
France	140	10	30	-270	-1040	-1090	-1480	-1610
Belgique	120	-20	-40	-300	-1000	-1120	-1500	-1610
RFA	-10	-80	-40	-440	-1200	-1220	-1560	-1640
Italie	-100	-220	-70	-540	-1270	-1380	-1670	-1740

TABLEAU 7.10 : MOYENNES PONDEREES EN CAS D'AUGMENTATION DE 100% DE L'AVANTAGE
ECOLOGIQUE NET DES VE

Finlande	820	800	610	470	0	-290	-870	-1010
Suède	700	840	530	340	-210	-240	-810	-960
Suisse	650	660	480	280	-320	-440	-950	-1100
Danemark	560	480	400	200	-510	-620	-1090	-1190
Grande-Bretagne	510	430	340	140	-640	-670	-1120	-1230
Autriche	560	560	420	170	-430	-540	-1030	-1150
France	550	490	390	180	-560	-610	-1090	-1250
Belgique	510	450	380	140	-540	-660	-1110	-1250
RFA	350	290	270	-30	-830	-850	-1250	-1360
Italie	260	170	260	-130	-880	-990	-1340	-1440

TABLEAU 7.11 : AVANTAGE FINANCIER POTENTIEL TOTAL DES VE DANS 10 PAYS

	Avantage moyen par VE - Ecu/ année			Nombre prévu de VE, en milliers			Avantage économique total en millions d'Ecu/année			
	ZvP	FvI	FvF	Voitures partic.	Camion- nette	Fourgon- nette	Voit. part.	Camion.	Four.	Total
Finlande	530	430	360	90	7	7	50	3	3	60
Suède	430	480	280	190	16	16	80	8	4	90
Suisse	360	300	230	160	13	13	60	4	3	70
Danemark	330	240	200	90	7	7	30	2	1	30
Grande-Bretagne	300	230	160	1000	83	83	300	19	13	330
Autriche	280	220	180	150	13	13	40	3	2	50
France	280	170	150	1300	108	108	360	18	16	390
Belgique	250	140	150	200	17	17	50	2	3	50
RFA	110	40	60	1560	130	130	170	5	8	180
Italie	20	-90	40	1260	**	106	30	0	4	30
Total				6000	394	500	1170	64	58	1280

** 106 000 véhicules non retenus parce que non avantageux

- g) diminution de 50 % de l'avantage écologique net des VE (tableau 7.9)
- h) augmentation de 100 % de l'avantage écologique net des VE (tableau 7.10).

7.3.6. Il ressort du tableau 7.1 que les coûts des trois premiers VE sont dans tous les pays nettement inférieurs à ceux des VT équivalents, sauf si l'on compare en Italie le Fiat Daily E2 avec la camionnette Iveco Daily à moteur diesel. Ces avantages ne seraient pas réduits à néant si le taux d'intérêt en termes réels passait à 10 % ou si les coûts d'entretien des VE étaient égaux à ceux des VT correspondants sauf en Italie et en Allemagne. La voiture Zagato resterait avantageuse, sauf en Italie, si sa durée de vie utile était égale à celle du VT correspondant, tandis que les avantages présentés par les deux autres véhicules seraient réduits à néant, sauf en Finlande et en Suède. Une diminution de moitié des avantages écologiques nets réduirait à néant l'avantage total en Allemagne et en Italie (et pour les deux camionnettes en Belgique), mais non dans les autres pays. Les avantages s'amplifieraient évidemment si le coût réel du carburant liquide augmentait par rapport à celui de l'électricité, si les coûts d'entretien des VE pouvaient être réduits, si la durée de vie utile des accumulateurs pouvait être allongée ou si les avantages écologiques nets des VE étaient majorés. Les comparaisons ont été effectuées sans tenir compte des trois grandes questions suivantes :

- a) les charge utile, rayon d'action, vitesse de pointe, accélération et aptitude en côte de ces VE sont-ils réellement suffisants pour leur permettre de remplacer un nombre de véhicules conventionnels assez élevé pour justifier leur production en grande série ?
- b) ces volumes de production permettent-ils de couvrir les frais généraux des services nécessaires de vente et d'après-vente.
- c) est-il possible d'amener un nombre suffisant d'utilisateurs potentiels à opérer la conversion ?

7.3.7. Nous n'avons pas abordé ces questions parce que nous ne disposions pas des moyens nécessaires pour les étudier de façon efficace et qu'il nous paraissait plus important d'examiner les perspectives de rentabilité (en termes de "coûts de ressource" à long terme des VE. Nos analyses ont démontré que la conversion au VE permettrait de réduire fortement les "coûts de ressource" si ces problèmes pouvaient être résolus et si les trois véhicules conventionnels retenus dans les comparaisons étaient utilisés ou pourraient l'être dans tous les pays ou dans la plupart d'entre eux.

7.3.8. L'ordre de grandeur de l'avantage financier total que Les 6 Millions de voitures particulières électriques et le million de camionnettes électriques que nous avons envisagées dans le chapitre I pourraient présenter peut être estimé en partant de l'hypothèse qu'elles peuvent être réparties entre les dix pays proportionnellement au nombre de voitures qui y sont immatriculées. Ce calcul est reproduit dans le tableau 7.11 et donne comme résultat plus d'un milliard d'Ecus par an. Même si le nombre des VE devait être divisé par trois, la demande totale occuperait deux usines produisant chacune 100.000 voitures particulières par an et trois usines produisant chacune 10.000 camionnettes par an, ce qui suffirait pour ramener les prix au niveau des estimations des constructeurs dont nous nous sommes servis dans nos calculs.

7.3.9. Le tableau 7.12 montre l'importance relative des cinq composantes (voir paragraphe 7.2.1) Les coûts annuels de ces trois VE et des VT comparables dans dix pays. (Les moyennes pondérées figurant dans le centre du tableau ont été pondérée en fonction du nombre, indiqué dans le tableau 7.11, de véhicules circulant dans les différents pays).

Aucune composante n'occupe une place réellement prépondérante, ni aucune une place négligeable, dans le coût total de l'un quelconque de ces six véhicules dans l'un quelconque des pays, exception faite peut-être du coût indirect des VE dans certains pays. Leur importance relative varie néanmoins profondément selon les véhicules et les pays. Le tableau laisse deviner les composantes qui semblent offrir les perspectives de réduction des coûts qui restent les plus prometteuses (exemple : coûts d'investissement des camionnettes électriques et de leurs accumulateurs plutôt que leur consommation d'énergie). Les données plus détaillées nécessaires à une étude sérieuse de la question figurent dans l'annexe 7/2 qui englobe également les quatre autres VE.

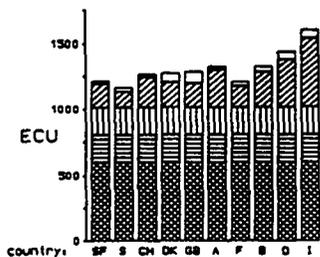
7.3.10. Cet avantage financier total potentiel est le fruit des avantages écologiques que les VE présenteraient dans tous les pays et qui se traduisent par un avantage financier indirect total de 1.700 millions d'Ecus par an. A l'heure actuelle, si les coûts indirects n'étaient pas pris en considération, les VE présenteraient un désavantage financier total direct de 400 millions d'Ecus par an.

TABLEAU 7.12. : STRUCTURE DU "COUT DE RESSOURCE"

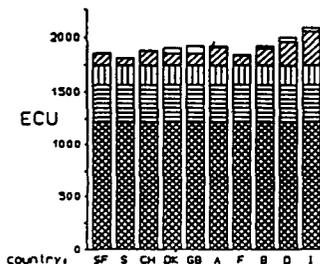
(COUT ANNUAL EQUIVALENT AU KILOMETRAGE MOYEN)

VEHICULES ELECTRIQUES

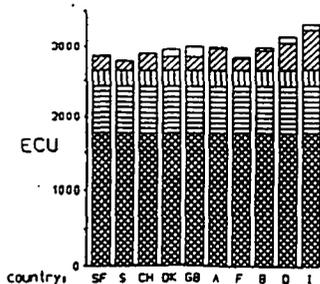
Zagato 250 car



Fiat 900 E/E2



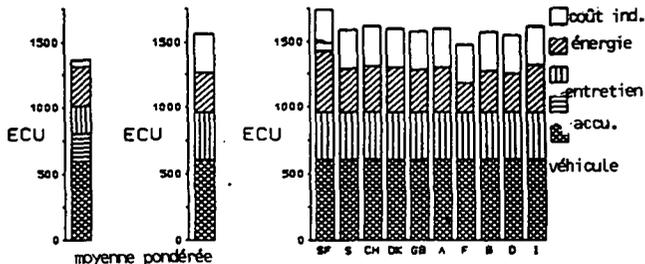
Fiat Daily E2



vs.

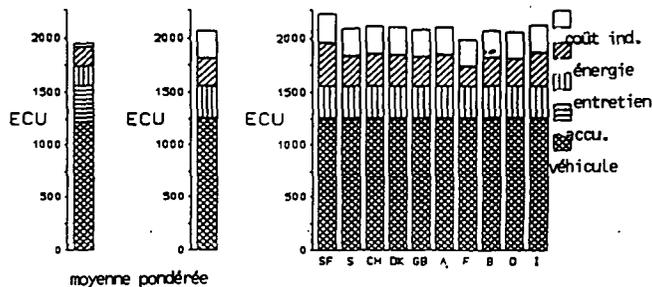
VEHICULES THERMIQUES

Fiat Panda 30 L



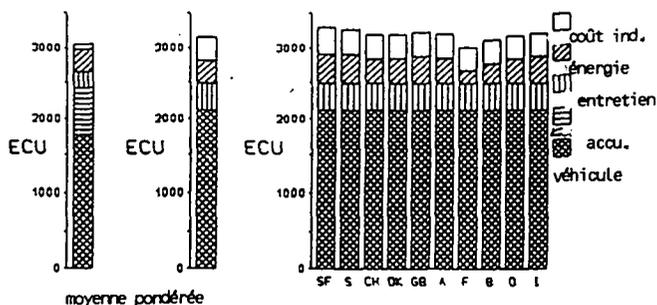
vs.

Fiat Auto 900 E



vs.

Iveco Daily 30.8



7.3.11. Ces avantages financiers indirects s'atténueront quand le niveau toléré de la pollution causée par les VT sera ramené aux taux indiqués dans le chapitre 3. La baisse de ces niveaux entraînera toutefois également une augmentation des coûts d'investissement et des coûts énergétiques des VT, augmentant ainsi les avantages financiers directs des VE. (Parallèlement, la baisse du niveau toléré de la pollution causée par les centrales électriques majorera le coût de l'électricité destinée aux VE tout en réduisant leurs coûts indirects). Si les estimations des coûts indirects que nous proposons dans le chapitre 3 sont plus ou moins exactes, la réduction nette de l'avantage financier indirect sera compensée par une augmentation nette à peu près équivalente de l'avantage financier direct, sans que l'avantage financier total soit donc entamé. Il se sera au contraire renforcé parce qu'il dépendra moins des estimations des coûts indirects, normalement moins sûres que celles des coûts directs. (La méthode d'estimation des coûts indirects résiduels, beaucoup plus faibles, des VE et des VT devra à l'avenir sans doute être profondément remaniée ou même être remplacée par une autre, mais cela n'enlève rien à la valeur de nos estimations actuelles).

7.3.12. Le tableau 7.1. montre également que les quatre autres VE ne présenteraient aucun avantage financier par rapport aux VT correspondants dans aucun pays s'ils étaient vendus aux prix estimatifs indiqués dans le chapitre 6. (Il ne faut pas tenir compte des avantages positifs présentés par le Citystromer en Finlande et en Suède parce que leur nombre est trop réduit pour justifier une production en grande série). Un taux d'intérêt égal à zéro pour cent en termes réels n'y changerait rien, sauf peut-être marginalement pour le Citystromer, non plus qu'une réduction des coûts d'entretien des VE jusqu'à un niveau représentant 50 % du coût des VT ou un allongement de moitié de la durée de vie utile des accumulateurs. Le tableau 7.4. montre qu'une augmentation du nombre annuel de jours ouvrables péjorerait les comparaisons dans la plupart des cas. L'augmentation du coût réel des carburants liquides par rapport à celui de l'électricité

(tableau 7.5.) renverserait la situation dans les pays où les VE sont comparés avec des véhicules à moteur à essence, mais pas dans ceux où ils sont comparés avec des véhicules à moteur diesel. Le doublement des avantages écologiques nets présentés par les VE renverserait la situation pour le Citystromer dans six pays (autres que l'Allemagne et l'Italie), mais non pour les trois autres VE.

7.3.13 Le tableau 6.3. du chapitre 6 montre que ces quatre VE sont techniquement plus proches de leurs correspondants thermiques que les trois autres. Il est toutefois évident que le principal problème est de ramener les coûts d'investissement de ces quatre VE et de leurs accumulateurs à des niveaux encore inférieurs à ceux que les constructeurs ont prévus jusqu'ici d'atteindre.

7.4. Comparaison des coûts commerciaux

7.4.1. La comparaison des coûts commerciaux est intéressante pour les deuxième et troisième points de notre mandat (paragraphe 1.1. du chapitre 1) qui nous charge d'étudier

- b) dans quelle mesure les parcs des VE des Etats participants devraient augmenter dans un avenir prévisible,
- c) si les gouvernements des pays participants auraient avantage à coordonner leurs politiques et leur activité législative de façon à induire un développement du parc plus rapide que celui qui peut actuellement être prévu.

7.4.2. Pour ce qui est de la première question, le coût commercial n'est évidemment qu'un des facteurs influant sur la taille du parc, c'est-à-dire la pénétration du marché, des VE. Les utilisateurs et les propriétaires sont également fortement influencés par au moins sept facteurs non monétaires, à savoir le degré d'équivalence technique des VE (voir chapitre 6, tableau 6.3.) sur le plan de leurs exigences personnelles, de la fiabilité, de la qualité des réseaux de distribution et d'entretien, des réglementations locales (de lutte contre le bruit par exemple), de la publicité et, parfois aussi, de la mode et des préjugés (pour ou contre les VE).

7.4.3. Il y a malheureusement plusieurs méthodes différentes largement utilisées pour comparer les coûts de projets commerciaux, en l'occurrence celles se référant à la "période" ou au "kilométrage". Ces méthodes sont très simples à appliquer, mais elles ne tiennent pas compte de l'inégalité de la durée de vie utile des VE, de leurs accumulateurs et des VT, ni des taux d'intérêt. Une autre méthode consiste à calculer les coûts annuels, amortissements compris, des véhicules et des accumulateurs, sans tenir compte de l'intérêt sur le capital. Il est parfois posé comme hypothèse que

Les véhicules sont vendus d'occasion après quatre ou cinq années d'utilisation, mais l'estimation de leur valeur à la revente ne peut être que très incertaine parce qu'il n'y a que très peu de VE en circulation. Eu égard à la diversité des régimes fiscaux en vigueur dans les dix pays, au fait que leurs effets dépendent de la méthode d'évaluation appliquée et à l'influence des facteurs non monétaires précités, nous avons renoncé à passer en revue la gamme des évaluations que les utilisateurs potentiels auraient probablement faites dans la pratique.

7.4.4. Pour ce qui est de la deuxième question, nous avons voulu faire ressortir les effets des régimes fiscaux actuellement appliqués dans les différents pays en apportant à nos comparaisons des "coûts de ressource" Les modifications suivantes :

- a) multiplication des coûts d'investissement des véhicules et (le cas échéant) des accumulateurs, des prix de l'énergie et des coûts kilométriques d'entretien par des facteurs (pourcentages fixes) reflétant la charge fiscale qui pèse sur eux dans les différents pays;
- b) prise en compte dans les comparaisons des autres coûts commerciaux différents pour les VE et les VT (notamment les taxes annuelles sur les véhicules dans la plupart des pays et, dans l'un d'eux, la taxe kilométrique)
- c) élimination des coûts indirects des comparaisons;
- d) maintien du même taux d'intérêt, du même véhicule, de la même durée de vie des accumulateurs et des mêmes prix hors taxes des véhicules et des accumulateurs que dans les comparaisons des "coûts de ressource".

7.4.5. Les taxes qui pèsent le plus sur les comparaisons sont les droits prélevés sur les combustibles liquides et, dans certains cas, les taxes annuelles sur les véhicules. Dans certains pays, la taxe à la valeur ajoutée représente un autre élément important du coût de l'automobile, quoi qu'elle puisse normalement être récupérée par ceux qui utilisent leur véhicule à des fins professionnelles. Quoique les sept VE puissent être utilisés à de telles fins, la majorité des petites voitures électriques seront vraisemblablement utilisées à des fins privées, tandis que les camionnettes électriques seront presque toutes utilisées à des fins professionnelles. Par souci de simplification, nous avons donc inclus la TVA (là où elle est due)

dans les comparaisons des deux voitures, alors que nous n'en avons pas tenu compte dans les autres comparaisons.

7.4.6. Ces adaptations de notre méthode de comparaison des "coûts de ressource" nous semblent également donner une méthode de comparaison des coûts commerciaux plus rationnelle que les méthodes précitées. Nous sommes conscients que les dimensions du parc des VE dépendront du jugement porté par les utilisateurs et propriétaires potentiels sur leurs avantages et inconvénients et non du fait qu'ils "devraient" s'y convertir, mais notre méthode présente de très sérieux avantages et nous la recommandons donc aux utilisateurs potentiels des VE (qui baseront évidemment leur jugement sur le prix qu'ils payeront effectivement pour les véhicules, les accumulateurs, l'énergie et les autres postes de coût).

