HAL
open science

Stratégies de développement de la voiture particulière

Olivier Appert

To cite this version:

Olivier Appert. Stratégies de développement de la voiture particulière. Sciences de l'ingénieur [physics]. 1974. hal-01909987

HAL Id: hal-01909987

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01909987

Submitted on 31 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE PARIS

Dossier long Ingr Stagiaire de 3e année
Promo X 1968

Consultation
sur place

STRATEGIES DE DEVELOPPEMENT

DE LA VOITURE PARTICULIERE

[46]

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES
Bibliothèque
IE 1

Consultation sur place

Olivier APPERT

Juin 1974

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE

DES MINES DE PARIS

-=-=-=-=-=

STRATEGIES DE DEVELOPPEMENT

DE LA VOITURE PARTICULIERE

-=-=-=-=-=-

par O. APPERT

[46]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES
Bibliothèque
N° IE 1

Consultation sur place

Directeur de Dossier

M. R. GREIF

Ingénieur en Chef des Mines

Juin 1974

AVANT PROPOS p. 1

INTRODUCTION p. 3

I - PROBLEMES POSES PAR L'USAGE DE LA VOITURE PARTICULIERE EN VILLE p. 6

I-1 - Pollutions et nuisances p. 9

I-1-1 - *L'automobile et l'environnement urbain*

I-1-2 - *Les difficultés de la lutte contre les nuisances*

I-2 - Congestion des villes p. 19

I-2-1 - *Qu'est-ce que la congestion ?*

I-2-2 - *Les transports en ville*

I-2-3 - *Les conséquences du développement du transport individuel*

I-3 - Energie p. 29

I-3-1 - *Les problèmes posés par la crise pétrolière*

I-3-2 - *Evolution des prix du pétrole*

I-3-2 - *Les problèmes à court terme*

I-3-3 - *Les problèmes à long terme*

I-4 - L'industrie automobile p. 40

I-4-1 - *Les difficultés de l'automobile*

I-4-2 - *Possibilités de l'innovation dans l'industrie automobile*

II - LES OPTIONS TECHNOLOGIQUES p. 49

II-1 - Une solution à rejeter : le véhicule urbain p. 51

II-1-1 - *La logique du véhicule urbain*

II-1-2 - *Critique de cette logique*

II-2 - Un principe à retenir : l'hybridation p. 62

II-2-1 - *Le principe de l'hybridation*

II-2-2 - *Les avantages de l'hybridation*

II-3 - [illegible] p. 67

II-3-1 - *Les générateurs électriques*

II-3-2 - *les générateurs mécaniques*

III - STRATEGIE DE DEVELOPPEMENT DE LA VOITURE PARTICULIERE p. 77

III-1 - Les critères de choix p. 78

III-1-1 - *Les sources d'énergie primaire*

III-1-2 *Les performances*

III-1-3 *Critères de choix de la filière*

III-2 - Elements d'une stratégie de développement p. 87

III-2-1 *Intégration du véhicule*

III-2-2 - *Introduction du véhicule dans le marché*

III-3 - Rôle de l'Etat p. 93

III-3-1 - *Les raisons de l'intervention de l'Etat*

III-3-2 - *Modes d'intervention de l'Etat*

BIBLIOGRAPHIE

AVANT PROPOS

Le Droit Chemin

A chaque kilomètre
chaque année
des vieillards au front borné
indiquent aux enfants la route
d'un geste de ciment armé.

J.PREVERT

Le présent document est le résultat d'une étude menée pour le compte de la DIMELEC dans le cadre d'un dossier long effectué au cours de la 3ème année de scolarité à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Les conditions dans lesquelles ce travail s'est déroulé permettent de mieux saisir la portée de ce document :

- le temps de travail consacré à l'étude a été relativement faible.

- l'éloignement des diverses réunions où était abordé le problème de la voiture (VSU au véhicule électrique) a permis une certaine indépendance vis à vis des intérêts en présence, mais n'a pas permis de comparer de visu les stratégies propres à chaque partenaire.

- une étude de cette ampleur nécessite d'allier des connaissances économiques, sociologiques, techniques à une expérience pratique de l'administration et de l'industrie. Dans ces conditions, c'est tout un groupe de travail qu'il faudrait constituer pour réaliser une étude plus sérieuse.

- Enfin les aléas économiques et politiques consécutifs à la crise du pétrole remettent en cause nombre de certitudes admises et rendent toute étude prospective très délicate.

Ce document ne veut pas être une synthèse de tout ce qui se dit sur l'automobile; il se veut l'expression d'une opinion personnelle sur l'avenir de l'automobile.

On s'est attaché à s'éloigner dans la mesure du possible des stéréotypes et des jugements partisans qui bloquent si souvent les discussions quand il s'agit de l'automobile. Et on s'est aussi plus attaché à déterminer une cohérence d'ensemble qu'une stratégie de développement de la voiture particulière.

Que le lecteur voit donc dans cette étude les idées sans parti pris d'un jeune fonctionnaire qui s'est efforcé de s'éloigner des chemins où certains défenseurs et adversaires acharnés de l'automobile auraient voulu le conduire "d'un geste de ciment armé"... comme disait le poête ! .

I N T R O D U C T I O N

L'un des signes de développement d'une société est le développement de ses transports de personnes ; que ce soient les transports du domicile au travail, les déplacements professionnels, les voyages ou les utilisations les plus diverses (courses, loisirs, visites...). L'automobile s'est taillée la part du lion dans le système de transport, puisqu'on estime qu'en France 70 % des transports sont effectués par la route (1) : on peut y voir là l'apothéose de la société de consommation.

Cependant plusieurs faits conduisent aujourd'hui à s'interroger sur la conception du véhicule automobile et sur la place à assigner au transport individuel dans l'organisation générale du transport de personnes: ce sont les exigences de la sécurité routière; l'aggravation de la congestion des agglomérations, la sensibilité nouvelle aux problèmes de nuisance. La récente crise de l'énergie conduit à mettre en cause le moteur à essence tel que nous le connaissons. Tous ces éléments conduisent à réfléchir sur l'avenir de l'automobile et sur la stratégie de développement de véhicules alternatifs.

Le véhicule spécifiquement urbain se présente comme un substitut éventuel de la voiture, du moins en ville. Nous avons commencé à analyser les conditions de développement du VSU, mais nous nous sommes vite rendu compte qu'il fallait poser le problème d'une façon plus globale. Le but de l'étude a donc été d'envisager les conditions générales de développement d'un véhicule alternatif.

Nous avons abordé le sujet dans une optique dirigiste pour laquelle les pouvoirs publics peuvent imposer aux constructeurs des mesures qui répondent à des besoins n'ayant pas forcément trouvé leur expression à travers le marché. Cette approche contradictoire en apparence avec le caractère libéral de l'économie française peut paraître technocratique. Ce choix correspond à des opinions personnelles et se trouve justifié par les difficultés économiques que va rencontrer dans les années à venir l'industrie française et plus précisément l'industrie automobile à cause de la crise pétrolière; d'autre part étant donné l'acuité des problèmes posés par l'automobile tant en ville que sur route les pouvoirs publics devront éffectuer des arbitrages et pourront orienter le développement de l'automobile dans un sens conforme à ses désirs.

L'étude se déroule suivant le cadre d'une étude de R.C.B. (1) c'est à dire :

- analyse des objectifs
- analyse des moyens
- relation entre moyens et objectifs
- Mise au point des programmes alternatifs.

Le manque de moyens d'étude n'a pas permis de pousser plus loin l'étude R.C.B . (de plus les autres phases relèvent du décideur plutôt que du technicien). De même on ne s'est livré à aucune quantification des objectifs ou des moyens. Ce choix s'explique par la difficulté du travail, et surtout par la conviction que toute étude doit commencer par une approche qualitative et conceptuelle.

- Conformément au cadre R C B nous étudions :

dans une première partie les problèmes posés par l'usage de la voiture particulière, en nous axant plus spécialement sur le cas urbain: on en déduira les principaux objectifs que pourrait se fixer une politique volontaire des Pouvoirs Publics.

dans une deuxième partie nous recensons les moyens techniques susceptibles d'avoir une action sur les objectifs poursuivis, sans considérer les aspects institutionnels ou légaux.

C'est en ce sens que l'étude est très incomplète puisqu'on ne peut négliger les intéractions entre moyens techniques et moyens institutionnels.

la troisième partie consistera à estimer dans quelle mesure chaque moyen mis en oeuvre concourt à la réalisation d'un objectif.

Nous établirons une grille de critère permettant d'orienter le choix de tel ou tel moyen. Dans cette dernière partie nous donnerons quelques indications sur les éléments que devrait nécessairement comporter un programme sur l'automobile. L'ensemble de ces développements permettront de préciser ce que peut être une stratégie de développement de la voiture particulière.

---

(1) cf La Rationalisation des choix budgétaires H .LEVY LAMBERTET H.GUILLAUME [2] P.19

1ère Partie

Problèmes posés par l'usage de la Voiture particulière en ville

La littérature sur ce sujet est très abondante et la plupart des auteurs semblent d'accord. Cependant il s'agit très souvent de thèses écrites pour défendre tel ou tel type de véhicule (voiture électrique, V S U ...) et elles ne relèvent pas toujours d'une analyse très approfondie : on en retiendra donc seulement la liste des principaux problèmes. Ils sont de trois types 3

- 1 - les premiers ont trait à la mauvaise utilisation de la voirie urbaine et des véhicules.

- 2 - les seconds englobent les nuisances directes ou indirectes (pollution atmosphérique, bruit etc...) qu'engendre l'utilisation du moteur thermique.

- 3 - enfin les troisièmes concernent le caractère superfétatoires en zone urbaine des performances des véhicules prévus pour circuler sur des routes dégagées. On rejoint là une simple constatation de bon sens que fait tout automobiliste en ville : quand trop de gens se servent de leur voiture:"on n'avance plus, ça sent mauvais et on consomme beaucoup d'essence pour pas grand chose..." Les défenseurs de nouveaux types de véhicule ont insisté diversement sur chacun de ces arguments : avec le véhicule urbain plus de problèmes de circulation; avec le véhicule électrique pas de nuisance; la propulsion hybride permet de diviser par 4 la consommation en ville ....

On ne peut nier qu'il y ait une vérité derrière ces arguments en forme de slogans publicitaires. Mais il s'agit bien souvent d'une utilisation commerciale de la sensibilité conjoncturelle du public ou des pouvoirs publics à tel ou tel problème : il y a 3 ans c'était l'environnement, maintenant il est de bon ton d'annoncer les problèmes d'énergie..

Il est donc indispensable de faire une étude plus approfondie de ces différents points : De plus encombrement, pollution, énergie ne sont pas indépendants les uns des autres : ainsi les encombrements en ville interviennent pour beaucoup dans le gaspillage de carburant et la pollution atmosphérique; de même les techniques antipollution se traduisent parfois par une augmentation de la consommation d'essence ....

Il est donc indispensable de faire une étude détaillée de chacun des 3 points .

L'horizon de temps que l'on retient doit être assez éloigné étant donné qu'il parait peu probable que la voiture actuelle disparaisse (même des villes) et soit remplacée massivement par "autre chose" avant une dizaine d'années -

Il s'agira donc de déterminer comment se posent les problèmes de l'automobile en milieu urbain en matière de pollution, encombrements, énergie. On analysera ensuite l'évolution à moyen ou long terme de l'acuité de ces problèmes: on pourra déterminer alors si la résolution d'un de ces problèmes peut devenir un objectif national important et réaliste, capable de renverser la tendance actuelle dans un sens déterminé (1).

Nous ajouterons un autre chapitre sur l'industrie automobile. Il s'agit en effet d'un acteur très important pour l'économie nationale (1 et 5) et les mesures prises touchant de près ou de loin l'automobile auraient une répercussion immédiate sur cette industrie qui est considérée comme le moteur de la croissance française : la crise de l'énergie nous a montré ces derniers mois qu'il serait grave de ne pas tenir compte des contraintes et de la stratégie propre à cette industrie lorsqu'on parle de la voiture particulière. De même il est probable (du moins à moyen terme) que ce soit l'industrie automobile qui ait la charge de développer l'alternative éventuelle de la voiture que nous connaissons : quelle est dans ces conditions la capacité de cette industrie à innover

Dans la conjoncture actuelle qui est très mouvante, chacun des chapitres qui vont suivre nécessiterait de plus amples développements. Mais le but de l'étude se plaçant en aval de ces préalables on a préféré faire une synthèse rapide de l'abondante littérature qui existe déjà sur ces sujets. Les développements suivants ne prétendent aucunement être exhaustifs : on a cherché plutôt à mettre en relief quelques idées qui permettent de définir une problématique générale (2).

Par "tendance actuelle", on entend l'évolution la plus probable de l'usage de la VP si on fait l'hypothèse que rien n'est fondalement changé (aucune limitation d'usage drastique, même mode de production ou d'appropriation) Pour plus de précisions voir une note de travail du SAEI sur un scénario tendanciel de développement de la voiture particulière (4)

Dans tout ce qui suit on a convenu de parler de court terme lorsque l'horizon de temps est inférieur à 5 ans, moyen terme s'il est égal à 10 ans, long terme s'il est supérieur ou égal à 20 - 25 ans . Il ne s'agit là bien entendu que d'une convention de langage.

../..

I - 1 POLLUTIONS et NUISANCES

Nous ne rentrerons pas dans les débats épineux de définition. Par nuisances nous considérons l'ensemble des atteintes sur les êtres vivants alors que les pollutions concernent les atteintes à l'environnement physique.

Ainsi le bruit du moteur sera classé dans les nuisances et les émissions de SO_2 seront des pollutions. Afin d'éviter les discussions nous ne considèrerons que ces deux aspects; les problèmes de cadre de vie que certains rattachent à l'environnement se posent en des termes spécifiques (urbanisme, rôle de la ville et des transports dans la ville) que nous aborderons dans le chapitre suivant ;

Les atteintes à l'environnement par l'automobile sont parmi les problèmes les plus étudiés par les environnementalistes. Depuis 5 ans en France elles ont donné lieu à un certain nombre d'études de grande envergure et ont conduit à la création de groupes interministériels animant des travaux sur les alternatives possibles à la voiture actuelle :

- alternatives partielles : ce sont les travaux du "groupe FRIBOURG" chargé en 1971 par le Premier Ministre de faire le point sur la question des nuisances automobiles. Ce groupe a défini en particulier les améliorations possibles des moteurs actuels et a analysé les avantages à attendre des moteurs nouveaux.

- alternatives complètes : Un groupe d'étude interministériel, le groupe SAULGEOT, a été constitué sous l'impulsion du Ministère de l'Environnement afin de faire le point sur le véhicule électrique.

Aussi la littérature ne manque pas et on ne s'attardera pas longtemps sur l'analyse des atteintes à l'environnement par la voiture . On insistera plus sur la portée réelle de la lutte contre les nuisances automobiles et on se demandera si celle-ci peut conduire à un renversement des tendances actuelles.

../..

I - 1 - 1 L'automobile et l'environnement urbain -

L'automobile émet des polluants, des odeurs et des bruits

a) les polluants : les principaux polluants émis par l'automobile sont : l'oxyde de carbone, les hydrocarbures, les oxydes d'azote (cf fig. I-1). L'anhydride sulfueux SO_2 n'est pratiquement pas émis par les moteurs à combustion interne. En revanche est plus préoccupant le plomb, additif antidétonant au carburant qu'on retrouve dans les gaz d'échappement.

La composition chimique des gaz d'échappement varie très notablement en fonction du régime et de la charge du moteur. (cf. tableau I-1) (6)

TABLEAU I-1

Composition chimique moyenne des gaz d'échappement

		Ralenti	Régime	Accélération	Décélération
Essence					
Azote	% en volume	70,4	73,2	71,0	70,4
Eau	% en volume	13,0	13,1	13,2	13,0
CO_2	% en volume	9,5	12,5	10,2	9,5
CO	% en volume	5,2	0,8	4,2	5,2
Hydrocarbures	p.p.m.	750	300	400	4 000
Oxydes d'azote	p.p.m.	30	1 500	3 000	60
Diesels					
CO	p.p.m.	0	0	500	0
Hydrocarbures	p.p.m.	250	65	115	250
Oxydes d'azote	p.p.m.	60	240	850	30

On voit clairement sur le tableau ci-dessus que les régimes les plus néfastes sont le ralenti (oxyde de carbone), l'accélération (oxyde d'azote) et la décélération (hydrocarbures). Ce sont précisément les régimes les plus utilisés en milieu urbain et comme c'est dans les centres urbains qu'on trouve les plus grandes concentrations automobiles, on comprend aisément l'importance de la pollution atmosphérique due aux automobiles.

La figure I-2 nous donne la composition de l'air d'un carrefour très pollué. Les mesures récentes faites par la RNUR et la Préfecture de Police ont conduit à des teneurs en oxyde de carbone avoisinant les concentrations limites déjà adoptées ou en projet. Ainsi place Clichy la concentration en CO est de 98 ppm, dans le tunnel de St-Cloud elle varie de 7 à 151 ppm alors que les doses limites sont de 17 (pour 2 heures) ou 46 (pour 1 heure) (1)

(1) On doit cependant remarquer que la pollution des carrefours très encombrés reste encore inférieure à celle d'une salle de réunion enfumée !

../..

FIGURE I - 1

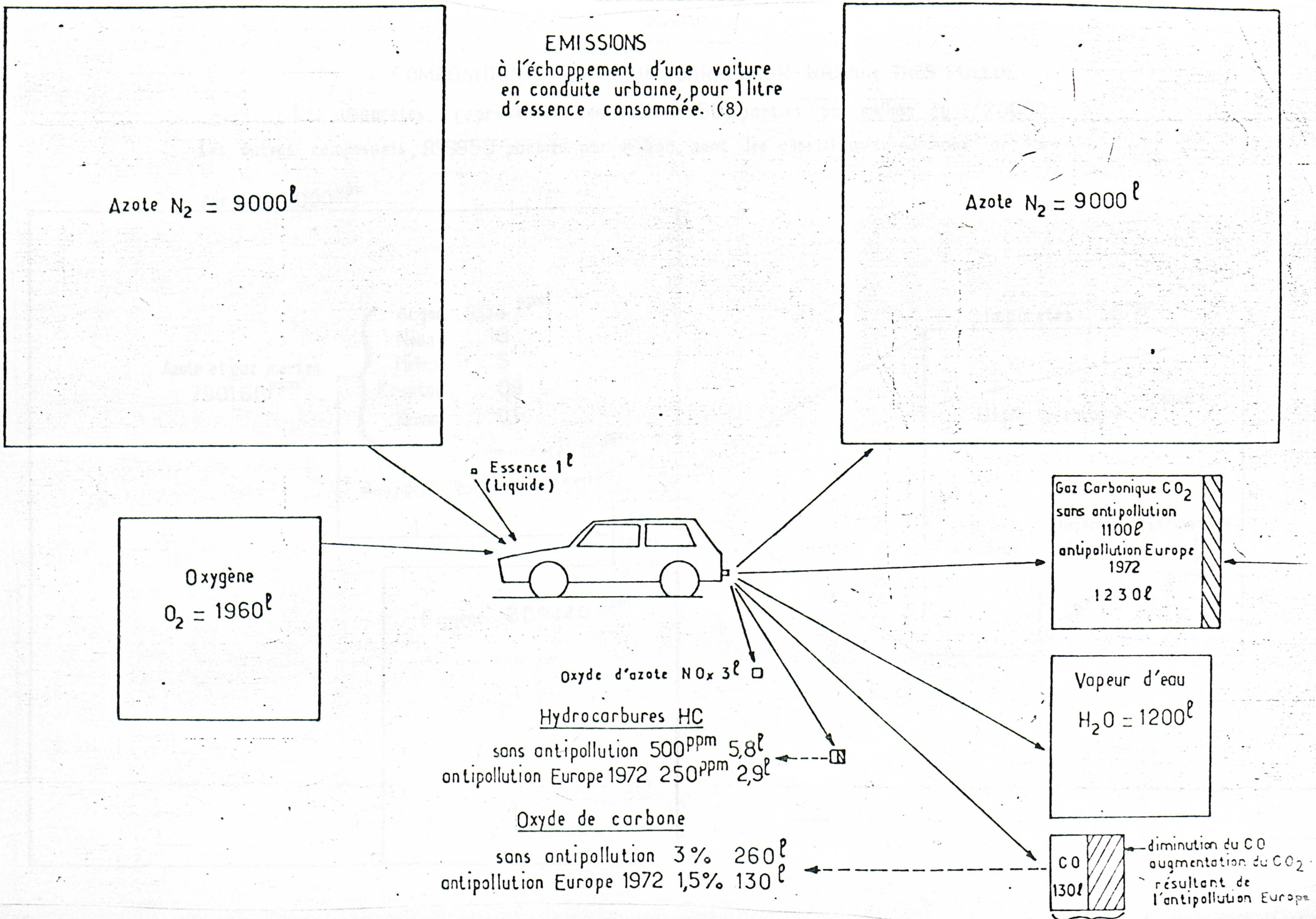
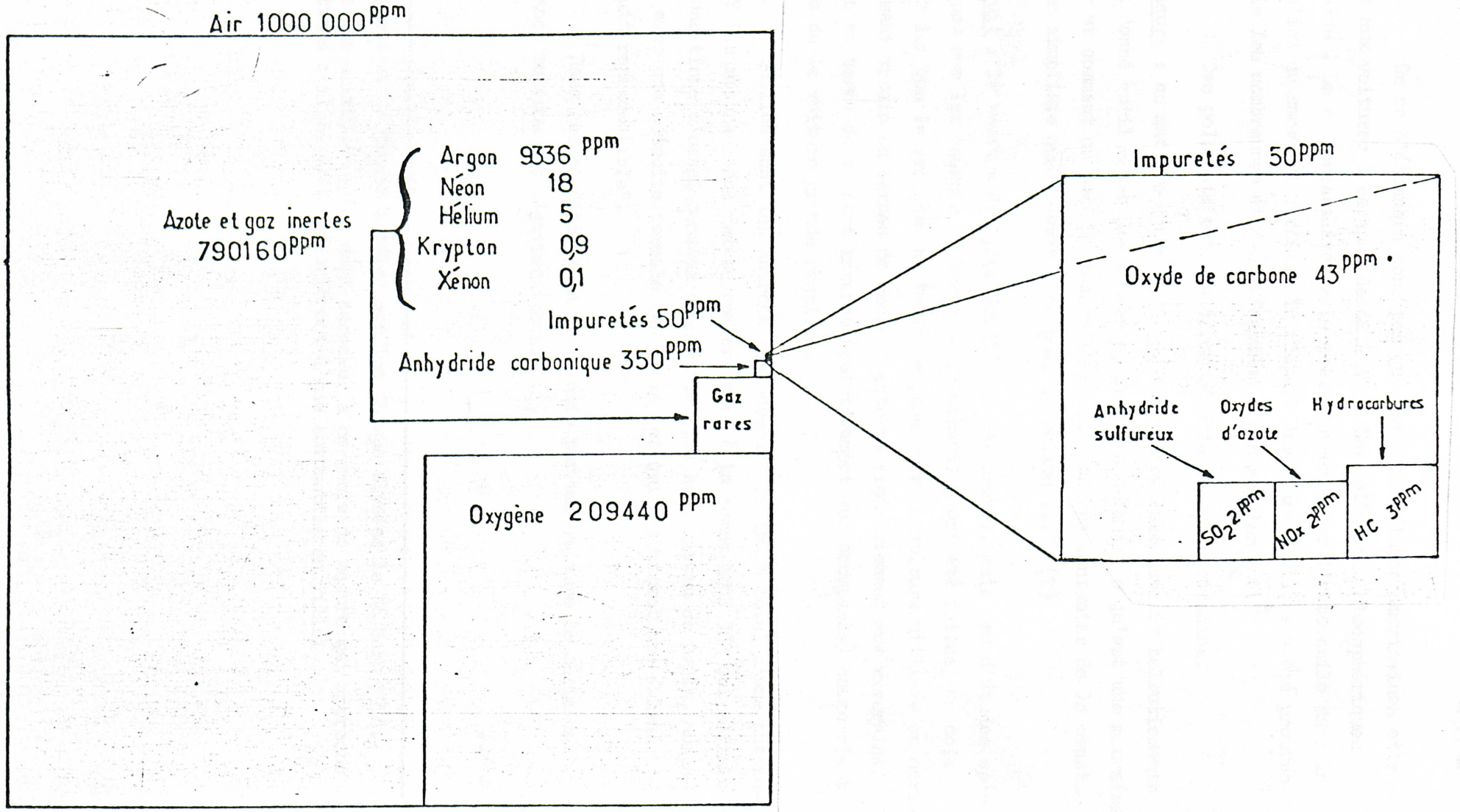

EMISSIONS
à l'échappement d'une voiture en conduite urbaine, pour 1 litre d'essence consommée. (8)
Azote N_2 = 9000ℓ
Azote N_2 = 9000ℓ
Essence 1ℓ (Liquide)
Oxygène O_2 = 1960ℓ
Gaz Carbonique CO_2 sans antipollution 1100ℓ antipollution Europe 1972 1230ℓ
Vapeur d'eau H_2O = 1200ℓ
Oxyde d'azote NOx 3ℓ
Hydrocarbures HC
sans antipollution 500ppm 5,8ℓ
antipollution Europe 1972 250ppm 2,9ℓ
Oxyde de carbone
sans antipollution 3% 260ℓ
antipollution Europe 1972 1,5% 130ℓ
CO 130ℓ
diminution du CO
augmentation du CO_2 résultant de l'antipollution Europe

FIGURE I - 2

COMPOSITION D'AIR D'UN CARREFOUR URBAIN TRES POLLUÉ

Les impuretés représentent en volume 50 parties par million ou 1/20000

Les autres composants, 999950 parties par million, sont les constituants normaux de l'air



On ne s'étonnera donc pas que certaines études américaines attribuent aux voitures à essence de 42 à 60 % des pollutions atmosphériques globales . La responsabilité de la pollution émise par l'automobile dans la formation du smog qui recouvre la plupart des grandes villes a été prouvée depuis les nombreuses études effectuées à Los Angeles . (11)

Ces polluants ont une odeur génante pour les citadins.

b) <u>odeurs</u> : en matière d'odeur, on en est malheureusement aux balbutiements étant donné qu'il n'est pas encore possible de définir ce qu'est une mauvaise odeur et comment on peut la mesurer. On doit donc se contenter de la constatation simpliste que "l'auto , ça pue, ça pollue ..." (1)

c) <u>bruit</u> : le bruit a été plus étudié que les odeurs, mais peu d'études spécifiques sur les sources de bruit de l'automobile ont été faites. On doit noteur ici que le problème du bruit se pose pour la voiture utilisée en environnement urbain en termes de confort externe (relativement aux riverains) et non en terme de confort interne (relativement aux occupants) comme c'est le cas de la voiture grande routière.

Quelles sont les sources responsables du bruit total d'une automobile ? Les mesures sont faites conformément à la norme ISOR 362 qui définit des conditions d'essai censées donner "le plus haut niveau de bruit, compatible avec une conduite normale (en ville) et qui entraînent une émission de bruit reproductible".

Dans ces conditions le bruit émis par une voiture de série de puissance moyenne est d'environ 30 dbA (2)

../..

---

(1) Slogan des participants de la "manif à vélo" sur les Champs Elysées le 16 Mars 1974.

(2) On verra ci-dessous les critiques qu'on peut adresser à ce genre de mesure qui approche bien mal les conditions réelles de fonctionnement d'une automobile en ville.

Dans un véhicule classique les sources de bruit sont multiples 9
on distingue :

- bruit de roulement
- bruit de bouche des systèmes d'admission et d'échappement
- bruit rayonné par les parois des systèmes ci-dessus
- bruit émis par le groupe motopropulseur (couple d'explosion et vibration des carters et accessoires)
- bruit émis par les carters de la boite de vitesse et par les transmissions
- bruit émis par les ventilateurs de refroidissement

Dans les conditions de fonctionnement prescrites par la norme I S O R 362, trois sources sont à peu près également responsables du bruit total. Ce sont :

- les vibrations du groupe motopropulseur
- les vibrations de la tuyauterie d'échappement
- l'entrée d'air à l'aspiration et la sortie des gaz à l'échappement

Il n'y a pas de source nettement prédominante. Le bruit de roulement par contre est négligeable.

