



Les
cahiers
du

C L I P

Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement

Automobile et développement durable

Bilan environnement - matière première 1975-2050

Automobile et gaz naturel

Scénarios prospectifs et impact sur l'environnement

Numéro

9

Décembre 1998

Automobile

Développement durable

Bilan environnement - matière première 1975 - 2050

Liste des membres

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ARP (Renault)
CEA : Commissariat à l'Energie Atomique
CIRAD : Centre de Coopération International en Recherche Agronomique
CNRS/Programme ECODEV (Centre National de la Recherche Scientifique/ Programme Interdisciplinaire de Recherche sur les Technologies pour l'Ecodéveloppement)
CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
EDF : Electricité de France
GDF : Gaz de France
IFP : Institut Français du Pétrole
INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
INRETS : Institut National de la Recherche sur les Transports et leur Sécurité
PSA : GIE PSA
Peugeot Citroën
STEG : Société Tunisienne de l'Electricité et du Gaz

Des responsables des ministères chargés de l'Environnement, de l'Industrie, de la Recherche, de la Coopération et du Plan font partie du Comité de Coordination et d'Orientation Scientifique.

Directeur de publication :
Benjamin DESSUS
Rédaction :
Stéphane HIS
Sébastien DELACROIX
Nathalie MARTINEZ
Maquette :
Ivan PHARABOD

Synthèse

Introduction

Analyse rétrospective

Méthodologie

Evolution des quantités globales d'énergie mobilisées pour un véhicule

Evolution des quantités globales de matières premières mobilisées pour un véhicule

Evolution des émissions de polluants pour un véhicule

Un bilan nuancé

Evolution globale du parc

L'impact de l'évolution du parc

Bilan 1970-1995

Prospective 1995-2050

Délimitation du cadre de l'étude

Les couples moteur/carburant

La réduction de la masse des véhicules

Conclusion

Annexe

Bibliographie

Gaz naturel

Scénarios prospectifs et impact sur l'environnement

Synthèse

Introduction

Intérêt environnemental

La méthodologie utilisée

Bilan des émissions actuelles

Les résultats

Impact sur l'effet de serre

Scénarios à l'horizon 2020

Les parcs de véhicules particuliers à l'horizon 2020

Progrès technique et distances parcourues

L'impact sur les émissions de CO₂

Conclusion

Annexes

7

8

9

10

10

11

13

13

13

17

18

18

19

29

32

34

36

40

42

43

43

46

50

52

53

55

57

61

62

Editorial

Les transports individuels et plus précisément la voiture font l'objet de ce numéro des "Cahiers du CLIP". Les travaux récents de la Commission Energie 2010-2020 du Commissariat Général du Plan¹ ont bien montré que la maîtrise de la consommation et de la pollution des transports allait devenir un enjeu central aussi bien pour les pays du Nord que du Sud. C'est en effet très largement de cette maîtrise que dépendra, pour les 50 années à venir, l'évolution de nos économies vers le "développement durable". Dans le paradigme complexe que constitue le domaine des modes de transports, (celui des personnes, mais aussi celui des marchandises), on sait bien que la voiture joue un rôle très spécifique. Mode dominant des transports individuels, la voiture concentre en effet des enjeux industriels, sociaux, économiques et environnementaux particulièrement forts. Devant les problèmes environnementaux, locaux, régionaux ou planétaires (effet de serre) liés à ce mode de transport en rapide croissance au niveau national, mais aussi mondial, de quelles solutions disposons-nous? Existe-t-il d'autres perspectives pour garder le contrôle de la situation que celle d'une limitation de la mobilité individuelle ou d'une restriction du développement du marché automobile au profit des transports collectifs? Le progrès technique, tel qu'on peut le concevoir aujourd'hui apporte-t-il une alternative crédible à ces limitations? Les deux études que nous présentons aujourd'hui tentent d'apporter quelques éléments de réponse à ces questions à différents horizons.

La première étude, "Automobile et développement durable", engagée par l'IFP et le Programme Ecodev avec la participation de PSA, se fixait un objectif à la fois plus ambitieux et plus lointain (2050).

Parmi les filières automobiles qui font l'objet d'efforts de recherches significatifs (véhicules hybrides, nouveaux carburants, piles à combustible, etc.) en existe-t-il qui soient susceptibles de procurer des avantages significatifs du point de vue du "développement durable"?

L'analyse de scénarios de pénétration d'une dizaine de filières à partir de 2015 dans un parc français en augmentation significative (35 millions de véhicules en 2050 contre 25 millions en 1997), montre que le véhicule hybride essence ou diesel est le mieux placé du point de vue des ponctions sur les ressources fossiles et des différentes atteintes à l'environnement. Il permettrait en effet, en pénétrant à partir de 2015 à un rythme analogue à celui du diesel dans le parc français des années quatre-vingt, de réduire la consommation globale de 20 % et l'ensemble des émissions de polluants (de 20 % pour le CO₂ et d'un facteur 6 à 10 pour les autres polluants). Ce n'est pas le cas des piles à combustible à hydrogène électrolytique, très handicapées par le mauvais rendement global de la filière (de l'ordre de 10 %). Les solutions piles à combustible à réformeur embarqué (méthanol ou hydrocarbures) plus performants du point de vue de l'environnement global que les piles à hydrogène électrolytique pourraient se présenter à plus long terme comme une alternative crédible, à condition que les rendements de filières espérés mais non encore prouvés puissent être effectivement obtenus.

La seconde étude, "Automobile et gaz naturel", fruit d'une collaboration entre le programme Ecodev et le GIE PSA Renault, s'interroge sur les perspectives du Gaz naturel carburant à l'horizon 2020.

Et tout d'abord, sous quelle forme utiliser le gaz pour limiter au mieux les émissions (locales et globales) : gaz naturel comprimé, carburant liquide de synthèse, électricité ex-gaz? Les solutions gaz naturel comprimé et électricité permettent des réductions substantielles des émissions au km parcouru (environ 20 %). Par contre le DME et le gazole ex-gaz, carburants liquides, malgré l'intérêt d'exploitation qu'ils présentent n'apportent pas d'avantages par rapport à l'essence du point de vue de l'environnement global.

L'étude de scénarios de pénétration volontariste de véhicules GNV ou électriques (électricité ex-gaz) dans les parcs de pays comme les Etats Unis, le Canada, l'Argentine, le Brésil ou la CEI montre cependant que l'impact sur les émissions est très modeste en 2020, de l'ordre de 1 à 3 %. En tout état de cause l'impact cumulé d'une telle politique à l'horizon 2020 reste d'un ordre de grandeur inférieur à celui de l'amélioration du rendement des moteurs à essence.

Benjamin Dessus

(1) "Energie 2010-2020, les chemins d'une croissance sobre", La Documentation française, 3e trimestre 1998.

AUTOMOBILE **et** **DÉVELOPPEMENT** **DURABLE**

*Bilan
environnement - matière première
1975 - 2050*

Synthèse

Le secteur des transports a été l'un des éléments moteurs du développement économique des pays industrialisés. Il est responsable d'une part importante de l'accroissement de la demande d'énergie en France et des problèmes de pollution atmosphérique. Avec 47,5 Mtep, les transports représentent aujourd'hui 25 % des besoins énergétiques du pays (contre 20 % en 1970), dont près de la moitié imputable à la seule circulation des véhicules particuliers. C'est sur ce secteur que porte l'analyse proposée.

Mais, l'impact de l'automobile sur l'environnement et les ressources naturelles ne se limite pas aux seules consommations de carburants et émissions à l'échappement. La fabrication des véhicules, le recyclage des matériaux ou encore, la production de carburants sont autant d'étapes dont il faut tenir compte pour mesurer l'impact global de la filière automobile¹.

Dans un premier temps, le bilan actuel des consommations de matières premières et d'énergie et des émissions atmosphériques associées à une automobile "type" en France a été établi. La décomposition de l'ensemble du cycle de vie d'une voiture, depuis l'extraction des matières premières, jusqu'à un éventuel recyclage, a permis d'identifier les étapes qui utilisent le plus de ressources naturelles, ainsi que les principales sources d'émissions atmosphériques de la filière. L'analyse montre que l'utilisation du véhicule et dans une moindre mesure, la fabrication des matériaux sont les deux étapes les plus importantes. Elles représentent respectivement 76 % et 17 % de la consommation totale d'énergie et 82 % et 15 % des émissions de CO₂.

A partir des éléments mis en évidence dans cette approche, **une étude rétrospective de l'évolution de la filière automobile en France sur la période 1975-1995 a été réalisée**. L'objectif était double. En considérant les étapes les plus consommatrices de la filière (fabrication des matériaux, utilisation), il s'agissait dans un premier temps de retracer l'évolution des besoins en matières premières et énergie utilisées pour un véhicule.

En extrapolant ensuite les données à l'ensemble du parc automobile, une évaluation des quantités globales mobilisées depuis les années soixante-dix a été réalisée. L'analyse montre que les évolutions des véhicules n'ont pas permis de maîtriser l'augmentation de la demande globale d'énergie et des émissions de CO₂ (+ 38 % pour l'énergie et le CO₂ entre 1975 et 1995). L'accroissement très élevé du parc de véhicules particuliers sur la période (+65%) est la cause essentielle de cette dégradation¹.