7.5. Résultats des comparaisons des coûts commerciaux

7.5.1. L'annexe 7.3. rassemble les comparaisons des coûts commerciaux de chaque VE effectuées dans huit des dix pays avec la méthode et les données décrites dans le chapitre précédent. Le tableau 7.13 reprend les avantages financiers moyens des VE, en les pondérant de la même façon que les moyennes du tableau 7.1 qui sont d'ailleurs reproduites au bas du tableau 7.13 pour faciliter la comparaison.

7.5.2. Il ressort clairement des tableaux 7.13 et 7.1 qu'en Grande-Bretagne et en Allemagne, les avantages présentés par les VE par rapport aux VT équivalents sont plus grands sur le plan du "coût de ressource" que sur celui du coût commercial (ou que, dans certains cas, les désavantages sont plus grands sur le plan du coût des facteurs que sur celui du coût commercial) et que dans de nombreux cas, les différences sont importantes. Ces différences représentent l'effet de la substitution des taxes sur les véhicules à leurs coûts indirects. Notre méthode présente l'avantage de pouvoir isoler ces effets de ceux d'autres facteurs tels que les politiques tarifaires des constructeurs et des distributeurs qui pratiquent pour un même véhicule des prix qui diffèrent selon les pays, ainsi que des effets de l'inégalité des "coûts de ressource" de l'électricité et des carburants liquides.

7.5.3. Ces différences ne devraient que s'amplifier dans un proche avenir parce que la tendance générale (évoquée dans le chapitre 3) va dans le sens d'une réduction des niveaux tolérés de la pollution atmosphérique causée par les véhicules thermiques et les centrales. La raison en est que, toutes autres choses étant égales par ailleurs, cette tendance ne diminuera pas les avantages en termes de "coûts de ressource" totaux (ou désavantages) présentés par les VE, et ce pour les raisons évoquées dans le paragraphe 7.3, mais augmentera au contraire leurs avantages (ou atténuera leurs désavantages) commerciaux.

7.5.4. La situation est différente en Finlande, en Suède, en Suisse, en France, en Belgique et en Italie. Pour toutes les comparaisons effectuées en Finlande et certaines des comparaisons effectuées dans les cinq autres pays, les avantages réunis sur le plan du "coût de ressource" l'emportent sur les avantages commerciaux (ou les désavantages observés sur le plan du "coût de ressource" sont inférieurs aux désavantages commerciaux). Dans la mesure où nos calculs donnent une image réaliste des avantages écologiques des VE, les régimes fiscaux en application dans ces pays constituent donc un obstacle fiscal potentiel à l'amélioration que les VE peuvent apporter à leur environnement et à leur économie.

7.5.5. Ces régimes fiscaux ne sont pas encore des obstacles de fait parce qu'il n'y a pas encore assez de VE. L'ampleur de ces différences "dommageables" diminuera également à mesure que les niveaux tolérés de la pollution atmosphérique causée par les véhicules conventionnels seront abaissés. Ils ne se ramèneront toutefois pas automatiquement à des niveaux suffisamment bas, ou ne les atteindront pas assez rapidement, pour qu'ils n'entravent pas la substitution des VE aux VT dans ces pays si les VE y réussissent leur percée et n'incitent pas non plus déjà les constructeurs à renoncer à planifier une production de VE en grande série.

Bibliographie

- (7.1.) "Commercial Costs and Resource Costs of Electric Road Vehicles", revision C, United Kingdom Department of Transport, Transport Science Policy Unit, 5 June 1984.
- (7.2.) "Annual Mileages of Cars in the United Kingdom", United Kingdom Department of Transport, Transport Science Policy Unit, November 1981.

TABLEAU 7.13 : AVANTAGES COMMERCIAUX MOYENS PONDERES DES VE (Ecus/année)

Comparaison (voir clé) TVA incluse/hors TVA	ZvP in	FvI ex	FvF ex	CvG in	BvP ex	BvD ex	BvK ex	DvD ex
Finlande	260	170	230	-560	-400	-930	-1380	-1470
Suède	480	660	260	-90	-170	-510	-1050	-1070
Suisse	430	250	200	-30	-490	-930	-1440	-1570
Grande-Bretagne	720	650	440	300	-230	-570	-1080	-990
France	280	80	100	-250	-760	-1180	-1560	-1670
Belgique	360	70	180	-100	-660	-1020	-1440	-1500
RFA	360	420	190	-180	-590	-850	-1400	-1260
Italie	320	-200	210	-150	-450	-1350	-1640	-1690

COÛTS TOTALS CORRESPONDANTS SUR LE PLAN DU COÛT DES FACTEURS (tirés du tableau 7.1)

Finlande	<u>530</u>	<u>430</u>	<u>360</u>	<u>150</u>	<u>-370</u>	<u>-660</u>	<u>-1160</u>	<u>-1280</u>
Suède	430	480	<u>280</u>	<u>40</u>	-570	-600	-1110	-1230
Suisse	360	<u>300</u>	<u>230</u>	-40	-680	<u>-800</u>	<u>-1250</u>	<u>-1370</u>
Grande-Bretagne	300	230	160	-100	-840	-870	-1300	-1400
France	280	<u>170</u>	<u>150</u>	<u>-120</u>	-880	<u>-930</u>	<u>-1350</u>	<u>-1490</u>
Belgique	<u>250</u>	<u>140</u>	150	-150	-850	<u>-970</u>	<u>-1370</u>	<u>-1490</u>
RFA	110	40	60	-300	-1080	-1100	-1460	-1550
Italie	20	<u>-90</u>	40	-400	-1140	<u>-1250</u>	<u>-1560</u>	<u>-1640</u>

CLE DES COMPARAISONS

ZvP	Zagato 250 car	v.	Fiat Panda 30L
FvI	Fiat Daily E2	v.	Iveco Daily 30.8
FvF	Fiat 900E/E2	v.	Fiat Auto 900E
CvG	VW Citystromer	v.	VW Golf
BvP	Bedford CF Electric	v.	Bedford CF Petrol
BvD	Bedford CF Electric	v.	Bedford CF Diesel
BvK	VW Electrotransporter 2	v.	VW Transporter Kombi
DvD	Daimler Electrotransporter	v.	Daimler Transporter 207

* Un signe moins indique un désavantage de coût ou, en d'autres termes, que le coût annuel équivalent du VE est supérieur à celui du VT.

**Les chiffres soulignés indiquent que l'avantage sur le plan du "coût de ressource" excède l'avantage commercial (ou que le désavantage sur le plan du coût des facteurs est inférieur au désavantage commercial).

CHAPITRE 8 : STANDARDISATION

8.1. PREAMBULE

8.1.1 Quoique datant de la fin du 19ème siècle, le véhicule électrique routier n'est pas encore arrivé dans sa phase de maturité et par conséquent il n'y a pas encore de règlements spécifiques particulièrement adaptés à ce type de véhicule ni au niveau Communautés Européennes ni dans les documents nationaux dont liste en annexe 8/1 a.

Par contre, les organismes tels que l'ISO (International Standard Organization) et la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) ont créé des groupes de travail actifs - TC 22/SC 21 pour l'ISO et TC 69 pour la CEI - qui étudient les problèmes de normalisation particuliers à ce type de véhicule (voir chapitres 8/5 et 8/6).

8.1.2. D'autre part La Commission des Communautés européennes édite et tient à jour les directives d'homologation des véhicules destinés à circuler sur la voie publique. La partie technique de ces directives précise les règles auxquelles doivent satisfaire tout véhicule pour répondre aux critères techniques qui ont surtout trait à leur sécurité active et passive vis-à-vis des occupants du véhicule et des autres usagers de la voie publique.

Il convient de noter que, conformément au désir exprimé maintes fois par le COST 302, cette étude n'a nullement l'intention de se substituer même partiellement à l'un ou l'autre des organismes spécialisés dans la normalisation mais d'apporter des éléments de réflexion qui, compte tenu du temps imparti et de l'aspect nécessairement international de la question, ne peuvent être considérés que comme étant une première analyse motivée par les spécificités de ce véhicule.

D'autre part, il faut tenir compte de l'état particulièrement évolutif auquel est liée cette technologie en cours de développement et dont certains aspects peuvent être catalogués comme technologie de pointe.

8/2 ORGANISATION DE L'ETUDE

En dehors d'un relevé qui a essayé d'être le plus complet possible des normes nationales et internationales qui sont applicables ou qui paraissent s'appliquer aux véhicules électriques, un des aspects importants a été l'analyse de la partie technique des directives C.E.E. et règlements de "Genève" existant pour les véhicules à moteur thermique.

Il est apparu que certaines de ces directives étaient directement applicables au véhicule électrique. Elles sont citées dans cette étude "Directives type A", d'autres seraient applicables sous réserve d'un examen plus approfondi avec des amendements éventuels "Directives type B" et enfin il serait nécessaire d'envisager des directives nouvelles ou la non application des "Directives type C" (voir annexe 8/4/a).

La méthode de travail utilisée a constitué à définir quelle pouvait être la particularité ou la spécificité technique des véhicules électriques par rapport au véhicule à combustible interne.

En effet, il paraît logique que pour tout ce qui n'est pas spécifique au véhicule électrique, les directives existantes soient d'application stricte, par exemple, toutes les directives de sécurité et de signalisation par rapport aux autres usagers de la voie publique.

L'examen des spécificités techniques a été divisé, arbitrairement peut être, en quatre rubriques :

- Stockage de l'énergie et raccordement à la distribution.
- Masse du véhicule, répartition des masses, freinage électrique.
- Procédure d'essais.
- Problèmes particuliers posés par l'électricité de bord.

8/3 SPECIFICITES DES VEHICULES ELECTRIQUES

8/3/1

La différence capitale par rapport aux véhicules à propulsion traditionnelle provient de la présence à bord d'une source d'énergie électrique puissante dont :

- la tension est généralement supérieure aux tensions dites "de sécurité"
- les masses (poids) sont généralement importantes.
- les fluides contenus sont généralement corrosifs.
- les dégagements gazeux peuvent présenter d'éventuels risques d'explosion.

Ces aspects particuliers pourraient déterminer des risques particuliers tels que électrocution, explosion, brûlure par flamme ou acide, perte de contrôle du véhicule, difficulté de freinage, risques aggravés en cas de crash, si des précautions particulières dans la conception du véhicule et de ses composants ne sont pas prises.

D'autre part, les performances de ces véhicules, eu égard aux puissances installées, à l'énergie stockée possible et aux différences fondamentales de technologie dans l'organe moteur, peuvent nécessiter des prescriptions et des procédures d'essais différentes de celles appliquées aux véhicules à moteur thermique.

Les particularités du véhicule électrique routier ont été appréciées en fonction de l'état actuel de l'art (essentiellement batteries au plomb-acide) et des technologies industrialisées. Ces particularités couvrent pour l'essentiel les différents types de véhicules actuellement envisageables.

Elles peuvent déterminer soit des risques nouveaux (électrocution), soit en éliminer (pollution), par rapport aux véhicules à moteurs à combustion interne.

8/3/2 Ravitaillement en énergie.

Cette opération s'effectue généralement par recharge électrique par redresseur, ce qui inclut généralement une charge lente à faible puissance d'environ 2 à 3 kW/1.000 kg/véhicule, prélevant au réseau de l'énergie non stockable et donc à faire de préférence pendant les heures creuses, ou pendant la journée pour augmenter l'autonomie. Les moyens à mettre en oeuvre pour ce ravitaillement seront différents suivant que le chargeur est embarqué ou non. Il y a lieu de considérer que dans ces deux cas le véhicule peut être raccordé au réseau avec ou sans transformateur d'isolement.

La charge lente peut se faire chez l'utilisateur ou à des bornes disposées sur la voie publique.

8/3/3 Raccordement au réseau.

Il faut tenir compte du mode de ravitaillement d'énergie précisé au point ci-dessus.

La charge lente ne pose pas de problème de disponibilité d'énergie si les utilisateurs disposent d'emplacements privés mais le problème légal de canalisation sur le domaine public est à considérer pour les recharges sur la voie publique.

D'autre part, le problème des harmoniques renvoyés par le redresseur dans les réseaux de distribution est à considérer. En fait, ce dernier point est examiné par l'Unipède et le Groupe de travail Technologie. De toute manière, il faudra considérer le problème des tensions et de la standardisation des accessoires de raccordement (prise de courant) au même titre que les dimensions des orifices de remplissage des réservoirs d'essence sont précisées internationalement.

8/3/4 Stockage d'énergie

Le véhicule à accumulateurs permet le stockage d'énergie électrique difficilement stockable en elle-même (sauf centrale de pompage), tandis que le véhicule thermique emmagasine pour son déplacement de l'énergie essentiellement stockable.

Il faut remarquer que pour le véhicule électrique, la totalité des matériaux nécessaires à la production d'énergie sont entièrement disponibles dans le "réservoir" et que par conséquent, il peut circuler dans des ambiances totalement confinées. Par contre, le véhicule thermique a besoin d'air de combustion pour libérer son énergie (la combustion de 10 litres d'essence nécessite une centaine de kg d'air).

Les quantités stockées actuellement dans les batteries sont beaucoup plus faibles que celles des véhicules thermiques. L'énergie stockée dans un véhicule électrique est de l'ordre d'une douzaine de kWh pour un véhicule dont la masse serait de 1.000 kg alors que pour un véhicule thermique de même masse l'énergie stockée est d'une centaine de kWh utiles (compte tenu du rendement). Ceci est dû principalement dans la technique d'accumulateurs, à ce que le réservoir d'énergie nécessite un poids mort extrêmement important pour rester valable pendant la durée de vie de la batterie.

Contrairement à l'énergie stockée en véhicule thermique, celle stockée en véhicule électrique dépend de la température (pour le plomb 1 % de perte par °C en moins), et dépend fortement des conditions d'utilisation, cette quantité diminuant lorsque la puissance prélevée augmente.

8/3/5 Puissance électrique installée

Ici intervient la notion de puissance développable en fonction du temps d'utilisation car en véhicule électrique la puissance maximale développable est d'au moins 3 fois la puissance uni-horaire tandis qu'en véhicule thermique la puissance maximale est pratiquement la puissance uni-horaire.

Les caractéristiques sont également très différentes car en véhicule électrique le couple maximum est déjà fourni à une vitesse de rotation de quelques tours/minute et ce couple décroît avec la vitesse tandis qu'en véhicule thermique le couple à très faible vitesse est pratiquement nul, croît jusqu'à environ 2/3 du régime maximum, puis décroît.

D'autre part, en véhicule électrique, la puissance instantanée développable en cas de défauts peut être très grande, d'où nécessité absolue de prévoir des sécurités efficaces en cas de défaillance de l'appareillage de contrôle de la puissance. Ceci d'autant plus que le plus souvent il n'y a pas sur le véhicule électrique de dispositif de découplage entre moteur et roues mais liaison directe tandis que le véhicule thermique a généralement un embrayage. Enfin, comme le moteur électrique développe des couples élevés en cas de surcharge la transmission mécanique doit être conçue en conséquence.

8/3/6 Risques particuliers.

Les risques particuliers sont de divers ordres :

1/ Batteries.

- risque de choc électrique car tension supérieure aux tensions dites de sécurité.
- risque chimique de corrosion par les électrolytes, acide, alcalin ou métaux fondus.
- masse importante car le réservoir d'énergie pèse environ 1/3 du poids total.

2/ Dans l'installation :

- risque de choc électrique car les tensions sont généralement supérieures aux 50 V admis comme tension non dangereuse.
- risque de court circuit très dangereux mais facilement maîtrisable par des protections appropriées.
- pratiquement pas de risques d'incendie par combustion de liquide, sauf dans le cas de batteries à haute température comme les sodium/soufre.

8/3/7 Nuisances

- 1/ Bruit faible, et actuellement ce point ne pose plus de problème pour les commandes électroniques. Il est généralement admis qu'un véhicule électrique n'émet pas plus de 60 db.
- 2/ Fumée : néant.
Par contre, émission de gaz dangereux inflammables et explosifs pendant la recharge et parfois pendant le freinage par récupération, d'où nécessité de ventilation efficace.
- 3/ Parasites. Ce point est à surveiller aussi bien vis-à-vis de l'environnement du véhicule électrique que des occupants éventuels car les moteurs et les contrôles électroniques sont naturellement des émetteurs de parasites radio-électriques.
- 4/ Confort. Une difficulté reste, c'est le chauffage étant donné que le bon rendement de propulsion ne procure pas de pertes suffisantes pour assurer un confort semblable au véhicule électrique.
Actuellement la seule solution "écologique" pourrait être le chauffage électrique par le réseau lorsque le véhicule est immobilisé et notamment lors des recharges.

8/3/8 Limites de performances

Actuellement, les performances industriellement obtenues sont de 60 km à 80 km d'autonomie urbaine et une vitesse maximum de 60 à 70 km/h.

Ces performances sont principalement limitées par le poids actuel du réservoir d'énergie surtout si on prend en considération les charges utiles transportées. Les réalisations actuelles font apparaître une charge utile transportée sensiblement égale au poids du réservoir d'énergie et de l'ordre du tiers du poids total maximum autorisé.