Divers montages sont possibles pour limiter ces bruits, mais on ne peut espérer une diminution de bruit supérieure à 4 db (moyennant un surcoût unitaire de 2,5 à 3,5 %).Par contre toutes les études s'accordent à reconnaitre l'importance de la vitesse de rotation du moteur. Ainsi une baisse du régime du moteur de 25 % conduirait à une diminution de bruit de 6 db. Mais il s'agit là de mesures drastiques que ni les constructeurs ni les clients automobilistes ne semblent prêts à accepter.

Et pourtant le bruit de la circulation risque de devenir un problème angoissant. Des études menées en Angleterre ont montré que sans action réglementaire contraignante dans les prochaines années, la proportion de citadins exposés à des niveaux de bruit difficilement tolérables (70 db, plus de 10 % du temps) passera de 19 % à 30 % en 10 ans.

Les nuisances de l'automobile en ville apparaissent donc assez importantes pour que des mesures radicales soient prises .

Il ne semble pas cependant qu'il y ait grand chose à attendre des efforts des environnementalistes.

../..

I - 1 - 2 Les difficultés de la lutte contre les nuisances

La lutte contre les nuisances est née récemment et si les défenseurs de l'environnement n'ont encore que peu de moyens techniques pour les rendre crédibles, ils manquent totalement de moyens financiers et pendant longtemps resteront démunis de pouvoir. On peut caricaturer ces difficultés par la proposition suivante (valable en particulier pour l'automobile) : les moyens de mesure n'existent pas et s'ils existaient, on ne saurait pas déterminer exactement les effets de ces nuisances sur l'homme, et même si on le pouvait, l'environnement restera toujours secondaire par rapport à d'autres préoccupations considérées comme vitales.

a) les moyens de mesure n'existent pas -

Avant de se lancer dans des débats passionnés sur l'environnement, il faut se demander s'il est possible de mesurer la teneur en polluants de l'air. Or la mesure du niveau de la pollution atmosphérique est extrêmement délicate, tant par la méthode de prélèvement ou d'analyse des échantillons que par la fiabilité des résultats.

Ainsi en France les mesures de pollutions se font en faisant effectuer aux véhicules un parcours type correspondant à une circulation urbaine encombrée. Les gaz d'échappement sont recueillis dans un vaste sac en plastique et analysés. Outre le caractère arbitraire du cycle de fonctionnement retenu, ce type de mesure ne permet de donner qu'un ordre de grandeur approximatif. En effet même sur un parcours fixe, les résultats des mesures peuvent varier de 15 à 20 % suivant la température du moteur, de l'air ambiant et surtout suivant les règlages du moteur: ainsi les mélanges riches donnent beaucoup de CO et d'hydrocarbure, alors que les mélanges pauvres contiennent pas de CO, peu d'hydrocarbures et beaucoup de NO. Il est inutile d'insister sur l'importance du conducteur.

De même l'implantation des sondes de prélèvement n'est soumise à aucune règle précise. Et pourtant les écarts induits par des modes de prélèvement différents sont beaucoup plus importants que les erreurs inhérentes à la mesure : la teneur en CO est deux fois plus faible à 5 qu'à 1,5 m. au dessus du sol.

Les résultats d'analyses sont donc souvent sujets à caution, les méthodes d'analyse n'étant pas encore tout à fait au point : c'est le cas par exemple de la mesure des oxydes d'azote qui repose sur un coefficient de conversion de NO en NO_2 mal connu.

../..

Que penser dans ces conditions de la signification de mesures de concentration en polluants inférieures à 1 millionième (comme c'est souvent le cas pour les mesures de pollution de l'air ambiant), sachant de plus que l'air contient d'autres polluants qui peuvent perturber la mesure ?

Pour ce qui est du bruit le problème de mesure est aussi mal résolu. L'analyse du bruit est effectuée comme nous l'avons dit plus haut dans des conditions d'essai fixées par une norme. Cette mesure se heurte à trois difficultés essentielles :

- les sources de bruit sont multiples et leurs spectres sont très riches
- l'intensité des sources varie au cours de la mesure
- les sources se déplacent au cours de la mesure.

De plus les normes I S O établies il y a une dizaine d'années correspondent à des conditions qui ne sont pas les conditions réelles de circulation urbaine (en particulier en ce qui concerne la puissance d'accélération).

Quant aux mesures des odeurs, il est clair que pour l'instant il n'en existe aucune.

Mais même si les méthodes de mesure existaient, on ne saurait que faire des résultats puisqu'on connait encore mal les effets des nuisances.

b) <u>On connait mal les effets des nuisances</u> -

Chercher à déterminer les effets des nuisances sur l'homme, c'est entrer a priori dans le domaine du subjectif : les seuls aspects objectifs sont en effet les atteintes au confort dues aux poussières ou aux odeurs.

La sensibilité à celle-ci a été profondément renforcée par la nouvelle psychose collective de l'environnement qui se développe dans certains milieux Il apparaît une tendance à tout attribuer à la pollution atmosphérique : le mauvais temps, les rhumes, la fatigue...

Dans un tel contexte passionnel et subjectif il est souvent difficile de démêler les problèmes extraordinairement complexes de détection des effets toxiques de la pollution atmosphérique. Certes des corrélations très fortes ont été décelées en quelques occasions exceptionnelles : ainsi lors du smog de Londres en 1952, la mortalité a cru dans des proportions considérables. Mais il s'agit là d'accidents aigus qui sont le résultat d'une combinaison de circonstances exceptionnelles (climatiques en particulier). Encore faut-il remarquer que la mortalité a fortement diminué le mois suivant, ce qui tendrait à prouver

que le smog n'a fait qu'accélérer le décès des gens les plus fragiles.

Ce sont les troubles chroniques qui sont les plus urgents à étudier. L'imagination ne fait pas défaut lorsqu'on recense quelles sont les affections causées par la pollution atmosphérique : diminution de la longévité, troubles de la croissance, altération des grandes fonctions biologiques, des organes des sens, du système nerveux ... Mais "dans la pratique il est très difficile d'étudier les troubles chroniques pour la simple raison qu'ils demandent des années d'évolution à bas bruit avant de devenir appréciables à des examens très affinés. Chemin faisant, d'innombrables facteurs peuvent interférer et déterminer à eux seuls des troubles similaires "(6)

On se heurte de plus à des phénomènes non linéaires (seuil de tolérance), non homogènes (concentration accrue en certains points), dépendant beaucoup de la présence de telle ou telle particule (les poussières ou les gouttelettes d'eau concentrent les toxiques et les rendent dangereux).

Quant à l'expérimentation sur les animaux, elle est d'un faible secours puisque le seul effet indiscutablement prouvé à ce jour sur un animal est l'action du fluor sur la dentition des vaches et que l'expérimentation est de toutes façons difficilement transposable à l'homme (différences de durée de vie, de système nerveux, de doses toxiques...)

L'étude des effets du bruit conduit aux mêmes types de problèmes. Il ne manque pas d'auteurs pour énumérer les affections que l'on peut attribuer au bruit dans les villes, mais comment dissocier les effets du bruit des effets du mode de vie urbain ?

De plus, dans la pratique le bruit a souvent un spectre très riche et tout porte à croire que hautes et basses fréquences sont ressenties de façon différente et sont plus ou moins amorties selon les parois des habitations. -

D'autre part diverses études sur les bruits de circulation ont mis en évidence deux paramètres importants de la gêne : ce sont respectivement :

- le niveau moyen du bruit : il définit le bruit de fond de la circulation,
- les écarts entre les pointes de bruit et le niveau moyen

Ne peut-on pas parler d'une accoutumance relative au premier paramètre ? Y-a-t-il un phénomène de seuil ? Comment mesurer la gène de la motocyclette qui réveille 25.000 personnes en circulant à 3 heures du matin ? (1)

---

(1) Dans ces conditions on peut s'intérroger sur la signification ou le sérieux d'études coût-avantages qui dans leur recensement des avantages de la réduction du bruit n'oublient pas d'inclure les déménagements évités ou la réduction des recours en justice !!! (report of the panelar Noise abatement US Départment of commerce repris dans (12)

Etant donné les difficultés de mesure des nuisances et des effets de celles-ci sur l'homme peut-on attendre des mesures radicales visant à limiter les nuisances des automobiles ? La réponse semble négative .

c) Les pouvoirs publics ne décideront rien au seul non de l'environnement -

On a vu au cours des paragraphes a, et b, qu'il est très délicat de mesurer les nuisances et de déterminer leurs effets sur l'homme. Il en ressort donc que dans l'état actuel des choses les gains à attendre de mesures antipollution sont aléatoires. Comme les coûts de cette lutte sont en général élevés les pouvoirs publics ne sont pas enclins à se lancer dans des mesures radicales.

Mais l'argument le plus important dans le domaine automobile est que les pouvoirs publics ne disposent pas de moyens techniques suffisants pour mettre en oeuvre une politique de lutte contre les nuisances automobiles. L'essentiel des moyens d'essais et des prototypes se trouvent chez les constructeurs ce qui accroit encore plus leur puissance (qui est déjà considérable) face aux pouvoirs publics). Ceux-ci ont à choisir entre deux attitudes: imposer artificiellement une norme en espérant que la technique suivra, ou bien se contenter de suivre le progrès technique. Avec la loi Muskie les USA ont choisi la première attitude, mais le renvoi à 1981 (au lieu de 1976) de l'application de cette loi, peut faire penser qu'il s'agit d'une procédure arbitraire sans signification économique. En France, les divers ministères qui se préoccupent d'environnement ont adopté la deuxième attitude plus réaliste et constructive. Mais on peut s'inquiéter lorsque les constructeurs affirment qu'il sera difficile d'aller au delà des Normes européennes 1976 sans un surcoût insurmontable. On voit mal dans ces conditions quelles mesures radicales pourraient être prises .

Les conclusions tirées sont donc justifiées actuellement par l'absence de connaissances scientifiques sur les nuisances et par l'attitude très prudente des pouvoirs publics. Certes on peut penser qu'à moyen terme la mesure des nuisances aura fait des progrès et que les pouvoirs publics auront affermi leur position. Il n'en reste pas moins que l'environnement ne pourra vraisemblablement pas à long terme être un élément dans l'évolution de l'automobile.

Trois raisons dominent : absence de force politique s'occupant de la défense de l'environnement, coût de la lutte antinuisance pour l'industrie automobile, priorité à d'autres problèmes dans les années à venir -

- absence de forces politiques : le propre des nuisances est d'être la contrepartie d'une activité de production (pollution industrielle ou de loisir (une partie des nuisances automobiles)

../..

Lutter contre les nuisances automobiles entrainera nécessairement des contreparties négatives du côté des automobilistes. (augmentation de coût, interdiction de circuler à certains endroits ...)

En ce sens une telle lutte ne peut recevoir d'appui que de non automobilistes : c'est bien ce qu'on a constaté lors des deux manifestations à vélo à Paris. Mais quelle communauté d'intérêt rassemble cette minorité de non automobilistes dont une faible partie seulement n'a pas voulu voiture ?

De plus les nuisances automobiles sont diffuses et mobiles (par définition) et on voit mal les habitants d'un village ou d'un quartier dans une ville s'unir pour lutter contre les nuisances automobiles comme c'est le cas pour la pollution industrielle.

Certes sur un problème comme la sécurité routière une véritable force politique s'est opposée aux constructeurs; aux Etats-Unis surtout avec Ralf Nader. Mais les données techniques existaient ou étaient faciles à rassembler et la liste des morts sur la route représentait un argument assez convainquant et indiscutable. On n'en est pas encore là pour les nuisances comme nous l'avons vu.

A moyen ou long terme on ne peut donc guère espèrer que se crèe une force politique active autour des problèmes de nuisances automobiles.

.- <u>la lutte contre les nuisances automobiles a une influence directe sur l'industrie automobile</u> : Il faut analyser cette influence au niveau international. Un pays peut imposer des normes antinuisances sévères ce qui permet de s'affranchir de la concurrence des constructeurs étrangers pendant un certain temps. C'est ce qu'on fait déjà les E U avec les voitures européennes . Mais il s'agit là d'une politique risquée. La lutte contre la pollution se traduit en effet par des investissements importants et par une augmentation des prix des véhicules.

Le tableau I-2 tiré des conclusions du Groupe FRYBOURG permet de mesurer cette augmentation de prix . Or en matière automobile la demande est hypersensible aux prix (1). Une telle mesure risque donc d'alourdir la charge financière des constructeurs nationaux et d'affaiblir leurs positions à l'exportation. Le risque est sans doute trop élevé pour les gains aléatoires qu'on peut attendre d'une lutte antinuisances.

Il est donc probable que les normes de pollution s'harmoniseront au niveau des pays industrialisés. Mais il est tout aussi probable que la lutte antinuisance risque de connaître un replis pendant assez longtemps. L'industrie

---

(1) Sur ces points voir une étude complète sur l'innovation dans la construction de matériel de transport [13] . On notera en particulier que les constructeurs hésitent à remplacer la dynamo par un alternateur car cela conduirait à un surcoût de 20 F.

automobile est en effet dans ces pays le moteur de la croissance mais est touchée depuis peu par la crise pétrolière. Dès lors son avenir est plutôt sombre (1). Il est donc fort probable que l'ensemble des pays industrialisés éviteront de prendre des mesures lourdes pour cette industrie comme des mesures antinuisances.

-.- Enfin et surtout le problème des matières premières et de l'énergie risque de prendre le pas sur les préoccupations environnementalistes. Une économie ne peut en effet tourner sans énergie et sans matières premières et les économies occidentales en font la douloureuse expérience. La guerre du Kippour a montré qu'il s'agit là d'une priorité qui conditionne toute l'économie ; Aux Etats-Unis la crise du pétrole a conduit à lancer définitivement des projets d'oléoducs bloqués depuis des années par les environnementalistes. En France la manière dont a été cré et a disparu le Ministère de l'Environnement n'est pas sans signification ; La conversion énergétique de la France à l'électricité est une tendance lourde autrement plus importante que les préoccupations d'environnement .

On peut en déduire qu'il est impossible d'envisager le développement de techniques antinuisances conduisant à une consommation énergétique supérieure.

Il n'en reste pas moins que la sensibilité du public aux problèmes d'environnement va croissante : il sefait donc difficile de prendre des mesures aboutissant à une augmentation des nuisances. Ainsi les nuisances, sans être un objectif prioritaire d'une politique de l'automobile, resterait cependant un problème à ne pas négliger.

En conclusion, on peut reprendre le tableau I-2 en éliminant les solutions techniques qui conduisent à des augmentations de consommation énergétique (3ème argument), ou de coût important (2ème argument) et celles dont les délais de réalisation sont trop importants. Cela nous conduit à exclure le moteur actuel et à ne retenir que les techniques de motorisation alternatives auxquelles on peut ajouter le véhicule urbain moins nuisant que le véhicule actuel parce que plus petit et moins puissant. Ainsi les contraintes d'environnement orientent vers ces types de véhicule, mais en aucun cas ne seront suffisantes pour les imposer.

(1) Ce point est développé au chapitre I-4.

I - 2 CONGESTION DES VILLES

Les encombrements à Paris ne font qu'empirer. A chaque retour de vacances le Parisien se rendant en voiture à son travail a l'impression "qu'on ne pourra plus circuler" l'année suivante. Cette saturation du réseau de voirie qui, il y a quelques années, était le lot des heures de pointe du soir tend maintenant à s'étaler sur la plus grande partie de la journée et à gagner des zones urbaines qui jusqu'à présent étaient épargnées. La congestion n'est plus un phénomène spécifiquement parisien, il touche toutes les agglomérations urbaines.

La congestion est certes un des arguments souvent avancé par les adversaires de l'automobile. Mais il s'agit là d'un sujet complexe auquel tout le monde est très sensible : défenseurs et adversaires de l'automobile justifient leurs positions par des arguments partiels et contradictoires. Ainsi les premiers avancent que la vitesse de déplacement dans Paris est actuellement supérieure à ce qu'elle était en 1955 [14] (1). Les seconds prétendent au contraire que le phénomène s'est aggravé : ainsi la vitesse commerciale des autobus, qui est un assez bon indicateur de la vitesse moyenne des déplacements, est passée de 1960 à 1967 de 11,5 à 10 km/h à Paris, de 13 à 11 km/h à Lyon, de 14 à 11 km/h à Nice [5] . Sur certaines lignes la vitesse moyenne reste aux alentours de 5,3 km/h [15] .

Face à un problème aussi délicat, il convient plus qu'ailleurs d'avancer en veillant à ne pas se laisser emporter par des partis pris. Après avoir analysé comment la congestion des villes se relie au problème global de transport dans une agglomération, nous verrons les causes générales de l'augmentation du nombre de déplacements urbains et en particulier de l'usage de l'automobile. Cela nous amènera à nous interroger sur la place du transport futur en insistant sur ses rapports avec la politique d'urbanisation. Cela nous amènera à nous interroger sur la place du transport individuel dans le système de transport futur, en insistant sur ses rapports avec la politique d'urbanisatio

.../...

(1) - Le S R E a calculé que la vitesse a été multipliée par 2,5. Il faut préciser qu'il s'agit de la vitesse moyenne obtenue sur les voies de surface et les voies rapides : en 1955 n'existaient ni les voies sur berge, ni le périphérique, ni les autoroutes de dégagement ....

Dans les paragraphes qui suivent nous nous intéresserons surtout au cas de Paris qui est en l'occurrence très représentatif du problème des grandes métropoles (1 000 000 d'habitants). Nous reviendrons au cours du développement sur le cas particulier des villes moyennes (300 000 habitants).

I - 2-1 Qu'est-ce que la congestion ?

La congestion est la saturation du réseau de voirie due à une affluence excessive de véhicules. Ces encombrements se situent de plus en plus au niveau des portes de Paris et des voies de dégagement. Cependant la circulation dans le centre de Paris reste difficile à toute heure. Ces encombrements se traduisent : -par une perte de temps évidente : mais par rapport à quoi peut-on mesurer cette perte de temps ? D'autre part il n'est pas certain que cette perte de temps soit ressentie de façon négative par tous les conducteurs, le trajet en voiture constituant pour eux un moment de transition agréable entre le travail et la vie familiale (1).

- par un gaspillage énergétique : le fonctionnement fréquent du moteur au ralenti dans les encombrements provoque un gaspillage d'essence que des études récentes ont chiffré à 40 % de la consommation totale en ville (cf. [18] et § III -1-1).

- par une pollution accrue du fait du gaspillage énergétique et du fonctionnement fréquent au ralenti, régime où la pollution est importante (cf. § I-1-1).

- par des pertes économiques : gênes apportées aux livraisons, aux services publics, pertes de recettes causées aux transports collectifs ... Pertes économiques et pertes de temps sont difficiles à chiffrer, mais semblent très importantes : ainsi à Lyon on a pu estimer qu'un véhicule parcourant un kilomètre dans une zone saturée coûtait, en perte de temps et en gêne, 2 Fr à la collectivité, soit 10 fois son coût de fonctionnement [5] .

.../

---

(1) - Cf. enquête effectuée pour la Profession automobile et reproduite partiellement dans la brochure "L'automobile et l'environnement" Oct. 72.
On ne peut nier cependant que les encombrements contribuent à l'état de fatigue générale de l'automobiliste comme du non automobiliste.

Mais en s'axant sur les seuls encombrements, on risque de passer à côté du phénomène dans sa globalité. La voiture est un mode de transport qui occupe beaucoup de surface au sol. En effet, la superficie par passager occupée par les voitures particulières est importante : à Paris dans 9 voitures sur 10 le conducteur est seul. De plus la voiture occupe aussi une place importante à l'arrêt. A Paris les voitures stationnant en permanence sur la voirie (45 % du parc parisien), gênent la circulation et contribuent à la congestion du centre de Paris. Le stationnement pose donc des problèmes de consommation d'espace et d'intégration des infrastructures de voirie et de stationnement : dans une agglomération moyenne, les parkings nécessaires pour satisfaire les besoins des déplacements individuels représenteront 10 à 12 % de l'espace central s'ils sont construits dans des immeubles à étages, soit 1/3 de l'espace construit (19) . On ne peut donc aborder la congestion des villes par l'automobile sans analyser la politique d'urbanisation.

Mais on ne peut non plus dissocier la congestion et la détérioration des transports en commun : l'augmentation du trafic automobile provoque une baisse de qualité de service des transports en commun. Ceux-ci sont délaissés par de plus en plus d'usagers qui préfèrent utiliser leur automobile.

Il apparaît donc que les problèmes posés par la congestion sont globaux. Certains considèrent cependant qu'avec un véhicule plus adapté à la ville, plus petit, moins rapide (le véhicule urbain) les problèmes seraient résolus. Certes la longueur excessive des véhicules (par rapport à l'usage qu'on en fait), la non homogénéité des véhicules en circulation rendent le trafic moins fluide; cependant tout nous porte à croire que le véhicule urbain ne résoudrait que temporairement les problèmes de congestion (1).

Dans ces conditions, comment se pose le problème des transports en ville ?

.../

---

(1) - Ce point est largement développé au chapitre II - 1

I - 2-2 Les transports en ville.

On commencera par développer le cas des grandes agglomérations en prenant l'exemple extrême de Paris puis on reviendra rapidement sur le cas particulier des villes moyennes.

A Paris on assiste à une croissance absolue des besoins de transports due à la conjugaison de 3 phénomènes :

- exode rural et concentration urbaine
- distorsion habitat-emploi
- élévation du niveau de vie.

Bien que la population de Paris intramuros ait diminué ces dernières années, la concentration industrielle et urbaine conduit à une croissance importante de la Région parisienne. Ainsi on estime que le nombre de ménages y passera de 3,1 millions en 1965 à 3,9 millions en 1985 et 4,9 millions en l'an 2 000.

Ce phénomène se double d'un phénomène d'éloignement des lieux d'habitat et d'emploi. Paris intramuros se vide de ses habitants alors que le nombre d'emplois (tertiaires pour la plupart) augmente de plus en plus. Alors que la population active de Paris diminuait de 11 % entre 1962 et 1968, elle augmentait de 10,5 % dans la Petite Couronne et de 32 % dans la Grande Couronne. Ainsi le rapport entre les emplois et la population active n'a cessé de se détériorer. Il augmente de 13 % à Paris et diminue de 2,5 % et 1 % dans les deux autres parties de la Région (Cf. tableau I - 3).

La distorsion existe aussi en Banlieue bien qu'elle soit moins nette. Des zones résidentielles et des zones d'emplois se développent de telle sorte que les déplacements internes à la banlieue augmentent.

Ce déséquilibre augmente la part des migrations alternantes dans l'ensemble des déplacements (en 1968 celles-ci représentaient 55 % des déplacements [15]), et constitue les heures de pointes : (29 % du trafic s'effectue entre 7 h. et 9 h. et 27 % entre 18 h. et 20 h.) [15] . Il s'ensuit un engorgement de l'ensemble du système de transport aussi bien transports individuels que transports collectifs.

D'autre part, l'élévation du niveau de vie entraîne une augmentation du nombre de déplacements quotidiens par personne.

Une comparaison avec certaines villes étrangères montre que lorsque le niveau de vie s'élève on assiste à une augmentation sensible du nombre de

.../

TABLEAU I - 3 Population active et emplois

Variations 1962-1968

Localisation (en milliers)	Population active (1)			Emplois (2)			Rapport (1)		
	1962	1968	Variation en %	1962	1968	Variation en %	1962	1968	Variation en %
Paris	1 470	1 310	— 11	1 980	1 990	+ 0,5	1,34	1,52	+ 13
Petite Couronne (3 départements)	1 610	1 780	+ 10,5	1 355	1 460	+ 7	0,84	0,82	— 2,5
Grande Couronne (3 départements)	920	1 210	+ 31	665	850	+ 30	0,71	0,70	— 1
Ensemble région	4 000	4 300	+ 7,5	4 000	4 300	+ 7,5	1	1	1

TABLEAU I - 4 Prévision de la population

et de l'utilisation des modes de transport

(extrapollation des tendances actuelles) (18)

Année	Nombre total de ménages	Nombre de ménages motorisés	Déplacements par véhicule individuel		Déplacements par transports en commun (4) (y compris ménages non motorisés)		Déplacements totaux tous modes de transports et tous ménages	
			Journaliers	aux 2 heures de pointe	Journaliers	aux 2 heures de pointe	Journaliers	aux 2 heures de pointe
1965	3,1 M	1,7 M	5 800 000	1 500 000	5 800 000	1 500 000	11 600 000	3 000 000
1985	3,9 M	3,2 M	17 500 000	3 900 000	5 500 000	1 600 000	23 000 000	5 500 000
2000	4,9 M	4,0 M	27 000 000	5 300 000	5 000 000	1 700 000	32 000 000	7 000 000

déplacements par jour et par personne : cette augmentation est surtout sensible pour ce qui est des déplacements d'affaire, de loisirs ou d'achats [15] .

Ainsi on peut prévoir la progression suivante du nombre de déplacements journaliers [20] :

1965 : 3,5 à 4 déplacements par ménage

1985 : près de 6 déplacements par ménage

2000 : 6, 5 à 7 déplacements par ménage (tendance au plafonnement).

Tous ces phénomènes concourent à une augmentation du nombre de déplacements beaucoup plus rapide que la seule croissance démographique comme le montre le tableau I - 4.

Ces dernières années ont été caractérisées de plus par une évolution de la répartition entre les différents modes de transport. Cette évolution se fait très nettement en faveur de l'automobile.

Ainsi entre 1958 et 1968 31 % des actifs ont changé de mode de transport (1). L'évolution de la clientèle des divers moyens de transport peut se faire sentir de la manière suivante :

Transport en commun	- 29 %
2 roues	- 35 %
Voiture particulière	+ 180 %
Marche à pied	+ 32 %

Ainsi la part des transports en commun passe de 55 à 47 %, alors que la part de la voiture particulière passe de 21 % à 30 %.

Les rares abandons au profit des transports en commun se font là où l'offre de transport en commun est meilleure, et surtout lorsque le stationnement est difficile.

Deux raisons au moins expliquent cette préférence pour l'automobile :

- élévation du niveau de vie
- changement de domicile.

Il est clair que l'accès à la motorisation de nombreuses couches sociales a conduit à des transferts immédiats : l'indépendance que procure

.../

---

(1) - Tous les chiffres donnés ci-dessous sont tirés d'une étude effectuée par l'I A U R P [16] .

l'automobile, sa souplesse d'utilisation, son prix d'achat relativement bas en font un des premiers biens de notre société de consommation (1).

On considère d'autre part que 60 % des changements de moyen de transport sont dus à des changements de domicile. Or comme on l'a vu ces changements de domicile se font pour la plupart vers les banlieues, en général mal desservies par les transports en commun.

En conclusion la répartition entre voiture particulière et transport en commun résulte moins des besoins des individus que des contraintes créées par le développement de l'urbanisation et du système de transport. Le tableau I - 4 montre de façon claire la situation des transports en l'an 2000 en Région parisienne si on prolonge les tendances actuelles (2).

Dans les agglomérations de taille modérée la prépondérance de la voiture particulière est encore plus affirmée [14] . Le centre de ces villes est dense, mais de taille relativement modeste. Il est de plus entouré par une urbanisation industrielle et résidentielle de faible densité s'étendant sur une superficie très importante. Le transport individuel a trouvé dans ces villes un terrain de développement favorable. Actuellement, près de 2/3 des déplacements s'effectuent en voiture, les autres s'effectuent en deux roues (20 %) ou par les transports collectifs (15 %).

La faible densité d'emplois, l'habitat relativement dispersé font de ces villes moyennes un paradis pour le transport individuel, mais cela a pour conséquence de saturer fortement les rues du centre qui n'ont pas été conçues pour recevoir un flot aussi important de véhicules individuels.

.../

---

(1) - On doit remarquer que bien peu de conducteurs tiennent compte des frais d'amortissement, d'assurance, d'entretien auxquels l'usage de la voiture individuel conduit. Ce point est développé dans le dossier long de F. GERIN "Motivations d'achat de voiture particulière" (sous thème "les coûts pour l'usager").