L'accroissement du nombre d'automobiles en France au cours des prochaines décennies devrait se poursuivre. Un troisième volet de l'étude a donc été consacré à **l'analyse prospective de la filière sur la période 1995-2050**. L'objectif était d'examiner l'ensemble des solutions techniques (nouveaux couples carburant/moteur, réduction de la masse des véhicules) permettant de limiter la croissance de la demande d'énergie et des émissions de polluants imputables au parc de véhicules particuliers français.

Les résultats sont riches d'enseignements à plus d'un titre. Tout d'abord, ils montrent que la simple généralisation des pots catalytiques devrait permettre la réduction des rejets globaux de polluants du parc automobile d'environ un facteur trois d'ici à 2015. Ainsi, à moyen terme le défi majeur à relever pour l'industrie automobile est celui de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂. Dans ce cadre, parmi l'ensemble des technologies qui ont été étudiées, la pile à combustible alimentée par de l'hydrogène électrolytique présente les plus mauvais résultats. Par contre, le véhicule hybride essence (mais dont le principe peut être appliqué à d'autres carburants : gazole, GPL, gaz naturel, etc.) possède le meilleur potentiel de réduction de la demande globale d'énergie et des rejets de CO₂ et ce malgré un accroissement du parc de 40 %. Cette solution a d'autant plus d'intérêt qu'elle ne suppose pas de bouleversement majeur du paysage industriel (les infrastructures de production et de distribution de carburant sont déjà en place) et qu'elle pourra profiter des avancées sur les moteurs thermiques et électriques.

Par ailleurs, un véhicule pile à combustible fonctionnant avec un système de production embarquée d'hydrogène à partir de méthanol a été étudié. Ce carburant dont la production et la distribution ne sont pas sans soulever des difficultés ne devrait être qu'une étape. L'objectif de certains constructeurs est d'arriver à employer l'essence comme source d'hydrogène à bord du véhicule. D'importants travaux de recherche sont menés pour la réalisation de réacteurs compacts basés sur ce principe. Mais, jusqu'à

présent leur réelle faisabilité est loin d'avoir été démontrée³. Outre les problèmes communs avec le reformeur embarqué de méthanol (compacité et temps de mise en marche élevé), il faut souligner qu'ils ne peuvent pas fonctionner avec une essence classique (notamment à cause de la teneur en soufre). Les hydrocarbures liquides dont les caractéristiques seraient susceptibles de convenir pourraient par exemple être des carburants de synthèse produits à partir de gaz naturel (DME sous une pression de 5 bars, hydrocarbures issus du procédé Fischer-Tropsch). Ces filières sont proches de celles du méthanol. Les résultats présentés où le méthanol est utilisé comme source d'hydrogène pour alimenter une pile à combustible donnent une bonne image de leurs avantages et inconvénients : un faible niveau d'émissions à l'échappement du véhicule, mais une importante consommation d'énergie pour la production du carburant. Dans un objectif de réduction des émissions globales de CO₂, ces solutions offrent, a priori, de moins bonnes performances que la voiture hybride essence.

Du point de vue du développement durable, les travaux prospectifs montrent donc qu'il est possible d'améliorer la situation de la filière automobile au cours des prochaines décennies. A plus long terme, le principal problème sera celui de l'évolution du cours du pétrole et l'épuisement des réserves.

Introduction

Le record d'affluence du mondial de l'automobile et le succès de la journée sans voiture illustrent à la fois la suprématie de l'automobile comme mode privilégié de déplacement et la préoccupation grandissante des populations pour les questions environnementales, notamment les problèmes de pollution urbaine. Les constructeurs automobiles s'adaptent en mettant de plus en plus en valeur les qualités environnementales des véhicules aux côtés des habituels arguments de vente (vitesse, auxiliaires d'équipement...). Dans ce contexte, une question reste entière : comment concilier l'accroissement de la mobilité et la réduction de l'impact de l'automobile sur l'environnement ?

L'objectif de notre étude est d'analyser l'impact global de la filière automobile, depuis l'extraction des matières premières nécessaires à la production des véhicules et des carburants, jusqu'à leur utilisation et leur mise hors service. Il s'agit de mesurer les flux de matières premières et d'énergie qu'il faut mobiliser au cours des différentes étapes de la filière (fabrication des matériaux, production automobile, utilisation, recyclage), ainsi que l'ensemble des polluants atmosphériques rejetés à chaque étape. Les émissions de polluants des différentes étapes de la filière automobile ont un impact local (émissions nocives pour la santé), régional (ozone et pluie acide) et global (effet de serre). Ces différentes étapes sont, de plus, liées les unes aux autres. A titre d'exemple, un carburant qui permettra une réduction des émissions de polluants à l'échappement nécessitera de manière générale plus d'énergie pour sa production (et occasionnera donc plus de rejets de CO₂). Autre exemple : l'utilisation de matériaux plus légers permet une diminution de la consommation d'énergie du véhicule mais augmente celle qui est nécessaire à leur fabrication et leur assemblage. Une analyse des différentes étapes de la vie du véhicule permet de vérifier que des innovations dans les process industriels visant à réduire les consommations d'énergie, ne génèrent pas des consommations supérieures lors d'autres étapes de la filière. On réalise bien l'intérêt d'une démarche qui doit être la plus globale possible de façon à éviter les déplacements de pollution.

Cependant, ce type de bilan s'effectue seulement sur un véhicule, sans prendre en compte les données sur l'évolution globale du parc automobile. Or les avancées techniques (amélioration des moteurs, pots catalytiques,...) ne sont pas forcément suffisantes pour compenser l'accroissement des consommations d'énergie lié à l'augmentation du parc et à l'évolution de l'automobile, notamment vers plus de sécurité et de confort.

La première partie de notre étude est consacrée à la décomposition du cycle de vie d'une voiture moyenne afin d'identifier les étapes les plus consommatrices de matières premières et d'énergie et les principales sources d'émissions atmosphériques.

A partir des éléments dégagés, une étude rétrospective de l'évolution de la filière automobile en France sur la période 1975-1995 est réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, seules les phases dominantes de la filière sont prises en compte afin de retracer les principales évolutions pour un véhicule. Puis, dans un second temps, l'intégration de données relatives au parc nous permet d'évaluer l'impact global sur les ressources naturelles et sur l'environnement depuis 1975.

Un troisième volet de l'étude est consacré à l'analyse prospective de la filière automobile sur la période 1995-2050 avec pour objectif l'examen des solutions techniques permettant de limiter à terme l'impact sur l'environnement de la filière automobile. A cette fin, des scénarios de pénétration de différents types de véhicules sont élaborés : GNV, GPL et véhicules alternatifs (hybride, pile à combustible).

L'objectif général est de dégager pour l'industrie et les pouvoirs publics, les enjeux principaux et les difficultés principales d'une évolution vers une plus grande "durabilité" de la filière automobile (plus faible ponction sur les ressources épuisables, moindres dégâts sur l'environnement), ainsi que les compromis souhaitables entre production et recyclage, substitution et ressources, etc. Il s'agit par ailleurs d'examiner des pistes nouvelles de recherche technologique dans des domaines très divers (sidérurgie, métaux non ferreux, recyclage, déchets ultimes, nouveaux carburants, etc.).

Analyse rétrospective

Principales évolutions observées sur un véhicule 1970-1995

Méthodologie

Devant les difficultés à recueillir des données rétrospectives suffisamment fiables sur l'ensemble des étapes du cycle de vie d'une automobile, les bilans présentés ont été réalisés à partir des évolutions constatées sur deux phases : celle de la production des matériaux nécessaire à la voiture et celle de l'utilisation du véhicule. Cette approximation se justifie par le fait, comme on peut le voir sur la figure 1, que l'essentiel des consommations d'énergie (et donc des émissions de polluants atmosphériques) se réalise au cours de ces deux étapes (pour près de 90 % des besoins globaux). Au total, cette consommation s'élève à près de **9 tep**, dont **76 % imputables à la seule consommation d'essence du véhicule**. Elle n'est plus que de 8 tep si l'on tient compte des économies d'énergie réalisées par le recyclage des matériaux.

De plus, la prépondérance de l'étape "utilisation" est amplifiée si l'on examine le bilan CO₂. En effet, à l'inverse des étapes de fabrication, de mise en forme des matériaux ou d'assemblage qui font un large appel à l'électricité, l'utilisation du véhicule ne fait appel qu'aux seuls produits pétroliers. De fait, 82 % des émissions globales de CO₂ (19 tonnes par voiture au total) sont produites à l'échappement du véhicule, contre 15 % pour la fabrication des matériaux et seulement 0,7 % pour la fabrication automobile dans les usines de montage et d'assemblage.

A la lumière de ces éléments, une étude rétrospective de l'évolution de la filière automobile en France sur la période 1975-1995 a été réalisée. Les besoins en matières premières et énergie et les émissions atmosphériques imputables à la fabrication et à l'utilisation d'un véhicule type ont été comparées sur trois années (1975, 1985 et 1995).