Par contre, le rapport du volume utile de chargement à l'encombrement au sol est généralement meilleur que celui des véhicules thermiques car les divers composants sont plus faciles à placer, vu le peu d'organes de transmissions mécaniques.

Il faut noter que les performances vitesse et accélération restent pratiquement constantes pendant assez longtemps, puis décroissent progressivement en fin d'autonomie, alors que les performances du véhicule thermique restent constantes jusqu'à la dernière goutte du carburant.

8/3/9 Conditions d'essai.

Vu ce qui est énoncé ci-avant, les conditions d'essai doivent être très strictement précisées et doivent être définies clairement.

Ces conditions doivent être différentes de celles demandées pour les véhicules à moteur thermique car les utilisations projetées pour l'avenir sont essentiellement urbaines et non pour la grande route.

Il semble qu'à l'heure actuelle, les conditions d'essai définies par la SAE (document J227a), sont quasi internationalement acceptées et sont un bon compromis vu les différentes catégories de véhicules urbains et suburbains.

8/4 APPLICABILITE DES DIRECTIVES C.E.E. EXISTANTES

A l'analyse de l'ensemble des directives jusqu'ici émises par les autorités compétentes de la C.E.E. concernant les véhicules automobiles de toutes catégories à moteur à combustion interne, il est apparu que certaines d'entre elles étaient directement applicables aux véhicules électriques routiers.

Il s'agit essentiellement des textes couvrant les équipements. Ces directives ont été dénommées dans cette étude : "Directives de type A".

D'autres directives pourraient être utilisées sous réserve de leur apporter quelques modifications ou adjonctions après une étude approfondie. Elles ont été dénommées dans cette étude "Directives du type B".

Enfin, il pourrait être utile qu'à terme de nouvelles directives (type C) soient émises pour couvrir les véhicules électriques routiers ou seraient déclarées inapplicables (pollution).

Voir annexe 8/4/a "Classification des directives et règlements de Genève".

8/5 NORMES DE LA COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

8/5/1

Conformément à la répartition des tâches entre ISO et CEI, ces normes ont plus spécialement trait à la partie électrique du véhicule soit le chargeur, la batterie, la chaîne de propulsion et ses auxiliaires.

Les normes actuelles sont :

- Publication 783 - 1984 - Filerie et connecteurs des véhicules électriques routiers,
- Publication 784 - 1984 - Instrumentation des véhicules électriques routiers,
- Publication 785 - 1984 - Machines tournantes des véhicules électriques routiers,
- Publication 786 - 1984 - Dispositifs de commande des véhicules électriques routiers,

qui concernent la chaîne de propulsion.

- Document 69 (secrétariat) 28 du 5 octobre 1985, concernant les chargeurs.
- Document VW 15715 du 10 janvier 1985 et ses annexes qui définit ce qui est relatif aux véhicules hybrides.

Enfin concernant les batteries, les Comités 21 et 69 ont pris en considération le document "Procédure d'essais pour batteries destinées aux véhicules électriques routiers" rédigé en 1984 par l'A.V.E.R.E.

8/5/2

Remarque générale.

Il est à remarquer que tous ces documents sont en fait plutôt des recommandations de bonne pratique destinés à servir d'interface entre fabricants des composants (moteur, batterie, etc...) et constructeurs des véhicules électriques plutôt que des documents destinés au grand public.

8/6 DOCUMENTS ISO (Organisation Internationale de Standardisation)

L'ISO a également publié plusieurs documents relatifs aux véhicules électriques routiers. Ces documents définissent plus précisément les spécifications générales applicables au véhicule et une proposition est en cours d'examen concernant la spécification des essais de consommation d'énergie. Il s'agit en fait des documents ISO/DIS 6469 et ISO/TC 22/SC21 WG1.

CHAPITRE 9 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

9.1. Notre objectif premier a été, comme le précisait déjà le chapitre 1, d'évaluer les principaux avantages et inconvénients des VE par rapport aux véhicules conventionnels. Cet objectif a été très largement atteint, sous réserve des erreurs d'évaluation inhérentes à de telles comparaisons. Nous n'avons pas tenté de prévoir les possibilités d'extension future du parc des VE, mais nous sommes arrivés à certaines conclusions et avons formulé diverses recommandations quant à la coordination des politiques et législations nationales ainsi qu'à d'autres questions relatives aux VE.

9.2. Nos calculs ont été bâtis sur l'hypothèse que les VE actuels pourraient remplacer quelque 6 millions de voitures particulières (7 % de l'ensemble du parc) et 1 million de camionnettes (12% de l'ensemble du parc) en Europe occidentale s'ils pouvaient être construits et fabriqués moins chers que les VE actuels, s'il était possible d'installer des réseaux de vente et de service après vente adéquats et si les propriétaires et utilisateurs potentiels pourraient être amenés à opérer la conversion. Il s'agit là toutefois d'hypothèses et non de prévisions.

9.3. En reprenant les avantages et les inconvénients dans l'ordre où ils sont classés dans le chapitre 1, nous avons estimé, dans le chapitre 2, que le nombre précité de VE pourrait réduire d'environ 3,5 % la consommation totale de pétrole du secteur des transports en Europe occidentale ou de 1% environ la consommation totale de pétrole de tous les secteurs réunis. La fourniture de l'électricité nécessaire aux VE ne devrait pas poser de problèmes sérieux, puisque leur consommation ne représente qu'environ 2,5 % de la consommation totale actuelle d'électricité.

9.4. Nos comparaisons économiques font entrer la valeur économique de ces économies en ligne de compte. Le fait que l'électricité peut être tirée de différentes sources d'énergie primaire est un avantage supplémentaire. Le fait en outre que les économies réalisées sur la consommation de pétrole se situeraient au niveau des fractions légères est également considéré comme un avantage par certains pays.

9.5. L'étude réalisée dans le chapitre 3 montre que les véhicules électriques pourraient réduire le volume total des émissions actuellement produites en agglomération par les véhicules thermiques. Cette réduction pourrait atteindre les 20 à 30% pour les principaux polluants (CO, NOx et CmHm). Dans certains pays tels que le Royaume-Uni et la République fédérale d'Allemagne, la production d'électricité augmenterait d'environ 2 % les émissions de SO2 produites par les stations thermiques conventionnelles. Le niveau de pollution serait réduit en zone urbaine.

9.6. La valeur nette de ces avantages serait de l'ordre de 150 à 750 Ecus par VE et par année, selon le type de véhicule et le pays dans lequel il circule. Nous avons tenu compte des valeurs appropriées dans nos comparaisons économiques, sans oublier qu'elles tendront à décroître à mesure que le législateur abaissera le niveau toléré des émissions contenues dans les gaz d'échappement des véhicules conventionnels et dans les fumées des centrales.

9.7. Les VE qui consommeraient de l'électricité produite par des centrales nucléaires pourraient légèrement aggraver le problème de l'élimination des déchets nucléaires, mais nous n'avons pas tenté d'évaluer cet inconvénient. Les 7 millions de VE n'obligeraient pas à accroître de façon significative la capacité des centrales de base et n'amplifieraient donc pas très fortement le risque d'accidents nucléaires graves. Nous n'avons pas non plus tenté d'évaluer l'incidence favorable que les VE pourraient avoir sur la pollution marine, y compris les risques de pollution grave, qui vont inévitablement de pair avec le transport du pétrole destiné aux véhicules conventionnels.

9.8. Le chapitre 3 avait également démontré que les VE ne peuvent à eux seuls réduire le bruit de la circulation là où celui-ci pose un problème social sérieux tant que d'autres mesures n'ont pas été prises (à l'encontre des poids lourds par exemple) et tant que les VE ne représentent pas une part substantielle des véhicules en circulation. Le silence des VE serait plus rapidement perceptible dans de nombreux lieux qui ne sont pas fréquentés par les poids lourds, par exemple dans les zones résidentielles. Nous n'avons pas tenu compte de cet avantage dans nos comparaisons économiques.

9.9. Le chapitre 4 a révélé que les expérimentations, pourtant nombreuses, effectuées avec les VE en Europe au cours de ces dix dernières années n'ont généralement pas permis de recueillir des données sur leurs coûts d'entretien. Nous suggérons donc de mettre l'accent, dans d'éventuels essais futurs, sur la collecte et l'analyse de données techniques et économiques, relatives notamment aux coûts de maintenance.

9.10. Une seule expérience, celle du Southern Electricity Board britannique, donne quelques indications sur les coûts de maintenance des VE. Cette expérience et nos propres calculs nous ont amené à conclure que si le parc des véhicules électriques atteignait les dimensions que nous avons envisagées, ces coûts seraient inférieurs d'environ 40 % aux coûts de maintenance des véhicules conventionnels qu'ils remplacent. En nous fondant sur les rares informations que nous avons pu rassembler, nous avons pensé que la durée de vie utile d'une voiture et d'une camionnette électrique excéderait respectivement d'environ 20 % (12 ans contre 10 ans) et 25% (10 ans contre 8 ans) celle du véhicule conventionnel correspondant.

9.11. L'étude prospective effectuée dans le chapitre 5 donne à penser que les accumulateurs nickel fer, zinc brome et sodium soufre de technique avancée seront plus performants que les accumulateurs plomb acide actuels sur le plan de l'énergie massique, de la puissance massique et du rendement énergétique. Il importe de ramener les coûts (calculés sur l'ensemble de la durée de vie utile) à un niveau plus bas que ceux des accumulateurs plomb/acide actuels et certains des types avancés d'accumulateurs pourraient le faire. Ces types avancés d'accumulateurs ne sont actuellement produits qu'en laboratoire, sauf un seul qui est actuellement produit industriellement à l'échelon de l'expérience-pilote. Ces nouvelles sources d'énergie ne devraient donc pas être commercialement disponibles avant la fin de 1989. Nous suggérons de mettre l'accent sur la production industrielle et la réduction des coûts dans la poursuite des recherches sur les accumulateurs.

9.12. Ce chapitre 5 est également bâti sur l'hypothèse que les moteurs à courant continu des VE actuels, sur lesquels la variation de la vitesse est assurée par des hacheurs à semi-conducteurs, céderont progressivement la place aux moteurs à courant alternatif sans collecteur sur lesquels la variation de vitesse est assurée par le courant triphasé fourni par des onduleurs à semi-conducteurs à fréquence variable. Cette évolution serait

évidemment beaucoup plus rapide si la production des VE atteignait les volumes que nous avons envisagés, mais nous n'avons pas tenté de tenir compte dans nos comparaisons économiques de l'incidence économique des améliorations qui seront apportées à l'avenir aux accumulateurs ou aux systèmes de propulsion.

9.13. Le chapitre 6 confirme qu'à l'heure actuelle, les coûts de production des VE sont beaucoup plus élevés que ceux des véhicules conventionnels, que le poids des accumulateurs (qui sont actuellement des accumulateurs plomb/acide, sauf sur quelques flottes de démonstration équipées d'accumulateurs nickel/fer) alourdit considérablement les VE et que les capacités de stockage des accumulateurs limitent fortement le rayon d'action des VE, alors que les véhicules conventionnels échappent à toutes ces contraintes.

Les VE ne soutiennent pas non plus très bien la comparaison sur d'autres plans, quoiqu'ils soient considérés comme suffisamment équivalents pour les types d'utilisation urbaine que nous avons envisagés. Les résultats chiffrés des comparaisons sont donnés dans le tableau 6.3.

9.14. Le chapitre 6 montre également jusqu'où les constructeurs des sept VE (deux voitures et cinq camionnettes) croient pouvoir ramener les coûts des véhicules et des accumulateurs si leur production atteignait les niveaux nécessaires pour amener leur parc au niveau prévu des 6 millions de voitures et du million de camionnettes. Ces réductions, illustrées dans les tableaux 6.1. et 6.2, permettent d'envisager la construction, par plusieurs usines européennes, d'un nombre de VE suffisant pour qu'ils puissent concurrencer sur le plan économique les véhicules conventionnels.

9.15. La fourniture des matières premières nécessaires à la construction des VE (voir chapitre 6) ne semble pas poser problème, même si certains des gisements de nickel et de zinc sont éloignés d'Europe. Les sorties de devises européennes entraînées par l'achat de ces matières seront probablement compensées par la diminution des sorties entraînées par les achats de produits pétroliers. A cela s'ajouterait qu'après quelques années, le recyclage des métaux permettrait de réduire ces sorties.

9.16. Le chapitre 7 opère une distinction entre les coûts commerciaux, c'est à dire ce que les propriétaires et les utilisateurs des véhicules doivent payer, après inclusion des taxes et déductions des subventions, et les "coûts de ressource", c'est à dire le coût des ressources consommées utilisées ou nécessitées pendant la construction et l'exploitation des véhicules, après déduction

des taxes et subventions et addition des coûts indirects qui ne sont pas imputés aux propriétaires ou aux utilisateurs, mais sont néanmoins supportés par les collectivités dans lesquelles les véhicules circulent. Les coûts indirects les plus importants sont ceux de la pollution atmosphérique causée par les gaz d'échappement des véhicules conventionnels et les fumées des centrales fabriquant l'électricité nécessaire aux VE.

9.17. Nous avons élaboré une méthode (annexe 7.1.) de comparaison des "coûts de ressource" totaux des VE et des véhicules conventionnels correspondants afin de pouvoir comparer valablement différentes catégories de véhicules taxés différemment dans des pays différents. Cette méthode permet d'estimer l'avantage (ou le désavantage) présenté par un VE sur le plan des "coûts de ressource" par rapport à un véhicule conventionnel équivalent parcourant certains kilométrages annuels donnés dans un pays quelconque.

9.18. Nous sommes arrivés à la conclusion qu'à quelques réserves près (voir paragraphe 9.25), trois VE (une voiture et deux camionnettes) seraient avantageuses sur le plan du "coût de ressource" dans les dix Etats, sauf une camionnette dans un pays (voir figure 7.1.). En conséquence, si 7 millions de ces VE étaient répartis dans les mêmes proportions que les voitures particulières habituelles, ils présenteraient au total un avantage sur le plan du "coût de ressource" de plus d'un milliard d'Ecus par an par rapport aux véhicules conventionnels actuels les plus comparables (voir figure 7.11.). Nos analyses de sensibilité permettent d'affirmer que cette conclusion est raisonnable, c'est à dire qu'elle n'est pas infirmée par des variations, plausibles, de nos données et de nos hypothèses.

9.19. L'ampleur de l'avantage total dépend des estimations formulées au sujet des avantages écologiques présentés par les VE dans les dix pays. En effet, l'avantage écologique total excède de près de 400 millions d'Ecus par an l'avantage total sur le plan du "coût de ressource"; mais ce dernier ne sera pas atténué par la réduction future du niveau toléré des émissions des véhicules conventionnels et des centrales (voir paragraphe 9.5.). La raison en est que ces réductions majoreront le coût de construction et d'exploitation des véhicules conventionnels avec lesquels les VE sont comparés davantage qu'ils ne majoreront les coûts d'exploitation des VE. En effet, la diminution des avantages mesurés en termes de coûts indirects sera contrebalancée par une augmentation à peu près équivalente des avantages mesurés en termes de coûts directs.

9.20. L'avantage total dépend toutefois des estimations formulées au sujet du coût de 3 VE seulement produits par deux constructeurs établis dans un seul pays. Quoique les 4 autres VE aient des performances techniques très comparables à celles des véhicules conventionnels correspondants, ils resteront trop chers pour pouvoir présenter des avantages sur le plan du "coût de ressource" tant que leur coût d'investissement n'aura pas été ramené à des niveaux nettement inférieurs à ceux que leurs constructeurs ont estimé pouvoir atteindre.

9.21. Le nombre de VE que les propriétaires et les utilisateurs seraient disposés à acquérir de leur plein gré est fonction non de leurs "coûts de ressource" mais de leurs coûts commerciaux dont les multiples méthodes de calcul actuellement utilisées sont malheureusement difficilement conciliables. Le choix des utilisateurs et des propriétaires est en outre fortement conditionné par des facteurs autres que le coût, notamment par les caractéristiques techniques des véhicules, leur fiabilité, la qualité des réseaux de vente et d'après-vente, les réglementations locales, la publicité et, parfois, la mode et les préjugés.

9.22. Nous ne disposons pas des moyens nécessaires pour effectuer une étude de marché en tenant compte de cette multitude de méthodes et d'influences, mais nous avons adapté notre méthode de façon à obtenir plusieurs comparaisons des coûts commerciaux des mêmes couples de véhicules afin de mettre en lumière l'incidence du remplacement, dans les comparaisons des coûts des facteurs, des coûts indirects (que les utilisateurs ne paient pas en tant qu'utilisateurs) par les taxes et subventions qu'ils paient ou reçoivent dans les différents Etats. Nous recommandons cette méthode ainsi adaptée à tous ceux qui pourraient acheter ou utiliser des VE. Nous nous sommes toutefois plus particulièrement préoccupés d'évaluer l'incidence de cette substitution sur les comparaisons afin de pouvoir inviter les différents pays à coordonner leurs politiques fiscales ou législatives.