(2) - Sans oublier le caractère hasardeux de ces extrapollations, celles-ci permettent cependant de rendre compte d'un futur possible ...).

On retrouve donc dans ces villes le conflit auquel se heurte inévitablement le développement du transport urbain dans les agglomérations.

I - 2-3 Les conséquences du développement du transport individuel.

Pour faire face à ce développement du transport individuel, un effort important a été fait (travaux de voirie et de parking). Cependant les experts estiment qu'on a tiré à peu près tous les bénéfices des mesures prises et qu'il faut se résoudre à de vigoureux efforts : interdiction totale du stationnement et surtout construction de nombreuses voies rapides nouvelles [18] .

Il s'agit là de mesures difficiles à prendre tant sur le plan politique que financier. Les voies rapide au centre des villes mettent en cause l'existence même de ces centres historiques (la voie expresse rive gauche en est un exemple frappant), et deviennent de plus en plus coûteuses dans les grandes agglomérations. De 120 Fr/hab/an dans les agglomérations de 350 à 400 000 habitants, les investissements atteindront 250 à 300 Fr/heb/an dans les agglomérations plusieurs fois millionnaires [19] . L'évolution des crédits consacrés aux investissements urbains au cours des derniers plans atteste de cette croissance des coûts :

85 Fr/hab/an au V° Plan
120 Fr/hab/an au VI° Plan
200 Fr/hab/an au VII° Plan

(en francs constants 1970 : agglomérations françaises, Région parisienne exclue) [12] .

En Région parisienne, on a pu avancer pour le VI° Plan le chiffre de 2 milliards de francs à dépenser chaque année pour la voirie. Et il faudrait doubler cette somme pour tenir compte de la croissance des déplacements et de la mise en souterrain de nombre de voies rapides.

Les blocages risquent aussi d'être d'ordre politique. Les atteintes à l'environnement et au cadre de vie sont de plus en plus ressenties par les populations urbaines et les pouvoirs municipaux ne sont pas indifférents à cette hostilité latente face à l'automobile : certains maires ont montré déjà leur volonté de conserver au centre de leur ville leur caractère historique en le transformant au moins partiellement en zone piétonnière.

../

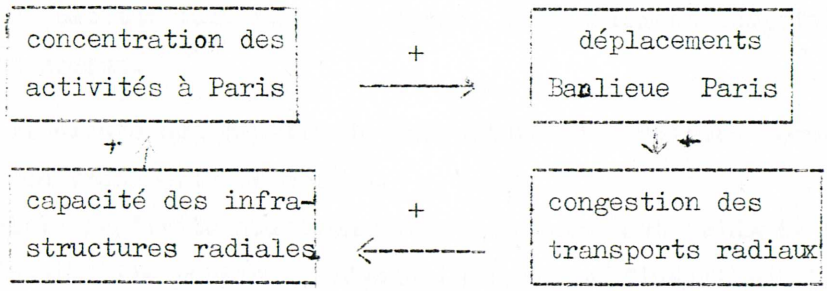
Le développement massif de l'automobile en ville se heurte donc à des blocages d'ordre financier et politique de sorte qu'on peut difficilement envisager à Paris ou en province la continuation de cette politique d'aménagement tendant à suivre, voire même susciter la croissance de l'usage de la voiture.

De nombreux auteurs ont mis en valeur les causalités circulaires auxquelles aboutit l'évolution des transports actuels :

utilisation accrue de l'automobile ⟷ structuration de l'espace urbain

utilisation accrue de l'automobile ⟷ baisse de qualité de service des transports en commun.

ou encore :



Il est certain qu'une première solution consisterait à mener la politique du pire, c'est-à-dire attendre que l'engorgement des centres dissuade certains automobilistes d'utiliser leur voiture et crée des conditions suffisantes pour que des mesures radicales concernant la voiture particulière soient prises. Une courte étude du S A E I (4) donne un exemple de ce que pourrait être cette politique du pire. On ne peut pas considérer que celle-ci présente le cadre cohérent nécessaire d'intervention des pouvoirs publics.

Lorsqu'on revient sur les raisons qui ont conduit à la situation actuelle, on distingue donc essentiellement deux types de raisons :

- les premières tenant à l'élévation générale du niveau de vie,
- les secondes à une évolution de l'urbanisme.

Il est bien évident qu'il ne s'agit pas de remettre en cause l'élévation du niveau de vie : les pouvoirs publics "se contenteront" de définir une politique d'urbanisme qui se traduise par un meilleur équilibre entre transports individuels et transports collectifs (1).

.../

(1) - Il s'agit là d'une oeuvre immense et délicate puisqu'elle peut conduire à remettre en cause les droits fonciers en ville.

Il s'agit bien en effet d'un équilibre entre transports individuels et transports collectifs et non d'un choix absolu pour l'un ou l'autre.

Les raisons en sont multiples :

- L'urbanisation évolue très lentement : il est donc nécessaire de tenir compte du parc urbain existant, fait par et pour l'automobile et il est exclu de prendre des mesures radicales immédiatement. Les Français sont d'autre part trop attachés à leur voiture pour qu'on puisse envisager de la leur supprimer (si tant est que cette mesure ait une quelconque signification !)

- Diverses enquêtes montrent que la grande majorité des Français désire une habitation en maison individuelle. Quelle que soit l'ambiguité de ces enquêtes et de ce désir, l'exemple américain laisse à penser que l'on se dirige vers un habitat suburbain peu dense, difficilement compatible avec les transports en commun.

- Il existe des captifs de la voiture particulière comme il existe des captifs des transports en commun.

Si la captivité aux transports en commun est évidente quand il s'agit d'impossibilité physique, légale (jeunes) ou financières (ménages non motorisés), la captivité à la voiture particulière est plutôt d'ordre psycho-sociologique (seulement 10 % des automobilistes utilisent la voiture dans leur travail): elle est très liée aux variables socio-économiques (revenu, CSP ...) [16] . On devrait plus parler de commodité, que de captivité. Et toutes les études s'accordent à reconnaître que la durée du trajet et les temps d'attente jouent pour la voiture particulière.

- Enfin l'automobile a des fonctions non urbaines (week-end, vacances ...) qui rendent impossible une interdiction totale de la voiture en ville (1).

S'attaquer au problème de l'automobile en ville impose donc de s'attaquer aux causes profondes et non aux seuls effets des encombrements et de la désaffectation des transports en commun. Cela implique d'abord un schéma général d'aménagement dont la cohérence interne dépend :

- de la fonction assignée aux agglomérations,
- de l'organisation, de l'espace et de la mise en oeuvre de la fonction transport [21] .

.../

---

(1) - Bien que certains espèrent un monde sans automobile....

Cela implique ensuite un ensemble complexe de mesures difficiles à prendre :

- décentralisation des activités tertiaires,
- politique foncière sur les loyers et la construction,
- promotion de pôles d'équilibre,
- restriction de stationnement dans les centres,
- promotion de nouveaux modes de transport plus modernes, mieux adaptés (en particulier systèmes bimodes ou systèmes à gros débit)
- structuration de l'espace par la combinaison de transports rapides et de rocades autoroutières.

*

* *

En conclusion, le problème de la congestion des villes par l'automobile dépasse très largement une réflexion sur la seule voiture particulière. Il serait donc caricatural de rechercher dans une innovation en matière automobile la solution de ce problème. Ce serait s'attaquer aux seuls effets. Cette innovation devra s'intégrer dans un cadre beaucoup plus global d'action à long terme qui nécessite en premier lieu une innovation d'ordre institutionnel concernant l'aménagement du territoire et la répartition entre transport individuel et transport collectif. On ne peut plus aborder le problème de congestion en terme de voiture particulière, mais en terme d'urbanisation et de système de transport.

I - 3

La récente crise pétrolière a ajouté dans le débat sur la voiture urbaine un élément qu'on avait eu tendance à oublier dans les périodes précédentes d'énergie facile : La voiture thermique actuelle consomme de plus en plus d'essence au moment où une diminution brutale des approvisionnements pétroliers rappelle aux experts du monde entier que les ressources pétrolières s'épuisent. Par delà la pénurie conjoncturelle consécutive aux décisions des producteurs de pétrole, se dessine une pénurie structurelle - C'est en effet à deux niveaux que se pose le problème pétrolier : à court terme, lorsqu'il s'agit de faire des économies sur tel ou tel produit pétrolier, à long terme lorsque les économies occidentales essaient de s'orienter vers de nouvelles sources d'énergie -

On retrouve cette même dualité à propos des décisions prises concernant l'automobile : les limitations de vitesse sur les routes et autoroutes visent à faire des économies de pétrole en 1974, alors que les décisions récentes concernant le véhicule électrique s'inscrivent dans une perspective à long terme qui permettrait de s'affranchir de la dépendance vis à vis du pétrole tout le monde semble d'accord pour reconnaître que l'énergie sera la préoccupation première des années à venir.

Ainsi il est nécessaire d'étudier les répercussions sur le véhicule urbain du problème pétrolier ; il s'agit là d'un problème global impossible à analyser sans tenir compte de toutes ses implications. C'est pourquoi dans un premier temps nous montrerons qu'on doit poser le problème du véhicule urbain dans une double perspective conjoncturelle et structurelle. Nous analyserons ensuite les perspectives d'approvisionnement de la France en produits énergétiques et en particulier en produits pétroliers. Cette analyse rapide nous permettra de dégager comment peut se poser le problème de la voiture dans le contexte énergétique -

I - 3 - 1 - Les problèmes posés par la crise pétrolière -

Dès que la menace de pénurie des produits pétroliers est apparue, les différents pays touchés ont cherché sur quels types de consommation il était possible de faire des économies la plupart ont pris très vite des mesures visant à limiter la consommation d'essence des voitures particulières (en particulier le dimanche). Il est remarquable qu'aucun

.../...

pays n'ait pensé limiter la circulation en ville c'est pourtant là que le gaspillage énergétique est le plus marqué. Les voitures "grandes routières" ont une puissance bien supérieure à celle qui est nécessaire en ville et par là consomment beaucoup plus d'énergie. Le fréquent fonctionnement "au ralenti" des moteurs à explosion dans les embouteillages fait encore monter le rapport entre énergie dissipée et énergie utile du strict point de vue fonctionnel. (1)

La croissance plus rapide du parc en zone sururbaine qu'en zone rurale ne peut qu'accroître ce gaspillage. On doit noter qu'il est difficile de mesurer la part de la consommation d'essence qui revient à la circulation urbaine : en effet l'essence achetée en ville sert aussi bien pour se rendre à son travail que pour partir à la campagne le dimanche.

Cette difficulté nous conduira à dépasser le cadre de la voiture en ville pour parler de la voiture en général.

La phase critique de la crise pétrolière étant passée le problème se pose en terme de prix : les approvisionnements coûtent plus chers ce qui met en grave danger la balance commerciale de certains pays très dépendants du pétrole. Les pouvoirs publics essaient d'agir sur deux variables : les prix et les quantités.

- les prix : l'augmentation du prix du pétrole brut a entrainé une hausse des prix des produits pétroliers, en particulier de l'essence. Cette augmentation du prix de l'essence a eu une répercussion immédiate sur la demande : la circulation automobile à PARIS aurait diminué d'un quart en Janvier, les ventes d'automobiles sur le marché français ont subi une diminution de l'ordre de 10% et les exportations d'environ 20 % (au mois de Décembre). S'agit-il d'un phénomène transitoire, puisque l'essence retrouve en fran cs constants son prix de 1960, ou au contraire le comportement des français sera-t-il modifié ? Personne ne peut le dire actuellement, les courbes d'élasticité de la demande par rapport au prix n'étant pas capables de donner des éclaircissements sur les conséquences d'une hausse si brutale. Néanmoins la demande restera probablement fonction du prix et le prix de l'essence croît avec le prix du brut (les pouvoirs ..

../..

(1) On estime que ce rapport est proche de 1 en ville .

publics nétant pas prêts semble-t-il à diminuer les ressources substantielles qu'ils tirent de la taxe sur l'essence).

Il est donc important de se demander qu'elle peut-être l'évolution des prix du brut, mais c'est se poser le problème général des énergies de substitution et du rôle que vont jouer les sociétés pétrolières.

- les quantités : A court terme on peut se demander si les économies d'essence réalisées (par le jeu des prix) ou réalisables (par un rationnement) servent à quelque chose - Il faut donc analyser les approvisionnements en brut, les structures de production et de consommation de la France.

La crise pétrolière a fait prendre conscience de la nécessité de s'orienter à long terme vers des énergies de substitution, que ce soit pour des motifs politiques d'indépendance énergétique, ou à cause de la diminution des réserves de pétrole. Quel type d'énergie sera disponible pour mouvoir l'automobile de l'an 2000 ? C'est une question fondamentale si on ne veut pas se retrouver dans une situation de crise semblable à la crise actuelle.

On voit ce que ces questions ont de fondamental et il est nécessaire de les analyser pour saisir comment se pose le problème de la voiture urbaine tant à court terme qu'à long terme.

1 - 3 - 2 - Evolution des prix du pétrole (2)

Depuis longtemps déjà les "pétroliers" avaient prévu une augmentation des prix du pétrole - celle-ci était liée à un épuisement progressif des réserves de pétrole. Elle était cependant limitée par le prix des énergies de substitution en particulier les schistes bitumineux. On prévoyait donc une augmentation progressive des prix jusqu'aux années 1980 où ceux-ci se stabiliseraient aux alentours de 8 à 10 $ le baril, prix de production estimé des schistes bitumineux.

Par suite de la crise du pétrole les prix ont atteint ou même dépassé ce seuil de 10 $ le baril. Mais surtout les rapports de force à court terme ont radicalement changés de sorte qu'il est impossible de

.../...

(2) Ce paragraphe reprend des analyses effectuées par certains experts. Il existe d'autres analyses. Celle-ci parait la plus vraisemblable.

prévoir l'évolution des prix à court terme. Cependant on peut estimer que lorsque les énergies de substitution seront au point et pourront concurrencer le pétrole, les prix de ces diverses énergies s'aligneront (3) .

Mais alors le problème du pétrole se posera plus en terme de quantité. Les experts estiment que la production de pétrole culminera dès 1990 ou en l'an 2000 pour disparaître inexorablement en 2050 ou 2075 [22]. Ainsi les ressources de l'IRAK seront épuisées dès 1980.

Même si l'on découvre d'autres réserves (ce qui est probable), on peut penser (ou espérer) que les nations développées prendront conscience du danger qu'il y a à vivre sur le stock énergétique et non sur un flux (énergie salaire ou geathermique à cycle court...). On devra donc envisager des substitutions (cf. § I-3-4) ce tableau sommaire permet de replacer dans un cadre plus vaste le problème de la consommation d'essence, à court terme et à long terme.

I - 3 - 3 - Les problèmes à court terme

L'économie d'énergie est un argument avancé depuis la crise du pétrole par les défenseurs des alternatives à l'automobile actuelle : c'est le cas en particulier pour le véhicule urbain ou le véhicule hybride. Mais le rationnement d'essence est-il justifié ?

On doit faire au préalable deux remarques :

- Depuis une vingtaine d'années l'économie française est de plus en plus dépendante de l'étranger sur le plan énergétique. Le taux de couverture en énergie est passé de 56,8 % en 1961 à 30,2 % en 1971. Cette dépendance est due en grande partie à la place prépondérante prise par le pétrole en raison d'une baisse de son prix par rapport à celui des autres sources d'énergie.

Le tableau ci-dessous permet de mesurer cette dépendance par rapport au pétrole

.../...

(3) Certains pensent que ce sont les compagnies pétrolières qui ont mené et continuent à mener le jeu pétrolier. Dans ces conditions il faut analyser le prix du pétrole en termes non seulement économiques mais aussi politiques.

Part dans la consommation énergétique(en %)

	en 1961	en 1971
Combustible et minéraux solides	53,5	22,3
Gaz	4,6	7,4
Pétrole	32,5	61,8
Electricité primaire	9,6	8

Cette structure semble très rigide à court terme : D'après M. BOITEUX (P.D.G. de l'E.D.F.) on ne peut pas espérer une diminution de la dépendance par rapport au pétrole avant 1978.

En effet la France, possède des mines descharbons, mais celles-ci sont en régression : il n'est guère possible d'augmenter sensiblement la production avant 5 ans. De plus comme nous le verrons ci-dessous le fuel s'est substitué au charbon en particulier pour le chauffage domestique et la substitution inverse est difficilement envisageable. La France possède peu de ressources de gaz, pas de ressources de pétrole et peu de réserves de schistes bitumineux. Quant à l'électricité nucléaire il faut attendre au moins 5 ans avant que l'effort consenti sur le nucléaire porte ses fruits.

- Il est peu probable que l'on assiste à un renversement des approvisionnements pétroliers. Dans les années à venir le pétrole importé proviendra du Moyen-Orient, d'Algérie et de la Mer du Nord. (les compagnies pétrolières françaises ayant peu de concession en dehors de ces zônes). La France restera donc approvisionnée en pétrole riche en fractions légères.

Pour se faire une idée de l'efficacité d'économies d'essence, on doit étudier successivement les structures de production et de consommation des produits pétroliers.

a) Structure de production

Rappelons que le raffinage du brut consiste en une première opération de distillation physique qui donne des pourcentages fixes de produits pétroliers. Ces pourcentages ne dépendent que de la nature du brut. Les approvisionnements français étant riches en parties légères, la distillation donne une proportion importante de produits légers (essences, gaz).

.../...

L'essence obtenue est ensuite traitée (reformage, isonérisation) afin de lui donner les qualités nécessaires (indice d'octane en particulier).

Les produits lourds sont soit utilisés directement (huiles, bitumes) soit craqués (essences lourdes, gaz-oil, fuel-oil, naphta).

En schématisant il y a deux types de craquages

- craquage catalytique qui donne des produits légers (essences) et lourds (cires, paraffines)
- craquage à la vapeur qui permet d'obtenir les bases chimiques (4)

Plus de 80 % de l'essence consommée est produite directement au cours de la 1ère distillation (contrairement aux E U où plus de 50 % de l'essence est obtenue par craquage). L'essence se présente donc comme un "produit fatal" dans la structure de production.

On ne peut donc pas dire que la production d'essence se fait au détriment des produits lourds ou des bases chimiques. Une diminution de la consommation d'essence ne se traduirait pas par une augmentation automatique de la production d'autres produits pétroliers.

Cette conclusion va se trouver confirmée par l'analyse de la structure de consommation.

b) Structure de consommation

Depuis une dizaine d'années le marché français des produits pétroliers se traduit par une croissance forte de la consommation (de 10 à 15 % par an) et par une évolution de la structure de consommation au profit des produits lourds (fuel-oil en particulier).

La part respective des différents produits ou groupes de produit dans l'ensemble du marché ne cesse d'évoluer au profit des fuel-oils

.../...

---

(4) En fait il y a un certain arbitraire dans la dénomination des produits puisque chacun est défini par une plage de température de distillation. Ces plages se chevauchant il est possible d'obtenir une substitution relative d'un produit à un autre.
Le craquage à la vapeur donne aussi de l'essence, mais en plus faible quantité que le craquage catalytique (25 % contre 85 %).

fluides et lourds comme le montre le tableau ci-dessous qui compare la situation à trois époques différentes (5)

	1938	1961	1971
	%	%	%
Essences	52,7	23,7	15,0
Distillats moyens (gaz-oils et fuel-oils fluides)	22,5	36,4	43,2
Fuel-oils lourds	8,6	22,9	28,1
Gaz de pétrole liquéfiés	0,8	3,8	2,5
Bitumes	6,0	5,3	3,0
Autres produits	9,4	7,9	8,2

La consommation ventilée par grands secteurs d'utilisation présente, à dix ans d'intervalle la structure suivante :

	1961	1971
	%	%
Transport	41,7	26,3
Secteur domestique et tertiaire	15,1	25,9
Agriculture	4,5	2,6
Industrie et divers	38,7	44,7

Si on prend comme base 100 les consommations de chaque produit en 1959 on en arrive en 1971 aux indices suivants :

- Essence 264
- Gas oil 328
- Fuel oil domestique 900
- Fuel oils lourds 478
- bases pétrochimiques 1146
- Total 428

.../...

(5) Les statistiques de ce paragraphe sont tirées du bulletin professionnel de l'industrie pétrolière de 1971 [24]

Ainsi il apparait nettement que c'est la consommation de parties lourdes qui est déterminante.

Or il est peu probable qu'à court terme on assiste à une diminution sensible de la consommation de ces produits. En effet le fuel domestique est utilisé essentiellement pour le chauffage des locaux (60,6 %) et dans l'industrie (34,6 %). Dans ces deux domaines il est difficile et long de changer de technologie : en effet si toutes les habitations construites à partir de 74 étaient à chauffage électrique, celles-ci ne représenteraient que 20 à 30 % du parc d'habitation en l'an 2000.

Il en est de même du fuel lourd qui est utilisé essentiellement dans les centrales (32,3 %) et dans l'industrie (60,5 %).

La demande de partie lourde risque donc de continuer à être forte. Par contre l'augmentation du prix de l'essence qui a eu un effet dissuasif du moins transitoirement, les mesures de limitation de vitesse, et surtout le ralentissement de la croissance du parc automobile dans les 5 ans à venir, vont faire baisser la demande d'essence.

On sera obliger d'importer du brut pour le chauffage domestique et non pour les automobiles.

Pour être complet il faut cependant se demander s'il serait possible d'utiliser ailleurs l'essence qui comme on l'a vu se présente comme un produit fatal : n'y aurait-il pas d'utilisations plus "intelligentes" de l'essence que de s'en servir comme carburant auto ? Dans l'état actuel des techniques on ne peut guère envisager que trois possibilités qui toutes posent des problèmes importants :

* gazeifier l'essence pour alimenter les centrales électriques "de pointe " comme G D F l'a déjà fait. Le coût de l'opération semble cependant élevé -

* extraire de l'essence les carbures aromatiques pour alimenter l'industrie chimique. Mais ne va t-on pas assister à un tassement de la pétrochimie étant donné l'augmentation importante des prix des bases chimiques ? -

* brûler l'essence ailleurs. Mais cela pose des problèmes

.../...

techonologiques : ses propriétés physiques (viscosité, point d'ébullition) rendant difficile et dangereuse son utilisation dans les installations de chauffage.

Il ressort clairement qu'une économie forcée d'essence ne permettrait pas de résoudre à court terme le problème pétrolier qui se pose au niveau des produits lourds. En conséquence les arguments d'économie avancés par les défenseurs de certaines alternatives à la voiture particulière en ville ont peu de poids à court terme. L'analyse du problème énergétique à long terme nous permettra cependant de poser le problème en terme de source d'énergie différente.

I - 3 - 4 - Les problèmes à long terme

- Comme on la vu sommairement au § I-3-2, la crise pétrolière a fait prendre conscience de l'épuisement prochain des ressources en pétrole. Si le risque de pénurie absolue n'est pas pour demain, il y aura pénurie relative (la production ne pouvant suivre une croissance des besoins de 10 à 15 % par an).

- Au paragraphe précédent on a constaté que la France ne dispose pas à court terme d'énergie de substitution -

- A long terme la France n'a pas beaucoup de possibilités : elle posséde peu ou pas de gaz et de schistes bitumineux. L'énergie hydraulique n'est plus un recours efficace compte tenu de la raréfaction des sites économiquement équipables. Les réserves de charbon en France n'ont rien à voir en qualité et quantité avec ce qu'on trouve en Allemagne ou aux U S A. Les énergies "écologiques" d'origine géothermiques ou solaires ne semblent envisagcables qu'à très long terme et il ne s'agira sans doute que d'énergies d'appoint local .

En admettant l'hypothèse fondamentale, acceptée implicitement par la collectivité, de la poursuite de l'explosion des besoins énergétiques et du maintien du modèle actuel de croissance et de développement, la seule solution pour la France est la conversion au nucléaire et la décision des Pouvoirs Publics à la Mi-Mars de construire 13 centrales nucléaires atteste que le tournant "tout nucléaire" a déjà été pris -

.../...

Dans ces conditions la part de l'énergie nucléaire dans le bilan énergétique qui s'élèvera à 2 % en 1975 passerait à 5 % en 1980 - 9 - 16 % en 1985 - et 30 - 40 % en l'an 2000. La part de l'électricité, quant à elle, qui était de 20,9 % en 1970, s'éléverait à 24 % en 1975, 26 % en 1980, 27 - 32 % en 1985 et 38 - 48 % en l'an 2000 [25]. Le tableau I - 5 retrace l'évolution des bilans énergétiques français - Il est probable que par suite de la crise du pétrole, le scénario 2 est le plus vraisemblable.

On remarquera que grâce à un effort considérable, l'introduction du nucléaire commence par réduire, puis vient même annuler, peu après 1980, la croissance absolue des fuels dans l'alimentation des centrales thermiques; par contre, il ne peut que contenir la croissance des hydrocarbures dans le bilan énergétique français (75-80% en 1985). La tendance ne s'inverserait en valeur relative qu'entre 1985 et 2000 (55-65 % en 2000), et en valeur absolue au delà de 2000. Cette inertie ne saurait étonner en raison des constantes de temps propres au secteur énergétique au niveau de la production et surtout de la consommation!

On voit donc que la voiture thermique a encore de beaux jours et que le problème ne se pose pas essentiellement en termes d'économie d'essence! Il du moins on admet que le parc automobile français est actuellement proche de la saturation (cf § I-4) -

Le problème de l'automobile consiste donc plutôt à s'adapter au tournant vers le nucléaire et l'électricité c'est-à-dire mettre au point un nouveau mode de propulsion conforme à cette évolution énergétique!

Certes la propulsion électrique à accumulateur est une solution. Mais ce n'est pas la seule! Le fonctionnement optimum d'une centrale nucléaire exige un fonctionnement en régime continu (c a d : en base)! De nombreux experts envisagent déjà d'adjoindre aux centrales nucléaires des unités de production d'hydrogène ou de méthanol qui fonctionneraient la nuit. Ces combustibles joueraient le rôle que joue actuellement le pétrole. On peut donc aussi envisager une propulsion électrique à pile à combustible, (hydrogène/air ou méthanol/air) ou même un moteur à hydrogène dont des prototypes ont déjà été construit aux Etats-Unis et en France.

.../...

PRÉVISIONS Millions de tec	FRANCE 1 hydrocarbures moyens nucléaire moyen				FRANCE 2A hydrocarbures faibles nucléaire fort			
	1970	1985	2000	2015	1970	1985	2000	2015
Minéraux solides	57,5	25	10	5	57,5	25	10	5
Pétrole	131,0	300	360	420	131	290	315	290
Gaz naturel	14,2	45	50	55	14,2	45	40	35
Hydraulique	18,9	20	20	20	18,9	20	20	20
Nucléaire	1,7	60	260	500	1,7	70	315	650
Consommation nationale d'énergie	223,2	450	700	1000	223,3	450	700	1000
dont Électricité	46,7	130	333	667	46,7	140	380	750
Parts en %								
Minéraux solides	26	6	1	0,5	26	6	1	0,5
Pétrole	59	67	51	42	59	64	45	29
Gaz naturel	6	10	7	5,5	6	10	6	3,5
Hydraulique	8	4	3	2	8	4	3	2
Nucléaire	1	13	37	50	1	16	45	65
Consommation nationale d'énergie	100	100	100	100	100	100	100	100
dont Électricité	21	29	48	67	21	31	54	75
Taux de croissance en %	1970/1985	1985/2000	2000/2015		1970/1985	1985/2000	2000/2015	
Minéraux solides	- 5,4	- 5,9	- 4,5		- 5,4	- 5,9	- 4,5	
Pétrole	5,7	1,5	1		5,4	0,6	- 0,6	
Gaz naturel	8	0,7	0,6		8	- 0,8	- 1	
Hydraulique	0,4	—	—		0,4	—	—	
Nucléaire	27	10	4,5		28	11	5	
Consommation nationale d'énergie	4,8	3	2,5		4,8	3	2,5	
dont Électricité	7	6,5	4,7		7,6	6,9	4,7	

TABLEAU I - 5 - Bilans énergétiques français (25)

On développera plus amplement ce point au § III - 1 - 1 .