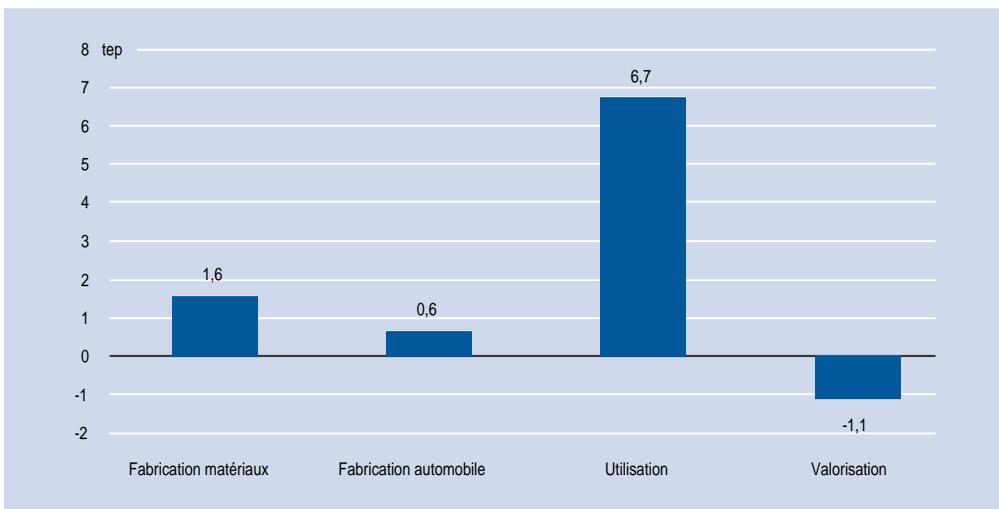


Figure 1
Répartition par étape de la consommation globale d'énergie

Evolution des quantités globales d'énergie mobilisées pour un véhicule

La figure 3 montre l'évolution comparée des consommations globales d'énergie associées à la fabrication des matériaux et à l'utilisation du véhicule pour les trois années considérées. En dépit de l'amélioration importante de l'efficacité énergétique des procédés de fabrication des matériaux, la demande d'énergie nécessaire à la production d'une automobile ne diminue que faiblement (0,78 tep en 1975 à 0,76 tep en 1995⁴). Durant les dix dernières années cette consommation d'énergie est même orientée à la hausse puisqu'elle a atteint son minimum en 1985 avec une valeur de 0,70 tep/voiture. Cette dernière période est caractérisée par l'augmentation de la masse des véhicules (+22%) et la pénétration des plastiques dans l'automobile. On peut estimer que les augmentations conjuguées de masse de plastique et dans une moindre mesure d'aluminium, ont compensé les gains d'efficacité enregistrés sur la production des matériaux.

De même, la consommation d'énergie de la phase d'utilisation de l'automobile suit une évolution qui enregistre un minimum en 1985. Cette variation traduit bien le relâchement des efforts consentis en faveur des économies d'énergie sur les véhicules après le contre-choc pétrolier de 1986. Elle est la conséquence de la transformation de la demande des clients vers

toujours plus de confort et d'équipement. Entre 1975 et 1995, la consommation globale de carburant d'une voiture moyenne a néanmoins chuté de 7,8 tep en 1975 à 6,7 tep en 1995 (avec un minimum de 6 tep en 1985).

Evolution des quantités globales de matières premières mobilisées pour un véhicule

La figure 4 montre les changements observés au niveau des consommations globales de matières premières. Comme les métaux ferreux sont restés les matériaux majoritairement utilisés (plus de 60 % en masse), les principales variations enregistrées ont pour origine les grandes mutations du secteur sidérurgique⁵ en France au cours des vingt dernières années. Leur production nécessite aujourd'hui beaucoup moins de matières premières qu'en 1975. On notera ainsi, pour une voiture moyenne, la diminution de la consommation de minerai de fer (-32 %), l'augmentation de la consommation de ferraille (+68 %) et la baisse plus relative de la consommation de charbon (-12 %).

Les variations imputables à la production de l'aluminium (bauxite et déchets d'aluminium : +46 %) et des plastiques (gaz : +126 %; pétrole : 74 %) sont essentiellement dues à leur pénétration importante dans les automobiles sur la période.

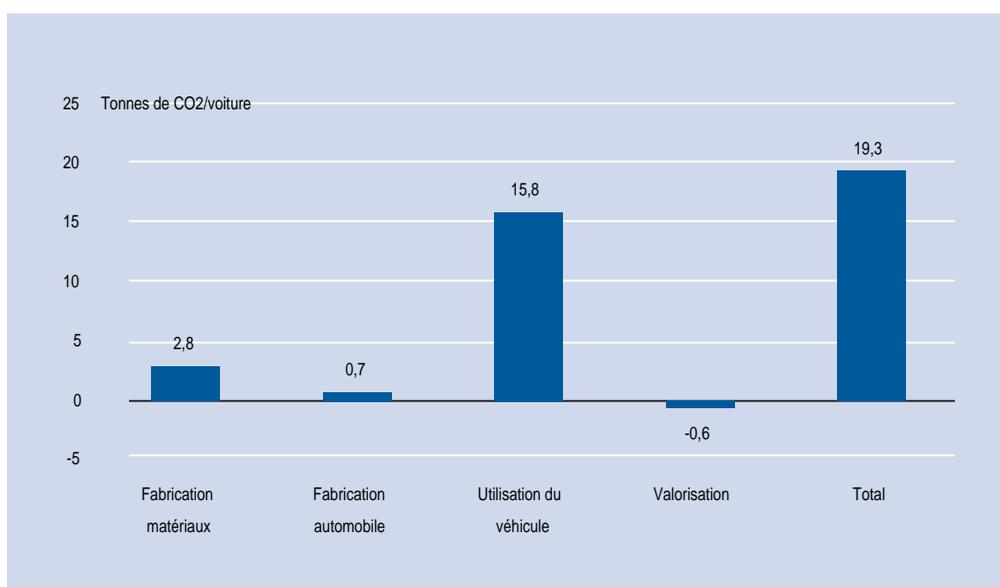


Figure 2

Répartition par étape des émissions de CO₂

Evolution des émissions de polluants pour un véhicule⁶

Les émissions à l'échappement des véhicules ont enregistré une forte diminution au cours des vingt dernières années. En effet, des progrès techniques importants ont été réalisés dans la perspective de satisfaire les normes d'émissions de polluants devenues de plus en plus restrictives.

Ainsi, les véhicules construits aujourd'hui polluent huit à dix fois moins que ceux mis en circulation dans les années soixante-dix. Des mesures effectuées dans l'agglomération parisienne montrent par exemple une division par douze des émissions unitaires de monoxyde de carbone depuis les années soixante-dix.

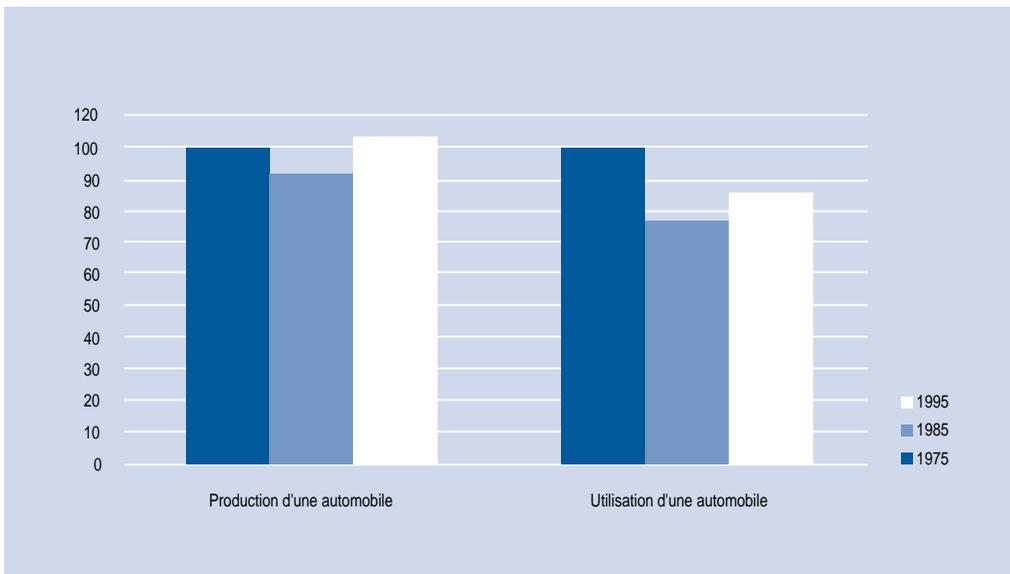


Figure 3
Evolution des quantités globales d'énergie mobilisées pour un véhicule (indice base 100 en 1975)