9.23. Nous constatons qu'en Grande-Bretagne et en Allemagne, les avantages présentés par les VE sur le plan du "coût de ressource" sont inférieurs aux avantages qu'ils présentent sur le plan du coût commercial ainsi calculé (ou que les désavantages sur le plan du "coût de ressource" excèdent les désavantages sur le plan du coût commercial) et que les différences sont souvent importantes. En outre, ces différences tendront à augmenter à mesure que le niveau toléré de pollution atmosphérique sera abaissé parce que cet

abaissement amplifiera les avantages présentés par les véhicules électriques sur le plan des coûts commerciaux sans entamer ceux qu'ils présentent sur le plan du "coût de ressource". D'un strict point de vue économique, nous ne voyons donc aucune raison d'inviter les gouvernements de ces pays à user de moyens fiscaux plus généreux encore pour favoriser la substitution des VE aux VT. Ils pourraient souhaiter refaire nos calculs en partant de données ou d'hypothèses légèrement différentes dans le cas où les différences sont faibles et en se demandant si ces facilités fiscales ne sont pas parfois excessives, mais nous ne prétendons pas que nos estimations sont exactes et nous n'avons pas de recommandation particulière à formuler en cette matière.

9.24. Les avantages présentés par certains VE sur le plan du "coût de ressource" excèdent pourtant les avantages qu'ils présentent sur le plan des coûts commerciaux (à moins que leurs désavantages en termes de "coût de ressource" soient plus faibles que leurs désavantages en termes de coûts commerciaux) en Finlande, en Suède, en Suisse, en France, en Belgique et en Italie. La fiscalité de ces pays est donc de nature à faire obstacle aux améliorations que ces VE pourraient apporter à leurs économies et à leur environnement. Nous suggérons donc aux gouvernements de ces pays de réexaminer leurs régimes fiscaux en vue d'en éliminer les obstacles au remplacement, profitable, des véhicules conventionnels par des VE et de les aligner sur ceux des deux autres pays. Nous ne prétendons pas que nos calculs doivent être acceptés sans autre vérification, mais nous sommes convaincus qu'un réexamen approfondi serait justifié et bénéfique à ces causes communes que sont la prospérité économique et l'amélioration de l'environnement de l'Europe occidentale.

9.25. Nos estimations des avantages présentés par les VE sur le plan du "coût de ressource" sont valables sous réserve que :

- a) l'estimation du coût d'investissement des trois véhicules "économiques" proposés dans le chapitre 6 soit réaliste ;
- b) les caractéristiques techniques (voir paragraphe 7.3.6.) des trois premiers VE leur permettent réellement de remplacer un tel nombre de véhicules conventionnels, que les hypothèses émises au sujet du nombre et du kilométrage annuel de ces véhicules conventionnels se vérifient ou qu'ils puissent être compétitifs et être utilisés aux fins prévues dans les dix pays ;

- c) la flotte prévue de VE puisse couvrir les frais généraux des réseaux de vente et de service après vente qui lui sont nécessaires ;
- d) un nombre suffisant d'utilisateurs et de propriétaires puissent être amenés à opérer la conversion, alors même que les véhicules électriques présentent l'inconvénient d'avoir une autonomie plus courte et des temps de recharge plus longs que les véhicules conventionnels.

9.26. Ces réserves, importantes, posent aux constructeurs et distributeurs de VE des problèmes dont la solution ouvrirait, si elle se doublait de l'élimination des obstacles fiscaux, un marché approprié à ces VE, ainsi qu'à d'autres VE de conception et de coût comparables, en Europe occidentale.

9.27. La solution de ces problèmes passe par :

- a) une réestimation minutieuse des coûts de production de l'option technique finalement retenue ;
- b) la poursuite des recherches en vue d'améliorer les performances techniques des VE "économiques" ou de réduire les coûts de production des VE qui ne le sont pas ;
- c) le réexamen des sources des composants, en particulier des accumulateurs, dont les coûts et les performances semblent différer profondément selon les constructeurs ;
- d) l'analyse des possibilités d'utilisation de composants communs, éventuellement normalisés, pour tous les VE ;
- e) des études de marché, la mise en place de réseaux de vente et de service après-vente, l'organisation de campagnes publicitaires.

9.28. Les perspectives semblent au total suffisamment prometteuses pour que nous recommandions aux constructeurs d'engager au moins les quatre premières de ces actions. Il serait toutefois parfaitement compréhensible qu'ils hésitent à investir lourdement dans la production du nombre de VE que nous avons jugé nécessaire à la concrétisation de leurs avantages potentiels tant que les régimes fiscaux applicables aux VE dans la plupart des Etats européens ne sont pas harmonisés dans un sens tel que les avantages présentés par les VE sur le plan du coût commercial soient au moins égaux à ceux qu'ils présentent sur le plan du "coût de ressource".

9.29. Si les conditions évoquées au paragraphe 9.26 pouvaient être réunies, il resterait encore à résoudre le problème de la transition entre la situation actuelle (quelques VE de prix relativement élevé) et celle où les VE seront produits et vendus en nombre suffisant pour devenir compétitifs. Au cours de cette période de transition, trois catégories de constructeurs devraient trouver un volume important de capital à risque, à savoir :

- a) Les grands constructeurs de véhicules conventionnels et les petits constructeurs de VE qui n'ont pas beaucoup d'expérience de la production en série;
- b) Les constructeurs d'accumulateurs qui ne connaissent pas encore la répartition future du marché entre les accumulateurs plomb-acide et les nouveaux types d'accumulateurs visés au paragraphe 9.11;
- c) Les constructeurs des chaînes de propulsion qui produisent actuellement des moteurs électriques et des équipements de commande destinés principalement à d'autres utilisations, notamment des utilisations ferroviaires et industrielles.

9.30. Dans cette situation plutôt complexe, les gouvernements ont la possibilité soit de donner à leur fiscalité un tour qui ne défavorise pas les VE au sens du paragraphe 9.24 et de laisser ensuite aux constructeurs le soin de prendre les risques nécessaires, soit de dépasser cet attentisme et de favoriser activement les VE pendant la période de transition. Nous recommandons un subventionnement généralisé de la production des VE. Il doit cependant exister des endroits où l'introduction des VE présenterait un avantage exceptionnel qui est mal pris en compte par les avantages fiscaux dont ils jouissent et qui mérite à ce titre un examen spécial de la part des autorités locales.

9.31. Par exemple, les avantages écologiques des VE varient ainsi d'un pays à l'autre et d'une ville à l'autre et certains de ces avantages ne peuvent s'exprimer en termes purement économiques. Les endroits intéressants visés au paragraphe ci-dessus sont ceux où les premières flottes de VE trouveraient le mieux à se constituer et à se développer parce qu'il serait possible d'y installer un très bon réseau de points de vente et de service après-vente au lieu de disperser ces flottes (au départ assez modestes) sur de nombreuses villes où le réseau des points de vente

et de service après-vente ne pourrait qu'être moins bien structuré et peut-être inapproprié. Certains des moyens à mettre en oeuvre pour promouvoir les VE dans ces endroits privilégiés sont indiqués dans l'annexe 9.1.

9.32. La propension des collectivités locales et des gouvernements centraux à soutenir financièrement ces programmes dépend de leurs politiques financières et sociale, mais il faut une certaine participation de ces collectivités locales pour donner au réseau des points de vente et de service après vente le niveau de densité souhaitable. Ces mêmes collectivités devraient participer à l'élaboration des règlements applicables aux postes de biberonnage sans lesquels l'exploitation des voitures électriques ne pourrait guère être rentable et qui serait sans doute nécessaire à terme pour les camionnettes électriques. (Il ne nous surprendrait pas que l'Etat ait également un rôle législatif à jouer dans la création de ce réseau, mais nous n'avons pas étudié cette question). Nous recommandons donc aux collectivités locales d'étudier les systèmes locaux qui pourraient s'avérer particulièrement favorables, sur le plan écologique ou autre, à l'éclosion des flottes de VE.

9.33. L'amélioration technique des matériaux ainsi que de la conception et des processus de fabrication des accumulateurs et des chaînes de traction se poursuivra à un rythme soutenu. Nous suggérons aux constructeurs d'effectuer une étude économique sérieuse en vue de déterminer ce que les VE doivent emprunter aux VT produits en grande série et ce en quoi ils doivent innover pour bénéficier du progrès technique accompli dans le domaine des matériaux et des composants électriques.

9.34 Les diverses recommandations formulées dans le présent chapitre sont réunies ci-après pour la facilité du lecteur :

- a) nous recommandons aux financeurs des futures flottes de démonstration de VE de porter l'effort sur la collecte et l'analyse des données économiques, plus particulièrement des coûts de maintenance (paragraphe 9, point 9);
- b) nous recommandons de focaliser la recherche en matière d'accumulateurs sur les possibilités de production industrielle et de réduction des coûts (9.11.);
- c) nous recommandons aux propriétaires et utilisateurs potentiels de VE

d'utiliser notre méthode corrigée de comparaison des coûts commerciaux des VE et des véhicules classiques correspondants (9.22);

- d) du strict point de vue économique nous ne voyons aucune raison de recommander l'amplification des facilités fiscales accordées par les gouvernements britanniques et allemands pour le remplacement de véhicules conventionnels par des VE (9.23.);
- e) nous recommandons aux gouvernements finlandais, suédois, suisse, français, belge et italien de supprimer dans leurs régimes fiscaux les dispositions qui pourraient faire obstacle au remplacement des véhicules conventionnels par des VE et d'aligner ces régimes sur ceux des autres pays (9.24);
- f) nous recommandons aux constructeurs de VE d'engager les quatre premières actions visées au paragraphe 9.27 (9.28);
- g) nous recommandons aux collectivités locales d'étudier tous les schémas locaux qui pourraient apparaître particulièrement adaptés comme "pépinières" pour les VE du fait de conditions d'environnement ou autres exceptionnelles.

A N N E X E S

- ANNEXES :
- au chapitre 3
- au chapitre 5
- au chapitre 7
- au chapitre 8
- au chapitre 9.

ANNEXE 3/1

EVALUATION MONETAIRE DE L'IMPACT DES VEHICULES ELECTRIQUES SUR LA POLLUTION DE L'AIR

A 3/1.1 Données du problème

A 3/1.1.1 L'impact des véhicules électriques sur la pollution de l'air se traduit essentiellement par une réduction des gaz d'échappement provenant de la circulation urbaine.

Les émissions provenant de l'approvisionnement en énergie peuvent par contre augmenter lorsque l'électricité nécessaire pour recharger les batteries provient de centrales au fuel ou au charbon. L'objet de la présente annexe est d'évaluer l'impact de l'emploi des véhicules électriques sur les coûts des facteurs en termes de pollution.

A 3/1.1.2 Contrairement, les coûts des facteurs micro-économiques incluent également les coûts sociaux supplémentaires (non pris en considération dans les calculs de prix et de coûts des entreprises) provenant d'effets externes et supportés non par le producteur ou le consommateur mais par des tiers ou la société dans son ensemble.

Dans la présente étude, l'expression "effets externes de la circulation routière" recouvre les dégâts causés par les gaz d'échappement à la santé de l'homme, aux bâtiments, aux matériaux, à la faune et à la flore, le coût de la prévention de la pollution et le coût de la lutte contre la pollution.

A 3/1.1.3 Toute tentative visant à déterminer les coûts sociaux supplémentaires provenant de la circulation routière se heurte à de sérieux problèmes. Quoi qu'il en soit, le groupe de travail "Environnement" de l'action COST 302 s'est efforcé d'évaluer monétairement l'influence des véhicules électriques sur la pollution de l'air afin que les comparaisons de rentabilité entre véhicules électriques et véhicules thermiques n'ignorent plus complètement le problème clef de l'impact des transports routiers sur l'environnement et de fournir des arguments explicites et démontrables plutôt que des jugements implicites et subjectifs.

A 3/1.1.4. La première tâche consiste à chiffrer l'impact des véhicules électriques; la deuxième à choisir un modèle et à recueillir les informations nécessaires et la dernière à procéder aux calculs et à l'évaluation proprement dite.

La présente annexe expose les principes ayant servi de base aux résultats figurant au chapitre 3 du rapport final.

A 3/1.2. Emissions provenant des fournisseurs d'énergie et de la circulation routière

A 3/1.2.1. Les gaz d'échappement des véhicules thermiques contiennent une foule de substances dont certaines sont déjà présentes dans l'air alors que d'autres ne le sont pas et risquent de devenir un facteur de pollution lorsque leur concentration est élevée.

La composition des gaz d'échappement des voitures dépend de toute une série de facteurs techniques et, dans une large mesure, de l'état du moteur. L'exemple ci-après montre la composition typique des gaz d'échappement d'une voiture thermique dans les conditions normalisées du cycle CEE (Genève), qui reflète les conditions normales de conduite en ville.

Composition des gaz d'échappement d'une voiture au cours du cycle CEE (Genève)

Substance	Formule chimique	Kg par litre de carburant	% en poids dans les gaz d'échappement
Azote	N ₂	8,568000	72,00000
Dioxyde de carbone	CO ₂	2,019000	17,00000
Vapeur d'eau	H ₂ O	0,990000	8,30000
Monoxyde de carbone	CO	0,167000	1,40000
Oxygène	O ₂	0,130000	1,10000
Hydrocarbures	HC	0,015000	0,13000
Oxydes d'azote	NO _x	0,012600	0,11000
Hydrogène	H ₂	0,004200	0,03500
Aldéhydes	HCHO	0,000254	0,00200
Anhydride sulfureux	SO ₂	0,000244	0,00200
Composés de plomb	Pb	0,000075	0,00060
Sulfates	SO ₄	0,000017	0,00015
Ammoniaque	NH ₃	0,000011	0,00010

A 3/1.2.2. Parmi ces substances, la littérature scientifique considère que le monoxyde de carbone, les hydrocarbures, les oxydes d'azote et de soufre ainsi que les composés de plomb notamment, peuvent être des substances polluantes. Si les véhicules diesel dégagent beaucoup moins d'imbrûlés (CO, HC) que les véhicules à essence, ils émettent par contre de plus grandes quantités d'anhydride sulfureux et dégagent par ailleurs de la suie et des particules (de carbone essentiellement). Ces particules sont inoffensives en soi, mais constituent un support sur lequel d'autres substances nocives, comme celles émises dans les gaz d'échappement des véhicules à essence, peuvent s'accumuler, ce qui en facilite l'inhalation.

A 3/1.2.3. Il va sans dire que les gaz d'échappement des voitures à essence ne contiendront plus du tout de plomb après le passage à l'essence sans plomb, changement auquel on peut s'attendre prochainement dans la plupart des pays européens. Les nouveaux modèles à essence sont généralement équipés de moteurs conçus pour l'essence sans plomb. Celle-ci n'a pas une composition fondamentalement différente de l'essence au plomb, exception faite peut-être d'une plus forte proportion de certains composés d'hydrocarbures et d'une moindre proportion d'autres.

A 3/1.2.4. Les hydrocarbures présents dans les gaz d'échappement se composent de toute une série de substances distinctes, dont certaines n'ont pas encore fait l'objet d'une analyse complète quant à leur nocivité éventuelle. D'autres par contre (benzol et benzopyrène par exemple) se sont avérées fortement cancérigènes. A l'heure actuelle, il est impossible d'évaluer de façon suffisamment fiable les risques que présentent ces substances, notamment pour la santé de l'homme, à proximité immédiate de la source. A cet égard, les véhicules électriques, qui n'émettent pas de gaz d'échappement et ne présentent donc pas de risques à ce niveau (même s'ils sont difficiles à prouver), détiennent un avantage certain mais difficile à chiffrer.

A 3/1.2.5. Les gaz d'échappement ne sont pas la seule source de pollution de l'air par les véhicules à essence. Ces véhicules sont en effet responsables d'autres émissions (notamment d'hydrocarbures) provenant de l'évaporation et des fuites au dispositif d'alimentation, de l'évaporation au niveau du carter, de l'usure des freins ou du débordement des huiles et lubrifiants. Ces émissions ont toutefois moins d'impact que les gaz d'échappement. Les précautions techniques prises dans les nouveaux modèles

de véhicules ont permis de minimiser une grande partie de ces émissions. Les émissions provenant du refoulement du réservoir lors du ravitaillement du véhicule sont traitées au chapitre A 3/1.2.15. dans le cadre des émissions le long de la chaîne d'alimentation en carburant.

A 3/1.2.6. Seuls les principaux effets quantifiables des véhicules électriques sur l'environnement peuvent être pris en considération dans l'évaluation monétaire. Dans les gaz d'échappement provenant de la circulation routière, le monoxyde de carbone, l'anhydride sulfureux, les oxydes d'azote, les hydrocarbures, la suie (pour les véhicules diesel) et le plomb sont les principaux polluants à prendre en considération. Etant donné toutefois que la méthode d'évaluation choisie (cfr. A 3/1.3) repose sur une comparaison avec les véhicules à essence et que l'essence au plomb est sur le point d'être remplacée par l'essence sans plomb dans la plupart des pays, il suffit de quantifier l'impact des quatre premiers polluants cités.

A 3/1.2.7. Afin de pouvoir chiffrer la réduction des émissions sur les routes due à l'emploi de véhicules électriques, il nous faut procéder à toute une série d'hypothèses sur les distances qui pourraient être parcourues par des véhicules électriques non polluants au lieu des véhicules thermiques actuellement utilisés. Ces distances hypothétiques sont multipliées par les facteurs d'émission propres au véhicule qui indiquent les substances polluantes émises au kilomètre par un véhicule thermique type dans des conditions de fonctionnement bien définies. On obtient ainsi une méthode qui permet de calculer les émissions dégagées par n'importe quelle quantité de véhicules ayant n'importe quel kilométrage annuel.