Si le problème de l'automobile ne se pose pas essentiellement en terme d'économie, il est clair que des efforts importants seront faits pour améliorer les rendements. La crise pétrolière a en effet fait prendre conscience des gaspillages énergétiques énormes dans les pays développés ; et l'automobile est sans doute une des utilisations où l'énergie est la plus gaspillée; en ville le rendement énergétique global (du pétrole brut à la roue) est de 7,5 % pour une voiture en ville (cf [18] et § III-1-1-).

En conclusion s'il n'est pas nécessaire d'économiser l'essence, il est nécessaire cependant de mettre au point un mode de propulsion compatible avec le " tournant électrique et nucléaire " et gaspillant moins d'énergie que le moteur actuel. Le problème énergétique risque donc d'être un déterminant majeur dans l'évolution de l'automobile et les objectifs d'adaptation de la motorisation et de lutte contre les gaspillages sont donc fondamentaux.

I - 4 - L'INDUSTRIE AUTOMOBILE

Les paragraphes précédents nous ont permis de saisir les problèmes posés par l'utilisation de la voiture particulière en ville. On a vu la nécessité de repenser la répartition entre transports individuels et transports collectifs. Cette remise en cause du rôle de la voiture ne peut s'apprécier indépendamment des conséquences prévisibles sur l'industrie automobile secteur clé de l'économie française. De plus, nous avons vu qu'il est nécessaire de développer un nouveau mode de propulsion qui se substituerait à long terme au moteur thermique que l'on connaît. Il est donc naturel de se poser la question de l'aptitude des constructeurs automobiles à développer une innovation de ce type.

On est donc conduit à analyser les problèmes que rencontrera l'industrie automobile dans les années à venir et leur aptitude à développer une alternative à la voiture actuelle.

L'analyse de la place de l'industrie automobile dans l'économie française dépasse largement le cadre de cette étude, bien qu'elle soit indispensable pour apprécier le caractère réaliste d'une politique plus ou moins favorable à l'automobile. On se contentera de rappeler que l'automobile fait vivre directement ou indirectement 10 % de la population française (1) et que les exportations françaises (5). A fortiori il n'est pas question de se demander s'il est souhaitable que l'automobile reste le moteur de la croissance française ou encore quelle industrie pourra remplir ce rôle.

I - 4 - 1 Les difficultés de l'automobile.

L'automobile est un produit qui ne laisse pas indifférent : on est pour ou contre et ces opinions se traduisent inévitablement dans les idées qu'on a de l'avenir de l'industrie automobile. De plus les incertitudes économiques actuelles pèsent sans doute plus qu'ailleurs sur cette industrie, de sorte qu'il est bien difficile de prévoir son évolution. L'avenir de l'automobile est donc un sujet délicat.

Légère dépression ou crise ? Les experts eux-mêmes se disent dans l'incapacité de le prévoir. On peut cependant faire l'hypothèse que par delà la crise, on retrouvera les tendances à long terme sur lesquelles un consensus s'était fait.

../..

On rappellera donc dans un premier temps les perspectives à long terme de l'automobile, puis on analysera comment la crise pétrolière peut se manifester dans ce secteur et enfin on verra comment les constructeurs envisagent de sortir de la dépression présente.

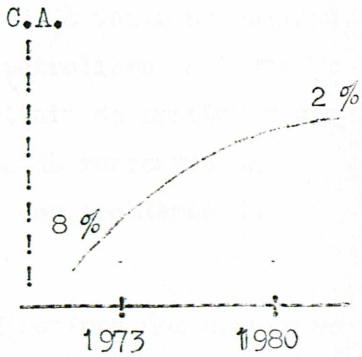
a) les perspectives à long terme de l'automobile.

Le passé recent a été une période particulièrement faste et pratiquement exceptionnelle, la croissance suivant la progression du pouvoir d'achat. Depuis 1958 l'automobile a bénéficié de la conjonction de plusieurs facteurs : une ouverture du marché permettant économie d'échelle et automatisation, un prix de carburant stable (et même décroissant en francs constants) d'une politique de transport favorable, d'où un prix de construction et un prix d'usage faible et attirant.

Pour la période 74/75 on prévoyait un ralentissement de la croissance dû à une surchauffe et aux restrictions de crédit consécutives aux mesures de lutte contre l'inflation.

A plus long terme on envisageait aussi un ralentissement de la croissance dû à une saturation progressive du marché (1) et à la disparition des facteurs structurels favorisant l'automobile. On envisageait déjà une augmentation du prix du carburant, mais surtout certains facteurs jouaient dans le sens d'une augmentation des prix. Les gains à attendre de l'économie d'échelle seront de plus en plus faibles. La lutte contre les nuisances et les normes de sécurité conduiront à des augmentations de coût sensibles. Enfin les récentes grèves d'O.S. laissent présager une remise en cause du travail à la chaine et de l'automatisation qui ont fait la prospérité de l'automobile (2).

Ceci se traduirait par un ralentissement de la croissance et on prévoyait qu'aux alentours de 1980, le taux de croissance de l'industrie automobile ne serait plus que de 2 % (cf graphique ci-contre) et qu'on assisterait à un marché de renouvellement et d'exportation pour l'essentiel.



(1) Bien que certains remarquent que les prévisions de saturation ont toujours été balayés et que les besoins de motorisation ne sont pas encore tous satisfaits.

(2) Ainsi la tendance constatée depuis 1968 d'une augmentation du prix réel de la voiture moyenne française ne pourra que se confirmer. Depuis 1950 ce prix n'avait pas cessé de diminuer (cf. (13))

Ainsi c'est dans un environnement peu favorable que la crise pétrolière s'est produite.

b) Répercussions de la crise pétrolière

Les répercussions de la crise pétrolière ont été immédiates tant à la production qu'à l'exportation.

Production : 332.900 en Octobre 305.000 en Novembre 232.000 en D

Exportations : 175.600 en Octobre 159.000 en Novembre 116.000 "

Cette réaction brutale est dûe à la menace de pénurie du début de la crise. La menace disparue, personne n'est en mesure de déterminer les conséquences du bond en avant des prix pétroliers. Si les experts ont établi par expérience qu'un relèvement de 10 % du prix de l'essence entraînerait une diminution de 2 à 3 % du nombre de kilomètres parcourus annuellement par l'automobiliste moyen, en revanche ils sont impuissants à calculer même approximativement les effets d'une augmentation de 29,6 % ;

La baisse de la demande est-elle un phénomène transitoire et va-t-on retrouver dans 2 à 3 ans les prévisions faites avant la crise ? Ou bien doit-on s'attendre à une diminution sensible du parc automobile par rapport aux prévisions (15 à 18 millions de véhicules au lieu des 19 millions en 1980.) ?

Ce qui reste certain c'est que la crise se traduit par des difficultés financières. Elle se traduit aussi par un ajustement de la production vers les petits modèles les plus demandés. Ainsi il est probable que les voitures que sortiront les constructeurs seront plutot des petites cylindrées. On risque aussi d'assister à un tassement de l'innovation : moins de nouveaux modèles, possibilité de voitures économiques bon marché.

Enfin, il risque de se poser dans les cinq années à venir un délicat problème de transition. La cassure brutale de la crise pétrolière va transformer complètement les données. Avant la croissance permettait de pratiquer une politique facile de fuite en avant. Maintenant la marche de manoeuvre est beaucoup plus faible et les constructeurs s'attendent à des problèmes de personnel importants.

Devant cette situation quels sont les moyens d'actions des constructeurs.

c) Les possibilités de s'en sortir.

La première solution consiste à se diversifier. C'est ce qu'ont fait déjà plusieurs constructeurs qui à côté de leur activité principale ont racheté des entreprises ou se sont développés dans d'autres domaines. Le vrai problème n'est pas d'acheter des entreprises, mais d'utiliser les usines d'automobiles à autre chose .

../..

Cette possibilité est peu vraisemblable étantdonné le caractère hautement spécialisé de cette industrie qui a développé des techniques propres (machines-transfert...) (1) Une diversification totale est peu probable étant donné la masse des investissements effectués (500 millions à 2 milliards pour une chaine de montage).

Ainsi la diversification ne pourrait toucher que quelques départements comme ceux de mécaniques.

La diversification de la gamme (deuxième possibilité) est déjà entamée, mais elle ne permettra pas un renversement de tendance.

Les constructeurs ne semblent pas envisager sérieusement une diversification de production consécutive à une innovation importante (véhicule électrique, V.S.U...) Cela rejoint le problème général de l'innovation que nous traiterons ci-dessous.

Reste alors la possibilité de se tourner encore plus vers l'exportation en particulier vers les pays en voie de développement peu touchés par la crise pétrolière et où les besoins sont importants (le Brésil par exemple avec ses 100 millions d'habitants). Mais la concurrence risque d'être sévère et n'est-il pas dangereux de devenir de plus en plus dépendant de l'exportation ?

Ainsi l'industrie automobile apparait un peu comme un géant aux pieds d'argile. Dans quelle mesure est-elle alors capable de développer une alternative à la voiture particulière en ville ?

I - 4-2 Possibilité de l'innovation dans l'industrie automobile (2)

On peut commencer par remarquer que depuis une vingtaine d'années les innovations en matière automobile ont été en général le fait d'inventeurs indépendants ou d'entreprises extérieures à l'automobile (c'est aussi le cas dans le transport ferroviaire).

Dans ces conditions à ce jour les groupes d'acteurs les plus engagés dans ces recherches sont extérieurs à l'automobile: ce sont les distributeurs d'énergie comme l'E.D.F., les pétroliers avec les développements des piles à combustibles, à l'I.F.P., certains inventeurs ou petits constructeurs tels BERTIN ou TEILHOL, certaines entreprises de construction électrique (C.G.E. en France, GE50 et Union Carbide aux USA , VARTA en R.F.A etc...) et enfin l'Etat dont le rôle est essentiellement règlementaire (normes de nuisances) et incitatif (financièrement). Les constructeurs eux n'ont pris

---

(1) " Si en 1914 il était possible de construire des obus à la place de voitures, ce n'est plus possible actuellement " nous a déclaré un constructeur.

(2) Ce paragraphe reprend les développements et les conclusions d'une étude effectuée pour le compte de l'I.R.T. par l'Institut de prospective et de politique de la Science : "l'innovation dans la construction des matériels de transport terrestre" (13)

jusqu'à présent qu'une part relativement modeste aux recherches et développemen ts sur le véhicule électrique, se contentant le plus souvent de fournir des véhicules de série pour tester les générateurs (1).

On tentera d'expliquer cette absence relative des constructeurs en analysant d'abord l'innovation qui se présente en général comme une activité risquée, puis nous étudierons les efforts de recherche des constructeurs. Nous verrons enfin les freins structurels à l'innovation propres à l'automobile.

a) L'innovation une activité risquée :

On doit d'abord distinguer l'innovation de perfectionnement et innovation de rupture. La première désigne une modification qui concourt à une plus grande cohérence technique du système, soit un accroissement du service rendu (maniabilité, confort ...) sans altérer profondément la conception du véhicule et son mode de propulsion. L'innovation de rupture par contre remet en question l'ensemble du système (2).

On verra que la stratégie des constructeurs les conduit à privilégier les premières, ce qui les amène à sacrifier les secondes.

Par innovation on entendra les secondes, celles dont on a vu la nécessité aux chapitres I-1 et I-3 :

Ce type d'innovation est une activité risquée tant sur le plan technique qu'économique.

1) Le risque technique : L'histoire des techniques abonde d'exemples de recherches qui n'ont pas abouti. On peut estimer que moins de 5 % des recherches entreprises aboutissent à un résultat.(1 brevet sur 5 ne débouche sur aucune application).

2) Le risque économique se situe à 2 niveaux : incertitude de coûts de production, incertitude des débouchés.

L'exemple du Concorde a montré clairement que le coût de la mise au point de prototype peut dépasser de 5 à 10 fois ce qui est évalué. Le risque existe à toutes les étapes du processus. De plus les dépenses à engager croissent depuis la phase recherche jusqu'à la phase industrialisation dans le rapport de 1 à 100 . Ces risques et ces dépenses sont particulièreme nt importantes lorsqu'il s'agit d'un produit très intégré et complexe comme l'automobile qui est le produit de 3/4 de siècle de perfectionnement (3)

---

(1) Certains signes laissent penser cependant que cette attitude était en train d'évoluer.

(2) cf. [13] . La frontière est souvent délicate : si l'injection électronique représente sans conteste une innovation de perfectionnement et la propulsion électrique une innovation de rupture, où doit-on placer le moteur rotatif ?

(3) La lecture du rapport de synthèse sur l'expérimentation des véhicules électriques de l'EDF (Janv.1974) [26] est très intéressante à ce sujet . Elle montre la difficulté d'atteindre à une fiabilité satisfaisante d'un système complexe même quand chaque composant de ce système (batterie, moteur électrique...) est bien connu et fiable.

Ces innovations impliquent en général des expérimentations en champ ouvert particulièrement coûteuses .(1)

Même lorsque l'innovation est techniquement au point elle n'est pas forcément acceptée par le marché. Tout lancement prématuré peut conduire à un échec commercial et à un enterrement quasi définitif de l'innovation. Si celle-ci vient trop tard la firme risque de se heurter aux réactions des concurrents qui auront lancé le même produit ou un produit semblable.

Dans ces conditions les firmes ont tendance à se limiter à des innovations de perfectionnement où le risque technique et économique est minime.

Il est vraisemblable que dans les années à venir les constructeurs seront encore moins enclins à courir le risque de l'innovation étant donné les incertitudes économiques et financières qui pèsent sur eux (comme on l'a vu au § I-4-1). L'expérience a en effet montré que l'innovation technologique ne donne aux entreprises ni une garantie de croissance, ni une g arantie de rentabilité et d'indépendance financière.

b) Les efforts de recherche des constructeurs.

On peut considérer que les dépenses de R.D. sont un bon indicateur de l'effort d'innovation d'une branche industrielle. (En notant qu'il s'agit d'un indicateur de moyens et non de résultats et qu'il n'y a pas de relations définies entre ceux-ci et ceux-là.)

Plusieurs ratios sont envisageables et leurs significations sont différentes :

- le rapport des dépenses totales de R D au chiffre d'affaire donne une indication sur l'évolution de l'effort dans le temps d'une firme, ou d'une branche, mais permet difficilement les comparaisons.
- le rapport des dépenses de R D à la valeur ajoutée est plus significatif.
- les dépenses de R D financées sur fonds propres mesurent l'effort de la firme ou de la branche.

Les tableaux I-6-I-7-I-8 donnent l'évolution de ces divers ratios pour l'industrie automobile et d'autres branches.

---

(1) cf. Allocution de M. FRYBOURG aux journées organisées par la R.G.E. sur le véhicule électrique. (26)

Tableau I-6- Dépenses totales de R.D. (%) / Chiffre d'affaires (H.T.)

Année	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
Automobiles et cycles			1.7	1.9	2.3	2.5	2.4	2.6	2.6
Construction mécanique	2.0	2.6	2.5	3.0	3.2	3.0	3.4	2.3	4.0
Construction électrique et télécommunications	3.2	3.8	3.8	3.3	5.5	5.4	4.6	4.0	4.5
Aérospatiale	20.1	19.1	17.7	24.6	27.4	32.1	34.5	30.0	29.8
Industrie pharmaceutique		7.0	6.6	6.6	8.25	6.8	7.2	7.3	8.8
Ensemble des industries	3.4	2.7	3.2	3.8	3.5	3.6	3.4	3.2	3.5

Tableau I-7 - Financement propre / Chiffre d'affaires (%)

Année	1964	1965	1966	1967	1968	1969 (1)	1970
Construction automobile	1.7	1.9	2.2	2.41	2.33	1.9	2.52
Construction mécanique			1.5	1.59	2.1	1.5	2.75
Construction électrique et télécommunications			3.6	3.56	3.9	3.0	3.17
Aérospatiale			3.4	3.04	5.4	2.0	2.19
Industrie pharmaceutique			7.5	6.39	7.1	6.9	7.47
Ensemble des industries			1.9	1.89	1.76	1.9	2.1

Tableau I-8 Financement propre / Valeur ajoutée de la branche (2) (%)

Année	1966	1967	1968	1969	1970
Construction automobile	4.18	4.37	4.56	3.66	5.12
Construction mécanique Mécanique de précision	0.82	0.91	1.01	0.91	1.16
Industrie aérospatiale	7.5	6.4	8.8	2.9	4.4
Industrie pharmaceutique	12.2	11.5	12.1	13.5	13.7
Ensemble des industries	0.69	0.72	0.62	0.65	0.74

On voit que suivant le critère l'effort de recherche de la construction automobile est nettement inférieur à la moyenne des industries françaises (1). Cette impression est sensiblement corrigée si on considère l'effort propre de la branche (financé sur fonds propres des firmes). Lorsqu'au contraire on prend comme indicateur le deuxième ratio les conclusions sont inversées. On constate cependant que depuis 10 ans ces ratios n'ont cessé de croître.

D'autre part, la part de l'automobile dans les dépenses globales de R D est passée de 3,93 % en 1960 à 9,9 % en I970.

Tous les ratios pour l'automobile ont tendance à progresser alors qu'on assiste à une stagnation depuis I967 pour les autres industries.

Cette croissance semble dûe en partie aux effets de la lutte contre les nuisances et pour la sécurité.

La discrétion des constructeurs ne permet pas de se faire une idée précise des orientations des efforts de R.D. On peut cependant estimer que les études d'amélioration de perfectionnement et de renouvellement des modèles classiques représentent 90 % des dépenses, les recherches sur les techniques et modèles futurs n'absorbant que IO % de ces dépenses.

On peut donc avancer l'hypothèse que l'automobile en est arrivée à un niveau de cohérence interne qui en fait un produit très élaboré pour lequel les modifications même mineures ont un coût de plus en plus élevé. L'automobile a mis plus d'un demi-siècle pour en arriver à la sophistication et à la fiabilité actuelle . Dans ces conditions, l'augmentation des dépenses de R D ne va pas nécessairement dans un sens favorable à l'innovation.

c) Les freins structurels à l'innovation.

Les conditions actuelles du marché automobile permettent de comprendre les freins à une innovation de rupture.

Il s'agit d'un marché de consommation de masse qui donne donc un rôle prépondérant aux fonctions commerciales et marketing. Il s'agit aussi d'un marché où la demande est très sensible aux prix ce qui implique de la part des constructeurs une prudence accrue face à l'inertie des consommateurs. L'existence des réseaux d'entretien et des services après vente introduit une inertie technique dont les constructeurs doivent tenir compte. Enfin le marché des voitures neuves est étroitement lié au marché de l'occasion et les constructeurs n'ont pas intérêt à faire baisser les prix d'occasion par des innovations trop marquées, parce que la stabilité de ce marché est un excellent argument de vente.

---

(1) En fait l'intensité d'effort de R D est très variable suivant les constructeurs puisqu'en 1970 le taux va de 1,9 pour RENAULT à 4,2 pour CITROEN .

Toutes ces caractéristiques orientent donc la production vers des innovations de perfectionnement que le client est spontanément disposé à payer, c'est à dire vers "la moindre innovation" et vers la recherche systématique des coûts de production (13)

Mais la stratégie d'innovation des firmes est commandée dans une large mesure par deux traits caractéristiques de l'industrie automobile :la masse des investissements fixes et la masse de main d'oeuvre employée et sa concentration.

- la masse des investissements fixes : l'outillage nécessaire à la fabrication en série d'un modèle peut varier de 500 millions à 3 milliards de francs. Bien sur les investissements sont d'autant plus faibles que les modifications par rapport à un précédent modèle sont minimes: d'où de la part des constructeurs une stratégie d'innovation prudente qui consiste à ne différencier les modèles que par des modifications compatibles avec la plus grande partie des équipements en fonctions.

D'autre part, l'industrie automobile est parmi les industries de produits de consommation finale celle qui met en oeuvre des masses de capital aussi considérable et ayant cru à une telle vitesse (taux de croissance de 450 % du capital fixe entre 50 et 70 alors qu'il n'est que de 250 % pour l'ensemble des branches de l'industrie française). Cette masse d'investissements constitue un obstacle majeur à des innovations techniques importantes qui conduiraient à introduire des modifications importantes dans les équipements.

- une industrie de main d'oeuvre : elle se caractérise par l'importance numérique de la main d'oeuvre, son extrême concentration et son organisation poussée à l'extrême (1) .Cela aboutit à un système productif très efficace , mais très rigide et par conséquent vulnérable à une défaillance en un point quelconque du système. Mais ce système conduit à un travail parcellaire répétitif monotone, le travail d'OS, dont la remise en cause a donné lieu à des grèves d'OS des usines PEUGEOT et RENAULT de Mars et Avril 1973, bloquent une grande partie de la production. Cette remise en cause s'exprime aussi par un absentéisme de plus en plus important (2) une augmentation du "turn-over", une raréfaction de la main d'oeuvre sous qualifiée gènant de plus en plus les constructeurs.

---

(1) Chez RENAULT le bureau des méthodes emploie 4500 personnes alors que les services de RD en comptent 2700.

(2) Aux Etats-Unis l'absentéisme atteint 15 % les lundi et vendredi. Chez FIAT à Turin il varie de 15 à 17 % selon les jours.

../..

La main d'oeuvre étant très concentrée, les problèmes sociaux étant donc plus explosifs, on peut penser que ceux-ci risquent d'être un frein supplémentaire si ce n'est le plus important, à l'innovation. Le risque inhérent à toute innovation de rupture fait apparaître immédiatement le spectre du chômage.

" Cet ensemble de caractéristiques (industrie de consommation, industrie capitalistique, industrie de main d'oeuvre) donne naturellement une dimension considérable aux risques, économiques et sociaux, que comporte toute innovation technique: sur le plan technologique l'automobile cumule les effets de rigidité que donnent la masse des investissements fixes en fonction, l'inertie du consommateur face à tout produit nouveau et la crainte de troubles sociaux consécutifs à des modifications trop brusques dans les conditions de travail ou la situation de l'emploi.

Le principal moyen (sinon le seul) de diminuer de tels risques est de choisir une évolution technologique qui procède par touches successives (par variation à la marge) dans la direction principale de l'évolution des habitudes de consommation et il devient dès lors difficile, sinon impossible d'infléchir profondément cette direction (13)

Ce paragraphe pose donc plus de problèmes qu'il n'en résoud. En effet l'industrie automobile qui a priori était la mieux placée pour développer et lancer une innovation présentant une solution aux problèmes posés par la voiture semble éprouver des difficultés importantes qui diminuent encore sans doute les chances de les voir développer un produit nouveau.

Est-il alors nécessaire d'avoir recours à un financement public si l'on veut qu'apparaisse un matériel de transport réellement nouveau ? Ne peut-on pas penser plutôt que dans ces conditions la solution des problèmes que posent les transports urbains, la voiture particulière notamment ne relève tout autant sinon plus d'innovations institutionnelles que d'innovations technologiques ?

2ème Partie

Les options technologiques

La 1ère partie de cette étude nous a permis de préciser les problèmes posés par l'usage de la voiture particulière en ville. Nous avons vu qu'il est nécessaire de se fixer deux objectifs principaux si l'on veut résoudre des problèmes il s'agit d'abord d'une innovation institutionnelle puisqu'il s'agit de définir le rôle de la voiture particulière dans le système de transport national, mais il s'agit aussi de promouvoir une innovation technologique visant à développer une motorisation s'adaptant à l'évolution des approvisionnements énergétiques de la France et éventuellement moins polluante.

On peut faire dès maintenant deux remarques :

- les objectifs définis ci-dessus s'appliquent à la voiture particulière aussi bien dans ses fonctions urbaines, qu'interurbaines. Si les problèmes urbains sont plus aigus, leur solution passe par une redéfinition technique et fonctionnelle globale de la voiture.

- les deux objectifs sont à très long terme : il est clair qu'une technologie est longue à mettre en place et il est tout aussi évident que l'inertie en matière d'urbanisme ou de comportement face à l'automobile est grande, de même que les SDAU à horizon 2000 ou 2015 orientent plus ou moins le développement urbain en tenant compte de données non marchandes (telles que le cadre de vie) [28] ,de même un agencement des deux objectifs retenus permettrait d'orienter utilement l'évolution de l'automobile en révélant des besoins qui ne peuvent s'exprimer par le marché (environnement, égalité sociale ...).

Si les objectifs sont lointains, il n'en reste pas moins que les délais de mise en oeuvre d'une politique de transport ou de lancement d'une innovation impliquent que les décisions de fond soient prises rapidement.

Dans cette deuxième partie, nous analyserons les moyens qu'il est possible de mettre en oeuvre pour atteindre les objectifs ci-dessus.

Nous nous limiterons aux innovations technologiques de motorisation en ne perdant pas de vue que la mise en oeuvre de celles-ci doit être complétée par une innovation institutionnelle.

Mais avant d'aborder plus à fond les techniques nouvelles, il est nécessaire d'étudier le véhicule urbain dont nous sommes partis pour cette étude et qui est présenté aussi par les défenseurs comme une alternative à la voiture particulière en ville.

II - 1. Une solution à rejeter - Le Véhicule Urbain (1).

L'idée du véhicule urbain est ancienne. Plusieurs tentatives ont été faites pour lancer un véhicule, petit, peu rapide, à faible capacité : c'était l'Isetta ou la Vespa 400. Mais ces véhicules n'ont eu qu'un succès d'estime et ont rapidement disparu du marché.

L'idée de V.U. a réapparu avec le véhicule électrique qui, de par ses performances, semblait mal adapté à un usage autre qu'urbain [30]. Le succès dans certains milieux de l'idée de véhicule adapté à la ville a donné naissance alors au véhicule urbain qui, avant même d'exister, a déjà son sigle V.S.U. ou V.P.U.

Mais de quoi s'agit-il ? Ses performances le présentent comme un véhicule plus spécialement adapté à la ville (essentiellement en taille et vitesse) et qui permettrait de résoudre à court terme le problème de l'utilisation de la voiture particulière en ville. On voit tout de suite ce que le concept de V.U. a de contradictoire avec la problématique retenue qui est à long terme et globale.

On commencera donc par décrire les arguments des défenseurs du V.S.U. pour les critiquer ensuite. On s'apercevra alors que le véhicule urbain ne peut conduire à une solution satisfaisante.

II - 1.1 - La logique du V.U.

Nombreux sont les défenseurs du V.U. en particulier dans les milieux administratifs. Mais bon nombre d'industriels réutilisent pour leur propre compte l'argumentation qui est mise au point. On se trouve en effet en face d'un raisonnement argumenté et logique qui est presque toujours présent derrière les articles concernant le V.U.

../

---

(1) - On parlera ici de véhicule urbain (V.U.), sans se poser la question de savoir s'il est spécifiquement ou particulièrement urbain : il ne semble pas y avoir de différence fondamentale entre le V.S.U. et le V.P.U. L'habitude nous conduira parfois à employer le mot VSU sans qu'il y ait une connotation quelconque de "spécificité" (pour plus de précisions cf. [29]).

Reprenons ce raisonnement en partant de quelques articles sur le VU particulièrement représentatifs, en particulier :

- Stratégie de développement du petit VU par M. FRYBOURG aux Journées de la RGE sur le véhicule électrique [26] .
- Première approche sur le VU I A U R P Mai 1970 [3] .
- La voiture électrique et la circulation urbaine A. TRANIE REVUE TRANSPORT n° 134 [31] .
- Adaptation de l'automobile à la ville I A U R P Mars 1970 [32] .
- Etude sur le véhicule urbain S A E I 1967, plus une enquête B C E O M et les divers comptes rendus de cette étude [33] .
- Le véhicule électrique urbain, G. GASTAUT Economie et Société Tome II n° 10 [34] .

La démarche d'A. BIEBER dans son article Urbaniser l'Automobile (Analyse et Prévision XII-4-1971 [10]) relève de la même logique ainsi que l'étude paramétrique menée actuellement à l'I.R.T.