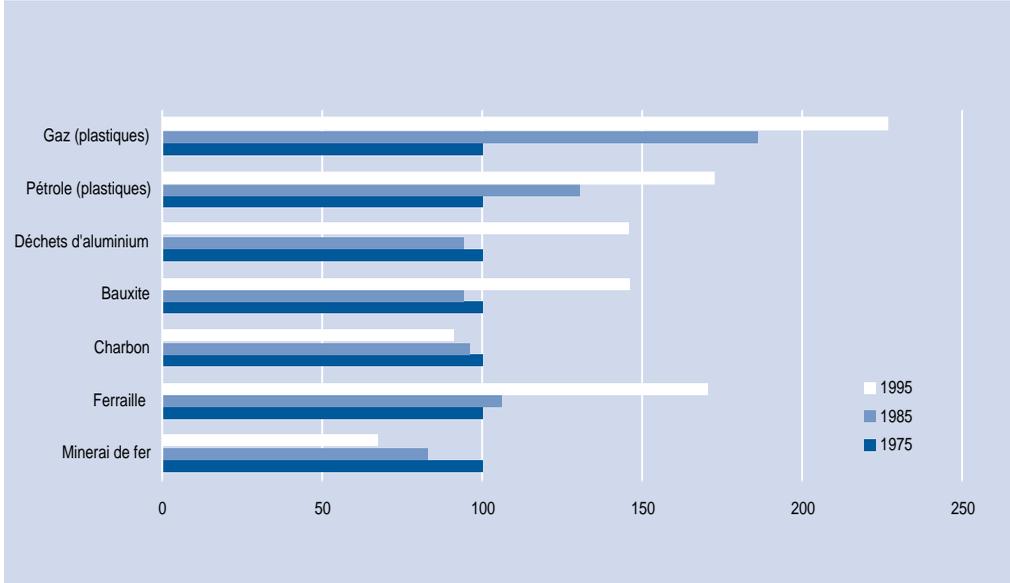


Figure 4
Evolution des quantités globales de matières premières mobilisées (indice base 100 en 1975)

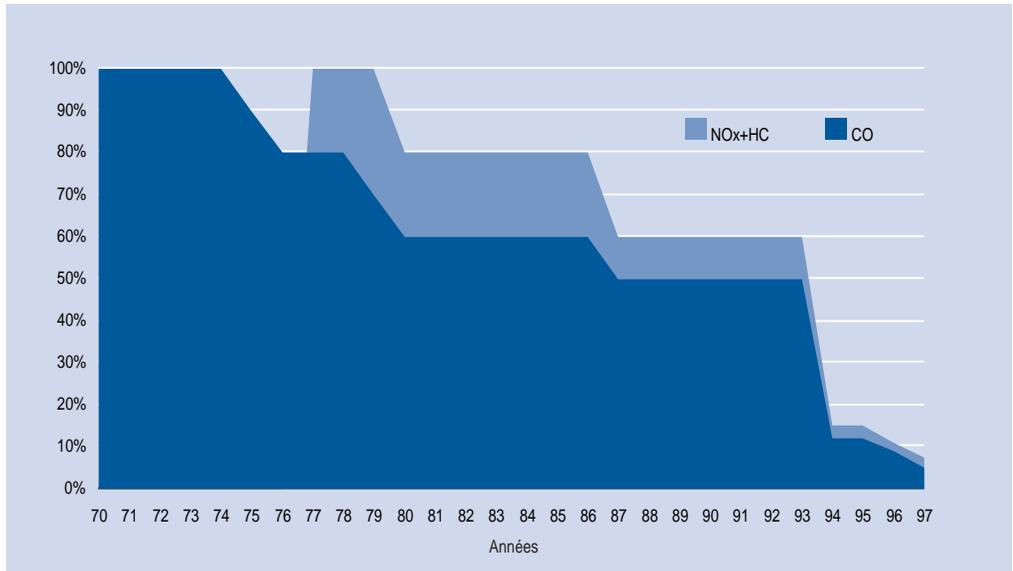


Figure 5
Evolution des normes
d'émission à l'échappement

Un bilan nuancé

Un bilan nuancé par l'évolution du parc

Evolution globale du parc

L'évolution globale du parc automobile en France

L'accroissement du volume du parc

En France, au 1er janvier 1997, le nombre d'automobiles s'élève à 25,5 millions de voitures particulières. Il a progressé de 12 millions en 1970 à 18 millions en 1980 et 23 millions en 1990⁷.

A raison d'un million de voitures produites par an, le marché automobile français a connu sa période faste au début des années soixante-dix. Le volume global de véhicules est alors de 12 millions d'unités et le taux d'équipement des ménages qui était de 20 % en 1954, puis de 50 % en 1967, s'élève à 70 %. Le premier choc pétrolier marque une rupture dans la croissance de l'économie et de l'industrie automobile.

A partir de 1986, année du contre-choc pétrolier caractérisée par la baisse conjuguée du cours du dollar américain et du baril de pétrole, le taux de croissance du parc automobile augmente de nouveau, passant le cap des 2 % par an entre 1988 et 1991, ainsi qu'en 1995. A

noter que depuis 1986, la barre des trois quarts de ménages équipés est franchie. Le pourcentage de ménages multimotorisés continue également d'augmenter pour s'établir à près de 27 % en 1997. Plus d'une automobile sur deux appartient aujourd'hui à un ménage multimotorisé.

L'évolution des caractéristiques globales du parc automobile

Depuis 1960, on observe trois changements majeurs :

- la concentration autour des véhicules de 4 à 7 CV

Les modèles de prestige des années 1970 sont remplacés petit à petit par des voitures "conjoncturelles" de taille plus réduite nées de la crise. Ceci a pour conséquence l'accroissement de la part des véhicules d'une puissance fiscale comprise entre 4 et 7 CV. Cette concentration a moti-

Années	Volume	Taux de croissance annuels moyens (%an)
1960	4 950 000	-
1970	11 860 000	1960-1970 : 9,1
1980	18 440 000	1970-1980 : 4,5
1990	23 010 000	1980-1990 : 2,2
1997	25 500 000	1990-1997 : 1,5

Tableau 1

L'évolution du parc automobile en France (Inférieur à 6 CV jusqu'en 1980)
Source : CCFA

vé le choix d'extrapoler les données sur un véhicule de gamme moyenne à l'ensemble du parc automobile français.

► la pénétration continue des moteurs diesel Amorcée à la suite des deux chocs pétroliers, en raison de l'accroissement du prix de l'essence, la pénétration des moteurs diesel est l'autre phénomène marquant de l'évolution du parc automobile en France. De 1 % en 1970, la part des diesels croît jusqu'à 4 % en 1980 à 15 % en 1990 et enfin 30 % aujourd'hui, soit 7,5 millions de véhicules.

► le vieillissement général des voitures Malgré les immatriculations neuves (2,1 millions en 1996 pour 4 millions d'immatriculations d'occasion) et en dépit des effets du contrôle technique, l'âge moyen du parc croît sensiblement : il augmente en effet de 6,2 à 6,8 ans entre 1975 et 1995. Ces phénomènes s'accompagnent d'une légère augmentation du kilométrage annuel moyen⁸. On notera qu'il est plus élevé pour les véhicules diesel que pour ceux à essence (respectivement 19 500 km contre 11 500 km par an en moyenne).

L'impact de l'évolution du parc

La ponction globale du parc sur les ressources énergétiques

La consommation globale d'énergie associée à la production des matériaux et à l'utilisation de l'ensemble des voitures particulières a progressé de 17,5 à 24,1 Mtep entre 1975 et 1995, soit un

accroissement moyen de 38 % en vingt ans (contre 65 % pour le parc). Les gains énergétiques enregistrés au niveau des véhicules ou de la production des matériaux n'ont donc pas été suffisamment élevés pour compenser l'impact de l'explosion du parc automobile.

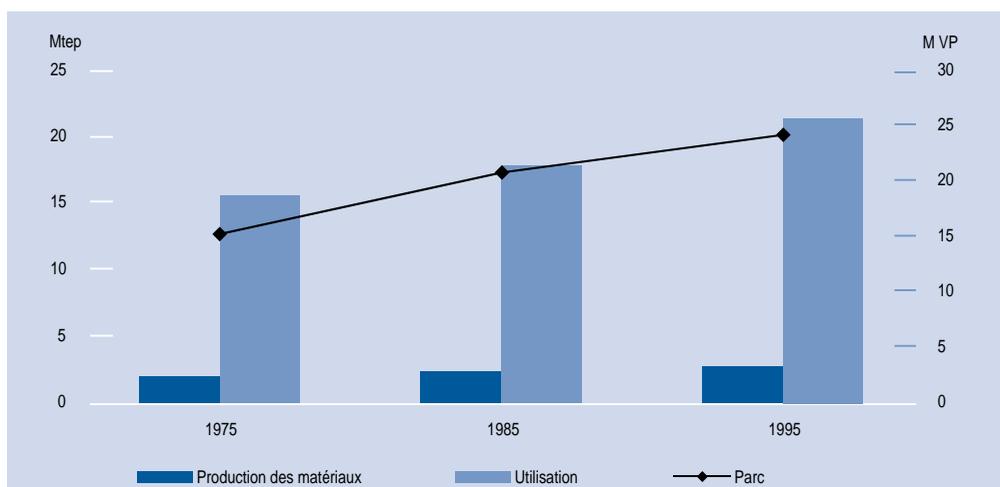
Tableau 2

Evolution des caractéristiques du parc automobile français

	1975	1985	1995
Parc de voitures particulières Essence (M)	14,9	19,1	17,9
Parc de voitures particulières gazole (M)	0,3	1,7	6,3
Kilométrage annuel essence (km/an)	13 160	11 530	11 490
Kilométrage annuel gazole (km/an)	26 169	23 200	19 740
Consommation unitaire essence (l/100 km)	9,5	8,17	8,49
Consommation unitaire gazole (l/100 km)	10	9,73	6,67
Essence : consommation annuelle par voiture (kg/an)	938	707	732
Gazole : consommation annuelle par voiture (kg/an)	2 251	1 941	1 132