A 3/1.2.8. Afin de mesurer les facteurs d'émission propres à chaque type de véhicule, on a tout d'abord défini les cycles de conduite reflétant les conditions de conduite et d'exploitation caractéristiques de la circulation urbaine. Les mesures prises ensuite sur des échantillons de véhicules représentatifs ont servi à calculer les émissions de certains modes de conduite (conditions de conduite idéalisées). Le groupe de travail "Environnement" de l'action COST 302 disposait de facteurs d'émission spécifiques (exprimés en grammes de substance polluante par véhicule-kilomètre) basés sur la vitesse moyenne du véhicule (y compris les arrêts). Certains de ces facteurs varient d'un pays à l'autre en raison des divergences qui existent au niveau de la composition du parc des véhicules ou, parfois, des conditions d'exploitation.

A 3/1.2.9. Les documents de travail du groupe "Environnement" de l'action COST 302 et les sources qui y sont mentionnées donnent des détails sur la façon de quantifier l'impact des véhicules électriques sur les gaz d'échappement provenant de la circulation routière. Les résultats de certains calculs sont repris dans les tableaux du chapitre A 3/1.8.

A 3/1.2.10. Si le véhicule électrique, en tant qu'alternative au véhicule classique dans certains cas d'application (essentiellement pour des trajets assez courts en agglomération), ne dégage aucune émission durant la conduite, il n'en assume pas moins sa part de responsabilité dans les émissions polluantes des centrales lorsque l'électricité nécessaire au chargement des batteries provient de combustibles fossiles. Par contre la production et la distribution des produits pétroliers provoquent également des émissions polluantes. Toute évaluation monétaire de l'avantage écologique que représentent les véhicules électriques doit dès lors tenir compte des émissions provenant du secteur énergétique.

A 3/1.2.11. La production d'électricité dans les centrales porte également atteinte à l'environnement bien que sous une autre forme que la circulation routière. Il s'agit généralement d'émissions de substances polluantes contenues dans les gaz de combustion, de pertes thermiques provenant des centrales thermiques classiques, de l'impact que peuvent avoir les centrales hydro-électriques sur la flore et le paysage, des risques liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire (conséquence d'un accident par exemple) et du problème non résolu du stockage des déchets radioactifs. Seules les émissions polluantes provenant des centrales thermiques brûlant des combustibles fossiles ont pu être prises en considération dans l'évaluation monétaire. Les oxydes de soufre et d'azote sont les plus importantes d'entre-elles. Ces dernières années, l'emploi assez répandu de dépoussiéreurs a fortement réduit les émissions de poussières (notamment des centrales au charbon). Les gaz de combustion des centrales ne libèrent que des quantités relativement faibles de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures dans l'atmosphère.

A 3/1.2.12. Il est difficile de déterminer la quantité de polluants émis par kilowatt/heure produit, étant donné que les émissions des centrales varient sensiblement en fonction du combustible utilisé, de la conception de l'installation et de ses conditions d'exploitation. Pour empirer les choses, le réseau de distribution de l'électricité est conçu de telle

manière qu'il rend impossible de lier une consommation d'électricité à une centrale donnée.

Pour pouvoir se faire une idée approximative de l'impact de la consommation énergétique des véhicules électriques sur les émissions des centrales, le groupe "Environnement" de l'action COST 302 disposait de moyennes sur les facteurs d'émission des centrales. Certains pays disposaient de chiffres partiellement ventilés selon la capacité de la centrale et le combustible utilisé, la plupart toutefois ne disposaient que de chiffres globaux pour l'ensemble de l'énergie produite à partir d'un type de combustible dans toutes les centrales du pays.

A 3/1.2.13. Ces facteurs d'émission ne tiennent pas compte de l'impact de la courbe de charge journalière (électricité produite en période de charge de base ou de charge de pointe). D'une manière générale, la production d'électricité est plus rentable et moins polluante dans les centrales de base que dans les centrales de pointe. Les calculs ne tiennent par ailleurs pas compte de la possibilité de combiner la production de chaleur et de courant puisque le rendement moyen retenu pour les centrales thermiques se situe entre 35 et 40 %, alors que la récupération de la chaleur pour des installations de chauffage peut porter le rendement des centrales à 60-80 %, ce qui réduit de moitié les émissions polluantes imputables à la production d'électricité.

Cette évaluation de l'impact écologique des véhicules électriques au niveau des centrales sur la base de la structure moyenne du parc de centrales actuel est à mettre en parallèle avec la tentative de détermination de l'impact écologique de la circulation routière qui se fonde également sur le parc de véhicules existant y compris les véhicules usagés.

A 3/1.2.14. La production d'électricité dans les centrales n'est pas la seule forme de conversion d'énergie qui produit des émissions polluantes. Le raffinage du pétrole brut et la distribution des produits pétroliers au consommateur final en produisent également.

Les émissions des raffineries contiennent non seulement les polluants typiques de la combustion (essentiellement du SO_2 et du NO_x), mais aussi des hydrocarbures libérés lors du transvasement et du stockage ou par les joints et les raccords et des gaz brûlés du torchage et du désensencage. Quelques pays, en particulier la République Fédérale d'Allemagne, ont transmis des

facteurs d'émission spécifiques à cet égard qui incluent également les gaz résiduels provenant du craquage catalytique lors du reformage des distillats moyens en distillats légers.

A 3/1.2.15. La distribution d'essence produit également des émissions dues au refoulement lors du remplissage du réservoir des véhicules : des hydrocarbures volatiles se libèrent dans l'atmosphère avec l'air refoulé hors du réservoir. Tout au long de la chaîne de distribution, les pertes par fuite et évaporation donnent lieu à d'autres émissions d'hydrocarbures. Quoiqu'elles seront sans doute sensiblement réduites à l'avenir, c'est sur la base de la situation actuelle qu'elles ont été prises en considération dans les calculs.

A 3/1.2.16. Les produits pétroliers sont acheminés du point de production aux différentes stations-service par oléoduc, par barge-citerne, par train et par camion-citerne. Les navires et camions-citernes en particulier émettent des gaz d'échappement qui ont été pris en considération dans les calculs.

A 3/1.3. Sélection de la méthode d'évaluation

A 3/1.3.1. Le chapitre A 3/1.2. expose les principes retenus pour chiffrer l'influence des véhicules électriques sur les émissions. L'étape suivante consiste à sélectionner une méthode d'évaluation permettant d'en chiffrer l'impact en termes de valeurs économiques. Comme nous le mentionnons au chapitre 3/1.5.1. du rapport final, nous avons le choix entre les méthodes directes ou indirectes (cf. document de travail mentionné au paragraphe A 3/1.9.15.).

Des études effectuées récemment en Suède (1) sur la base de ces deux méthodes ont permis de conclure que le coût de la pollution provenant de la circulation routière semble être plus élevé (bien que pas tellement plus élevé) si on le calcule par la méthode directe plutôt que par la méthode indirecte.

(1) S. OLOF Gunnarsson/Ingemar Leksell, estimation des coûts sociaux de l'impact qu'ont sur la santé et l'environnement les gaz d'échappement provenant des véhicules à moteur circulant en ville en Suède.

A 3/1.3.2. La méthode directe nécessite des informations assez sur les relations de cause à effet, dont le groupe de travail COST 302 ne dispose pas. Des problèmes se posent notamment en ce qui concerne :

- a) la définition des termes "dommage causé à la santé" et la distinction entre les dommages causés à la santé par la pollution de l'air et les autres causes de maladie;
- b) l'ignorance de l'impact de la pollution de l'air sur l'être humain et notamment de ses effets à long terme et synergiques (action conjuguée de différents polluants);
- c) la conversion du dommage en valeur monétaire en l'absence de prix de marché;
- d) l'évaluation des charges psychiques, des décès prématurés ou du raccourcissement de l'espérance de vie;
- e) la détermination de la part du dommage imputable aux gaz d'échappement (en tenant compte du fait qu'il existe des millions de sources et de victimes de la pollution et que les effets ne se limitent pas à la simple somme des différents groupes de polluants);
- f) une connaissance incomplète du cheminement suivi par les différents composants des gaz d'échappement de l'émission à l'immission en tenant compte des réactions chimiques et photochimiques ainsi que des conditions climatiques, topographiques et urbanistiques.

A 3/1.3.3. Le document de travail mentionné au point A 3/1.9.16 présente une méthode d'évaluation directe concevable. Il s'agit toutefois d'une méthode relativement coûteuse basée sur une série d'hypothèses et de prémisses qui en limitent fortement les possibilités d'application à l'action COST 302. C'est pourquoi le groupe de travail a opté pour une méthode indirecte qui est non seulement d'une utilisation plus simple, mais qui peut surtout s'appliquer à tous les pays participants.

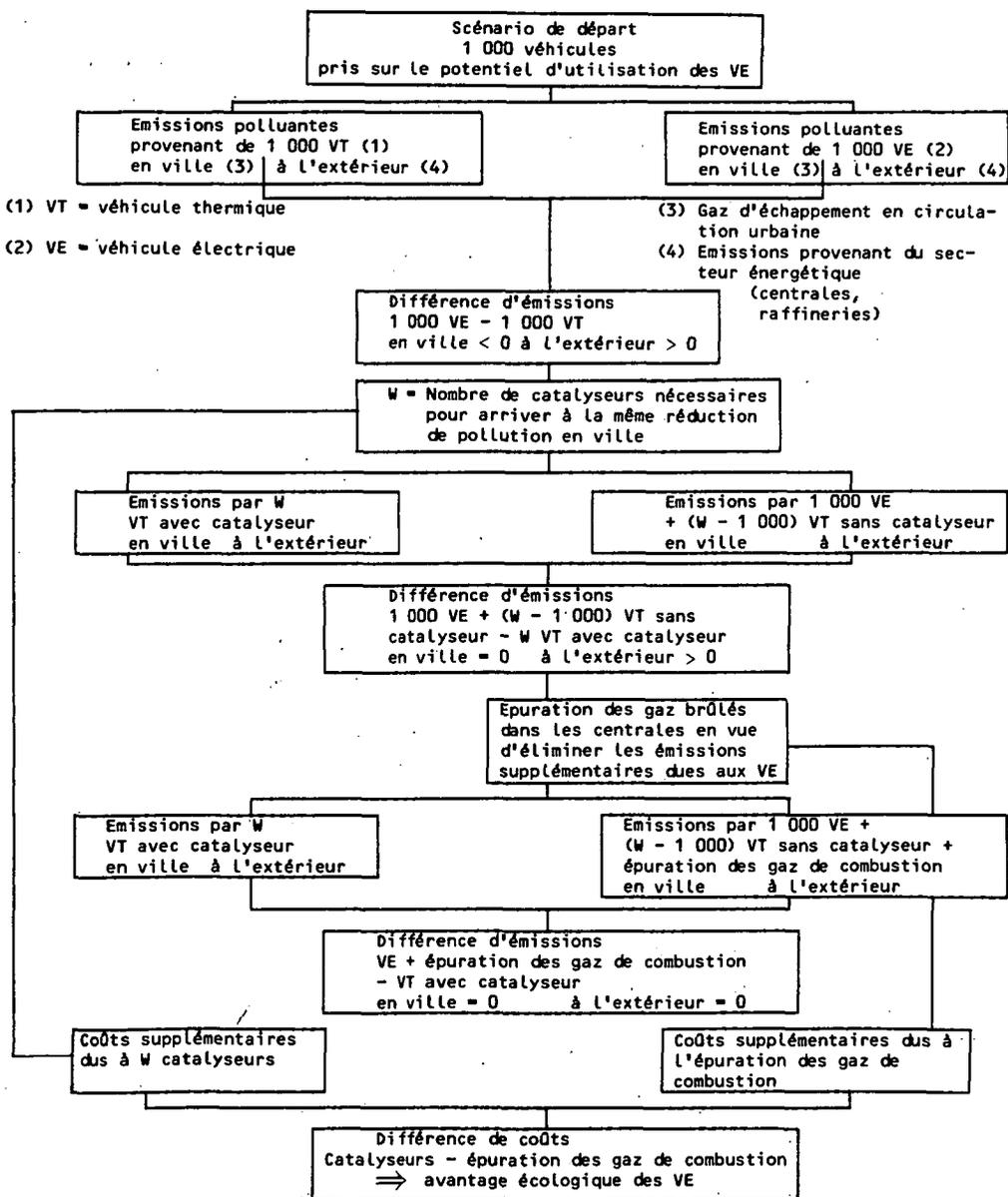
A 3/1.3.4. La méthode indirecte retenue repose sur une comparaison entre la réduction des gaz d'échappement due à l'emploi de véhicules électriques et celle due à l'adaptation de catalyseurs sur les véhicules thermiques. Il faut savoir quels seraient les coûts d'achat et de fonctionnement d'un nombre suffisant de catalyseurs à trois voies pour arriver à une réduction des niveaux de pollution semblable à celle résultant de l'introduction

d'un nombre déterminé de véhicules électriques. Ces coûts servent d'étalon de l'avantage écologique que représentent les véhicules électriques en termes de réduction des émissions provenant de la circulation urbaine. Du strict point de vue de la méthode, l'avantage écologique du véhicule électrique en termes monétaires n'existe que par rapport au véhicule à essence étant donné qu'il n'y a pas à l'heure actuelle de système permettant de réduire les gaz d'échappement des véhicules diesel.

A 3/1.3.5. Les centrales qui produisent l'électricité nécessaire au chargement des batteries des véhicules électriques émettent des matières polluantes (notamment des oxydes de soufre et d'azote qui dépassent de loin les émissions dues à la production d'une quantité équivalente de carburants pétroliers dans les raffineries).

De l'avantage monétaire que représentent les véhicules électriques en raison de l'absence de gaz d'échappement, il convient donc de déduire les coûts des mesures de prévention nécessaires au niveau des centrales, afin d'éviter toute émission supplémentaire due à la production de l'électricité de traction.

A 3/1.3.6. Le paragraphe A 3/1.4 présente en détail le modèle d'évaluation construit à partir de cette idée de base. Le graphique A 3/1.1. ci-après illustre schématiquement les principales étapes des calculs permettant de déterminer l'avantage monétaire du véhicule électrique en termes d'environnement.



Graphique A 3/1-1 : Présentation schématique du modèle d'évaluation monétaire de l'avantage écologique des véhicules électriques.

A 3/1.4. Modèle d'évaluation - Formules

A 3/1.4.1. Le modèle d'évaluation monétaire de l'avantage écologique des véhicules électriques, tel qu'il est présenté au paragraphe A 3/1.3, nécessite plusieurs étapes de calcul commentées ci-après.

A 3/1.4.2. Etape a)

a) Réduction des émissions en trafic urbain par l'emploi de 1.000 véhicules électriques

Il convient de déterminer dans quelle mesure le remplacement de 1.000 véhicules à essence par 1.000 véhicules électriques permettrait de réduire les émissions polluantes dues à la circulation urbaine, en utilisant la formule suivante :

$$E_k^{(v),u} (D_j) = 10^{-5} \cdot e_k^{(v),u} \cdot d^{(e),u} \cdot D_j$$

où :

D_j = kilométrage annuel d'un véhicule (KM/an)
(véhicule électrique et véhicule thermique)

$d^{(e),u}$ = proportion du kilométrage annuel parcourue par le véhicule électrique en ville (%)

$e_k^{(v),u}$ = coefficient de pollution spécifique aux véhicules thermiques (g/km)

où $k = 1$: monoxyde de carbone

$k = 2$: dioxyde de soufre

$k = 3$: oxydes d'azote

$k = 4$: hydrocarbures

$k = 5$: poussières (suie/particules)

désignent les différents composants des gaz d'échappement

$E_k^{(v),u}$ = réduction annuelle des émissions en trafic urbain due à l'introduction de 1.000 véhicules électriques (t/a) où k désigne le polluant concerné.

A 3/1.4.3. Etape b)

b) Nombre équivalent de véhicules équipés de catalyseurs

En se servant des taux de conversion applicables au CO, NO_x et HC d'une part et de facteurs de toxicité qui décrivent l'impact des cinq polluants considérés sur la santé humaine d'autre part, il est possible de calculer le nombre de véhicules thermiques qui doivent être équipés de catalyseurs à trois voies pour arriver en agglomération urbaine à la même réduction de pollution qu'avec 1.000 véhicules électriques.