Le raisonnement se déroule en plusieurs temps.

a) L'automobile actuelle présente des inconvénients en ville : elle pollue, elle encombre, elle gaspille l'espace et l'énergie, et on rejoint là une analyse classique.

b) Les inconvénients viennent de ce que les caractéristiques actuelles des véhicules ne sont pas adaptées aux contraintes de la ville :"Déplacer en ville, à faible vitesse un passager dans un véhicule conçu pour transporter cinq personnes avec bagages à grande vitesse n'aboutira nullement à un optimum, aussi bien pour le propriétaire du véhicule que pour la collectivité" [26] .

" La conclusion est que, pour la plupart des citadins motorisés, il serait à tous égards préférable, plus rentable aussi de rompre avec les habitudes d'esprit anachroniques et de promouvoir pour la circulation urbaine un moyen spécialisé de locomotion. Un moyen spécialisé ? c'est-à-dire une voiture urbaine. Deux questions se posent alors : que serait cette voiture urbaine ? peut-elle trouver des acheteurs ?" [31] .

../

" On peut dresser comme suit "le portrait robot" d'un véhicule urbain, tel qu'il résulte des différentes études effectuées dans ce domaine et qui, sur ce point se trouvent être remarquablement en accord :

- taille réduite (2 m. de long sur 1,5 m. de large .., 2 places)...
- stabilité et robustesse grandes pour en garantir la sécurité d'utilisation.
- grande manoeuvriabilité (rayon de giration très court).
- puissance autonomie et vitesse de pointe (60 à 80 km./h) limitées..
- mode de propulsion non polluant, donc soit propulsion d'origine électrique, thermique, hybride ... soit apport d'amélioration très importantes au moteur à explosion classique." (3) .

De plus "en optant pour un véhicule "urbanisé", plus rationnel parce qu'occupant moins l'espace public et provoquant moins de nuisances en ville, un individu permet à la collectivité de réaliser une économie puisque le transfert associé à l'utilisation de son véhicule est moins élevé. La voiture urbanisée ne pourra pas s'inscrire dans les faits si son utilisateur ne reçoit pas une compensation à la mesure du gain qu'il procure à la collectivité" (10) .

" Ces mesures (de compensation) peuvent être diverses :

- financières : suppression de la vignette
  pas de taxe de stationnement etc...
- réglementaires : emplacements de stationnement réservés
  droit de stationner perpendiculairement au trottoir, voies réservées etc...

On peut, en tout état de cause, affirmer qu'aucun constructeur ne prendra le risque de la construction d'un véhicule urbain sans que les pouvoirs publics aient annoncé (voire commencé à mettre en oeuvre) les mesures destinées à favoriser son introduction et notamment entrepris cette politique de construction de garage" (32) .

" L'Etat interviendra en faisant progresser l'évaluation du coût social des nuisances et en encourageant la recherche technique, notamment par l'aide au développement" (26) .

../

Le raisonnement est implacable et on peut le schématiser sous forme de théorème :

LEMME : L'automobile a des inconvénients en ville.

Hypothèse : Les inconvénients sont dus à ses caractéristiques mal adaptées à la ville. Une voiture mieux adaptée présenterait des avantages collectifs importants.

Conclusions :

1) Adoptons donc la voiture en ville
2) Mais cette voiture a un marché faible bien que d'un coût inférieur à cause de sa taille
3) Comme le V U présente un avantage collectif, internalisons cette "économie" sociale des nuisances et pour augmenter ces avantages par une diffusion massive, l'Etat va prendre des mesures en faveur du V U.
4) Afin d'inciter les constructeurs définissons un cadre juridique qui précise quel type de véhicule bénéficiera de ces mesures : c'est la définition administrative stade suprême consacrant le véhicule urbain.

Les questions qui restent à traiter sont secondaires : le véhicule est-il particulièrement ou spécifiquement urbain, quelle propulsion utiliser, sera-t-il à deux ou trois places, une partie du parc sera-t-elle gérée de façon centralisée ? ...

Ce raisonnement est sans faille si l'on admet l'hypothèse de base. Mais qu'en reste-t-il si on n'admet pas cette hypothèse ?

../

II - 1-2 Critique de cette logique.

On peut remarquer d'abord que rien dans la première partie ne nous a permis de retenir l'hypothèse que les inconvénients de la voiture en ville sont dûs à ce qu'elle est mal adaptée aux conditions urbaines. Est-il donc si sûr que le V U présente des avantages collectifs importants ?

a) les avantages à attendre sont faibles

- encombrement

Contrairement à ce qui est affirmé en général il y a très peu à attendre, du point de vue de la fluidité de la circulation, d'un véhicule de dimensions réduites (29). Le débit en véhicule d'une voie dépend directement de la distance moyenne entre deux véhicules. Celle-ci est la somme pondérée de la longueur du véhicule, de la distance correspondant à l'accélération et à un temps de réponse du conducteur (distance de sécurité)

La distance entre deux véhicules s'exprime par :

$$D = L + a V \tau + b \frac{V2}{2 \gamma}$$

L longueur du véhicule

V Vitesse

τ temps de réponse

γ accélération

a,b paramètres

D'où le débit en véhicules /heure

$$d = 3600 \frac{V}{D} = \frac{3600 V}{L + a V \tau + b \frac{V2}{2 \gamma}}$$

Comme on le voit ci-dessus le débit dépend de la longueur des véhicules.

Les gains en débit peuvent être importants, mais à des vitesses très faibles. Ainsi en faisant passer L de 6 m. à 3 m. le débit augmente de 70 %, mais à une vitesse de 6 km/h ! (1).

.....

(1) Ces chiffres tirés de Cars for Cities Ministry of transports Londres 1967 ont été extraits de (3)

Aux vitesses plus élevées la longueur du véhicule devient faible par rapport aux autres termes et l'encombrement dynamique diminue très peu. On peut seulement espérer un retour plus rapide à la fluidité après un encombrement.

Si l'introduction du VU influe peu sur l'encombrement dynamique, il est clair que l'encombrement statique est considérablement diminué. Ainsi le V U occupe moins d'espace en parking et peut se garer perpendiculairement au trottoir. Mais on peut se demander aussi s'il ne risque pas d'y avoir un phénomène d'induction : plus on offre de possibilités de parking, plus on incite les automobilistes à se servir de leur voiture et l'expérience des dernières années permet de se demander si une politique de transport ne commencepas par une politique de pénurie de parking (ou par une tarification rigoureusement appliquée(1). Ainsi l'introduction du V U peut renforcer les problèmes d'encombrement : les problèmes de parking étant facilités (diminution de l'encombrement dynamique).

Encore faut-il remarquer que les gains que nous avons notés sont des gains théoriques en supposant un parc homogène. Pendant les périodes de transition où le V U ne sera pas le seul en ville les gains à attendre sont beaucoup plus faibles.

Ainsi les débits baissent de 20 à 45 % lorsque le parc n'est pas homogène. Les gains à attendre de l'introduction du V U seront donc infimes. A plus long terme se pose le problème de la coexistence de très petits véhicules et de gros véhicules de livraison ou d'autobus. Les problèmes de sécurité n'impliquent-ils pas d'éviter au maximum cette coexistence, ce qui revient comme certains le disent à interdire les villes aux autobus et camions de livraison ! De toute façon la présence nécessaire de ces gros véhicules en ville diminue les gains en matière de débit même si le V U est seul en ville.

De même les parkings actuels sont dimensionnés pour une dimension de véhicule donnée ; il est difficile, voire même impossible de transformer les parkings actuels en parkins pour V U... On peut ajouter d'autre part que les experts estiment que le stationnement perpendiculaire à la voie est une solution assez dangereuse [35].

.....

---

(1) Voir à ce propos les statistiques du tableau 1 dans le § II-1-2 b.

Pour conclure ce point, un calcul rapide montre que la généralisation en l'an 2000 d'un VU (long de 2m. au lieu de 4 m.) conduit dans une ville moyenne à une baisse d'investissements en voirie et parking inférieure à 5 %.

- nuisance et énergie

La diminution de puissance du V U par rapport aux véhicules actuels permet des gains sensibles pour un véhicule isolé tant sur le plan des nuisances que sur le plan de l'énergie.

Cependant l'amélioration des nuisances ne peut être appréciable que si la proportion de V U est importante. Or le marché potentiel du V U est faible comme on le verra ci-dessous.

D'autre part la faible consommation d'essence semble présenter plus d'avantages individuels que collectifs (cf. chapitre I-3)

Les avantages que présente le véhicule urbain sont donc faibles surtout si on les compare aux contraintes qu'il impose.

b) ces avantages se payent par une diminution de sécurité.

Le V U est un petit véhicule : on considère en général que 2 m constitue un optimum (1). Or les experts sont formels : même avec structure particulièrement résistante il n'est pas possible d'offrir avec des véhicules de 2 m une sécurité identique à celle des véhicules actuels. Il est en effet nécessaire d'avoir devant le donducteur un espace et une masse suffisants pour que les tôles puissent absorber l'énergie du choc. On estime en général qu'au dessous de 3 m, le véhicule ne peut plus techniquement satisfaire aux normes de sécurité actuelles (choc à 50 km/h contre un mur). Cette difficulté a incité les défenseurs du V U à préconiser une double règlementation en arguant qu'il n'était pas nécessaire d'avoir les mêmes normes de sécurité puisque les V U vont moins vite. Par contre, disent-ils on insistera sur les problèmes de choc avec les piétons et cyclistes qui représentent la majorité des accidents en ville [10].

C'est supposer d'abord une complémentarité entre sécurité dans les chocs contre les voitures et contre les piétons : or ce n'est pas parce qu'une voiture résiste mieux au choc contre un camion qu'elle est plus meurtrière dans un choc contre un piéton puisqu'il s'agit essentiellement ici d'une question de hauteur d'impact voiture-piéton et donc de dessin de l'avant de la voiture.

.....

---

(1) Telles sont les conclusions de l'étude du S A E I [33]

De plus si l'on permet une dérogation aux normes de sécurité, n'est-on pas obligé d'interdire aux V U l'accès aux périphériques et voies de dégagement : la vitesse y est beaucoup plus élevée qu'en ville et les chocs entre V U et camions risquent d'être très meurtriers ?? ..

Peronne n'envisage réellement de cantoner les V U à l'intérieur des villes (cf. [29] et [26]). Mais alors les accidents en rase campagne risquent donc d'être beaucoup plus meurtriers avec les V U qu'avec les autres véhicules. Dans ces conditions les pouvoirs publics ne risquent-ils pas d'être affrontés à une campagne à la Nader dénonçant les dérogations en matière de sécurité qui transforment le V U en un "cercueil roulant" ?

c) Même si des mesures favorisant le V U sont prises, peut-on espérer un marché ?

Il n'y a pas grand chose à attendre du côté du prix du V U

Le prix d'une voiture dépend du nombre de pièces autant que du poids de tôle. Le V U contiendra autant de pièces qu'un véhicule actuel (4000) et la diminution du prix ne sera pas proportionnelle à la diminution de taille.

Il n'y a pas grand chose à attendre non plus au niveau de la propulsion. En effet un moteur détaré coûte le même prix qu'un moteur normal. Quant aux techniques de propulsion innovantes (hybrides, électriques..) il est clair que leur prix sera supérieur à celui des techniques actuelles puisqu'il est nécessaire d'amortir les coûts de R D qui comme on l'a vu sont importants.

Enfin le prix dépend essentiellement de la taille de la série. Le marché qu'on peut espérer à court et moyen terme étant faible (cf. ci-dessous) il est clair que les économies d'échelle joueront peu.

Si le prix n'est pas un élément attractif en faveur du V U, peut-on espérer que ses caractéristiques techniques lui ouvriront un marché important.?

Le V U est adapté à la ville et en particulier à Paris, Or c'est précisément dans les agglomérations importantes qu'on assiste à un phénomène de sous-motorisation voire même de démotorisation.

.....

Bien que les revenus soient plus élevés à Paris qu'en province, le taux de motorisation actuel y est de 38 % contre 51 % pour la moyenne "France entière". En tenant compte de cet effet de revenu, on s'aperçoit que sur 100 ménages qui "devraient" être motorisés, seuls 64 le sont. Les ménages qui ne se sont jamais motorisées représentent les 3/5 de la sous-motorisation, ce qui est considérable. Aussi bien, le nombre de ménages démotorisés à Paris est presque triple de ce qu'entraîneraient normalement les effets d'âge et de revenu [36]

Le tableau II - 1 rapproche les indices de démotorisation à âge et revenu égal qui sont l'expression la plus frappante du "découragement d'emploi" de l'automobile.

La clientèle potentielle à laquelle s'adresse le V U a donc tendance à se détacher de la voiture au profit des transports en commun. Peut-on espérer alors un marché important ? D'autant plus que le V U ne serait pas utilisé seulement dans les zones urbaines. Dans les zones néo-urbaines (banlieues et petites villes) où se développent les autoroutes de dégagement à grande vitesse le V U est moins adapté (étant donné sa vitesse faible). Or c'est précisément là que le parc automobile va croître le plus vite : en 1985 c'est 70 % de parc qui sera concentré dans les zones néo-urbaines, 15 % du parc subsistant dans les zones urbaines denses et 15 % dans les zones rurales (en 1970 les proportions étaient respectivement 60 %, 20 %, 20 %). (cf. [10] et [30])

Enfin la voiture actuelle se présente comme une bonne à tout faire adaptée à tous parcours (porte à porte, autonomie, diversité du chargement...) On imagine mal les automobilistes abandonner ces possibilités même s'ils n'utilisent que rarement toutes les possibilités de leur voiture (1). Il y a une inertie du comportement qui rend difficile toute adaptation partielle de l'automobile. Ainsi le V S U n'a jamais vu le jour et sera toujours supplanté par la petite voiture, (sauf contraintes administratives et économiques).

Les quelques études de marché effectuées par les constructeurs révèlent bien cette absence de marché réel pour le VU (2) (Marché de 100.000 véhicules par an au maximum).

.....

(1) La généralisation et le succès de la porte arrière est un exemple du désir d'adapter la voiture à tout type de chargement.

(2) On peut se méfier de ce type d'étude de marché portant sur un produit qui n'existe pas : elle donne cependant des indications intéressantes.

X

Certains défenseurs du V U conscients de la faiblesse du marché envisagent un mode de gestion particulier des V U et parlent alors de système bimode ou de banalisation. Tous les experts s'accordent pour reconnaître que les systèmes bimodes sont conceptuellement très attirants, mais que pour la voiture particulière il s'agit de projets à très long terme relevant plutôt de la futurologie. Plus réaliste est la banalisation des véhicules. Or l'I.R.T. qui a suivi l'expérience de Montpellier ne pense pas que la banalisation puisse s'étendre dans les 20 ans à venir. Elle impose en effet des investissements très lourds en véhicule et parking si on veut atteindre une qualité de service qui la rende attrayante. De plus la voiture banalisée est concurrencée par la voiture particulière dans les déplacements domicile-travail et par le transport en commun sur les axes privilégiés à gros débit.

Il en ressort en définitive que le marché spontané du V U restera faible. Des mesures en faveur du V U permettraient sans doute d'élargir ce marché, mais quels seraient les résultats de ces mesures ?

d) Résultat des mesures visant à créer artificiellement le marché.

Rappelons que ces mesures sont d'ordre financières ou règlementaires (32). Ces mesures visant à favoriser le V U et à lui créer un marché. Certains envisagent même des mesures plus autoritaires d'interdiction aux véhicules normaux de circuler à l'intérieur des villes. Quel que soit le type des mesures adoptées, elles correspondent à un type de diffusion de l'innovation par l'intermédiaire des revenus le plus élevé (1).

C'est en effet dans le marché de la double motorisation que le V U s'insère. Les mesures incitatives en faveur du V U se présentent donc comme des transferts économiques en faveur des classes sociales les plus favorisées, et en ce sens accroissent l'inégalité sociale. Sans faire preuve de démagogie, il est peu probable que de telles mesures puissent être prises facilement par les pouvoirs publics

.....

---

(1) C'est par ce type de clientèle que s'est développé l'automobile au début du 20° siècle ou que se développent actuellement les matériels photographiques ou audiovisuels.

De plus même les défenseurs du VU reconnaissent que son introduction ne permet pas de résoudre à long terme les problèmes de circulation. "On peut penser qu'à partir de 1985-1990 commenceront à nouveau les problèmes de congestion. Plus précisément, le véhicule urbain ne change pas la nature du problème plus général des transports urbains, il ne fait qu'en reculer les échéances 33 .

De même il est irréaliste de penser que le véhicule urbain envisagé comme une solution adaptée aux problèmes à court terme permettra de faire sortir l'innovation nécessaire en matière de motorisation.

Bien plus, le véhicule urbain par le seul fait qu'il existe, risque de bloquer le développement des autres innovations d'ordre institutionnel ou technologique qui sont un impératif à long terme (cf. II-2 et II-3). "Les innovations mineures constituent des obstacles aux innovations majeures dans la mesure où elles tendent à répondre, au moins partiellement à la demande et souvent à un moindre coût à court terme et par conséquent à occuper la place" 13 .

<u>En conclusion il apparaît que développer le véhicule urbain serait une erreur économique, politique et technique.</u>

On doit cependant tempérer cette conclusion par deux remarques :

- Il n'en reste pas moins qu'on va assister dans les années à venir à une diminution de taille et de puissance des véhicules : il s'agit là d'une évolution spontanée du marché, d'une adaptation des techniques traditionnelles, soudainement imposées par une menace d'ordre économique. Mais en aucun cas il ne s'agit d'un véhicule urbain ;

- Cette conclusion ne vise que le V S U tel qu'il est envisagé actuellement : elle ne remet absolument pas en cause une spécificité urbaine ou routière de la voiture à long terme à condition que ce nouveau véhicule soit compatible avec l'urbanisation et le système de transport.

II - 2 Un principe à retenir : l'hybridation

Nous allons maintenant nous pencher sur les diverses alternatives techniques à la voiture automobile actuelle(laissant de côté, comme on en a convenu, les innovations institutionnelles relatives à l'urbanisme ou à l'organisation du système de transport).

Rappelons de même qu'on s'intéresse aux innovations de rupture à moyen terme en matière de propulsion automobile et non aux améliorations à court terme du moteur thermique.

On a rencontré deux obstacles principaux :

- énormité du travail : depuis une quinzaine d'années chaque pays, chaque firme même poursuit des recherches sur le sujet (1). Il s'ensuit une littérature abondante de haute technicité mais de qualité très inégale de sorte qu'il est difficile de faire la part entre ce qui est porteur d'avenir et ce qui ne l'est pas ;

- la deuxième difficulté vient du secret qui entoure la plupart des recherches sur les générateurs : d'une part certaines recherches ont en effet des applications militaires immédiates et d'autre part quelques entreprises pratiquent une véritable politique du secret.

Encore une fois il ne s'agira ici que de faire le point de ce qui se fait et d'indiquer sommairement les problèmes des diverses filières.

Dans un moteur thermique on peut distinguer deux fonctions : génération d'énergie (explosion de l'essence dans les pistons) et propulsion (par l'intermédiaire de l'arbre moteur). Ces deux fonctions sont intégrées dans la même cellule, le moteur à explosion.

On peut penser dans un premier temps dissocier la fonction génération d'énergie et la fonction propulsion : c'est fait dans le véhicule électrique où le générateur fournit l'électricité utilisée au niveau du moteur. Mais on peut aussi ajouter une fonction supplémentaire: celle

../..

(1) Sur les piles à combustible ont travaillé en France de 65 à 70 : CNRS,ONIA (Office Nat. Industrielle de l'Azote), la Cie Générale d'Electricité, Gaz de France, l'Institut Fr. du Pétrole, Alsthom-Pechiney, St-Gobain, Thomson-Houston, EDF, Cie Gle Télégraphie sans Fil (CSF) Azote et Produits Chimiques (APC), Peugeot-Alsthom-Esso 5)

d'accumulation d'énergie : Un générateur primaire alimente un accumulateur d'énergie (électrique, mécanique ou hydropneumatique) qui fournit tout ou partie de l'énergie de propulsion. Tel est le principe de l'hybridation.

La plupart des modes de propulsion alternatifs semblent recourir à ce principe. Quelques prototypes ont déjà été mis au point tant au Japon qu'aux Etats-Unis. Dans le contexte d'économie de l'énergie il semble que le principe de l'hybridation puisse se généraliser. C'est pourquoi nous l'étudierons dans ce chapitre, repoussant au chapitre suivant l'étude des modes de propulsion alternatifs proprement dits.

Nous étudierons donc successivement le principe de l'hybridation et les avantages qu'on peut en tirer.

II - 2-1 Le principe de l'hybridation

L'idée du véhicule hybride vient de la constatation que dans un trajet urbain un véhicule a besoin d'une puissance moyenne 6 à 8 fois inférieure à la puissance nécessaire pour les accélérations. D'où l'idée de dimensionner le moteur pour la puissance moyenne, quitte à fournir par un dispositif quelconque les pointes de puissance nécessaire en accélération.

"On appellera véhicule hybride un véhicule disposant en cours de fonctionnement de deux réservoirs d'énergie, de caractéristiques différentes et complémentaires pouvant être sollicités ensemble ou séparément "(4)

Le premier assure le régime de croisière et doit donc avoir une énergie massique élevée alors que le second doit effectuer les pointes de puissance et doit avoir une puissance massique importante.

Le premier réservoir d'énergie est en principe alimenté de l'extérieur, on l'appelle le générateur. Il s'agit d'un moteur thermique, d'un générateur électrique, d'un moteur d'un type nouveau (cf chapitre III-3). Le second réservoir peut être alimenté à partir du premier générateur, par une source extérieure ou même en récupérant l'énergie cinétique du véhicule. On l'appelle l'accumulateur.

Les types de générateurs et d'accumulateurs sont multiples et aucune optimisation n'est encore possible.

-.- générateur :-électrique : accumulateurs, piles métal air piles à combustible (cf § II-3-1)

-thermique : moteur à explosion, Diesel, moteur sterling, moteur à vapeur turbine à gaz (cf § II-3-2)

-.- accumulateur : mécanique (ressorts)

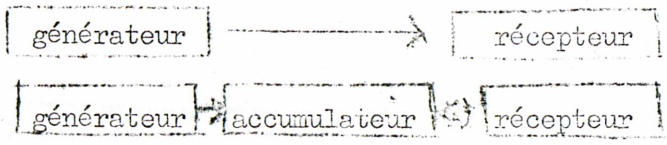
cinétique (volant d'inertie)

pneumatique (gaz comprimé)

électrique (accumulateurs)

L'énergie fournie par le générateur et/ou l'accumulateur est utilisée dans un récepteur qui assure la propulsion (roues par l'intermédiaire d'un moteur électrique ou d'un train épicycloïdal).

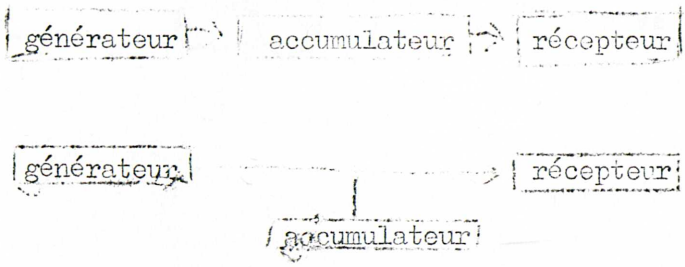
Ainsi l'hybridation revient à dissocier deux fonctions confondues dans la voiture classique et à rajouter une autre fonction comme on le schématise ci-dessous



moteur actuel

moteur hybride

On distingue deux types de fonctionnement suivant que le récepteur est alimenté en totalité ou en partie à partir de l'accumulateur.



disposition série toute l'énergie passe par l'accumulateur

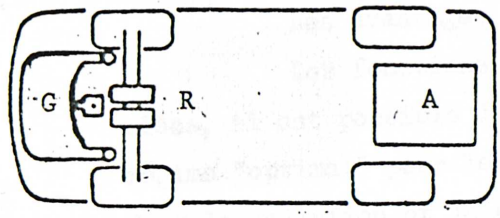
disposition parallèle l'énergie provenant du générateur peut aller soit au récepteur soit à l'accumulateur.

Enfin le principe de l'hybridation permet une récupération de l'énergie cinétique au freinage (1) qui est impossible avec certains types de propulsion.

Le véhicule peut donc fonctionner suivant plusieurs modes comme le montre la figure II-1 ; Suivant le type d'utilisation enfin le taux d'hybridation peut être très différent (42)

../..

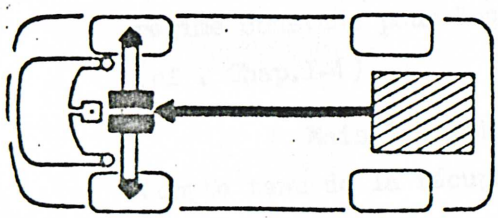
(1) A condition que le récepteur soit inversible en tant que générateur, ce qui est en général le cas.



G : Générateur

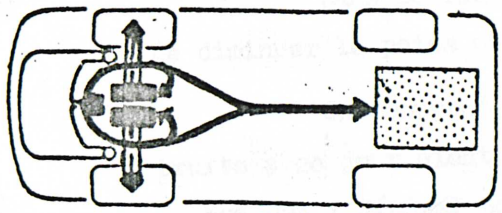
R : Récepteur

A : Accumulateur



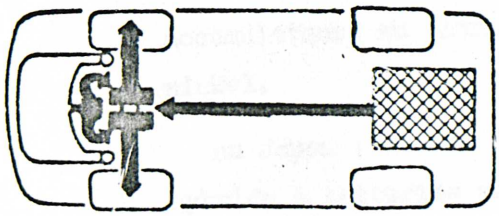
Mode 1 :

Mode "accumulateur"



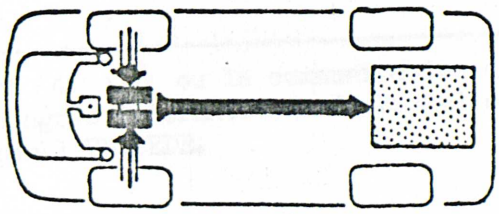
Mode 2 :

Mode hybride avec faible demande d'énergie. L'accumulateur continue à se charger.



Mode 3 :

Mode hybride avec forte demande d'énergie. L'accumulateur se décharge bien que le générateur fonctionne.



Mode 4 :

Récupération de l'énergie fournie par les roues (décélération, descente de côtes).

FIGURE II - 1 - Divers modes de fonctionnement d'un véhicule hybride

II - 2-2 Les avantages de l'hybridation

Les avantages théoriques de l'hybridation sont importants :

Les fonctions génération d'énergie et propulsion étant dissociées, il est possible de faire fonctionner le générateur primaire à un régime "optimal" pour les critères que l'on retient en général, c'est à dire la pollution et la consommation énergétique.

Ainsi la présence de l'accumulation d'énergie permet de faire fonctionner un moteur thermique utilisé comme générateur primaire à un régime constant pour lequel les nuisances (bruit, pollution) sont faibles. (cf . Chap.I-1)

Mais les gains sont surtout importants en matière énergétique. Compte tenu de la récupération d'énergie au freinage et surtout du dimensionnement du générateur à la puissance moyenne. Ainsi on a pu calculer qu'une Renault 4 L. hybridée aurait une consommation de l'ordre de 3 litres aux IOO kilomètres dans des conditions d'utilisation urbaine normale.

Dans le cas de générateurs électriques l'hybridation permet aussi de diminuer le poids du système de propulsion -

On comprend dans ces conditions que de nombreux prototypes construits à ce jour aient utilisé le principe de l'hybridation (1) :

aux USA : Général motors a réalisé un grand nombre de véhicules série 512, série XEP-1 A (en 1971), série X P 883 ou même GM Stirlec II (moteur stirling, batteries en plomb, moteur électrique). Le véhicule d'Union Carbid fonctionne avec une pile à combustible H_2/air et des batteries en plomb.

Général Electric (GECO) a présenté en 1967 son modèle Delta à accumulateurs au plomb couplés en parallèle à des accumulateurs cadmium nickel.

au Japon : Nissan Motors Compagny Ltd a construit en I968 un véhicule hybride à batteries au plomb couplées à des accumulateurs Cadmium Nickel. Daihatsu a de nombreux projets de véhicules hybrides. Toya Kagyo a construit un prototype très original de véhicule urbain hybride à moteur rotatif wankel dont les quatre roues sont disposées en losange.