Figure 6

Evolution de la quantité globale d'énergie mobilisée pour l'ensemble du parc



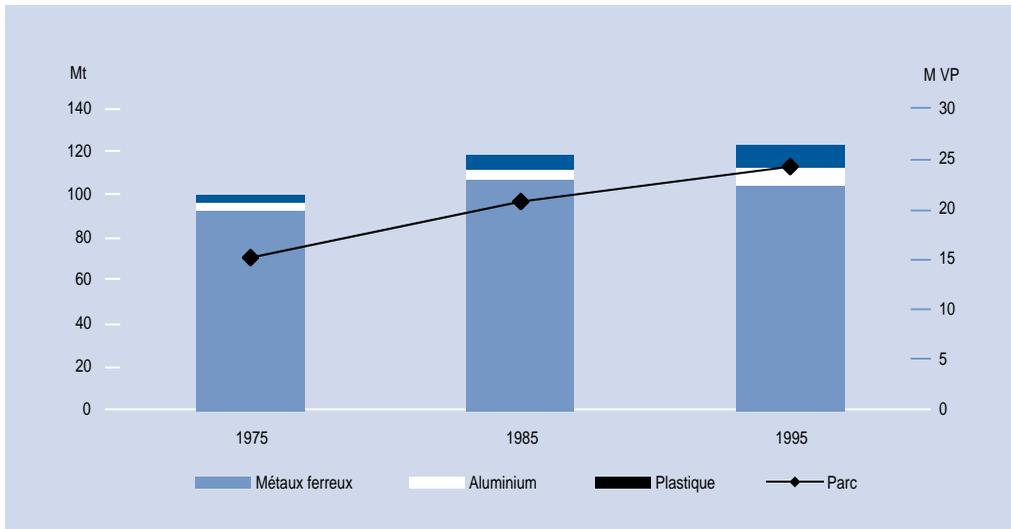


Figure 7
Evolution de la ponction globale sur les matières premières

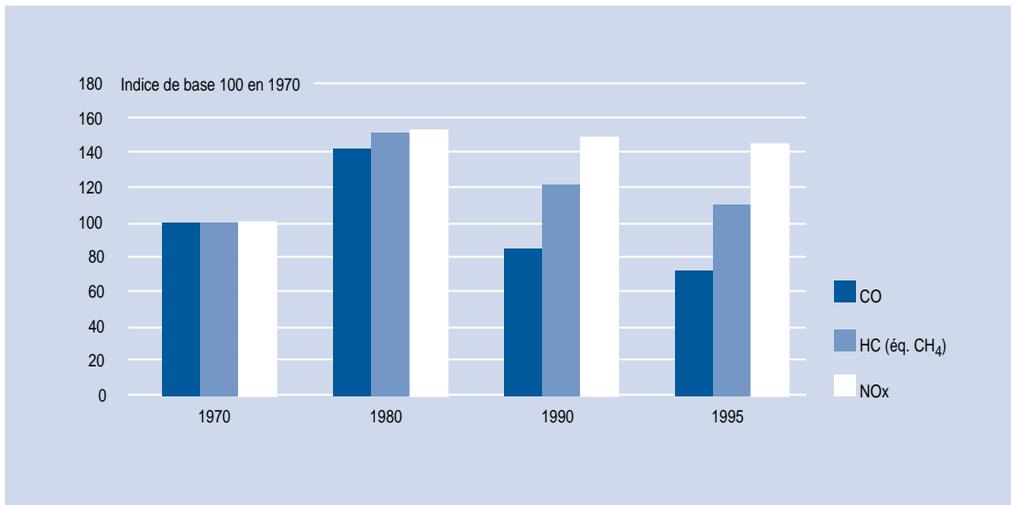


Figure 8a
Evolution des émissions de CO, HC et NOx à l'échappement

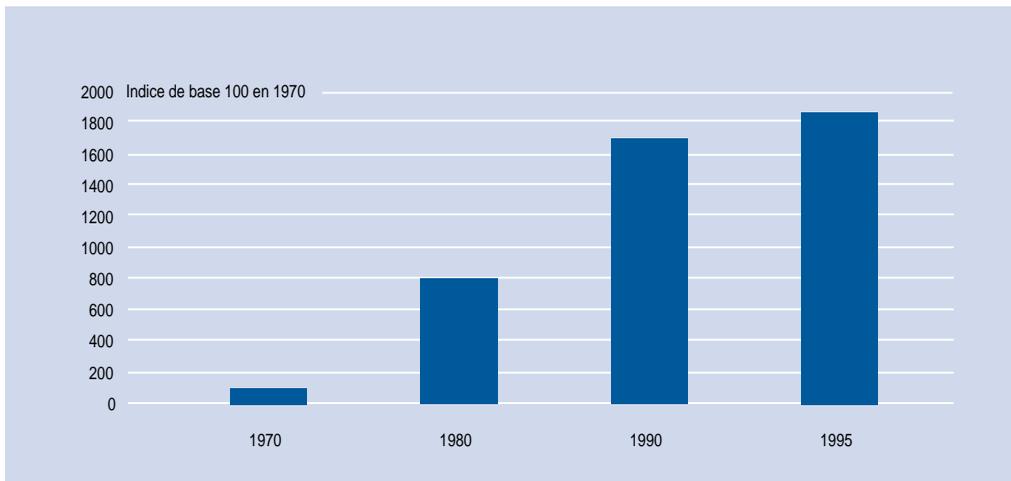


Figure 8b
Evolution des émissions de particules à l'échappement

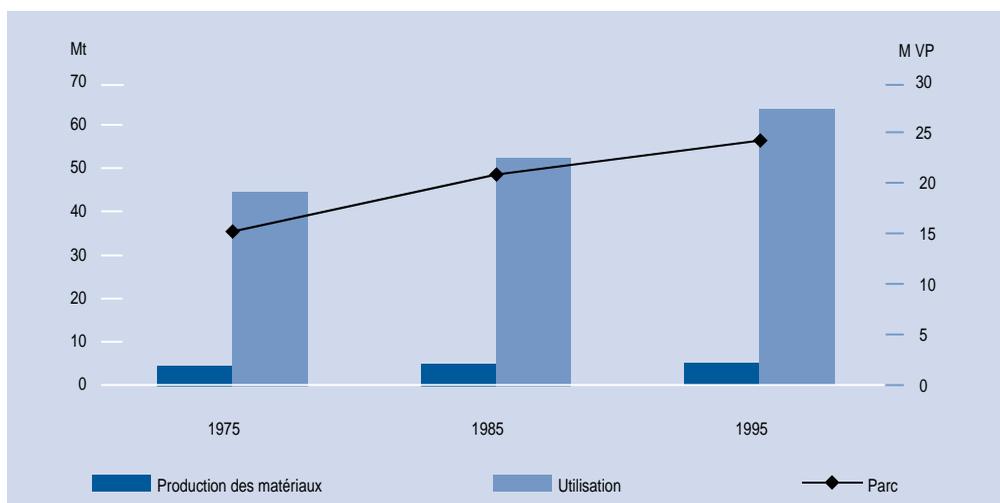


Figure 9

Evolution des émissions globales de CO₂

La ponction globale du parc sur les matières premières

La quantité globale de matières premières (minerais de fer, bauxite, pétrole, gaz naturel) mobilisée pour l'ensemble des automobiles en France s'est élevée de 106 à 123 Mt entre 1975 et 1995, soit un accroissement moyen de 16 % sur la période. Cette augmentation est relativement faible compte tenu de l'effet conjugué de l'explosion de la demande d'automobile et de l'augmentation du poids moyen des véhicules qui ont respectivement crû de 65 % et de 22 % sur cette période. On notera que depuis 1985, les consommations globales de matières premières n'augmentent que faiblement. Le développement important de la filière de production d'acier à partir de ferraille explique essentiellement ce progrès.

L'estimation des émissions atmosphériques imputables au parc automobile

Les émissions d'oxydes d'azote enregistrent une faible baisse sur la période tandis que celles d'hydrocarbures imbrûlés et de monoxyde de carbone chutent d'une façon plus prononcée. Ces variations sont la conséquence de la baisse des rejets de polluants générés par les véhicules (généralisation de l'injection électronique, du pot catalytique...) et de la "diésélisation" du parc.

Cette dernière a par ailleurs eu pour autre conséquence la forte augmentation des quantités de particules retrouvées dans l'air.

L'accroissement des rejets globaux de CO₂ imputables au parc automobile (figure 9) est identique à celui enregistré pour les consommations d'énergie (de l'ordre de 40 %). En revanche, il n'est que de 12 % si l'on ne considère que l'étape de production des matériaux. Le développement de la filière de l'acier obtenu à partir de ferraille, l'accroissement de la part de l'aluminium dans le secteur automobile (qui fait un large appel à l'électricité) et enfin, la pénétration du gaz dans la fabrication des plastiques, par ailleurs de plus en plus utilisés, expliquent ce moindre accroissement des émissions CO₂.