Formule :

$$w(D_j) = 10^5 \cdot \frac{d^{(e),u}}{d^{(i),u}} \cdot \frac{\sum_{k=1}^5 (e_k^{(v),u} \cdot t_k^{(u)})}{\sum_{k=1}^5 (e_k^{(v),u} \cdot t_k^{(u)} \cdot \tau_k^{(u)}(D_j))}$$

où

$d^{(i),u}$ = Proportion du kilométrage annuel que le véhicule thermique parcourt en ville (en %)

$t_k^{(u)}$ = facteur de toxicité reflétant l'impact qu'a le polluant k sur la santé humaine (en milieu urbain) (1)

$\tau_k^{(u)}$ = taux de conversion (en %) du polluant k par le catalyseur à trois voies d'un véhicule circulant en trafic urbain

w = nombre équivalent de véhicules équipés d'un catalyseur (1)

Les taux de conversion $\tau_k^{(u)}$ dépendent du kilométrage cumulé, étant donné que le vieillissement thermique et l'intoxication réduisent progressivement l'efficacité du catalyseur. Des études sur l'importance de ces pertes d'efficacité ont été effectuées en République Fédérale d'Allemagne (1) Elles ont permis de déduire les rapports suivants entre taux de conversion et kilométrage cumulé :

-	CO	$\tau_1^{(u)} = R_1^{(u)} \cdot e^{-m_1 \cdot x}$
-	NO _x	$\tau_3^{(u)} = R_3^{(u)} - m_3 \cdot x$
-	HC	$\tau_4^{(u)} = R_4^{(u)} - m_4 \cdot \ln(x+1)$

(1) P. Oser/W. Branstetter

Grundlagen zur Abgasreinigung von Ottomotoren mit der Katalysatortechnik
dans : Motortechnische Zeitschrift 45 (1984)5

A 3/1.4.4. Etape c)

c) Coût des catalyseurs

Les coûts d'achat et d'utilisation du nombre de catalyseurs déterminé au paragraphe b) permettent de calculer l'avantage écologique que représente en termes monétaires l'introduction de 1 000 véhicules électriques grâce à la suppression des gaz d'échappement en trafic urbain.

Ces coûts se composent du coût d'achat du catalyseur réparti annuellement d'une part et de l'augmentation des coûts d'utilisation annuels du véhicule en raison du catalyseur. La formule à cet égard est la suivante :

$$x(D_j) = w(D_j) \cdot \left[A \cdot \frac{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^n \cdot \frac{c}{100}}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^n - 1} + 10^{-4} \cdot g \cdot f \cdot D_j \cdot \left(d^{(i),u} \cdot c^{(i),u} + d^{(i),r} \cdot c^{(i),r} \right) + D_j \cdot b \right]$$

où

- A = Prix d'achat d'un catalyseur à trois voies, y compris les accessoires nécessaires (en DM).
- i = Taux d'intérêt (en %).
- $d^{(i),u}$ = Proportion du kilométrage annuel que le véhicule à moteur parcourt en ville (en %).
- $d^{(i),r}$ = idem, mais à la campagne (en %).
- $c^{(i),u}$ = consommation de carburant (l/km) d'un véhicule thermique en ville
- $c^{(i),r}$ = idem (l/km), mais à la campagne
- g = consommation supplémentaire de carburant due au catalyseur (en %)
- f = prix de l'essence (hors taxes) (DM/l)
- b = autres augmentations des frais d'utilisation du véhicule dues au catalyseur (DM/an)
- x = coûts annuels d'équipement et d'utilisation de w véhicules thermiques équipés d'un catalyseur (DM/an).

où x représente le kilométrage cumulé [en 1 000 km], $R_k^{(u)}$ Le taux de conversion (en %) du polluant K dans le nouveau catalyseur et $m_k > 0$ un paramètre dépendant du type de vieillissement.

En partant de ces rapports, la formule

$$\tau_0 = \frac{1}{X_0} \cdot \int_0^{X_0} \tau(x) dx$$

où $X_0 = 10^{-3} \cdot D_j \cdot n.$

permet de calculer les taux de conversion moyens en fonction du kilométrage annuel D_j et de la vie utile n du véhicule.

Les taux de conversion calculés de la sorte sont alors des moyennes qui portent sur toute la vie utile du véhicule et tiennent compte du kilométrage annuel parcouru;

Les équations sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \tau_1^{(u)}(D_j) &= R_1^{(u)} \cdot \frac{10^3}{m_1 \cdot n \cdot D_j} \cdot (1 - e^{-m_1 \cdot n \cdot D_j \cdot 10^{-3}}) \\ \tau_2^{(u)}(D_j) &= R_2^{(u)} (= 0) \quad \text{effet du catalyseur : nul} \\ \tau_3^{(u)}(D_j) &= R_3^{(u)} - \frac{1}{2} \cdot m_3 \cdot n \cdot D_j \cdot 10^{-3} \\ \tau_4^{(u)}(D_j) &= R_4^{(u)} - m_4 \cdot \left(\left(1 + \frac{10^3}{n \cdot D_j} \right) \cdot \ln(n \cdot D_j \cdot 10^{-3} + 1) - 1 \right) \\ \tau_5^{(u)}(D_j) &= R_5^{(u)} (= 0) \quad \text{effet du catalyseur : nul} \end{aligned}$$

Si, au lieu des taux de conversion dépendant du kilométrage, on se contente d'introduire dans les calculs des moyennes générales pour l'effet du catalyseur, il faut alors se servir du paramètre $m_k = 0$ et retenir les taux moyens constants comme valeurs des variables $R_k^{(u)}$ (où le facteur dégressif de $1^{(u)}$ devient 1).

A 3/1.4.5. Etape d)

d) Augmentation des émissions dans le secteur énergétique due à l'introduction de 1.000 véhicules électriques

La mise en service de 1.000 véhicules électriques occasionne, au niveau des centrales, des émissions polluantes dues à la production de l'électricité de traction. Ces émissions sont dégagées non pas pendant la mise en circulation du véhicule, mais lors du chargement des batteries et interviennent donc, dans le temps et dans l'espace, largement en dehors des pointes de pollution critiques en ville.

La production et la distribution du carburant nécessaire à w véhicules avec catalyseur (le nombre w étant calculé lors de l'étape b) entraînent également des émissions polluantes (dans les raffineries, lors des opérations de transvasement et durant le transport à l'aide de barges et de camions-citernes).

En vue de dresser un bilan correct des émissions provenant du secteur énergétique, il convient de procéder aux comparaisons suivantes :

Scénario : véhicule électrique

- Emissions des centrales en rapport avec le kilométrage de 1.000 véhicules électriques
- Emissions imputables à la production du carburant nécessaire à 1.000 véhicules thermiques (sans catalyseur) qui effectuent les parcours à longue distance non réalisables par les véhicules électriques
- Emissions imputables à la production du carburant nécessaire pour couvrir le kilométrage parcouru par $(w-1000)$ véhicules thermiques sans catalyseur.

Scénario : véhicule avec catalyseur

- Emissions imputables à la production du carburant nécessaire pour couvrir le kilométrage parcouru par w véhicules thermiques avec catalyseur, en tenant compte de la consommation supplémentaire de carburant.

La formule est la suivante :

$$E_k^{(s)}(D_j) = 10^{-5} \cdot D_j \cdot (d^{(e),u} \cdot c^{(e),u} + d^{(e),r} \cdot c^{(e),r}) \cdot \frac{1}{(100-q)} \cdot \sum_{i=1}^6 (p_i \cdot e_{k,i}^{(p)}) + 10^{-5} \cdot D_j \cdot (e_k^{(r)} + e_k^{(d)} + e_k^{(t)}) \cdot (d^{(e),r} \cdot c^{(i),r} - (d^{(i),u} \cdot c^{(i),u} + d^{(i),r} \cdot c^{(i),r}) \cdot (1 + g \cdot 10^{-5} \cdot W(D_j)))$$

où

- $d^{(e),u}$ = proportion du kilométrage annuel que le véhicule électrique effectue en ville (%)
- $d^{(e),r}$ = idem, mais à la campagne (en %)
- $d^{(e),r}$ = proportion du kilométrage annuel qui devrait être parcouru en rase campagne par un véhicule électrique, qui ne peut pas l'être en raison du manque d'autonomie et qui est donc parcouru par un véhicule thermique (en %)
- $c^{(e),u}$ = consommation énergétique (d'électricité prélevée sur le réseau) d'un véhicule électrique en trafic urbain (en kWh/km)
- $c^{(e),r}$ = idem, mais à la campagne (petits trajets) (en kWh/km)
- q = pertes lors de la distribution et de la transformation de l'électricité (en %)
- p_i = proportion de l'électricité (en %) produite grâce à l'énergie i , où
 $i = 1$: houille
 $i = 2$: lignite
 $i = 3$: autres combustibles solides
 $i = 4$: fuel
 $i = 5$: gaz
 $i = 6$: énergie hydraulique, énergie nucléaire, autres sources d'énergie
- $e_{k,i}^{(p)}$ = émissions spécifiques du polluant k dans les centrales de type i par kWh produit (en g/kWh)
- $e_k^{(d)}$ = émissions spécifiques du polluant k dues au refoulement (pendant l'opération de transvasement) par litre d'essence consommée (en g/l)
- $e_k^{(t)}$ = émissions spécifiques du polluant k dues au transport (par camion citerne par exemple) par litre d'essence consommé (en g/l)
- $E_k^{(s)}$ = augmentation des émissions dans le secteur énergétique à la suite de l'introduction de 1.000 véhicules électriques par rapport aux émissions imputables aux véhicules équipés de catalyseurs conformément à l'étape (b) (en t/a).

A 3/1.4.6. Etape (e)

(e) Réduction des émissions dues aux véhicules avec catalyseur en trafic rural.

Toute comparaison des émissions polluantes produites par 1.000 véhicules électriques aux émissions imputables au nombre de véhicules équipés de catalyseurs déterminé au point (b) doit tenir compte du fait que la réduction des gaz d'échappement due aux véhicules électriques à la campagne est faible, voire inexistante.

Le catalyseur réduit par contre les gaz d'échappement des véhicules à essence sur les longs parcours à la campagne qui ne peuvent pas être effectués par les véhicules électriques en raison de leur manque d'autonomie.

Les calculs doivent dès lors tenir compte de la réduction d'émissions due à l'emploi de véhicules avec catalyseur en trafic rural déduction faite le cas échéant de la réduction imputable aux véhicules électriques sur "petits parcours" à la campagne.

La formule est la suivante :

$$E_k^{(v),r}(D_j) = 10^{-5} \cdot D_j \cdot e_k^{(v),r} \cdot (d_k^{(e),r} + d_k^{(u),r} \cdot (10^{-5} \cdot r_k^{(u)} \cdot w(D_j) - 1))$$

ou

$r_k^{(r)}$ = taux de conversion du polluant k par un catalyseur à trois voies d'un véhicule circulant à la campagne (en %)

$E_k^{(v),r}$ = réduction des émissions imputables à w véhicules équipés d'un catalyseur et circulant à la campagne par rapport aux émissions de 1000 véhicules électriques (ent/a).

Les taux de conversion $r_k^{(r)}$ sont calculés au moyen des mêmes formules que le taux de conversion équivalents $r_k^{(u)}$ applicables au trafic urbain (cf. étapes b), la seule différence étant qu'il convient éventuellement de

remplacer les variables $R_k^{(u)}$ par d'autres valeurs $R_k^{(r)}$ pour tenir compte des différences de conditions d'emploi.

A 3/1.4.7. Etape (f)

(f) Coût de la réduction nécessaire des émissions au niveau des centrales

L'avantage écologique que représentent les véhicules électriques en milieu urbain se calcule d'après le nombre de véhicules avec catalyseur nécessaire pour arriver à la même réduction de pollution. Inversement, l'inconvénient relatif que représentent les véhicules électriques en raison de l'augmentation des émissions dans le secteur énergétique d'une part et des effets limités qu'ils produisent en trafic rural d'autre part se calcule d'après le coût des mesures qui doivent être prises pour épurer les gaz de combustion dans les centrales, afin de réduire les émissions des centrales d'un montant correspondant au surplus de pollution.

La formule est la suivante :

$$Y(D_j) = h_2 \cdot \frac{t_2^{(r)} \cdot S_2(D_j) + t_5^{(r)} \cdot S_5(D_j)}{t_2^{(r)}} +$$

$$+ h_3 \cdot \frac{t_1^{(r)} \cdot S_1(D_j) + t_3^{(r)} \cdot S_3(D_j) + t_4^{(r)} \cdot S_4(D_j)}{t_3^{(r)}}$$

où

$t_k^{(r)}$ = facteur de toxicité reflétant l'impact du polluant k sur la végétation (à la campagne) (1)

h_2 = coûts spécifiques des mesures d'épuration des gaz de combustion dans les centrales par tonne d'émissions de SO_2 en moins (en DM/t).

h_3 = idem par tonne d'émissions de NO_x en moins (en DM/t).

$$S_k = E_k^{(s)} + E_k^{(v)}, \text{ où } E_k^{(s)} \text{ provient de d) et } E_k^{(v)}, \text{ provient de e)}$$

y = coût de la réduction nécessaire des émissions provenant des centrales
(en DM/a)

A 3/1.4.8. Etape (g)

(g) Avantage écologique d'un véhicule électrique exprimé en termes monétaires

L'avantage écologique d'un seul véhicule électrique exprimé en termes monétaires est égal à l'avantage résultant de l'absence de gaz d'échappement en trafic urbain déduction faite de l'inconvénient résultant des émissions dans le secteur énergétique et en trafic rural.

La formule est la suivante :

$$z(D_j) = 10^{-3} \cdot (X(D_j) - Y(D_j))$$

où

z = avantage écologique d'un seul véhicule électrique exprimé en termes monétaires (en DM/a)

X = coût du catalyseur d'après l'étape (c) (en DM/a)

Y = coût de l'épuration des gaz de combustion dans les centrales d'après l'étape (f) (en DM/a)

A 3/1.5. Modèle d'évaluation : données de base

A 3/1.5.1. Le modèle d'évaluation décrit au point A 3/1.4. a permis de calculer de manière uniforme pour les dix pays participant à l'action COST 302 l'avantage écologique que présentent :

- les voitures électriques;
- les fourgonnettes électriques;
- les camionnettes électriques;

par rapport à leurs homologues thermiques.

Pour ce faire, il a fallu préparer les données de base nécessaires pour 30 variantes de calcul. Dans la mesure du possible, les délégués du groupe de travail chargé de cette tâche se sont mis d'accord sur des chiffres uniformes ou comparables pour l'ensemble des dix pays.

Dans certains cas, d'autres calculs ont été nécessaires, pour tenir compte des conditions particulières ou des tendances futures des pays donnés. On a par ailleurs procédé à une analyse permettant de déterminer la sensibilité des résultats à toute modification des variables de départ. Compte tenu de la multiplicité des sources utilisées à cette fin, pour l'origine des différentes données, nous vous prions de vous référer aux documents de travail du groupe "Environnement" et aux sources qui y sont citées.

A 3/1.5.2. Des données chiffrées complètes ne sont fournies que pour les calculs de base utilisés au chapitre 7. Le chapitre A 3/1.6. ne reprend que les principaux résultats des calculs particuliers par pays ainsi que l'analyse de sensibilité. Certaines données de départ servant aux calculs de base sont constantes pour l'ensemble des pays mais varient pour les trois types de véhicules; d'autres par contre varient d'un pays à l'autre tout en ne dépendant pas du type de véhicule. Ces données ont été reproduites ci-après. Les pays y sont désignés d'après leurs

initiales habituelles. Quant aux symboles des variables, ils correspondent aux descriptions du point A 3/1.4.

A.3/1.5.3. Répartition du kilométrage

	Tous les pays		
Unité (%)	Voiture	Fourgonnette	Camionnette
$d^{(i),u}$	85	100	100
$d^{(i),o}$	15	0	0
$d^{(e),u}$	85	100	100
$d^{(e),r}$	0	0	0
$d^{(e),r'}$	15	0	0

A.3/1.5.4. Consommations énergétiques

	Tous les pays		
Unité	Voiture	Fourgonnette	Camionnette
$c^{(i),u}$ (L/km)	0,080	0,085	0,176 ./.