../..

(1) cf (41) (47) ou la communication de H J Young (Electric Véhicle Council N.Y.) au congrès International de Bruxelles sur le véhicule électrique organisé en 1972 par l'UNIPEDE.

en Allemagne : Mercedes Benz a construit un autobus hybride de 66 places modèle OE 302 de 16 à 19 T. de poids total alimenté par 3.500 kg. de batteries au plomb et un moteur Diesel de 65 CV. couplé aux accumulateurs par un générateur triphasé.

en U.R.S.S. : A l'exposition Elechtro 72 de Moscou, les constructeurs soviétiques ont présenté une voiture hybride prévue pour 7 passagers, dotée d'un moteur à combustion interne de 20 CV. entrainant un générateur qui alimente des batteries au plomb.

en Italie : Commercialisation d'un véhicule hybride (accumulateurs au Pb/ accumulateurs Cadmium-Nickel) par Bargogli et Cristiani depuis 1971.

en France : Recherches par Renault d'un autobus hybride. Mise au point par Peugeot d'hybrides électriques et mécaniques.

Cette liste montre les efforts importants effectués sur le véhicule hybride depuis quelques années. La crise de l'énergie va sans aucun doute redonner de l'intérêt au principe de l'hybridation qui semble devoir se généraliser dans les années à venir.

Si le principe même de l'hybridation est très séduisant, sa mise en oeuvre pose encore de gros problèmes :

- au niveau de l'accumulateur d'énergie : les accumulateurs d'énergie ne sont pas encore au point. Les accumulateurs cinétiques ou pneumatiques ont une puissance et une énergie massique faible. De plus l'énergie accumulée se dissipe rapidement par frottement (volant) ou par diffusion (gaz comprimé) Les accumulateurs électriques posent le problème de leur durée de vie : ils supportent actuellement plusieurs centaines de cycle alors que l'hybridation impliquerait plusieurs centaines de milliers de cycles.
- au niveau de l'intégration dans le véhicule : l'inconvénient majeur de l'hybridation est sa complexité. Celle-ci se traduit par un encombrement et un poids important, mais aussi par une moins grande fiabilité et un coût plus élevé.

On peut penser cependant que l'utilisation de l'hybridation dans des créneaux spécialisés (cf. § III-2-2) permettra de mettre en valeur ses avantages et de mettre au point les techniques.

II-3 Les modes de propulsion alternatifs

Dans le contexte général d'économie d'énergie à long terme, il sera nécessaire comme on l'a vu de développer la propulsion hybride. Encore faut-il savoir quelle source d'énergie primaire on va utiliser ? Le principe d'hybridation laisse libre le choix du générateur d'énergie; ce peut-être un moteur thermique, une pile à combustible ou un moteur à combustion externe. -Ce générateur participe participe - directement à la propulsion (moteur thermique) ou non (pile à combustible), la seule chose qui nous intéresse ici est qu'il fournisse de l'énergie.

Les divers générateurs envisageables en sont à des états de développement très divers, ce qui rend difficile une estimation comparative. On s'est efforcé cependant dans la mesure du possible d'éliminer les générateurs.

- dont le prix est et restera trop élevé compte tenu de l'utilisation nécessaire de métaux précieux.
- dont l'état des recherches n'est pas assez avancé pour envisager un développement important dans les 25 années à venir.
- dont les conditions d'utilisation sont trop spécifiques et qui sont mal adaptées à l'usage sur une voiture.

Dans ces conditions on distinguera deux types de générateurs. Les uns fournissent l'énergie sous forme électrique (§ II-3-1), les autres sous forme mécanique (§ II-3-2)

Le but des paragraphes qui suivent n'est pas de faire le point complet des diverses filières techniques (1), mais de rappeler quelques caractéristiques des filières les plus prometteuses. Dans la 3ème partie nous donnerons quelques critères permettant le choix entre ces diverses filières.

II - 3-1 Les générateurs électriques

La voiture électrique est aussi vieille que la voiture thermique. Mais la propulsion thermique a supplanté la propulsion électrique car elle évitait les contraintes de l'autonomie. La voiture électrique a connu un relatif succès pendant les périodes de crise (deuxième guerre mondiale), mais ce sont surtout les problèmes de nuisances qui ont redonné à la voiture électrique un regain d'intérêt depuis une dizaine d'années -

../..

(1) Pour plus de précision cf.limes données en bibliographie.

Il s'agit donc d'un problème beaucoup étudié et l'accord se fait en général sur les filières envisageables pour l'automobile, même si les coûts et les délais sont souvent contestés.

On distingue les accumulateurs rechargeables électriquement les piles rechargeables mécaniquement (1) et les piles à combustible (37).

U n générateur se caractérise par son énergie massique exprimée en w/kg et sa puissance massique en wh/kg -

On reviendra plus longuement au § III-1-2 sur ces grandeurs et on verra en particulier en quoi elles caractérisent le générateur. Un autre paramètre important est la durée de vie puisque l'augmentation des performances va de pair avec une diminution de la durée de vie du générateur.

Il existe un grand nombre de filières de générateurs électriques. Cependant certains ont des caractéristiques (prix, poids, mode de fonctionnement, délais de mise en oeuvre) qui les rendent incompatibles avec leur utilisation sur la voiture. On semble assister depuis quelques années à une stabilisation des techniques favorables à des actions de développement.

Cette stabilisation se traduit dans les interventions des spécialistes aux divers congrès consacrés au véhicule électrique (26) et (30). Ils retiennent : l'accu mulateur au plomb, la pile au zinc, les piles à combustible .

a) L'accumulateur au plomb : c'est un vieux matériel qui bénéficie d'une longue pratique industrielle . D'énergie massique théorique faible (170 wh/kg) il permet de restituer actuellement de 35 à 40 wh/kg. Il ne semble pas qu'au cours des années futures on puisse dépasser 50 wh/kg. C'est dire qu'on ne peut réaliser en ce qui le concerne de bien grands progrès: l'essentiel des recherches consistent à augmenter la durée de vie de la batterie qui est actuellement d'environ 500 cycles.

Avec des tensions de charge/décharge de 2,02/1,98 V, l'accumulateur au plomb a un bon rendement. Cependant la durée de charge est importante et les performances de la batterie sont sensibles aux conditions d'utilisation (en particulier durée de la décharge) . Le coût est de l'ordre de 4 F/Kg.

../..

(1) La distinction est parfois arbitraire : Ainsi une pile Air-Zinc et un accumulateur air-zinc fonctionnent suivant le même principe et ne diffèrent que par la conception de l'électrode à air.

Les accumulateurs alcalins bien que plus performants en puissance massique ne semblent pas convenir étant donné leur prix (13)

L'accumulateur sodium/soufre a de très bonnes performances, cependant il est nécessaire de le maintenir en permanence à 300°C sous peine de le détériorer définitivement. Il est donc incompatible avec la voiture d'autant plus que son utilisation poserait de délicats problèmes de sécurité.

b) Pile ou accumulateur air/zinc: suivant la technologie utilisée pour l'électrode, ce générateur peut être rechargé électriquement ou mécaniquement (par changement de l'électrolyte).

L'énergie massique est de l'ordre de 80 à 130 wh/kg alors que l'énergie massique théorique est de l'ordre de 900 wh/kg. Cette énergie massique élevée permet des autonomies de 200 km.en non stop et de I00 à 150 km. en ville.

L'accumulateur air/zinc a encore une durée de vie faible, le dégagement gazeux détériorant l'électrode. De même la durée de recharge semble importante. Le rendement de l'accumulateur doit être faible.

La pile air/zinc ne semble pas permettre non plus de bons rendements. On estime qu'il faut fournir 2 Kw/h. pour obtenir 1 kw/h.aux bornes de la batterie.

-.- Pour recharger la pile il suffit de remplacer l'électrolyte contenant la poudre de zinc en suspension; on ne peut nier cependant la lourdeur de l'infrastructure nouvelle à mettre en place (distribution et régénération de l'électrolyte).

c) Les piles à combustibles.

Elles constituent un procédé séduisant de transformation directe de l'énergie chimique en énergie électrique et présentent des avantages certains par rapport aux accumulateurs. Si le principe est connu depuis 1839, c'est la conquête de l'espace qui a déclenché les recherches importantes qui se poursuivent encore. Les objectifs premiers étaient l'espace et les applications militaires de sorte que les piles mises au point à ce jour sont en général mal adaptées à un éventuel véhicule électrique.

Les grands espoirs soulevés dans les années 60 par la pile à combustible ont été partiellement déçus et certains désespèrent d'une mise au point adaptée à l'automobile.

../..

Sue les accumulateurs les piles ont l'avantage d'être immédiatement rechargeables, d'avoir un rendement important et d'utiliser des réactifs très énergétiquesDans le cas d'une pile utilisant l'hydrogène comme combustible, l'énergie massique théorique est de 3600 wh/kg alors qu'elle n'est rappelons-le que de 170 wh/kg. pour l'accumulateur au plomb.

Dans la pratique la réactivité des combustibles reste faible et on doit l'élever en fonctionnant à haute température ou en utilisant des catalyseurs : c'est essentiellement à ces deux problèmes que se sont heurtés les chercheurs.

Il existe un grand nombre de variantes possibles de piles suivant la température, le réactif primaire, l'électrolyte, les électrodes (cf .tableau II-2). Les principaux combustibles envisagés et leurs caractéristiques sont indiquées ci-dessous.

combustible	prix	réactivité	état physique à température ordinaire	principaux produits de combustion	toxicité
hydrogène	moyen	très bonne	gazeux	H_2O	nulle
hydrazine	très élevé	excellente	liquide	N_2; H_2O (traces de NH_3)	très élevée
méthanol	faible	moyenne	liquide	CO_2; H_2O	faible
hydrocarbures	très faible	très faible	liquide (ou gazeux)	CO_2; H_2O	faible
ammoniac	faible	très faible	gazeux (liquide sous pression)	N_2; H_2O	faible

On obtient donc les principaux types de pile dont les caractéristiques sont données au tableau II-3

Les délais importants de démarrage et les problèmes de sécurité semblent interdire l'usage des piles à moyenne et haute température. La pile à hydrazine est exclue étant donné le coût et la toxicité du combustible.

Les piles directes à hydrocarbure ne sont pas envisageables dans un délai court bien que les progrès se fassent. L'intérêt de ces piles sont évidents puisqu'elles nécessitent 4 à 5 fois moins d'hydrocarbure qu'un moteur thermique, à performances égales.

Le problème principal est la faible réactivité des hydrocarbures de sorte qu'il est nécessaire d'utiliser un catalyseur comme le platine. On oriente les recherches vers d'autres catalyseurs (alliages complexes) mais il est difficile d'estimer l'horizon temporel (5 ans ou 20 ans). Même si la possibilité technique éclate, elle risque de ne plus être intéressante du fait de la pénurie éventuelle d'hydrocarbures.

../..

réactifs primaires		électrolyte		électrodes		
combustible	comburant	nature	état	type	nature du catalyseur	support
hydrogène	air	basique	libre ou immobilisé (matrice) ou membrane échangeuse d'ions	poreuses	métaux de la mine du platine	métaux précieux
hydrazine		acide		dispersées	argent	
méthanol	oxygène				nickel-cobalt	carbone
hydrocarbures		neutre		non poreuses	carbures métalliques	
ammoniac	eau oxygénée	fondu		redox	spinelles de métaux de transition	tantale
hydrures métalliques		solide		à émulsion	charbon actif	niobium
oxyde de carbone					phtalocyanines	nickel cuivre cobalt
					enzymes	

TABLEAU II - 2 - Variantes possibles de piles à combustible (37)

piles	température (°C)	combustible envisagé	électrolyte (pH)	ion facteur d'échange inter-électrodes	comburant envisagé	catalyseur	inconvénients de principe et problèmes à résoudre	stade d'avancement
pile à haute température	1 000 à 1 100	hydrocarbures	oxydes de zirconium oxydes d'yttrium	O^{2-}	air	Ag; Ni	temps de démarrage assez long, puissance massique faible; problèmes technologiques	laboratoire
	600 à 800	hydrocarbures	carbonates fondus, eutectique CO_3Na_2, CO_3Li_2, CO_3K_2	CO_3^{2-}	air + CO_2 (recyclé)	Ag; Ni; oxydes	temps de démarrage important; problèmes de matériaux	laboratoire
pile à moyenne température	250	hydrogène	solution KOH	OH^-	oxygène ou air	Ni; NiO	temps de démarrage assez long	prototypes et applications spatiales
pile à basse température	150	hydrocarbures	PO_4H_3 ou H_2SO_4	H^+	air	Pt; Pd	recherche de catalyseur bon marché et disponible, problème de matériaux, puissance spécifique faible	laboratoire
	80	méthanol	H_2SO_4 ou électrolyte neutre pH < 8	H^+ OH^-	air	Pt; Pd	recherche de catalyseur bon marché et disponible, puissance spécifique faible	laboratoire
		hydrogène	H_2SO_4 ou membranes	H^+	air	Pt, Pd	recherche de catalyseur bon marché et disponible, problème de matériaux	prototypes et applications spatiales
		hydrogène	KOH ou NaOH ou membranes	OH^-	air ou O_2	Ag; Ni; C	emploi d'un combustible gazeux	prototypes
		hydrazine	KOH ou NaOH	OH^-	air ou H_2O_2	Ni; C; Co	combustible d'un prix très élevé et de toxicité importante	prototypes et applications militaires

TABLEAU II - 3 - Différents types de piles (37)

Les piles directes au méthanol posent le même problème de catalyseur. De plus elles émettent des gaz nocifs de méthanol qu'il est nécessaire de piéger, d'où un rendement faible. A performances égales elles pèsent et coûtent le double d'une pile à hydrogène (13), le pessimisme a gagné les équipes de recherche et en particulier Esso et Alsthom qui ont abandonné leurs recherches sur des piles au méthanol adaptées à l'automobile.

La pile à hydrogène semble avoir un horizon temporel plus rapproché. On doit d'abord éliminer semble-t-il les piles indirectes hydrogène-air. Le principe consiste à décomposer catalytiquement le méthanol; l'hydrogène obtenu est envoyé dans la pile à combustible elle-même. On peut aussi craker des hydrocarbures. Le poids de ces dispositifs de craking-réforming est du même ordre de grandeur que la pile elle-même : ainsi l'énergie spécifique descend aux alentours de 50 wh/kg, ce qui ôte beaucoup d'intérêt à cette solution (30). De plus les opérations de craking-reforming semblent poser des problèmes de pollution.

La pile à hydrogène directe présente l'avantage de ne pas exiger l'emploi de métaux précieux, si l'on adopte une filière alcaline. Le platine anodique peut être remplacé par le nickel, plus abondant et moins cher. La faisabilité de la pile à hydrogène a été démontrée depuis longtemps et plusieurs voitures expérimentales ont déjà été équipés d'une pile hydrogène-air (Union Carbide aux U SA en 1971). Une étude complète de l'I.F.P. (38) sur l'adaptation d'une pile sur une 4 L montre qu'il est possible d'obtenir des performances intéressantes : autonomie de 235 km (avec 2 kg de H_2) à 80 km/h avec 340 Kg de charge utile (PTC 1070) et une pile de 11,5 Kw (pesant 165 Kg), et de 400 wh/kg. Etant donné les progrès réalisés depuis une dizaine d'années (en 7 ans la puissance massique a été multipliée par 30) on peut espérer en améliorer encore sensiblement les performances.

La pile à hydrogène, comme les autres piles ne va pas sans poser quelques problèmes: tolérance des catalyseurs aux situations accidentelles comme l'insuffisance de combustible, faible puissance au démarrage à basse température.

Mais le prix reste encore un problème majeur : il est très difficile de déterminer le prix alors que la conception et les techniques sont encore loin d'être figées. Une première estimation conduit à des prix de

l'ordre de 250 à 500 F. par Kw dans la gamme 5-10 kw suivant les cadences de production considérées (I0.000 à 300.000 unités par an) [39].

Pour un véhicule de type 4 L. la pile représenterait un prix H T de 5300 F. et l'ensemble de la propulsion 9.200 F. (les minimas prévisibles étant respectivement 2500 F et 5300 F) alors que la propulsion du véhicule thermique coûte 2000 F [38]

La sécurité représente un deuxième handicap de la pile à hydrogène. L'hydrogène est en effet inodore, incolore, et se dilue très bien dans l'atmosphère. Comme le mélange H_2/air est explosif quelque soit la concentration, le moindre accident ou le moindre défaut dans les réservoirs d'hydrogène peut avoir des conséquences catastrophiques. Il est encore possible de piéger l'hydrogène dans les hydrures. Mais il s'agit d'un corps cher et lourd (I00 kg. d'hydrures pour piéger 5 à 6 kg. de H_2).

La cinétique de formation est de plus très lente de sorte que la régénération des hydrures risque d'être délicate et coûteuse .

Le tableau II-4 et la figure II-2 résument les caractéristiques des divers générateurs retenus.

../..

TABLEAU II - 4

- ACCUMULATEURS -

TYPES DE GENERATEURS	TENSION d'UTILISATION Volts	ENERGIE MASSIQUE THEORIQUE Wh/Kg	ENERGIE MASSIQUE PRATIQUE Wh/Kg	ENERGIE VOLUMIQUE PRATIQUE Wh/dm^3	PUISSANCE MASSIQUE W/Kg	DENSITE	DUREE DE VIE Nbre de CYCLES 80% DECHARGE capacité 5h	DUREE DE RECHARGE heure
Accus au plomb	2	170	45/55	140	400	2,2/2,6	500/750	4
Accus Soufre-Sodium	1,8	785	150/200	130	200	0,8/1	2500	2 à 3
Accus Zinc-Air	1,1	900	100	100	20/50	1	100	10

- PILES A COMBUSTIBLE -

TYPES DE GENERATEURS	PLAGE VARIATION DE LA TENSION d'UTILISATION volts	ENERGIE MASSIQUE PILE + COMBUSTIBLE pour 4h autonomie Wh/Kg	ENERGIE VOLUMIQUE PILE + COMBUSTIBLE pour 4h autonomie Wh/dm^3	PUISSANCE MASSIQUE PILE seule W/Kg	PUISSANCE MASSIQUE PILE + combustible W/Kg	DENSITE PILE seule Kg/dm^3	DENSITE RESERVOIR plein Kg/dm^3	DUREE DE vie ans	RENDEMENTS FAIBLE charge %	RENDEMENTS PLEINE charge %
Pile Zinc-Air	0,9/1,2	135	185	200	35	0,9	1,7	3	75%	>55%
Pile Hydrogène-Air	0,75/1,1	360	290	142	90	0,7	2	3	80%	>50%

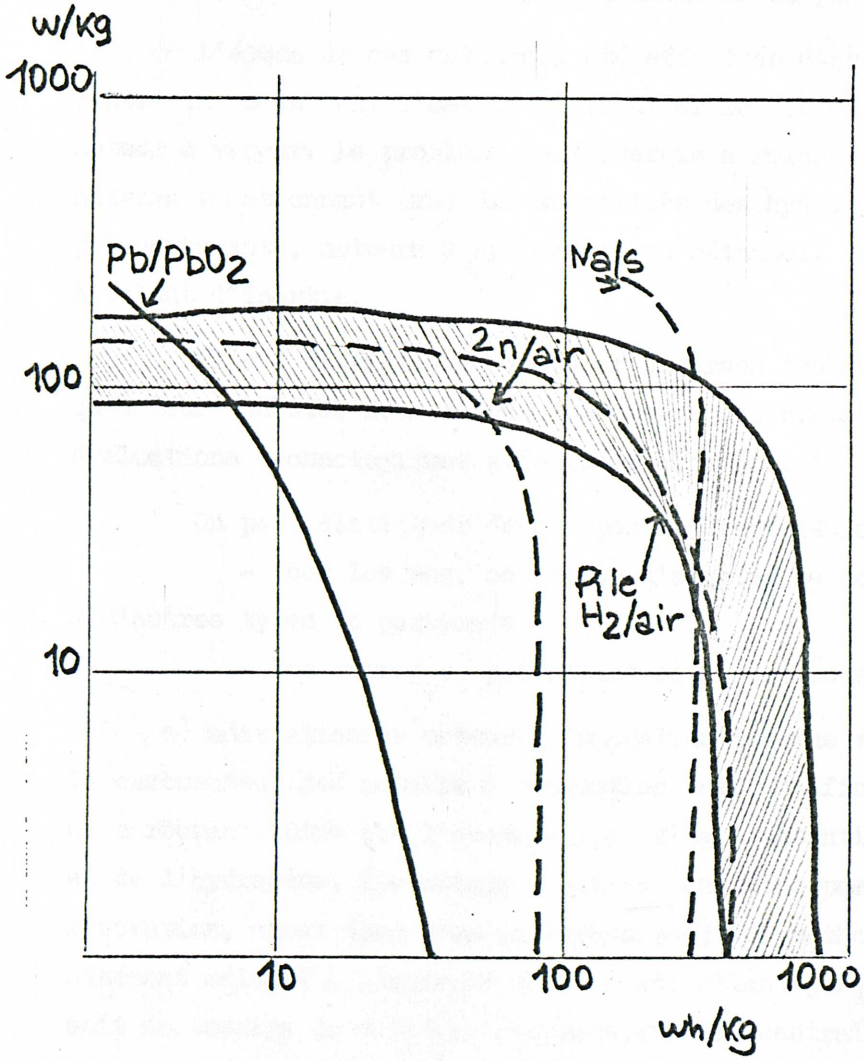


FIGURE II - 2 - Puissance et énergie massique et différents générateurs d'électricité.

II - 3 - 2 Les générateurs mécaniques

Ces générateurs mécaniques ont été beaucoup moins étudiés que les améliorations du moteur actuel ou même que la propulstion électrique.

En effet il n'y a pas d'application militaire immédiate et les rendements sont inférieurs aux rendements de la pile à combustible.

L'étude de ces moteurs a été effectuée dans le cadre de la lutte contre la pollution. C'est en particulier le cas du moteur stirling ou du moteur à vapeur. Le problème de l'énergie a relancé l'intérêt pour des moteurs fonctionnant avec des substituts des hydrocarbures : moteurs polycarburants, moteurs à hydrogène, au méthanol, au gaz, ou même moteurs à volant d'inertie.

Il est difficile de comparer diverses technologies qui n'en sont qu'à leurs débuts. Nous allons donc faire une synthèse rapide des diverses évaluations technologiques effectuées à ce jour ([51] , [45] , [7]).

On peut distinguer deux types de générateurs mécaniques :

- pour les uns, on essaie d'adapter le moteur à combustion interne à d'autres types de carburant -
- les autres se présentent comme des moteurs polycarburants.

a) adaptation du moteur à combustion interne : il s'agit de modifier le carburateur des moteurs à combustion interne afin de fonctionner avec un carburant autre que l'essence : il s'agit essentiellement du méthanol et de l'hydrogène. (Le moteur à gaz ne constitue pas une véritable innovation, aussi nous n'en parlerons pas). Le méthanol peut en effet être aisément mélangé à l'essence en quantité allant jusqu'à 15 % sans qu'il soit nécessaire de modifier les moteurs : au contraire les performances en sont améliorées puisque le méthanol possède un indice d'octane de 106. On peut même n'utiliser que du méthanol en modifiant le moteur(réchauffement du circuit d'admission, surpression dans le circuit d'alimentation). Le faible rapport volumétrique carburant/ carburant (6 pour le méthanol contre 14 pour l'essence) conduira à des départs à froid difficiles. De plus le pouvoir calorifique est deux fois plus faible que celui de l'essence.

.../...

Cependant les gains à attendre en matière de pollution sont très importants (- 75 % co, - 95 % no, pas de plomb tétraéthyle).

On peut dire la même chose du moteur à hydrogène aux dires des promoteurs de cette technique (Université d'Oklahoma CENG) : il peut fonctionner avec un mélange hydrogène-essence ou avec l'hydrogène seul. La pollution de ce moteur sera nulle (exception faite des oxydes d'azote formés lors de l'explosion). Le pouvoir calorifique reste faible (8,7 K cal /cm3 contre 30,9 pour l'essence).

Mais le principal problème reste le stockage de l'hydrogène sur la voiture (cf. § II-3-1 c).

Bien qu'il soit encore trop tôt pour avoir des résultats significatifs en matière de performances on peut cependant prévoir que le rendement effectif maximum ne sera pas très différent de celui qu'on peut obtenir avec le moteur à essence actuel : en effet comme on le sait le principe du moteur à combustion interne n'est guère favorable du point de vue rendement.

b) les moteurs polycarburants : (moteur à vapeur, moteur Stirling, turbine à gaz) ces moteurs présentent l'avantage de pouvoir brûler n'importe quel combustible. De plus ils présentent des avantages très importants en matière de pollution et de bruit. Il s'agit cependant en général de moteurs lourds et / ou encombrants.

Les recherches sur le moteur à vapeur ont consisté à remplacer l'eau qui a de graves inconvénients (lubrification, gel) par un liquide organique. L'adaptation à l'automobile implique de nombreux auxiliaires de sorte que l'encombrement et le poids resteraient un handicap sérieux ainsi que le long délai de mise en route du moteur. Le faible rendement du moteur et sa consommation forte sur route compromettent son adaptation à l'automobile.

Le principe de la turbine a été largment utilisé dans l'aviation et des études sérieuses d'adaptation à l'automobile ont été faites. Mais cela ne va pas sans poser de sérieux problèmes : le rendement n'est correct qu'à condition de récupérer les calories à l'échappement ce qui implique

.../...

un échangeur lourd encombrant coûteux. La multiplicité des problèmes qui se posent encore (bruit au ralenti, consommation en ville, technologie coûteuse de la turbine, faible nervosité) ne permet pas d'espérer un grand développement si ce n'est peut être sur les véhicules industriels.

Le moteur Stirling semble être le moteur polycarburant qui a le plus d'avenir. Le principe du moteur Stirling est connu depuis 1816, mais des travaux récents (Chilips, GM, Man) ont permis d'améliorer le moteur : le fluide de travail qui reste à l'état gazeux, est chauffé par un brûleur externe puis refroidi par un radiateur ventilé par l'air ambiant. La pression du fluide s'applique à des pistons qui entraînent des villebrequins. La présence entre les deux chambres d'un régénérateur qui joue le rôle " d'éponge à chaleur " permet un bon rendement (35 - 40 % au lieu de 25 % pour le moteur à combustion interne). S'il s'agit d'un moteur très intéressant du point de vue pollution et énergie (polycarburant à bon rendement), son poids et son encombrement importants ainsi que son coût élevé en limite les chances de développement.

De récents progrès, dans la métallurgie en particulier, permettent à nouveau le développement de l'accumulation cinétique. Le principe est ancien : il a été utilisé dans les mines et plus récemment, en 1950, les Suisses ont lancé un autobus propulsé par un volant d'inertie. On a déjà parlé de ce type d'accumulation qui est un des moyens de réaliser l'hybridation mais jusqu'à présent l'énergie emmagasinée n'avait jamais été suffisante pour qu'on puisse voir dans le volant autre chose qu'un complément énergétique. Les progrès récents ont consisté à utiliser des alliages à haute résistance mécanique mis au point pour la conquête de l'espace et à placer le volant sous vide afin de diminuer les pertes par frottement (cf. [52], [53]) (1). Il est certain qu'il s'agit d'une motorisation totalement propre. Cette technique peut s'adapter à n'importe quel contexte énergétique puisqu'il suffit de recharger le volant avec un moteur extérieur électrique, thermique etc.... Bien qu'il soit trop tôt pour avancer des chiffres, certains experts estiment que l'autonomie de ce système est importante (de 200 à 300 Km) et que son rendement est meilleur que celui des moteurs à combustion interne [54].

.../...

---

(1) Deux trolleybus fabriqués par Loocheed et fonctionnant suivant ce principe vont rouler à San Francisco à partir de l'an prochain.

Cette deuxième partie nous a permis de faire un point rapide de toutes les techniques alternatives à la voiture actuelle. Nous en avons tiré deux conclusions principales :

- d'une part le V S U n'est pas la panacée universelle comme ses défenseurs le prétendent - Le développer dès maintenant serait une erreur (2)
- d'autre part l'hybridation semble être un principe à retenir étant donné qu'il permet des économies d'énergie substantielles et qu'il se présente comme un dénominateur commun à tous les types de générateurs d'énergie nouveaux.