Bilan 1970-1995

Bilan sur l'exercice rétrospectif 1970-1995

L'analyse rétrospective des principales mutations de la filière automobile au cours des vingt dernières années montre que les gains enregistrés au niveau de la production des matériaux ou de la consommation des voitures ont été en partie annulés par l'accroissement continu des trafics et plus particulièrement du volume du parc. En outre, certaines mesures mises en place afin de réduire la demande d'énergie imputable au transport automobile, ont eu un impact négatif en matière de pollutions locale et régionale. Ainsi, les effets positifs de la "diésélisation" en terme de consommation globale de carburant s'accompagnent d'un accroissement parallèle des émissions de particules et de NO_x , deux polluants fortement incriminés dans la baisse de la qualité de l'air des villes.

Si au cours des prochaines décennies, le nombre de véhicules particuliers en France continue d'augmenter, comme on peut s'y attendre, il apparaît nécessaire de mettre en place dès aujourd'hui toute une série de mesures destinées à limiter l'impact de cet accroissement sur les ressources naturelles et l'environnement.

Le défi à relever est triple :

- Il s'agit en premier lieu de réduire les consommations de carburant et les émissions à l'échappement des véhicules de façon suffisamment importante pour contrer les effets de la croissance du parc;
- Il faut, par ailleurs, favoriser les technologies permettant une lutte simultanée contre les différents types de pollution créés par l'automobile (globale, locale et régionale).
- Enfin, dans le cadre de la lutte contre l'effet de serre, il faut prendre en compte non seulement les émissions liées à l'utilisation du véhicule mais également celles qui sont générées par la production des carburants ou des véhicules.

Ces différents aspects sont abordés dans la partie suivante de l'étude où sont présentés différents scénarios prospectifs.

Prospective 1995-2050

Analyse prospective de la filière automobile en France 1995-2050

Délimitation du cadre de l'étude

La problématique

Les diverses solutions de lutte contre la pollution automobile sont rarement globales, au sens où elles ne permettent pas de s'attaquer en même temps aux différents types d'atteinte à l'environnement. A titre d'exemple, le pot catalytique a conduit à une forte réduction des polluants⁹. Par contre, les conséquences de son adoption sur l'effet de serre sont négatives. En effet, son fonctionnement génère une augmentation de l'ordre de 4 % de la consommation de carburant, donc des émissions supplémentaires de CO₂. De plus, il induit des rejets de N₂O, gaz à très fort potentiel d'effet de serre¹⁰. Autre exemple : le moteur diesel qui, comme on l'a déjà mentionné, permet de baisser les émissions de CO₂ mais induit une pollution locale et régionale du fait des émissions de particules et de NO_x. Entre les mesures à impact local et régional et celles à impact global un équilibre est à trouver.

Les voies technologiques retenues

Le premier axe choisi est celui **des couples moteur/carburant**. Il englobe la filière carburant (depuis l'extraction des matières premières jusqu'au réservoir), le rendement et les émissions du groupe motopropulseur. Par cette démarche, on aborde de manière globale la question de la pollution automobile :

- le rendement du moteur a une influence directe sur la consommation et donc sur les émissions de CO₂;
- la filière carburant permet de s'assurer de la viabilité du groupe motopropulseur pris comme un élément de la chaîne énergétique. Il est, par exemple, possible de mettre en lumière des effets pervers de certaines filières, où les problèmes liés à la consommation d'énergie sont déplacés (c'est le cas de l'hydrogène électrolytique et du véhicule électrique);
- l'étude de différents carburants devrait permettre d'identifier les filières susceptibles de

limiter l'impact local ou régional du parc automobile. L'idée est d'arriver, par l'utilisation d'un carburant approprié, à diminuer les émissions à l'échappement.

Le second axe choisi est celui de **la réduction de la masse du véhicule**. Cette fois, on privilégie indirectement la baisse de la consommation et donc la lutte contre l'effet de serre.

La masse des voitures est en effet un élément qui a une influence non négligeable, comme l'illustre bien le tableau 3 où sont reportés les indices de sensibilité "s" des différents paramètres (s=gain en consommation en %/ gain sur le paramètre en %). Même si ce tableau n'a que valeur d'exemple, il montre que les facteurs les plus influents sont le rendement moteur et la masse du véhicule. On notera qu'alors que tout gain sur l'efficacité énergétique du moteur se répercute directement sur la consommation du véhicule, **en revanche une réduction de 10 % de la masse n'entraînera qu'une baisse de 6,7 % de la consommation**.

Le tableau 3 indique également que la réduction de la consommation peut se réaliser par l'ajustement de nombreux autres paramètres. L'option retenue consiste à privilégier les plus importants. Il est clair que pour obtenir des économies d'énergie élevées, l'influence du Scx, des frottements moteur ou des rendements de transmission ne peuvent être négligés.

Par ailleurs, dans le cadre d'une optimisation de la lutte contre les pollutions locales et régionales, le traitement des fumées de combustion est un élément essentiel, notamment parce qu'il conditionne en partie le développement de technologies pouvant réduire les émissions de CO₂. A titre d'exemple, la commercialisation de moteurs à injection directe essence est fortement liée aux résultats futurs de la catalyse De-NO_x. De même, l'avenir des moteurs diesel semble être tributaire de celui des filtres à particules.

	Unité	Valeur type	Sensibilité %
Masse	kg	1250	67
Scx	millième	625	11
Frottement véhicule	Newton	155	11
Rendement thermodynamique moteur	g/kw/h	205	100
Couple au litre, Pme	bar	11	58
Frottement moteur	bar	1,9	51
Consommation au ralenti	l/h	1,1	11
Rendement transmission	%	98	45
Accessoire électrique	Watt	300	-

Les couples moteur/carburant

La modélisation prospective du parc

A partir de différentes hypothèses d'évolution des marchés, le parc de véhicules particuliers a été reconstitué et les données relatives aux performances des moteurs (en terme de rendement et d'émissions) et filières carburants (depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la mise à disposition dans le réservoir) ont été incorporées.

Différentes hypothèses d'évolution du marché ont été émises :

- les véhicules GPL et GNV sont davantage destinés à une clientèle réalisant de forts kilométrages. En effet, dans le cadre de taxes favorisant ces deux carburants, seuls les "gros rouleurs" pourraient rentabiliser le surcoût à l'achat de la voiture. Les véhicules GNV et GPL se substitueront donc au diesel.

• D'autre part, les véhicules alternatifs (hybride, pile à combustible) destinés à une clientèle à kilométrage plus faible remplaceront les véhicules essence.

De manière à mettre suffisamment en relief la comparaison entre les filières, certains paramètres ont été figés.

Il s'agit :

- du kilométrage annuel (19 000 km pour les véhicules Diesel, GNV et GPL, 11 000 km pour les versions essence et les voitures évoluées) qui a relativement peu varié sur les 20 dernières années;
- de la répartition par cylindrée des immatriculations essence et diesel, supposée sans influence significative sur les résultats.

Trois grands scénarios d'évolution du parc ont été établis. Pour chacun d'entre eux, sur une période de 50 ans, le volume du parc croît d'environ 25,5 millions à près de 35 millions de véhicules particuliers (accroissement de 40 %, soit 0,8 % par an). Cette augmentation est plus faible que celle des 25 dernières années (70 % sur 25 ans, soit 2,8 % par an) et suppose une faible variation du taux d'équipement des ménages.

Le scénario "laisser-faire"

Dans ce scénario, le parc reste très majoritairement composé de véhicules essence et diesel. On assiste seulement à une faible

pénétration du GPL, comme on peut le voir sur la figure 10. Le marché du GPL reste limité à environ 2 500 000 unités, valeur qui représente la quantité de voitures pouvant être approvisionnée par les raffineries françaises dans la situation actuelle.

Le scénario gaz

Cette fois le parc essence est invariant par rapport au scénario précédent, mais en revanche le véhicule GNV remplace totalement la motorisation diesel. Cette pénétration correspond à celle des voitures fonctionnant au gazole observée lors des 25 dernières années. Le marché du GPL reste limité à 2 500 000 unités (hypothèse identique à celle du scénario "laisser-faire").

Le scénario "voitures évoluées"

Ce scénario est marqué par une forte augmentation du nombre de véhicules dits "évolués" à partir de 2015. Ils remplacent une grande partie du parc essence en 2050. A titre de comparaison, l'évolution du taux de pénétration du marché est comparable à celui du diesel : en 25 ans, il progresse de quelques pour-cent à environ 50 %. On remarquera également un développement modéré des carburants gazeux qui remplacent une partie du diesel. Ce scénario "voitures évoluées" sera utilisé pour les différentes prospectives impliquant un véhicule hybride ou un véhicule

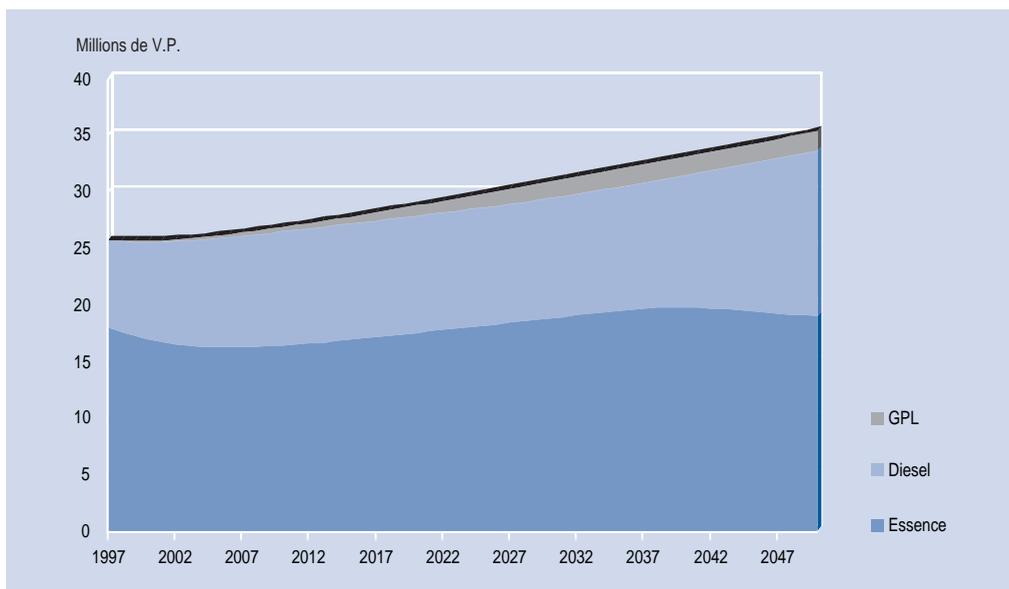


Figure 10

Evolution de la composition du parc V.P. français scénario "laisser-faire"

fonctionnant avec une pile à combustible (hydrogène électrolytique ou à reformeur méthanol).