	Tous les pays		
Unité	Voiture	Fourgonnette	Camionnette
$c^{(i)}, u$ (l/km)	0,065	--	--
$c^{(e)}, u$ (kWh/km)	0,300	0,320	0,620
$c^{(e)}, r$ (kWh/km)	0,276	--	--

A 3/1.5.5. Coefficients de pollution spécifiques aux différentes catégories de véhicules

----- Voitures privées -----

Unité, (g/km)	B, CH, D, DK, F, I	GB	A	SF	S
$e_1^{(v)}, u$	25,65	26,0	19,79	14,31	54,65
$e_2^{(v)}, u$	0,05	0,0	0,00	0,00	0,00
$e_3^{(v)}, u$	1,68	1,3	1,68	2,10	2,56
$e_4^{(v)}, u$	2,51	3,2	2,54	1,69	6,86
$e_5^{(v)}, u$	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00
$e_1^{(v)}, r$	11,22	7,5	6,95	6,95	11,19
$e_2^{(v)}, r$	0,03	0,0	0,00	0,00	0,00
$e_3^{(v)}, r$	3,66	1,0	2,88	2,88	2,54
$e_4^{(v)}, r$	1,07	1,7	1,20	1,20	3,23
$e_5^{(v)}, r$	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00

----- Fourgonnettes -----

Unité (g/km)	B, CH, D, DK, F, I	GB	A	SF	S
e ₁ ^{(v),u}	27,25	27,6	21,03	15,20	58,07
e ₂ ^{(v),u}	0,05	0,0	0,00	0,00	0,00
e ₃ ^{(v),u}	1,79	1,4	1,79	2,23	2,72
e ₄ ^{(v),u}	2,67	3,4	2,70	1,80	7,29
e ₅ ^{(v),u}	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00
e ₁ ^{(v),r} e ₂ ^{(v),r} e ₃ ^{(v),r} e ₄ ^{(v),r} e ₅ ^{(v),r}	--- sans objet ---				

Camionnettes (tous les pays)

e ₁ ^{(v),u}	45,80
e ₂ ^{(v),u}	0,08
e ₃ ^{(v),u}	2,12
e ₄ ^{(v),u}	5,24
e ₅ ^{(v),u}	0,00
e ₁ ^{(v),r} e ₂ ^{(v),r} e ₃ ^{(v),r} e ₄ ^{(v),r} e ₅ ^{(v),r}	--- sans objet ---

A 3/1.5.6. Coefficients de pollution spécifiques à l' approvisionnement en carburant

Tous les types de véhicules

Unité (g/l)	GB	Tous les autres pays
e ₁ ^(r)	0,0	0,019
e ₂ ^(r)	2,0	0,895
e ₃ ^(r)	0,3	0,320
e ₄ ^(r)	0,04	0,895
e ₅ ^(r)	0,0	0,045
e ₁ ^(d)	0,0	0,000
e ₂ ^(d)	0,0	0,000
e ₃ ^(d)	0,0	0,000
e ₄ ^(d)	4,5	4,609
e ₅ ^(d)	0,0	0,000

Tous les types de véhicules

Unité (g/l)	GB	Tous les autres pays
e ₁ ^(t)	0,089	0,089
e ₂ ^(t)	0,040	0,040
e ₃ ^(t)	0,172	0,172
e ₄ ^(t)	0,038	0,038
e ₅ ^(t)	0,013	0,013

A 3/1.5.7. Pertes au niveau de la transformation et de la distribution de l'électricité

Unité (%)	Toutes catégories de véhicules et tous pays
q	10

A 3/1.5.8. Coefficients de pollution des centrales

Unité (g/kWh)	Coefficients identiques pour tous les types de véhicules mais variant en partie d'un pays à l'autre				
- Houille $e_{k,1}^{(p)}$		A, B, CH DK, F, I, S.	D	SF	GB
	k = 1	0,000	0,170	0,170	0,0
	k = 2	5,600	9,780	5,430	11,6
	k = 3	2,800	5,240	2,960	3,9
	k = 4	0,000	0,034	0,034	0,0
	k = 5	0,110	1,010	0,435	0,7
- Lignite $e_{k,2}^{(p)}$		F	A, B, CH, D, DK, GB, I, S, SF		
	k = 1	0,000	0,110		
	k = 2	36,920	7,560		
	k = 3	2,250	2,170		
	k = 4	0,000	0,034		
	k = 5	0,990	0,600		
- Autres combustibles solides $e_{k,3}^{(p)}$	k = 1	0,000			
	k = 2	1,580			
	k = 3	1,580			
	k = 4	0,049			
	k = 5	0,170			

Unité (g/kWh)		Coefficients identiques pour tous les types de véhicules tout en variant parfois d'un pays à l'autre			
- Fuel $e_{k,4}^{(p)}$		F	A, B, CH, D DK, I, S	SF	GB
	k = 1	0,000	0,034	0,034	0,0
	k = 2	16,650	9,270	9,780	9,1
	k = 3	1,000	2,420	1,010	1,7
	k = 4	0,000	0,069	0,067	0,0
	k = 5	0,550	0,300	0,230	0,0
- Gaz $e_{k,5}^{(p)}$		F	A, B, CH, D, DK, GB, I, S	SF	
	k = 1	0,000	0,010	0,010	
	k = 2	0,009	0,100	0,099	
	k = 3	3,500	1,910	1,880	
	k = 4	0,000	0,005	0,004	
	k = 5	0,000	0,001	0,001	
- Hydroélectricité, énergie nucléaire et autres sources d'énergie $e_{k,6}^{(p)} = 0$ pour k = 1 à 5 et pour tous les pays					

A 3/1.5.9. Structure de la production d'électricité

Unité (%)	Structure indépendante du type de véhicule									
	A	B	CH	D	DK	F	GB	I	S	SF
P ₁	0,4	28,1	0,0	31,6	95,2	11,6	73,5	12,5	0,0	12,3
P ₂	7,0	0,0	0,0	21,5	0,0	1,6	0,0	0,7	0,0	0,0
P ₃	3,0	0,4	0,7	1,1	0,0	0,0	0,0	0,5	1,6	12,2
P ₄	7,3	8,0	0,9	2,5	4,4	1,7	7,5	40,1	2,5	2,3
P ₅	10,5	10,1	0,2	8,1	0,0	1,0	0,0	14,9	0,0	1,6
P ₆	71,8	53,4	98,2	35,2	0,4	84,1	19,0	31,3	95,9	71,6

A 3/1.5.10. Coefficients de toxicité

Unité (1)	Pour tous les types de véhicules et tous les pays	Unité (1)	Pour tous les types de véhicules et tous les pays
$t_1^{(u)}$	1	$t_1^{(r)}$	0
$t_2^{(u)}$	75	$t_2^{(r)}$	100
$t_3^{(u)}$	100	$t_3^{(r)}$	100
$t_4^{(u)}$	30	$t_4^{(r)}$	200
$t_5^{(u)}$	100	$t_5^{(r)}$	0

A 3/1.5.11. Taux de conversion des catalyseurs

Unité (%)	Tous types de véhicules, tous pays	Unité (%)	Tous types de véhicules, tous pays	Unité (%)	Tous types de véhicules, tous pays
$R_1^{(u)}$	76,9	$R_1^{(r)}$	85,4	m_1	0,0026
$R_2^{(u)}$	0,0	$R_2^{(r)}$	0,0	m_2	0,0000
$R_3^{(u)}$	78,2	$R_3^{(r)}$	86,9	m_3	0,2832
$R_4^{(u)}$	74,6	$R_4^{(r)}$	82,9	m_4	3,1065
$R_5^{(u)}$	0,0	$R_5^{(r)}$	0,0	m_5	0,0000

A 3/1.5.12. Coût des catalyseurs

Unité	Tous types de véhicules et tous pays	
A (DM)	1600	
n (a)	8	$n = \min \left(n, \frac{80.000}{D_j} \right)$ utilisé dans les formules visées au paragraphe A3/1.4.
i (%)	5	
g (%)	10	
b (DM/km)	0	

La longévité d'un catalyseur est limitée non seulement dans le temps mais aussi et surtout par le kilométrage. C'est la raison pour laquelle nous avons retenu, dans l'hypothèse, une longévité moyenne de 8 ans et un kilométrage maximum de 80.000 kilomètres.

Données ne dépendant pas du type de véhicules mais dépendant du pays					
Unité	A	B	CH	D	DK
f (DM/1)	0,853	0,758	0,855	0,721	0,771
Unité	F	GB	I	S	SF
f (DM/1)	0,713	0,777	0,711	0,832	1,062

A 3/1.5.13. Coût des centrales

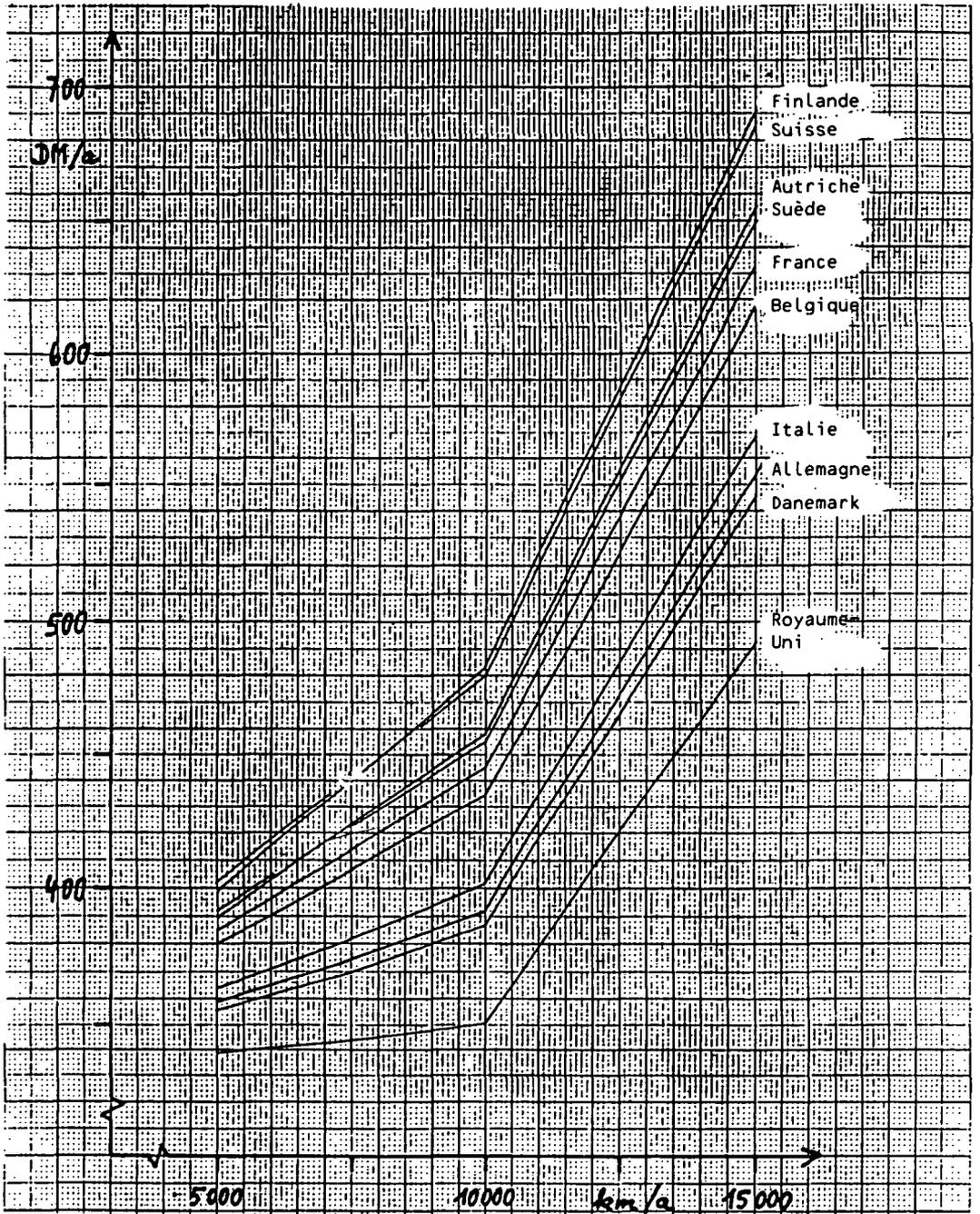
Unité (DM/t)	Tous types de véhicules, tous pays
h_1	0
h_2	3750
h_3	3000
h_4	0
h_5	0

A 3/1.6. Résultats de l'évaluation

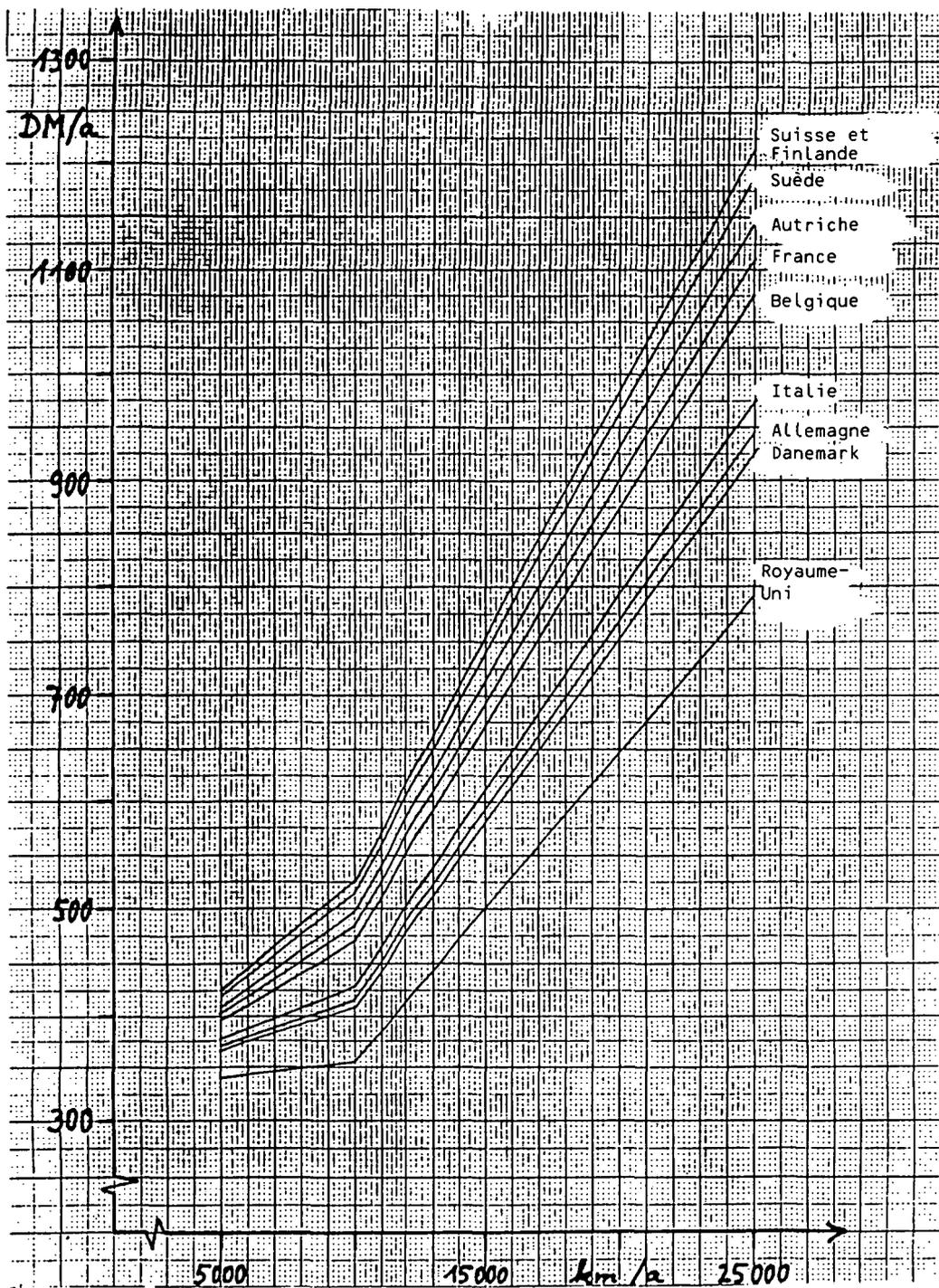
A 3/1.6.1.

En nous basant sur le modèle décrit au point A 3/1.4. et en reprenant les données énoncées au point A 3/1.5., nous avons procédé à des calculs pour les trois catégories de véhicules :

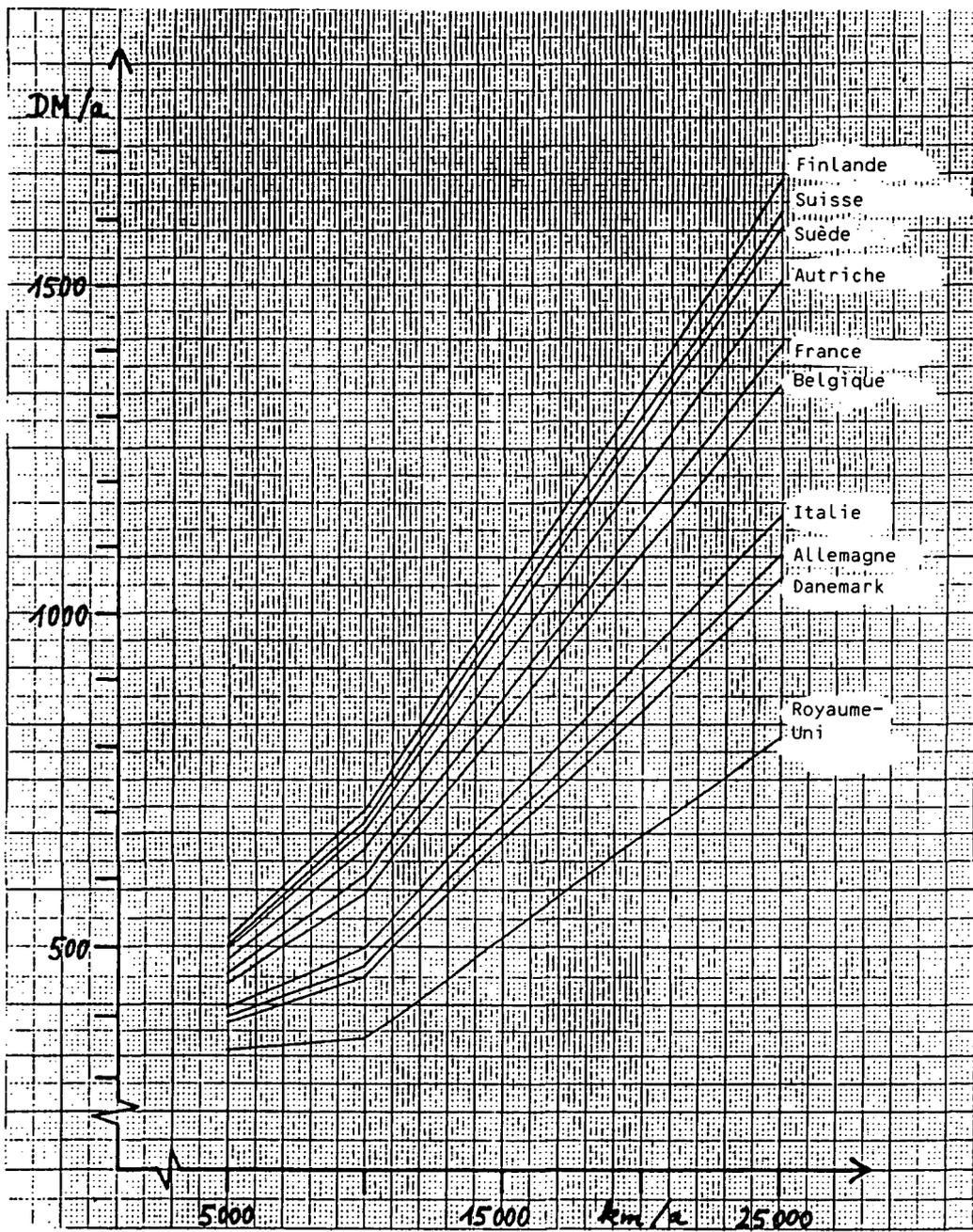
- voitures particulières;
- fourgonnettes;



Graphique A 3/1-2 : Avantage écologique annuel d'une voiture électrique



Graphique A 3/1-3 : Avantage écologique annuel d'une fourgonnette électrique



Graphique A 3/1-4 : Avantage écologique annuel d'une camionnette électrique

- camionnettes;

dans les dix pays participant à l'action COST 302. Les résultats de ces calculs sont présentés de façon détaillée au point A 3/1.8. Les graphiques A 3/1.2., A 3/1.3. et A.3/1.4. donnent un aperçu des résultats finaux.