L'étude rapide de ces générateurs d'énergie ne permet pas de retenir une filière qui s'impose de par ses performances.

L'objet de la 3ème partie sera d'éclairer le choix des filières et de donner des idées générales sur la stratégie de développement de ces techniques innovantes.

.../...

---

(2) Précisons encore qu'on parle du V S U et non du principe d'une spécialisation de la vocation de l'automobile; il semble cependant qu'on ne peut envisager une spécialisation sans une politique de transport et d'urbanism volontaire et à long terme.

3ème Partie

Stratégie de Développement

de la voiture particulière

Il n'est pas question de prévoir quelle technique s'imposera dans les trente ans à venir. Ce n'est guère possible et de, toutes façons tel n'était pas le but de cette étude. Un des buts que peuvent s'assigner les Pouvoirs Publics en matière automobile peut consister à orienter le développement futur de la voiture particulière dans une direction compatible avec d'autres aspects d'une politique d'aménagement. C'est ce que nous allons analyser ici. Comme nous l'avons vu, aucune technologie nouvelle ne s'impose d'elle-même. Les pouvoirs publics devront donc commencer à déterminer à partir de leurs objectifs initiaux (analysés en 1) un certain nombre de critères de choix concrets (chapitre III -1-). Dans un deuxième chapitre nous étudierons quelques aspects importants d'une éventuelle stratégie de développement de la voiture particulière. En guise de conclusion nous donnerons quelques indications sur le rôle que pourraient jouer les Pouvoirs Publics dans une telle stratégie.

III - 1 Les Critères de choix

Si les Pouvoirs Publics sont amenés à développer une alternative à la voiture particulière, ils devront choisir de privilégier un ou plusieurs modes de propulsion. Ce choix sera guidé par un certain nombre de critères. La question énergétique est primordiale, c'est pourquoi nous reviendrons sur elle au § III-1-1 (on sera amené à faire quelques redites que le lecteur voudra bien excuser) les performances sont très importantes aussi puisqu'elles déterminent le type d'utilisation du véhicule (cf III-1-2) . En rajoutant quelques autres critères, nous déboucherons enfin sur un tableau comparatif des diverses filières.

III - 1 - 1 - Les sources d'énergie primaire

Nous avons analysé au chapitre I-3 comment on pouvait poser le problème énergétique pour l'automobile. On a constaté qu'on se trouverait à long terme en face d'une pénurie vraisemblable de pétrole. Il est trop tôt cependant pour écouter l'hypothèse (moins probable certes) d'une abondance d'hydrocarbures pendant encore plus d'un siècle : c'est pourquoi il n'est pas possible de rejeter d'emblée le moteur thermique actuel ("dépollué") ou la pile à hydrocarbures qui peuvent devenir des techniques d'avenir dans cette seconde hypothèse.

.../...

Si on se place dans la première hypothèse, il est nécessaire de développer à long terme une technique alternative basée sur une énergie autre que le pétrole (recensée au chapitre II - 3) et nous allons voir en quoi ces énergies primaires sont compatibles avec ce contexte énergétique global.

On étudiera ensuite comment se traduira la préoccupation de lutte contre les gaspillages énergétiques.

a Aspect qualitatif : Les 20 années à venir se caractériseraont en France par la généralisation de l'électricité d'origine nucléaire. Les centrales nucléaires doivent fonctionner en continu et à régime pratiquement constant afin de limiter au maximum les risques et d'obtenir un rendement correct. Cela impose d'utiliser les centrales nucléaires comme centrale de base.

La flexibilité de l'offre de courant sera donc beaucoup moins grande que maintenant et il sera nécessaire de répartir la demande plus uniformément : - soit en incitant la consommation aux heures creuses
- soit en "stockant de l'énergie électrique".

Une solution de stockage de l'électricité consiste évidemment à la transformer en hydrogène (cf. [49],[50],[55],[56]).

Pour obtenir l'hydrogène, on peut recourir à l'électrolyse de l'eau. Cette solution est cependant peu rentable étant donné que le rendement de la transformation est faible. C'est pourquoi on fonde beaucoup d'espoirs sur le crackage de l'eau à haute température en utilisant directement la chaleur produite par le réacteur. Des progrès récents ont permis de réaliser la décomposition de l'eau à basse température (730° C) par le procédé Mark I (Euratom Ispra). D'autres procédés sont étudiés et visent à réaliser la décomposition à plus basse température par le biais d'une succession de cycles chimiques utilisant des produits non polluants et non corrosifs.

Les avantages de l'hydrogène sont énormes : suppression de la pollution par les basses calories non récupérées, amélioration du rendement à la production (60 %) possibilité de stockage sous forme liquide

.../...

ou gazeuse, transport facile par pipe line , absence de pollution à la combustion, production simultané d'oxygène utilisable dans les procédés de dépollution, énergie massique élevée...

Il n'est donc pas étonnant que le nombre de spécialistes attendent un développement très important de l'hydrogène tant pour des usages domestiques qu'industriels.

Si l'avenir de l'hydrogène ne fait aucun doute le seul frein vraisemblable est d'ordre économique. Plus de 80 % de l'hydrogène actuel est produit à partir des hydrocarbures. Dans ces conditions la calorie " hydrogène " vaut 3,5 fois la calorie " fuel ". Si on produisait l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau, la calorie "hydrogène" vaudrait 8 fois celle du fuel [49].

On peut escompter une amélioration des performances des centrales nucléaires et de l'électrolyse. De plus les rendements escomptés pour les craquages de l'eau à haute température sont voisins de 85 à 90 %. Mais il est encore trop tôt pour chiffrer le coût de cette calorie " hydrogène ". Si le coût de l'hydrogène risque de rester supérieur au coût du fuel et du gaz, il sera par contre très compétitif par rapport à l'électricité puisque les pertes de transmission et distribution sont infimes [55]. L'hydrogène a donc sa place parmi les énergies de substitution.

L'hydrogène présente cependant deux graves inconvénients qui risquent de gêner le développement de l'hydrogène pour certaines applications : sa faible densité et son inflammabilité importante.

Ainsi bien que l'énergie massique de l'hydrogène soit importante son énergie volumique à l'état liquide reste 4 fois plus faible que l'essence. Il se pose en particulier de délicats problèmes de stockage à bord de véhicules: il est pratiquement impossible de le conserver sous forme liquide (pb de [illegible]) ou sous forme gazeuse (taille des réservoirs). Quant aux hydrures, outre leur prix et leur cinétique chimique délicate leur énergie massique reste dix fois plus faible que l'essence.

.../...

L'autre problème, le plus grave, est surement celui de la sécurité : le mélange stochiométrique est très étendu (de 4 % à 75 %), une énergie infime est suffisante pour l'enflammer (une cause probable de l'incendie du " Hindenburg " en 1937 est une étincelle d'énergie statique après un orage). De plus l'hydrogène est inodore. Bien que diffusant très rapidement, on peut penser qu'il ne sera possible d'assurer la sécurité que pour des usages industriels (1).

Le méthane et le méthanol peuvent aussi jouer un rôle : on peut les obtenir directement, par distillation (de la houille ou des hydrocarbures), par synthèse (gaz de synthèse) ou par incinération des ordures ménagères.

Dans le contexte de pénurie de produits pétroliers on doit analyser plutôt les 3 derniers procédés. Le méthanol présente l'intérêt de pouvoir être fabriqué sans faire appel aux combustibles fossiles : il n'est pas envisageable d'obtenir du méthanol ou du méthane à partir du charbon ou des hydrocarbures. Le principal problème qui se pose consiste à obtenir un radical carboné. On peut synthétiser directement à partir du gaz carbonique et d'hydrogène; l'hydrogène provenant de centrales nucléaires ou d'électrolyse de l'eau, le gaz carbonique de l'eau ou du carbonate de calcium. Ces procédés se sont révélés très chers et ont été abandonnés. Mais il est encore possible de fabriquer le méthanol à partir de déchets de tous ordres. Des calculs ont en effet montré que le méthanol produit par les incinérateurs, alimenté par les $1,3 \cdot 10^{11}$ kilogrammes d'ordures produits annuellement aux Etats-Unis couvrirait 8 % des besoins en carburant automobile de ce pays.

De multiples utilisations du méthanol sont envisageables, mais risque de s'élever un obstacle majeur : il n'y aura pas assez de méthanol. Le méthanol est déjà utilisé en chimie et son utilisation comme substitut de l'essence impliquerait des investissements énormes. En conséquence

---

(1) Dans ces conditions l'hydrogène jouerait le rôle d'intermédiaire entre la centrale nucléaire fonctionnant en continu et l'utilisateur consommant irrégulièrement de l'électricité fabriquée à partir de l'hydrogène dans des piles à combustible de haute puissance. Il serait utilisé aussi directement dans les industries grosses consommatrices d'énergie.

le méthanal se présente plutôt comme un carburant de complément que comme un carburant de substitution.

Que penser alors de la compatibilité des techniques exposées au § II - 3 dans ce contexte énergétique des 30 prochaines années : - générateurs électriques : Les divers accumulateurs électriques permettent une recharge nocturne contribuant à un étalement de la consommation d'électricité (on estime en effet que la consommation en électricité pour les seuls besoins des véhicules aurait représenté en 1971 environ 25 % de la consommation totale d'électricité en supposant que la seule source d'énergie disponible est l'électricité).

Il est clair qu'il en est de même de la pile air/zinc puisque la régénération de la poudre de zinc peut se faire aux heures creuses.

Parmi les piles à combustible, seule la pile directe à hydrogène semble compatible. La pile indirecte ou la pile au méthanol seront nécessairement limitées par manque de carburant.

- générateurs mécaniques : Pour les mêmes raisons que ci-dessus, le moteur à hydrogène a plus d'avenir que le moteur à méthanol. Les moteurs polycarburants et le moteur à accumulation cinétique présentent l'avantage de pouvoir fonctionner avec n'importe quel carburant et donc s'adapter aisément aux aléas énergétiques (2).

On vérifie donc que les modes de propulsion alternatifs sont compatibles pour la plupart avec le tournant énergétique de la France.

b) Aspect quantitatif : comme nous l'avons indiqué au chapitre I - 3 la lutte contre les gaspillages sera la préoccupation première des décénnies à venir.

Les transports seront parmi les premiers visés par ces mesures d'économie. Une étude américaine [54] montre en effet que le rendement énergétique dans les transports est de 25 % alors qu'il est de 75 % pour les autres utilisations. Les pertes énergétiques dues au transport représentent plus du tiers des pertes énergétiques (y compris les pertes dans la production et le transport de l'électricité).

.../...

---

(2) Encore faudrait il vérifier que les autres sous systèmes (brûleur, réservoir...) sont facilement adaptables !

L'importance de ces pertes provient en grande partie du mauvais rendement de la voiture automobile (3). Bien que le moteur thermique ait été sensiblement amélioré depuis 1900 (le rendement intrinsèque est passé de 22 à 25 %) la consommation des véhicules par kilométre n'a cessé d'augmenter depuis 1940 [54].

Dans les années à venir un effort important devrait être fait dans le but d'améliorer le rendement de la motorisation.

Mais en fait le véritable paramètre à prendre en compte est le rendement global de motorisation tenant compte de la production de l'énergie à partir des sources d'énergie primaire, de la motorisation, de la transmission, mais aussi des conditions générales de transport. Ainsi les gaspillages en ville sont importants avec le moteur à 4 temps à cause du fonctionnement au ralenti dans les encombrements : on estime que le régime urbain divise par 2 le rendement énergétique. La propulsion électrique permet de ramener à 10 % la perte de rendement puisque le moteur ne consomme rien à l'arrêt (4).

La figure III - 1 donne les rendements globaux en régime urbain des différents modes d'utilisation du pétrole brut dans les transports. Ces données seraient à compléter puisqu'elles ne présentent pas certaines techniques (en moteurs polycarburants) ou même certaines énergies primaires (hydrogène d'électrolyse ou nucléaire, méthanal...). Ce concept de rendement global est délicat à utiliser puisque il est difficile de comparer par exemple le rendement de production de l'hydrogène de synthèse et de l'hydrogène "nucléaire". De même comment évaluer le rendement de production de méthanol à partir des ordures ménagères ? Malgré ces difficultés il semble que le rendement global de la propulstion soit un critère de choix particulièrement important.

III - 1 - 2 - Les performances

Les performances sont un critère de choix très important, tant pour l'usager que pour les Pouvoirs Publics. Celles-ci se mesurent par des chiffres très divers et souvent peu comparables : autonomie du véhicule

.../...

(3) Moteur thermique 25 % - turbine à gaz 35 % - moteur diesel 40 % - pile à combustible 60 %, moteur électrique de 60 à 90 % ([54])

(4) Ces chiffres sont tirés d'une étude effectuée aux Etats-Unis et de la communication de la CGE au récent congrès de Washington ([18])

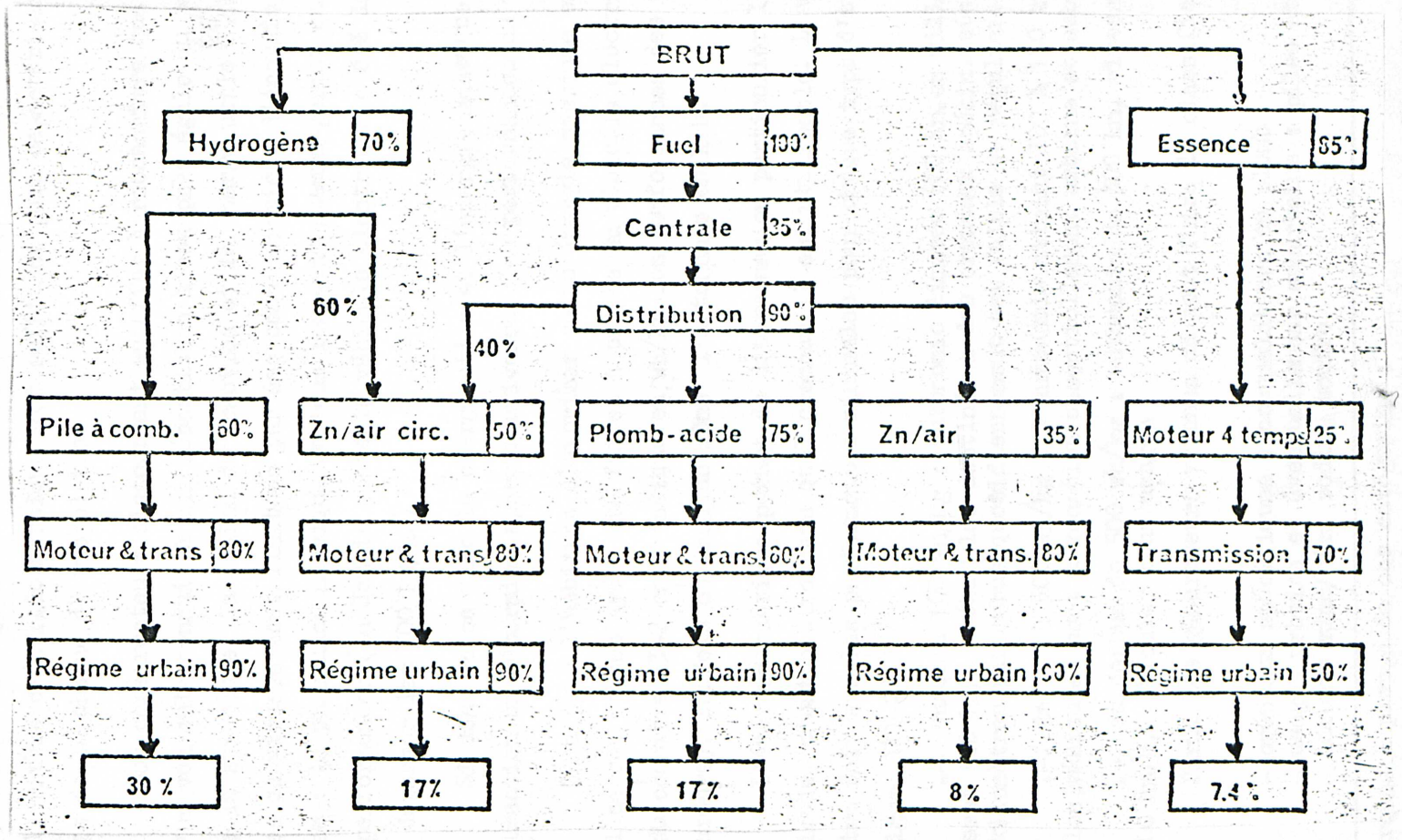


FIGURE III - 1 - RENDEMENTS GLOBAUX POUR DIFFERENTS MODES DE TRANSFORMATION DE L'ENERGIE (18)

en ville, à telle vitesse et avec une telle charge, autonomie à vitesse constante, accélérations jusqu'à une vitesse donnée ... En fait il semble que le seul critère d'énergie massique soit suffisant pour caractériser les performances de la chaine de propulsion.

Les constructeurs s'accordent en effet à reconnaître que l'optimisation d'un véhicule conduit à une répartition à peu près égale du poids total entre la structure, la chaine de traction et la charge utile [26]. Les performances en vitesse sont limitées par des considérations d'énergie et non de puissance : la puissance massique de tous les générateurs permet en effet de bonnes performances (La Jamais contente véhicule électrique a été le premier véhicule à dépasser les I00 km/h.)

Si donc on se fixe la charge utile et l'énergie massique de la chaine de traction on détermine approximativement les performances du véhicule.

On a pris l'habitude d'exprimer cette énergie massique en wh/kg, l'essentiel de ces études ayant été faites à propos du véhicule électrique (au cours du chapitre II-2 on a indiqué en wh/kg les performances des principaux générateurs). Parfois on indique même l'autonomie en kwh.

L'énergie massique permet de déterminer en particulier l'autonomie du véhicule, c'est à dire dans quel creneau il est utilisable. L'accord semble s'être fait sur les performances minimales pour chaque type d'utilisation (cf figure III-2) (1)

.-. jusqu'à 100 wh/kg : autonomie limitée (80 Km en ville) à faible vitesse (60 km/h) véhicules destinés à des créneaux spécialisés où le nombre de kilomètres parcourus quotidiennement est faible et régulier.

.-. de 100 à 500 wh/kg : l'autonomie atteint I00 à 150 km (à 90 km/h), les véhicules sont à vocation essentiellement urbaine et suburbaine

.-. au dessus de 500 wh/kg : autonomie de 300 km, vitesse supérieure à I00 km/h, véhicules tous usages

Parmi les générateurs retenus on peut faire la classification suivante :

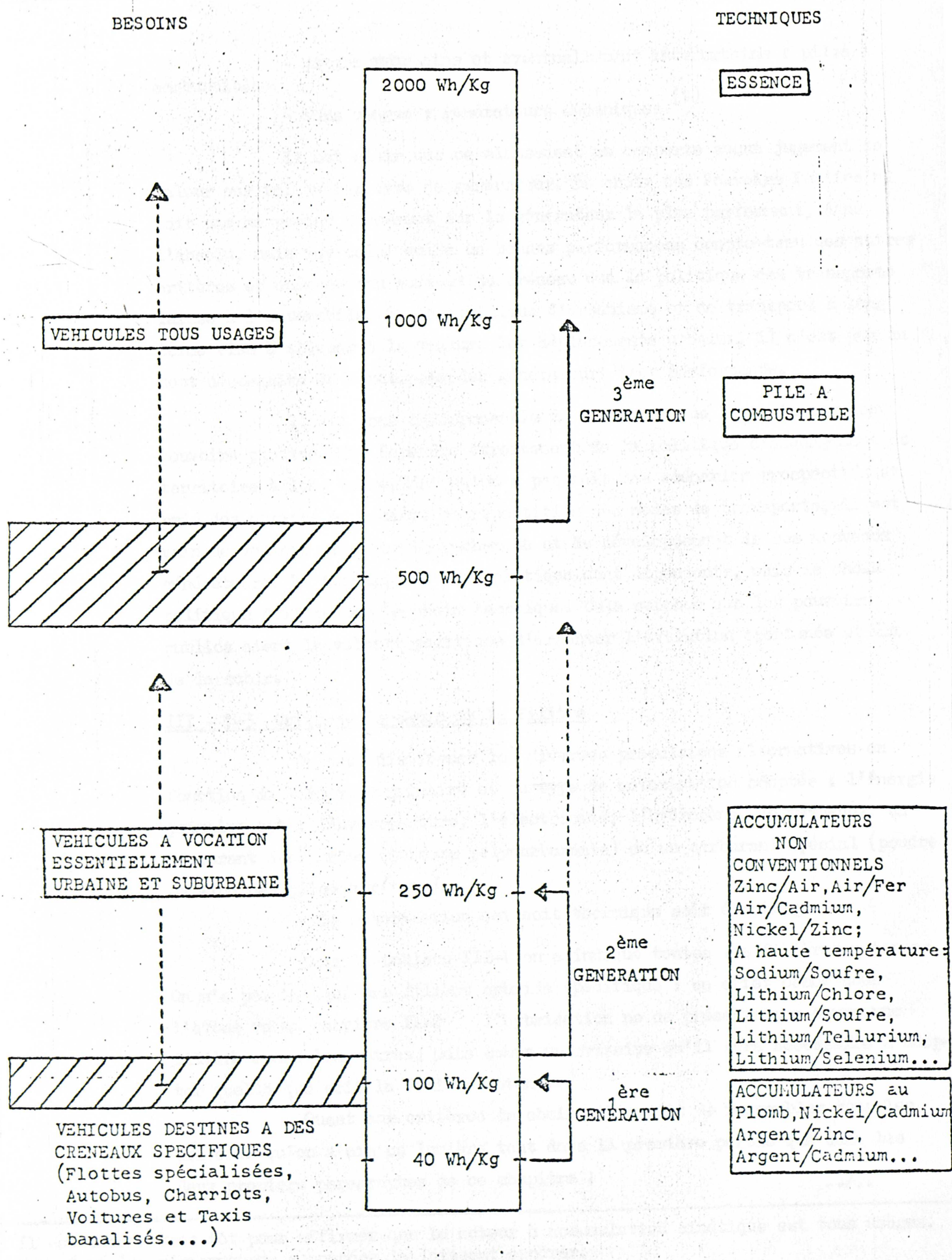
- créneaux spécifiques : accumulateurs au plomb
- usages urbains et éventuellement suburbains : piles et accumulateurs zinc/air, sodium soufre

../..

(1) On doit faire trois remarques à propos de ces catégories :
- certains experts estiment qu'il est possible d'obtenir dès maintenant de bien meilleures performances à condition d'adapter le véhicule à la propulsion électrique (chassis spécial, répartition des masses, pneus) Dans ces conditions 12 kw suffiraient là où il en faut 20 actuellement. Le véhicule électrique à accumulateur au plomb aurait donc une vitesse de pointe de I00 km/h et une autonomie de I50 km. (dans les mêmes conditions)
- l'autonomie est un critère incomplet puisqu'il ne tient pas compte des possibilités de recharge rapide. La pile au zinc, la pile à combustible ou les moteurs à combustion externe permettent une recharge immédiate, ce qui étend leurs possibilités
- l'hybridation permet une amélioration certaine des performances.

FIGURE III 2

ENERGIE MASSIQUE, BESOINS ET TECHNOLOGIES



- usages suburbains et éventuellement interurbains : piles à combustibles

- tous usages : générateurs mécaniques (1)

Il est clair que ce classement ne comporte aucun jugement de valeur sur tel ou tel type de générateur. Le choix des Pouvoirs Publics ne doit pas se porter forcément sur le générateur le plus performant, dans l'absolu, mais sur celui qui a de bonnes performances compte-tenu des autres critères et compte-tenu surtout du créneau que la politique des transports laisse à l'automobile. Si la politique d'urbanisme et de transport à long terme vise à allouer à la voiture les déplacements urbains, il n'est pas du tout nécessaire de développer des générateurs très performants.

Il est donc indispensable de remarquer que le choix par les pouvoirs publics doit dépendre étroitement de la politique d'aménagement du territoire à long terme. Tant qu'on a pas fait des scénarios prospectifs et pris des options en matière de répartition des modes de transports, il est vain de vouloir orienter la recherche et le développement de ces nouveaux générateurs. La technique et la politique sont dépendants, mais le choix politique doit guider le choix technique. Cela suppose que les pouvoirs publics aient la volonté politique d'orienter l'évolution spontanée et non de la subir.

III - 1-3 Critères de choix de la filière

On peut distinguer les diverses propulsions alternatives en fonction de l'énergie primaire et du type de motorisation adoptés : l'énergie primaire est : l'hydrocarbure, l'électricité, l'hydrogène, le méthanol, un carburant quelconque (moteurs polycarburants) ou un carburant spécial (poudre de zinc des piles air/zinc).

- La motorisation est soit thermique soit électrique

Dans le tableau III-1 on a indiqué toutes les filières retenues On n'a pas indiqué une filière hybride spécifique : en effet comme nous l'avons vu au chapitre II-2 l'hybridation ne se présente pas comme une filière comme les autres, mais comme un principe qu'il sera nécessaire d'adopter quelle que soit la filière retenue.

Quant aux critères de choix, il suffit de rassembler tous les critères qu'on a mis en lumière tant dans la première partie que dans les deux premiers paragraphes de ce chapitre .

../..

(1) Il est encore trop tôt pour affirmer que le moteur à accumulation cinétique est tous usages. Cependant les performances annoncées le laissent espérer.

- critères énergétiques : on peut résumer les développements du § III-1-1 par trois critères : abondance quantitative de l'énergie, peut-on en disposer facilement ? Ne risque-t-il pas de se poser des problèmes de pénurie ?

- rendement du générateur énergétique et rendement global .

- critères de transport : Ces critères résument les performances de motorisation du point de vue transport : énergie massique du générateur et type d'utilisation, encombrement et poids spécifique.

- critères de pollution : dans la mesure du possible on essaiera de donner les performances relatives à chaque polluant et au bruit ,(le moteur actuel étant pris comme référence.)

On rajoute d'autres critères qui nous ont paru important et en particulier les conditions de sécurité. Il est délicat de donner des critères économiques de coût. On dispose de peu de renseignements tant sur les coûts de développement que sur les prix de prototype et ceux d'une éventuelle série . Une analyse de coût devrait faire l'objet d'une étude approfondie. On donnera seulement une idée du délai de grande série de pise au point sans se faire d'illusions sur les chiffres avancés. Par contre la nécessité d'infrastructures nouvelles semble un critère important . En effet certaines filières imposent la mise en place d'infrastructure spécifiques de production et de distribution d'énergie primaire. En ce sens ces filières permettront moins de souplesse d'adaptation et seront sans doute plus difficiles à développer.

Enfin nous avons indiqué pour chaque filière les firmes françaises intéressées. Il convient en effet de raisonner dans un contexte de concurrence internationale vive, comme on le verra au § III-2-3.

Le tableau III-1 se présente donc comme une approche sommaire de l'analyse multicritère que l'on doit faire pour déterminer une stratégie de développement de la voiture particulière .

Il est bien évident qu'il ne s'agit pas de conclure à partir de ce tableau. Il apparait en effet qu'aucune filière n'est idéale au vu des critères retenus. Il revient aux Pouvoirs Publics de décider les critères qui seront prépondérants : énergie, transport, environnement, sacurité ....

Ce choix est un dernier ressort une décision politique que les études techniques se contentent d'éclairer.