On notera que le véhicule électrique n'a pas été pris en considération. Il devrait faire l'objet d'une future étude dans laquelle sera incorporée l'hypothèse d'une rupture technologique sur cette filière, en particulier sur les batteries.

Les filières carburants et les technologies moteurs

Les filières carburants

Au total, 7 grandes catégories de couples moteur/carburant ont été retenues. Parmi celles-ci, 6 filières carburants ont été étudiées. Les rendements énergétiques de la mise à

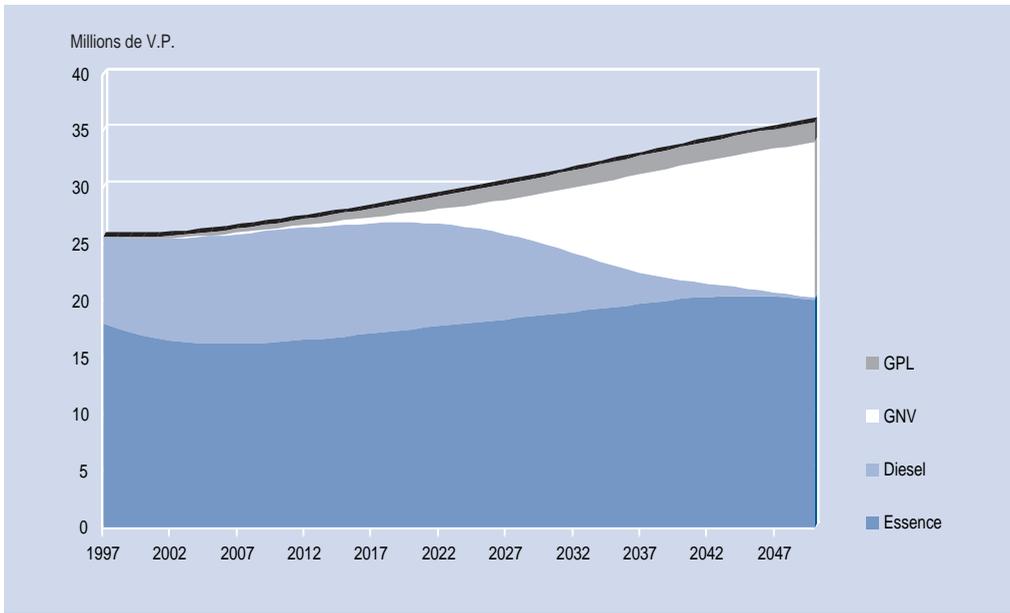


Figure 11
Evolution de la composition du parc V.P. français scénario "gaz"

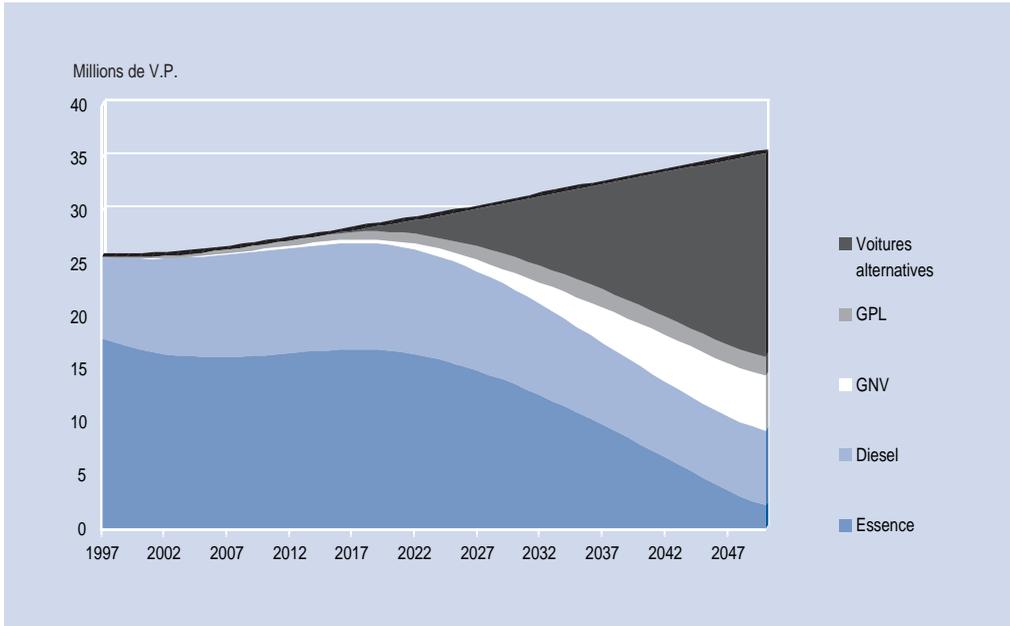


Figure 12
Evolution de la composition du parc V.P. français scénario "voitures évoluées"

Rendement énergétique ¹ de la mise à disposition du carburant	
Essence 1996	85 %
Diesel 1996	86 %
Essence 2005	81 %
Diesel 2005	84 %
GPL	85 %
GNV	87 %
Hydrogène liquide électrolyse ²	18 %
Méthanol (gaz naturel)	60 %

(1) rendement : énergie disponible dans le réservoir de la voiture / énergie totale initialement introduite dans le système
 (2) calcul effectué avec la conversion 1 MWh= 0,222 tep.

Tableau 4
Rendements énergétiques des filières carburants

disposition des carburants sont fournis dans le tableau 4.

Les groupes motopropulseurs

Pour les filières essence, diesel, GPL et GNV deux types de motorisation ont été considérés. Il s'agit d'un moteur dit classique et d'un moteur à injection directe qui économise 20 % d'énergie pour les moteurs à allumage commandé et 30 % pour le diesel injection directe "common rail".

Pour les véhicules "évolués", trois filières carburants ont été étudiées. Il s'agit de l'essence, de l'hydrogène liquide et du méthanol.

Les caractéristiques de la version **hybride essence**, sont calquées sur celles du véhicule PRIUS commercialisé au Japon depuis le mois de décembre 1997 par TOYOTA. La consommation est de l'ordre de 4 l/100 km en cycle japonais. Sachant que la pénétration de ce type d'automobile n'est envisagée qu'à partir de 2015, il a été supposé que d'ici là des progrès importants seraient réalisés et qu'une consommation de 3 l/100 km pourrait être atteinte sur le cycle européen¹². On notera que ceci représente une avancée substantielle puisque les

écarts entre les deux cycles sont conséquents : annoncées avec une valeur de 3,57 l/100 km sur cycle japonais, les consommations ont été mesurées entre 5 et 6 l/100 km¹³ sur le cycle européen.

Un véhicule avec une consommation en équivalent essence de 3 l/100 km pour **la version pile à combustible à hydrogène liquide** a été choisi. Ceci représente un progrès important pour ce type d'automobile puisque, par exemple, le rendement que Mercedes a obtenu avec sur son prototype Nekar II (pile à combustible alimentée par de l'hydrogène comprimé) est de 28,8 % sur cycle européen, valeur qui est proche de celle des moteurs diesel de nouvelle génération. Ainsi, les performances en terme d'efficacité énergétique de cette haute technologie sont, pour l'instant, comparables à celle d'un bon moteur diesel.