A 3/1.6.2.

Les résultats de l'évaluation montrent que l'avantage écologique des véhicules électriques exprimé en termes monétaires dépend du type de véhicule, du kilométrage annuel parcouru et du pays considéré. Les graphiques qui suivent font apparaître ces influences (à cet égard, il faut tenir compte de la présence d'échelles différentes dans les trois diagrammes). Par ailleurs, certains résultats sont plus sensibles que d'autres aux incertitudes ou changements dans les paramètres de départ. Nous vous renvoyons ici aux graphiques contenus dans les documents de travail du groupe environnement (cf. point A 3/1.9.).

A 3/1.6.3.

Les résultats finaux - tels qu'ils sont repris dans les graphiques - de l'avantage écologique que représentent en termes monétaires les véhicules électriques par rapport à leurs homologues thermiques sont en fait le produit de deux sous-totaux, l'un positif, l'autre négatif. Tant les avantages des véhicules électriques dus à l'élimination de la pollution en trafic urbain que les inconvénients des mêmes véhicules dus à l'accroissement des émissions des centrales dans le secteur énergétique augmentent avec le kilométrage. Les avantages l'emportent toutefois sur les inconvénients, de telle sorte qu'en fin de compte l'avantage écologique des véhicules électriques augmente avec le kilométrage.

A 3/1.6.4.

Les résultats de l'évaluation dépendent très fort de la longévité du catalyseur retenue au départ. L'hypothèse d'une longévité limitée à 8 ans ou à 80.000 kilomètres produit dans les graphiques une inflexion très nette au

kilométrage annuel 10.000 km/a qui marque le point de passage de la longévité dépendant des années à la longévité dépendant du kilométrage.

A 3/1.6.5.

Les différentes hypothèses relatives aux coefficients de pollution des véhicules et des centrales, mais plus encore les différences dans la composition du parc des centrales débouchent sur des résultats différents d'un pays à l'autre. D'une manière générale, les avantages écologiques des véhicules électriques sont nettement moins importants dans les pays ayant un pourcentage élevé de centrales au charbon ou au fuel (par exemple Royaume-Uni, Danemark, Allemagne, Italie) que dans les pays ayant par exemple une forte proportion de centrales hydro-électriques (Finlande, Suisse, Autriche, Suède). L'ordre des dix pays en ce qui concerne l'importance de l'avantage écologique de la propulsion électrique ne dépend pas du type de véhicule.

A 3/1.6.6.

Si l'on compare les différents types de véhicules, on constate que l'avantage écologique des camionnettes électriques est supérieur à celui des voitures électriques pour plusieurs raisons :

- a) Dans l'hypothèse retenue, les voitures particulières effectuent une partie de leur kilométrage à la campagne, où le catalyseur conserve son efficacité là où le véhicule électrique n'est plus utilisable en raison de son autonomie réduite.

Par contre, d'après l'hypothèse retenue au départ, le kilométrage des camionnettes s'effectue entièrement en ville, où l'avantage écologique de la propulsion électrique produit tous ses effets.

- b) La différence dans la composition des gaz d'échappement des voitures et des camionnettes (même ayant toutes deux des moteurs à essence) favorise les camionnettes électriques par rapport aux voitures électriques.

- c) Les camionnettes consomment plus de carburant que les voitures et sont ainsi à l'origine d'émissions plus importantes dans le secteur énergétique, ce qui vient encore renforcer l'avantage des camionnettes électriques par rapport aux voitures électriques.
- d) Néanmoins, l'avantage de la camionnette électrique par rapport à la voiture électrique dont il est question au point c) est moindre dans les pays ayant un pourcentage élevé de centrales au charbon. Dans ces pays, le surplus de consommation énergétique de la camionnette électrique par rapport à la voiture électrique est défavorable à la traction électrique. C'est la raison pour laquelle l'écart entre les résultats des voitures et des camionnettes diffère selon les pays (important en Finlande, en Suisse et en Suède, faible au Danemark et en Allemagne, très faible en Grande-Bretagne).

A 3/1.6.7.

La sensibilité des résultats aux modifications des paramètres de départ a également fait l'objet d'une étude (cf. documents de travail mentionnés au point A 3/1.9.14.). D'après cette étude, la structure de la production d'électricité, le coût et la longévité du catalyseur ont une grande influence sur les résultats. Par contre, les coefficients de pollution spécifiques aux centrales, les coefficients de toxicité, les hypothèses sur l'augmentation de la consommation d'essence due à l'introduction du catalyseur, sur le rendement du catalyseur et sur la mesure dans laquelle ce rendement dépend de l'état du véhicule tout comme les hypothèses sur le coût des mesures d'épuration des gaz de combustion dans les centrales n'ont qu'une influence modérée sur les résultats. Cette influence est encore moindre en ce qui concerne les différences actuelles de prix du carburant selon le pays (exception faite de la Finlande), les coefficients de pollution spécifiques au type de véhicule concerné et les hypothèses relatives à la répartition du kilométrage entre la ville et la campagne (pour autant que l'on compare les véhicules électriques aux véhicules thermiques équipés d'un catalyseur sur la base d'un profil d'utilisation semblable).

A 3/1.6.8.

Si la base de comparaison du modèle d'évaluation est modifiée de telle sorte que les véhicules électriques sont comparés dans leur ensemble (hypothétique) à l'ensemble du parc des véhicules à essence, l'avantage écologique des voitures électriques est multiplié par un facteur se situant entre 2 et 3. En effet, seule une faible proportion (environ 1 tiers dans la plupart des pays) du kilométrage total de l'ensemble des véhicules à essence est parcouru en ville. En fait, en cas d'introduction généralisée du catalyseur, un tiers seulement de ces véhicules (équipés d'un catalyseur) contribuerait à réduire les gaz d'échappement en ville.

A 3/1.6.9.

Pour une grande partie des paramètres intervenant dans le modèle de calcul sélectionné, on ne disposait que de valeurs forfaitaires globales comme données de départ. C'est ainsi par exemple que pour les sources d'énergie utilisées dans les centrales, on s'est référé aux moyennes annuelles nationales (de 1984/85 pour la plupart des pays). Dans certains pays, notamment ceux où l'énergie hydraulique est importante comme par exemple en Autriche, la structure de la production de l'électricité connaît de fortes variations saisonnières. D'autres variantes de calcul donnent à penser qu'en appliquant une méthode tenant compte des variations saisonnières, les avantages écologiques du véhicule électrique seraient encore plus importants.

A 3/1.6.10.

Pour la plupart des pays, il est à prévoir que l'emploi de véhicules électriques dans les proportions envisagées ne nécessitera aucune augmentation de la capacité des centrales. En Suède toutefois, les centrales hydro-électriques et nucléaires existantes (qui produisent actuellement environ 95% de l'électricité) ne seraient pas à même d'absorber toute augmentation imprévue de la demande d'électricité qui dépasserait les prévisions de croissance. En cas d'introduction massive des véhicules électriques, la demande d'électricité supplémentaire qui en résulterait devrait être couverte par un surcroît de production dans les centrales au fuel existantes

ou par la construction de nouvelles centrales au charbon. Indépendamment de ce fait, la Suède s'efforce de réduire sa dépendance à l'égard de l'énergie nucléaire et l'utilisation accrue de combustibles fossiles dans les centrales viendrait ainsi réduire l'avantage écologique des véhicules électriques.

A 3/1.6.11.

Les tendances enregistrées en Finlande et les conclusions à en tirer sont similaires. Toutefois, dans les années à venir (à l'horizon 1990 environ), la technique du catalyseur ou toute autre technique similaire permettra sans doute de réduire les émissions polluantes des véhicules thermiques à tel point que les nouveaux véhicules fabriqués alors devront être évalués de façon tout à fait différente par rapport aux véhicules électriques. Cette évaluation ne pourra plus se faire avec la méthode retenue ici. La valeur de production brute de ces futurs véhicules sera supérieure dans l'ensemble et influencera toute comparaison de leur rentabilité par rapport aux véhicules électriques. Ce phénomène compliquera également l'évaluation monétaire de l'impact écologique sur la base de la méthode indirecte sélectionnée ici.

A 3/1.7. Coûts indirects

A 3/1.7.1.

Les résultats de l'évaluation monétaire de l'avantage écologique des véhicules électriques sont repris dans les comparaisons relatives aux coûts des factures du chapitre 7. Ils y sont nécessaires en tant que coût non internationalisé de la pollution de l'air causée par les véhicules thermiques et électriques. Le modèle d'évaluation choisi établit toutefois une distinction entre impact en milieu urbain d'une part et impact à l'extérieur de la ville d'autre part. Pour les comparaisons de coûts économiques, les résultats classés d'après le critère géographique (à l'intérieur/à

l'extérieur des villes) doivent être reclassés d'après le système de propulsion (véhicule thermique ou véhicule électrique). Les ajustements nécessaires au niveau des calculs sont repris ci-après :

A 3/1.7.2.

D'après les modèles visés au point A 3/1.4., l'avantage écologique d'un véhicule électrique est égal à la différence entre les coûts d'achat et de fonctionnement du nombre (déterminé au point A 3/1.4.3.) de catalyseurs nécessaires d'une part et les coûts des mesures d'épuration nécessaires des gaz de combustion dans les centrales (calculés au point A 3/1.4.7.) d'autre part pour compenser les émissions supplémentaires au niveau des raffineries et des centrales. La formule à cet égard - qui fait appel aux symboles du paragraphe A 3/1.4.8. - est la suivante :

$$z(D_j) = 10^{-3} \cdot (xD_j) - y(D_j)$$

D'après le paragraphe A 3/1.4.7., les coûts $Y(D_j)$ représentent le solde des changements d'émissions à la campagne provenant des trois facteurs suivants :

- émissions des centrales;
- émissions des raffineries ainsi qu'émissions dues à l'évaporation et à la distribution des carburants;
- absence d'impact écologique des véhicules électriques à la campagne.

Les coûts imputables au premier et au troisième de ces facteurs représentent les coûts indirects des véhicules électriques. Les coûts imputables au deuxième facteur ainsi que les coûts du catalyseur calculés au paragraphe A 3/1.4.4. représentent par contre les coûts indirects des véhicules thermiques.

A 3/1.7.3.

La formule permettant de calculer les changements d'émissions dans le secteur énergétique (cf. paragraphe A 3/1.4.5.) doit donc se répartir en

émissions spécifiques aux centrales $E_k^{(s),e}(D_j)$ d'une part et en émissions dues à l'approvisionnement en carburant $E_k^{(s),f}$ d'autre part comme suit :

$$E_k^{(s)}(D_j) = E_k^{(s),e}(D_j) - E_k^{(s),f}(D_j)$$

$$E_k^{(s),e}(D_j) = 10^{-5} \cdot D_j \cdot (d^{(e),u} \cdot c^{(e),u} + d^{(e),\tau} \cdot c^{(e),\tau}) \cdot \frac{1}{(100-q)} \cdot \sum_{i=1}^6 (p_i \cdot e_{k,i}^{(p)})$$

$$E_k^{(s),f}(D_j) = 10^{-5} \cdot D_j \cdot (e_k^{(r)} + e_k^{(d)} + e_k^{(t)}) \cdot [(d^{(r),u} \cdot c^{(r),u} + d^{(r),\tau} \cdot c^{(r),\tau}) \cdot (1 + g \cdot 10^{-5} \cdot w(D_j)) - d^{(e),\tau} \cdot c^{(e),\tau}]$$

A 3/1.7.4.

Conformément à cette répartition des émissions, les coûts $Y(D_j)$ qui y sont liés (cf. A 3/1.4.8.) se répartissent également en sous-totaux $Y^{(d)}(D_j)$ imputables aux émissions des centrales ($\alpha = 1$), aux émissions des raffineries ($\alpha = 2$) et au trafic interurbain ($\alpha = 3$) comme suit :

$$Y(D_j) = Y^{(1)}(D_j) + Y^{(2)}(D_j) + Y^{(3)}(D_j)$$

où les sous-totaux $Y^{(\alpha)}(D_j)$ sont définis de façon analogue au point A 3/1.4.7. comme suit :

$$Y^{(\alpha)}(D_j) = h_2 \cdot \frac{t_2^{(\alpha)} \cdot S_2^{(\alpha)}(D_j) + t_5^{(\alpha)} \cdot S_5^{(\alpha)}(D_j)}{t_2^{(\alpha)}} + h_3 \cdot \frac{t_1^{(\alpha)} \cdot S_1^{(\alpha)}(D_j) + t_3^{(\alpha)} \cdot S_3^{(\alpha)}(D_j) + t_4^{(\alpha)} \cdot S_4^{(\alpha)}(D_j)}{t_3^{(\alpha)}}$$

où

$$\begin{aligned}\alpha = 1 : S_k^{(1)}(D_j) &= E_k^{(s),e}(D_j) \\ \alpha = 2 : S_k^{(2)}(D_j) &= E_k^{(s),f}(D_j) \\ \alpha = 3 : S_k^{(3)}(D_j) &= E_k^{(v),t}(D_j)\end{aligned}$$

A 3/1.7.5.

L'avantage financier que représente sur le plan écologique un véhicule électrique par rapport à un véhicule thermique comparable se calcule comme suit :

$$z(D_j) = 10^{-3} \cdot (x(D_j) - y^{(1)}(D_j) + y^{(2)}(D_j) - y^{(3)}(D_j))$$

Ce résultat peut être conçu comme la différence entre les coûts indirects d'un véhicule thermique $Z^{(i)}(D_j)$ et les coûts indirects d'un véhicule électrique $Z^{(e)}(D_j)$ définis comme suit :

$$z^{(i)}(D_j) = 10^{-3} (x(D_j) + y^{(2)}(D_j))$$

$$z^{(e)}(D_j) = 10^{-3} (y^{(1)}(D_j) + y^{(3)}(D_j))$$

ce qui donne :

$$z(D_j) = z^{(i)}(D_j) - z^{(e)}(D_j)$$

A 3/1.7.6.

Les valeurs $Z^{(i)}(D_j)$ et $Z^{(e)}(D_j)$ ont été calculées pour plusieurs kilométrages annuels différents pour tous les types de véhicules considérés et pour tous les pays. Les résultats de chaque variante de calcul ont ensuite été soumis à une régression comprenant le kilométrage comme variable indépendante, étant donné que les calculs économiques du chapitre 7

reposaient sur des kilométrages annuels variables. Les coefficients de cette régression ont été mis à la disposition du groupe de travail "Rentabilité" pour servir de données de base. Les coûts indirects des véhicules thermiques et des véhicules électriques repris dans les comparaisons de coûts du chapitre 7 ont été calculés à partir de ces régressions.

A 3/1.7.7.

Afin de clarifier à nouveau l'objectif et le contenu des ajustements entre calculs écologiques et calculs économiques, le tableau A 3/1-5 ci-après reprend schématiquement les systèmes de classification adoptés (avec utilisation des symboles des paragraphes A 3/1.7.4. et A 3/1.7.5.).

Système de propulsion \ Situation géographique	En ville	A la campagne	Comparaison d'après le système de propulsion au chapitre 7
Moteur Thermique	x	y ⁽²⁾	x + y ⁽²⁾
Moteur électrique	o	y ⁽¹⁾ , y ⁽³⁾	y ⁽¹⁾ + y ⁽³⁾
Comparaison d'après la zone d'action (géographique) au chapitre 3	x	y ⁽²⁾ - (y ⁽¹⁾) + y ⁽³⁾	Comparaison économique Compa- raison écologique

Tableau A 3/1-5 : Schéma des différentes catégories comparables de résultats monétaires.