TABLEAU III - 1 COMPARAISON DES DIVERSES FILIERES

Energie primaire	Hydrocarbures		Electricité		Hydrogène		Méthanal		Autres Polycarburants				
Motorisation	Thermique	Electrique	Electrique		Thermique	Electrique	Thermique	Electrique		Thermique ext	Thermique ext	Turbine	cinétique
filières / critères	Thermique à hydro-carbure	Elec. à piles à hydrocarbure	Elec. à accus en Pb	Elec. à accus air/zinc	Thermique à hydro-gène	elec. à pile M2/air	Thermique au méthanal	elec. à pile méthanal/air	élec. à pile air/zinc	stirling	vapeur	turbine à gaz	volant d'inertie
abondance	-	-	+	+	+	+	-	-	0	+	+	0	+
rendement générateur	25 %	60 %	75 %	35 %	faible	60 %	faible	60 %	50 %	40 %	25 %	25 %	?
rendement global en ville	7,4%	30 %	17 %	8 %	faible	? 30 %	faible	30 %	17 %		faible sur route	faible en ville	?
énergie massique type d'utilisation	très élevée ts usages	élevée ts usages	très faible urbain	faible suburbain	moyenne (réservoirs de H_2) ts usages	ts usages	élevée ts usages	moyenne ts usages	faible suburbain	élevée ts usages	moyenne suburbain	moyenne interurbain	? ts usages
Pollution	défavorable (1)	favorable	très favorable (0)		très favorable (0,1)		défavorable		favorable	très favorable (0,1)	très favorable (0,1)	favorable (0,3)	très favorable (0)
Bruit	défavorable	favorable	favorable		?	favorable	défavorable	favorable	favorable	favorable	favorable	bruyant au ralenti	?
Sécurité			danger de l'électrolyse en cas de choc		danger important d'explosion			dégagement de C O	danger de l'électrolyse				danger du volant en cas d'accident
Délais de grande série	0	15 ans	5 ans	10 ans	10-15 ans	15 ans	5 ans	15 ans	5-10ans	15 ans	15 ans	10 ans	?
Infrastructure nouvelle	Néant		dispositifs de rechange		Production du méthanal		Régénération et distribution de poudre de zinc		néant	néant	néant	néant	dispositif de rechange du volant
Firmes sur la question	toutes	CFR(?)	EDF Renault	Citroën	CENG	IFP		Peugeot Alsthen	CGE	Aucune	Bertin	Aucune	Aucune

III - 2. Eléments d'une stratégie de développement.

En supposant que les pouvoirs publics aient la volonté politique d'infléchir l'évolution naturelle de l'automobile, à quelles contraintes sera soumis le développement de la ou des filières retenues comme étant les meilleures compatibles avec la politique d'aménagement du territoire pratiquée?

Ces contraintes sont de deux types :

- il ne s'agit pas de changer le seul générateur d'énergie, il est nécessaire de repenser l'ensemble du véhicule,
- le véhicule alternatif ne pourra pas s'imposer d'emblée sur le marché de consommation de masse. Il devra donc se développer suivant un processus spécifique.

Les développements qui suivent concernent autant le principe de l'hybridation que les générateurs alternatifs.

III - 2-1. Intégration du véhicule.

Si les générateurs ont été beaucoup étudiés il n'en est pas de même du reste de la chaîne de traction (moteur, commande). Cependant, afin d'avoir des performances satisfaisantes, les véhicules munis d'une propulsion non conventionnelle doivent être adaptés pour tenir compte des caractéristiques des diverses filières.

a) Mise au point de la chaîne de traction : certains experts estiment que les véritables problèmes du véhicule alternatif ne se situent pas au niveau du générateur d'énergie, mais en aval dans la chaîne de traction, au niveau du moteur et de la commande. Ce problème est particulièrement important dans le cas de la propulsion électrique. Etant donné l'importance des filières électriques, il est nécessaire de s'arrêter un instant sur ces difficultés qui ne sont guère différentes de celles qu'on rencontre avec les autres types de moteur (1).

.../

---

(1) - Rappelons de plus qu'on a retenu le principe de l'hybridation. Or l'hybridation électrique (la plus intéressante, semble-t-il) fait appel à un moteur et une commande électriques.

S'il existe de nombreux types de moteurs pouvant théoriquement convenir à l'automobile (1), aucun n'est produit dans des conditions satisfaisantes : : il s'agit en effet en général de moteurs robustes, lourds, construits en petite série, donc chers. Il est nécessaire de les alléger (par exemple en augmentant la vitesse de rotation des moteurs [30]). Mais il s'agit surtout de baisser les prix de revient : or le bobinage des moteurs actuels de cette taille se prête mal à une production de série (ce n'est pas vrai pour les moteurs d'électroménager). De plus étant donné la quantité de cuivre qu'on emploierait pour la construction en grande série de moteurs électriques, on doit prévoir la récupération du cuivre, ou l'utilisation d'un autre conducteur (bobinage en aluminium par exemple) (2). Ainsi il ne s'agit pas d'une simple adaptation des moteurs électriques actuels, mais de la définition d'un nouveau type de moteur.

La commande du véhicule n'est pas encore résolue de façon satisfaisante. A quel niveau cette commande s'effectuera-t-elle ? Au niveau du générateur (contrôle du combustible admis), au niveau du moteur (du moins lorsque les 2 fonctions sont distinctes). Lorsque cela est possible il semble préférable de ne contrôler au niveau du moteur qu'une partie de la puissance, le reste étant contrôlé par la quantité de combustible admis. Cette solution plus intéressante sur le plan énergétique nécessite cependant des asservissements complexes.

Dans le cas de la propulsion électrique le choix est loin d'être fait entre les différents types de commande : hacheur (poids, bruit) gradateurs ou onduleurs (complexité, poids) suivant le type de moteur (cf. l'intervention de M. Benezech dans [26]).

b) Intégration du véhicule : Les véhicules actuels sont mal adaptés aux caractéristiques des filières nouvelles, différentes de celles du moteur à combustion interne. Il s'agit en général, de chaînes de traction lourdes et encombrantes. Ainsi l'hybridation impose deux "moteurs" au lieu d'un seul.

.../

---

(1) - M. Benezech recence dans [26] une vingtaine de moteurs électriques adaptés à l'automobile.

(2) - L'utilisation de la propulsion électrique peut même mettre en cause le principe de l'unicité du moteur : certains prototypes sont déjà munis d'un moteur par roue (cf. M. Benezech dans [26]).

La filière électrique au plomb nécessite un poids important de batterie. Les filières à hydrogène imposent un réservoir très bien calorifugé et protégé (pour l'hydrogène liquide) ou bien un volume important et facilement accessible pour les hydrures etc... De même il est nécessaire de repenser la répartition des divers composants pour obtenir des conditions de sécurité primaires et secondaires satisfaisantes.

Certaines caractéristiques des filières permettent de s'affranchir de contraintes propres au moteur à combustion interne. Ainsi avec la propulsion électrique on peut réduire dans de fortes proportions les pertes aérodynamiques, ainsi que celles par roulement, du fait que l'on peut nettement améliorer le C_x par un bon carénage du dessous du véhicule puisqu'on n'est plus gêné par les impératifs thermiques et que les performances des véhicules permettent l'emploi de nouveaux pneumatiques dont la traînée est nettement diminuée. Certains experts estiment que ces seules adaptations permettent d'augmenter les performances des véhicules de plus de 50 %.

Il apparaît donc que le développement du véhicule alternatif dépasse de loin la mise au point du seul générateur. Il est nécessaire de repenser la globalité du véhicule afin de l'adapter aux caractéristiques des diverses filières et afin d'obtenir des performances satisfaisantes. Il s'agit donc d'une innovation fondamentale dont le développement se fera difficilement en ce sens qu'elle se présente comme un véhicule entièrement différent.

III - 2-2. Introduction du véhicule dans le marché.

Le véhicule alternatif, est une innovation de rupture importante. Or comme nous l'avons vu au chapitre I - 4, l'industrie automobile a du mal à promouvoir des innovations de rupture par l'intermédiaire du marché de consommation de masse. Les défenseurs du V S U s'en sont bien aperçus et ont proposé de créer artificiellement le marché par le jeu réglementaire et tarifaire. Les arguments que nous avons employés pour rejeter le V S U nous conduisent à rejeter aussi la stratégie d'innovation qui consisterait à créer artificiellement un marché de consommation de masse (cf. II - 1). Et pourtant il est nécessaire de développer en champ ouvert les diverses techniques retenues, comme le notait M. FRYBOURG aux Journées de la R G E [26] : ceci permet entre autre de mettre au point un matériel complexe, de tester sa friabilité et la réaction des usagers face à l'innovation. Dans ces conditions,

comment réaliser le développement de ce nouveau véhicule ou plutôt de cette nouvelle technique de propulsion ?

Puisqu'il n'est pas possible d'introduire directement l'innovation dans le marché de consommation de masse, la solution semble être de l'introduire dans quelques créneaux spécifiques où l'expérimentation est réalisable et utile.

Ces créneaux devront satisfaire au moins trois critères :

- le prix de motorisation est faible dans le prix du véhicule : en effet, à performances égales, l'innovation est à priori plus chère (on a donné quelques idées à propos de la pile à combustible). Il est donc nécessaire que le surcoût relatif dû à l'innovation soit le plus faible possible.

- l'encombrement et le poids de la motorisation ne gênent pas : à ses débuts l'innovation sera à priori plus lourde et plus encombrante que le matériel qu'elle remplace. Il ne faut pas que ces caractéristiques détériorent complétement les performances du véhicule.

- la surveillance et l'entretien sont faciles et réguliers : comme le montre l'expérience d' E D F [27] , à ses débuts le véhicule innovant est peu fiable et nécessite une surveillance et un entretien important. Ceux-ci ne semblent possibles que dans le cas de flotte de véhicules. Notons que dans le cas où la filière de propulsion nécessite une infrastructure de recharge en énergie primaire nouvelle (accumulateur, pile air/zinc, pile à combustible hydrogène/air) il est possible de développer sur une grande échelle les "stations services". L'alimentation en énergie ne peut se faire à l'origine que dans quelques points, par exemple dans les garages de flottes spécialisées.

Quand on essaie de déterminer les créneaux répondant à ces trois critères, on retombe en gros sur les créneaux retenus par l' E D F ([30] , [26]). Le choix d'E D F en 5 classes était semble-t-il essentiellement guidé par la nécessité de tenir compte des performances des batteries au plomb. Ce n'est pas ce souci qui guide notre choix, mais chaque classe retenue par l'E D F répond plus ou moins aux critères ci-dessus.

.../

Rappelons succinctement les cinq classes retenues [26] :
" Classe A : Véhicules pour zones réservées à faible vitesse 30 km/h et faible autonomie (30 à 40 km) pour usines, entrepôts, résidences, aéroports, parcs publics, etc..., et pouvant également servir pour le déplacement d'handicapés physiques.

Classe B : Véhicules de déplacement urbain pour une ou deux personnes avec petits bagages; vitesse nettement supérieure pouvant atteindre 60 km/h et l'autonomie de 60 à 80 km.

Classe C : Véhicules commerciaux de service ou de petite livraison, toujours à deux places pouvant accepter de 200 à 350 kg de charge utile à des vitesses maximales du même ordre et même un peu supérieure à celles des véhicules de la classe B, soit de 60 à 80 km/h et une autonomie de 80 à 100 km.

Classe D : Camionnettes de livraison urbaine de 800 à 1200 kg de charge utile ou microbus de huit à dix places pouvant faire office de multi taxi à la demande.

Classe E : Véhicules lourds de 2 à 4 T. de charge utile, ou minibus de transport urbain de 20 à 50 places".

On notera que la classe B ne semble pas un véritable créneau étant donné les critiques qu'on a adressées au V S U. Quant au domaine des transports en commun c'est sans doute un créneau particulièrement adapté (à condition d'avoir déjà obtenu un minimum de fiabilité). De même les classes C et E qui s'adressent à de grandes entreprises ou collectivités (E D F, P T T, Préfectures ...) permettent une gestion en flotte spécialisée qui simplifie beaucoup les expériences grâce au réseau de maintenance dense et éprouvé déjà en place.

En conclusion, les expérimentations en champ ouvert sont une nécessité si on veut améliorer les performances des diverses filières, et en particulier la fiabilité. Le développement sur le marché de consommation de masse ne pourra intervenir qu'après un long murissement technique qui

../

rapprochera la filière d'un optimum et rendrait comparables les performances de la nouvelle filière et celles du moteur à essence. Comment l'innovation pénétrera-t-elle dans le marché de masse ? Il est trop tôt pour le dire. La substitution se fera peut-être progressivement, mais il est plus vraisemblable qu'elle interviendra de façon brutale, à cause d'une offensive commerciale d'un pays étranger ou bien à la suite d'une crise économique ou politique grave comme la présente crise du pétrole. L'essentiel pour les industriels et pour le pays est de disposer alors d'une filière de remplacement qui permette de faire face à la situation nouvelle.

III - 3 Rôle de l'Etat

Arrivé au terme de cette étude, on peut se demander en guise de conclusion quelles actions sont susceptibles de jouer les pouvoirs publics.

Tout le monde d'accorde à reconnaître le rôle central de l'Etat dans les stratégies de développement de la voiture particulière : les uns voient en lui un pourvoyeur de fond, d'autres attendent des règlements, d'autres enfin espèrent des décisions draconniennes .. Avant d'étudier comment les pouvoirs publics pourront intervenir, il convient de revenir sur les raisons de cette intervention .

II - 3-1 Les raisons de l'intervention de l'Etat

Depuis toujours les pouvoirs publics sont intervenus en matière de développement automobile. Cette intervention touchait plusieurs aspects :

- aspects règlementaires par l'intermédiaire de la Direction des Routes, du service des Mines ou encore de la Délégation à la Sécurité Routière.

- aspects infrastructures : construction de routes ou d' autoroutes.

- aspects financiers : ce sont aussi bien les prêts du FDES, les dotations en capital de Renault que les taxes sur l'essence.

Mais jusqu'à présent l'action des constructeurs se déroulait dans un cadre libéral. La R.N.U.R. bien que nationalisée jouissait d'une entière liberté tant pour sa politique commerciale que pour sa politique de recherche. Différents éléments laissent à penser que dans les années à venir les rapports entre pouvoirs publics et constructeurs évolueront, la tutelle de l'Administration se renforçant progressivement .

La crise probable de l'industrie automobile, industrie stratégique qui fait vivre de près ou de loin 1/10° des actifs en France conduira les pouvoirs publics à fournir une aide financière aux constructeurs, ce qui accroitra leur dépendance.

Cette intervention de l'Etat devient indispensable si on veut développer une alternative à la voiture particulière. Nous résumons ici les principales raisons qui nous sont apparus au cours des chapitres

précédents. Il s'agit de repenser globalement le véhicule: les coûts de recherche-développement seront très importants et les conducteurs ne sont pas prêts à se lancer dans l'opération étant donné le risque inhérent à toute innovation. Les pouvoirs publics devront supporter une partie du risque et par là même ils pourront orienter les R D dans un sens conforme à l'intérêt général.

Cette intervention est indispensable aussi car le marché est incapable de tenir compte d'un certain nombre d'effets externes de plus en plus facheux : pollution, nuisances... Seuls les pouvoirs publics peuvent internaliser les coûts afférents à ces externalités.

De même, si le marché répond facilement aux problèmes conjoncturels, il rend très mal compte des problèmes structurels : c'est le cas de la pénurie d'énergie ou de la place de l'automobile dans le système de transport. C'est donc aux pouvoirs publics de prendre en compte ces phénomènes à long terme et de faire passer dans les faits les mesures adéquates.

C'est sans doute le risque économique de la concurrence étrangère qui sera la raison principale d'intervention de l'Etat. S'il a été possible de laisser les Japonais envahir le marché de l'audio-visuel, il n'est pas concevable de laisser la France dépendre d'une économie étrangère en matière automobile. Certes la France dispose d'atouts importants en ce qui concerne le véhicule traditionnel, mais est-elle en mesure de se placer dans le marché international du véhicule alternatif ? Dans ce domaine les Etats-Unis et le Japon disposent d'une avance importante:

-Etats-Unis : La General Motors a déjà construit un ou plusieurs prototypes des filières de propulsion que nous avons envisagées au chapitre III-1 (cf. [57] , [58], [59]):

- Véhicules hybrides : 512, Stirlec II, xP-883
- Véhicules électriques à batterie : 512 (plomb), Electrovair II (air/zinc) XEP-1 A (plomb et air/zinc)
- Véhicules électriques à pile : Electrovan (pile H_2/O_2)
- Moteur à hydrogène : prototypes prévu en 1975
- Moteur Stirling : Stirlec II
- Turbine à gaz : GT 309, RT X, GT-225
- Moteur à vapeur : SE 101, SE 124

Ainsi tant au niveau du générateur d'énergie primaire, de l'accumulateur que du moteur, une firme comme General Motors a une expérience déjà importante. Les autres constructeurs américains ou même d'autres firmes ont déjà effectué des recherches et construit des prototypes. S'il est peu probable

../..

qu'à court terme les E U exportent des véhicules vers la France, on peut penser cependant que l'introduction de ces techniques se fera par l'intermédiaire des filiales que les constructeurs américains ont en France, en Allemagne ou en Angleterre. Les entreprises américaines ont donc dès maintenant une forte position sur le marché potentiel du véhicule innovant .

- Japon (cf. (13)) : les recherches sont plus récentes et plus concentrées qu'aux Etats-U nis. On est cependant frappé par l'intensité des recherches sur le véhicule électrique durant ces dernières années . L'effort de l'Etat s'est concentré autour d'un projet national de Recherche et Développement du Ministère du Commerce Extérieur et de l'Industrie (MITI) nanti d'un budget de 5 milliards de gens répartis sur une période de 5 ans (1971-1975). Dès maintenant les Japonais semblent avoir résolu de nombreux problèmes de la voiture électrique : on peut considérer que les constructeurs japonais disposent de moteurs compacts adaptés à la traction automobile et que des unités dont le poids ne dépasse pas 1 kg. à 1,5 kg. par KW sont réalisables industriellement (les moteurs courants font de 6 à 8 kg par Kw).

La récupération d'énergie au freinage est au point et semble généralisée. Les recherches sont importantes sur les différents accumulateurs (plomb, air/zinc, sodium/soufre) et les performances obtenues sont satisfaisantes. Même les problèmes de carrosserie et de chassis ont été abordés et Hitachi Kasei Engineering a déjà présenté des carrosseries particulièrement adaptées à la propulsion électrique.

La structure industrielle nipponne est particulièrement adaptée pour aborder avec succès la construction du véhicule électrique. Depuis une dizaine d'années un groupe de recherche a été créé et regroupe Sony, Fuji Heavy Industries Ltd (carrosserie et châssis), et Shinho-Electric (moteur électrique et convertisseur électronique). Le lancement du projet du M I T I a contribué à rapprocher les constructeurs automobiles, les firmes de construction électrique et d'électronique. Cette concertation industrielle est un atout de poids qui laisse à penser que le Japon est d'ores et déjà prêt à entrer dans la concurrence internationale sur le véhicule innovant.

Sans minimiser les efforts des diverses entreprises qui en France se sont intéressées au véhicule alternatif, on ne peut nier que les recherches soient moins intensives qu'aux USA et moins bien coordonnées qu'au Japon. C'est donc sur ces deux points essentiellement que devra porter l'effort des pouvoirs publics.

../..

II - 3-2 Les modes d'intervention de l'Etat

On distinguera (pour simplifier) le programme d'intervention lui-même et le cadre administratif et politique dans lequel se déroule cette intervention.

Nous serons brefs sur le premier point puisqu'il s'agit de faire une synthèse des développements des deux derniers chapitres. Sur le seul plan technique auquel nous nous sommes toujours limités les pouvoirs publics devront intervenir en matière de recherche et développement afin de faire un inventaire complet des possibilités et des limites propres à chacune des filières envisageables. Ce travail technique devra se doubler d'un travail identique sur les innovations institutionnelles (politique foncière, d'urbanisation, de politique des transports). Ce travail parallèle que nous avons esquisé au § III-1-3 devrait permettre de faire le choix de quelques filières techniques et institutionnelles (2 ou 3) correspondant chacune à une politique cohérente en matière d'environnement d'urbanisation, d'énergie...) (1) . Un tel choix devrait conduire dans un deuxième temps au lancement de quelques programmes importants de recherche et développement, en insistant particulièrement sur les structures industrielles à mettre en place afin d'assurer un développement du véhicule alternatif dans de bonnes conditions. Cela implique bien entendu la mise en oeuvre d'une politique industrielle hardie où le rôle des pouvoirs publics sera primordial (2) . Il sera aussi nécessaire de mettre au point rapidement des procédures permettant les indispensables expérimentations en champ ouvert.

En définitive l'essentiel des moyens d'intervention de l'Etat dans le domaine technique existe déjà (moyens financiers, règlementaires, tutelle sur diverses entreprises).

Sans se prononcer sur les moyens de mettre en oeuvre l'innovation institutionnelle, il semble que manque gravement une coordination entre toutes les instances administratives s'occupant de ces problèmes: il s'en suit une faiblesse structurelle de l'administration à résoudre des problèmes complexes et une impossibilité à mener une réelle politique.

../..

(1) C'est semble-t-il le travail auquel s'est livré le "Groupe Saulgeot". Il serait nécessaire cependant de ne pas se limiter au véhicule électrique et aux seuls aspects techniques. Les moyens financiers ne sont pas non plus à la mesure de l'importance du but poursuivi.

(2) A ce sujet il serait très intéressant d'étudier l'exemple du Japon avec ses projets nationaux lancés par le M I T I .

Ainsi les problèmes des transports en région parisienne dépendent d'une vingtaine d'organismes administratifs ou paraadministratifs : Ministères de l'Equipement, de l'Environnement, des Finances, de l'Industrie, de l'Intérieur, Délégation à l'Energie, Datar, Préfecture de Police, Préfecture de Région, Plan, RATP, SNCF ... Aucun organisme n'a de compétence spéciale sur ces problèmes, de sorte que l'indispensable coordination se fait peu et mal, chaque organisme abordant le problème de façon ponctuelle. Une telle coordination est pourtant fondamentale conduisant à des remises en causes fondamentales : place de la voiture dans le système de transport, évolution de l'urbanisme, politique foncière, technique de motorisation.. Il s'agit d'un problème horizontal que l'administration ne peut aborder correctement de par sa structure verticale. Une modification de la structure administrative semble donc être un préalable indispensable si les pouvoirs publics désirent avoir une intervention efficace. Il serait présomptueux de déterminer dès maintenant la structure administrative adéquate. On peut penser cependant à un ministère à compétence élargie qui pourrait intégrer en son sein des équipes spécialisées, (le MITI au Japon en serait un exemple) ou encore à une structure horizontale souple dotée de pouvoirs étendus et chargée d'une mission interministérielle à long terme (on peut penser au cas de la DATAR ou la Délégation à l'Informatique).

Une telle structure administrative retrouverait l'autorité et l'homogénéité nécessaire pour imposer aux différents partenaires sociaux les mesures indispensables.

En conclusion les problèmes posés par la voiture particulière en ville sont globaux et deviendront à long terme cruciaux. Les mécanismes classiques de marché ne permettront pas d'y apporter une réponse satisfaisante et là,plus qu'ailleurs, gouverner c'est planifier (1). Il est donc nécessaire que dès maintenant les Pouvoirs Publics mettent en oeuvre une stratégie de développement de la voiture particulière. Une telle politique conduira nécessairement à s'interroger sur certains tabous de la société moderne concernant la ville ou l'automobile. C'est pour cela qu'elle nécessitera une imagination hardie, un dialogue permanent et une volonté politique ferme.

---

(1) Titre d'un article de J. DELORS dans le Monde (15.1.74).

BIBLIOGRAPHIE

---

[1] Stop ou l'automobile en question M. FABRE, M. MICHAEL

[2] La rationalisation des choix budgétaires M. LEVY-LAMBERT, M. GUILLAUME

[3] Première approche du véhicule urbain IAURP 1970

[4] Scénario tendanciel de développement de la voiture particulière
Note de travail SAEI 1974

[5] Stratégie de développement de la voiture particulière
Proposition d'étude SAEI avril 1973

[6] La pollution atmosphérique Annales des Mines Mai-juin 1972

[7] Automobiles et nuisances. Pour un programme d'action
La Documentation Française Paris 1971

[8] La pollution atmosphérique d'origine automobile 1973

[9] Evaluation des sources de bruit d'un véhicule automobile RNUR 1973

[10] Urbaniser l'automobile M. BIEBER. Analyse et prévision XII-4-71

[11] Pollution atmosphérique d'origine automobile . M. HUBLIN Analyse et prévision XI-4-71

[12] Les pollutions d'origine automobile. Analyse et prévision XIV-4-72

[13] L'innovation dans la construction de matériels de transport terrestre
IREP - IPEPS juillet 1973

[14] La desserte des centres urbains : plans de ciruclation et infrastructures nouvelles M. POULIT. Journées de l'ATEC 15-11-73

[15] Cahiers de l'IAURP n° 17-18

[16] Cahiers de l'IAURP n° 26

[17] Cahiers de l'IAURP n° 28

[18] Intervention de la CGE au congrès de Washington sur le véhicule électrique
Février 1974

[19] La circulation urbaine M. POULIT. Revue générale des routes et des aérodromes n° 451 Février 1970

[20] Les transports dans la Région Parisienne M. FELIX
Transports n° 151 Mai 1970

[21] Les transports en Région Parisienne : 3 scénarios RATP 1973

[22] Les sources d'énergie M. VERGUESE. Le Monde 4-12-1973

[23] Renchérir les produits pétroliers ou les rationer M. FABRA. Le Monde 11-12-73

[24] Bulletin professionnel de l'Industrie pétrolière IFP 1971

[25] Les aspects économiques de l'énergie électrique d'origine nucléaire
M. ROBIN (EDF)

[26] Le véhicule électrique urbain : l'électricité dans les transports. Journées d'études organisées du 6 au 8 décembre par la SEER RGE n° 6-7-8 1973

[27] Mission d'étude et d'aménagement de Melun Sénart.
Expérimentation de véhicules électriques : Rapport de synthèse janvier 1974

.../..

[28] Etudes préliminaires d'infrastructures de transport. Note de synthèse SETRA - IRT 1973

[29] Note de synthèse de la réunion sur le définition administrative du VSU Direction des Routes Décembre 1973

[30] Journées d'études sur le véhicule électrique, Arc et Serrans 8/9 février 73

[31] La voiture électrique et la circulation urbaine? Tranié. Transport n° 134

[32] Adaptation de l'automobile à la ville IAURP Mars 1970

[33] Synthèse de l'étude du SAEI sur le véhicule urbain 1969

[34] Le véhicule électrique urbain. M. GASTAUT Economie et Scoiété Tome II n° 20

[35] Construction de voies urbaines traditionnelles. Revue générale des routes et aérodromes Septembre 1973

[36] L'accoutumance à l'automobile. M. VILLENEUVE. Collections de l'INSEE

[37] Piles et Accumulateurs. Articles de BREELLE dans le dictionnaire encyclopédique

[38] Using hydrogen Fuel cells for urban traction BREELLE IFP novembre 1973

[39] Les piles à combustible et l'hydrogène BRELLE, GREHIER, CHERAR, IFP Revue Sciences et Techniques 15-9-1973

[40] Piles à combustible et piles reversibles. Braroël CNRS

[41] Connaissance de la traction électrique. M. GORY SIA 1971

[42] Etude de M. BENEZECH pour le groupe Saulgeot

[43] Rapport du conseiller scientifique à Tokyo sur le véhicule électrique janvier 1974

[44] Le véhicule électrique : perspectives d'avenir et consommation spécifique Rapport EDF

[45] Véhicules terrestres à propulsion hybride. Projet de fin d'étude de l'ENSTA 1973.

[46] Le véhicule urbain à propulsion hybride Barbier SRE septembre 1971

[47] Où en est le véhicule électrique Barbier-Jacob IAURP

[48] Scientific American Août 1973

[49] Sciences et Vie Mars 1974

[50] La Recherche Novembre 1972, Janvier 1974, Avril 1974

[51] "Phase zéro" Octobre 1972

[52] American Scientist Décembre 1973

[53] Time magazine 6 mai 1974

[54] The big wheel Scientific American Septembre 1971

[55] Scientific American Janvier 1973

[56] Sciences et Avenir Numéro spécial Hors série n° 12

[57] Report ou progress in areas of public concern G.M. C 10-2-1972

[58] Véhicules et systèmes de transport de l'avenir. Conférence donnée par E.M. TUFFIER au Congrès mondial de la librairie Hachette (20-5-1969)

[59] Progress of Power General Motors Corporation Mai 1969.