Enfin à **reformeur méthanol** utilise ce carburant pour le transformer dans une étape intermédiaire en hydrogène qui est introduit dans une pile à combustible. La consommation de ce véhicule est estimée à 3,5 l/100 km en équivalent essence. L'opération de production de ce gaz à bord du véhicule réduit, en effet, de 15 %

Filières	Rdt Gpe motopropulseur	Rdt filière carburant	Rdt total
PAC hydrogène électrolyse	55 %	19 %	10 %
Essence 2005 inj. directe	25 %	81 % ⁽¹⁾	20 %
PAC ² réformeur méthanol	44 %	60 % ⁽¹⁾	26 %
Diesel 2005 inj. direct"common rail"	33 %	84 %	28 %
Véhicule électrique (centrale au fioul)	85 %	36 %	31 %
PAC ² hydrogène (gaz naturel)	55 %	60 %	33 %
PAC ² hydrogène RSV ³ (pétrole)	55 %	63 %	35 %
Véhicule (gaz naturel cycle combiné)	85 %	50 %	43 %
	Rdt Gpe motopropulseur équivalent sur le cycle urbain	Rdt filière carburant	Rdt total
Hybride essence 2005	40 %	81 %	32 %

Tableau 5
Récapitulatif des rendements énergétiques des différentes filières

(1) Source PSA
 (2) PAC : pile à combustible. Les rendements des filières hydrogène sont obtenus d'après "Emission de gaz à effet de serre de la production d'hydrogène jusqu'à son utilisation en tant que carburant automobile" C. Armengol, Les Cahiers du CLIP n°2, mai 1994.
 (3) RSV : résidu sous vide

le rendement global du groupe motopropulseur¹⁴ par rapport à une voiture pile à combustible équivalente directement alimentée en hydrogène. Il reste, par ailleurs à signaler, que pour certains constructeurs, l'utilisation du méthanol comme source d'hydrogène ne devrait être qu'une étape. L'objectif est d'arriver à employer l'essence comme carburant. Des publications font état d'un avancement certain dans le domaine. Mais, jusqu'à présent, aucun prototype fonctionnant avec ce type de réacteur n'a été mis au point. De plus, indépendamment des problèmes liés à la compacité et au temps de réponse élevé de ce type de système¹⁵, il faut préciser que les essences qui existent aujourd'hui ne pourraient pas convenir pour une telle utilisation (en particulier la concentration en soufre est trop élevée). Ainsi, cette solution ne serait envisageable qu'à partir de carburants de synthèse pouvant notamment garantir une absence totale de soufre. Dans ce cadre, les filières les plus en vues sont celles issues de la conversion du gaz naturel en carburant liquide. Il peut s'agir de celle du méthanol, mais également de voies possédant sensiblement les mêmes caractéristiques. On peut par exemple penser à DME (sous une pression de 5 bars) ou aux hydrocarbures issus du procédé Fischer-Tropsch.

Les rendements énergétiques des différentes filières sont reportés au tableau 5. Les valeurs doivent être considérées avec réserve. Le rendement énergétique global va de 10 % pour la pile à hydrogène électrolytique à plus de 50 % pour les véhicules hybrides en cycle urbain. Il est précisé que la valeur proposée pour le véhicule hybride est un ordre de grandeur.

Le tableau 6 met en évidence les différences de rendement des filières pile à combustible (hydrogène électrolytique) et hybride essence. Le rendement amont de la production d'hydrogène est très faible (19 %). Cette mauvaise performance est essentiellement la conséquence de deux étapes :

- la production de l'électricité utilisée lors de l'électrolyse de l'eau en vue de produire l'hydrogène (rendement de 40 % en moyenne); c'est le principal poste de consommation d'énergie;
- la phase d'électrolyse de l'eau.

L'exemple traité tableau 6 comporte un stockage de l'hydrogène sous forme liquide. Il existe deux autres moyens de stocker l'hydrogène à bord du véhicule : sous forme gazeuse sous haute pression (200 à 700 bars) ou lié à des matériaux (par adsorption ou associé à des métaux sous formes d'hydrures).

La phase liquide de ce carburant nécessite une température très basse (-253 °C), par contre sa densité énergétique est très élevée. A titre d'exemple, le prototype RENAULT FEVER possède une autonomie de 500 km avec seulement 8 kg d'hydrogène liquide.

L'hydrogène comprimé présente surtout le désavantage d'offrir une faible densité énergétique, ce qui limite fortement l'autonomie du véhicule. Les systèmes de stockage d'hydrogène par liaison chimique (adsorption sur fibre de carbone ou association avec des métaux) sont intéressants, car ils nécessitent des pressions relativement faibles (10 à 30 bars). Par contre leur poids est élevé et ils offrent une autonomie plus limitée (environ 250 km). Une étude du Financial Times¹⁶ estime, par exemple, qu'à capacité d'énergie équivalente, un système par

Véhicule PAC hydrogène liquide	Véhicule hybride essence 2005
Electrolyse	Extraction du pétrole
4,2 kep d'énergie primaire / kep d'H ₂	(valeur confidentielle PSA)
Transport de l'hydrogène gazeux et liquéfaction	Transport et raffinage
0,83 kep d'énergie primaire / kep d'H ₂	(valeur confidentielle PSA)
Distribution	Distribution de l'essence
0,1 kep d'énergie primaire / kep d'H ₂	(valeur confidentielle PSA)
Consommation totale amont	Consommation totale amont
5,13 kep d'énergie primaire / kep d'H ₂	1,23 kep d'énergie primaire / kep d'essence
Consommation du véhicule	Consommation du véhicule
0,024 kep/km	0,024 kep/km
Consommation globale d'énergie	Consommation globale d'énergie
12,1 kep/100 km	2,91 kep/100 km

Calcul effectué avec la conversion 1 MWh = 0,222 tep

Tableau 6
 Comparaison des consommations d'énergie associées aux filières "pile à combustible" (hydrogène électrolytique) et "hybride essence" (spécifications 2005)

adsorption pèse environ deux fois plus qu'un dispositif de stockage d'hydrogène comprimé et quatre fois plus qu'un dispositif à hydrogène liquide.

Il reste qu'aucun de ces modes de stockage ne se distingue par ses performances, chacun d'entre eux possédant des avantages et des inconvénients. Celui qui permettait a priori la plus grande autonomie a été privilégié. Mais, on remarquera que la différence au niveau énergétique pour ces différents modes de stockage n'est pas de nature à remettre en cause les mauvaises tendances dégagées pour la filière (la consommation finale d'énergie varie entre 12,1 et 10,4 $\text{kep}/100 \text{ km}^{17}$). Le poste principal de consommation d'énergie est celui de l'électrolyse et de la production d'électricité.

Les émissions

On a bien évidemment supposé que les émissions des voitures essence et diesel respecteraient les normes réglementaires. L'estimation de leur évolution pour l'ensemble des véhicules à motorisation thermique qu'ils soient à injection directe ou classique est donnée dans le tableau 7.

Pour le véhicule hybride essence, les données fournies par TOYOTA ont été utilisées. Elles ont été obtenues sur cycles japonais. Une baisse de 90 % des émissions de l'ensemble des polluants observés par rapport aux normes 96 (CO 0,27 g/km et HC +NO_x 0,097 g/km) a ainsi été appliquée. Ces réductions peuvent paraître élevées si on considère qu'elles s'appliquent au cycle européen. Pourtant, il apparaît que d'importants progrès sont réalisables bien avant le développement industriel de ce type d'automobile (2015 pour nos scénarios). De plus, comme on pourra le voir au paragraphe VII.2.2, le simple respect des normes 2005 assure une nette réduction des émissions pour l'ensemble du parc et ce, quels que soient les scénarios.

On précise, d'autre part, que les véhicules fonctionnant avec une pile à combustible sont considérés comme ne produisant aucun polluant à l'échappement.

Les niveaux de rejets de SO_x dépendent des quantités de soufre contenues dans le carburant. Les valeurs correspondantes exprimées en g/km sont calculées d'après l'évolution donnée dans le tableau 8 des concentrations en soufre contenues dans les produits pétroliers envisagés d'ici 2005.

Les consommations d'énergie du parc V.P. français : exercice prospectif

Parmi les cinq courbes d'évolution de la consommation d'énergie, on remarque que le scénario "pile à combustible hydrogène électrolytique" est le moins performant, et que la version "**véhicule hybride essence**" est la **meilleure des solutions étudiées**. Cette dernière est la seule qui, malgré l'augmentation du volume de voitures en circulation, permet une baisse de la dépense énergétique globale. En effet, pour compenser les effets de la croissance du parc à l'horizon 2050, une diminution de 50 % de la consommation unitaire est nécessaire.

Le scénario pile à combustible hydrogène électrolytique est très pénalisé par les mauvaises performances de l'électrolyse. Il montre bien que les récents progrès enregistrés sur le rendement des piles à combustible (jusqu'à 55 % sur les piles PEMFC) ne compensent pas les résultats médiocres de la production de ce carburant. L'hydrogène peut bien évidemment être produit à partir d'hydrocarbures (pétrole, gaz, charbon). Ces solutions présentent a priori moins d'intérêt car elles contiennent du carbone. C'est la production d'hydrogène à partir des résidus sous vide (issus du pétrole) qui offre alors la

g/km	Essence		Diesel			GNV		GPL	
	CO	HC+NO _x	CO	HC+NO _x		CO	HC+NO _x	CO	HC+NO _x
				Inj. indirecte	Inj. directe				
1992	2,7	0,97	2,7	0,97	0,97				
1996	2,2	0,5	1	0,7	0,9	0,8	0,3	0,37	0,15
1999	2,2	0,5	1	0,7	0,7	0,8	0,3	0,37	0,15
2000	2,3	0,35	0,64	0,56	0,56	0,6	0,24	0,26	0,1
2005	1	0,18	0,5	0,3	0,3	0,4	0,18	0,16	0,05

Tableau 7
Niveaux d'émissions des véhicules¹⁸

	1997	2000	2005
Essence	500	150	50
Gazole	500	250	50

Tableau 8
Niveau de concentration en soufre des carburants en ppm¹⁹

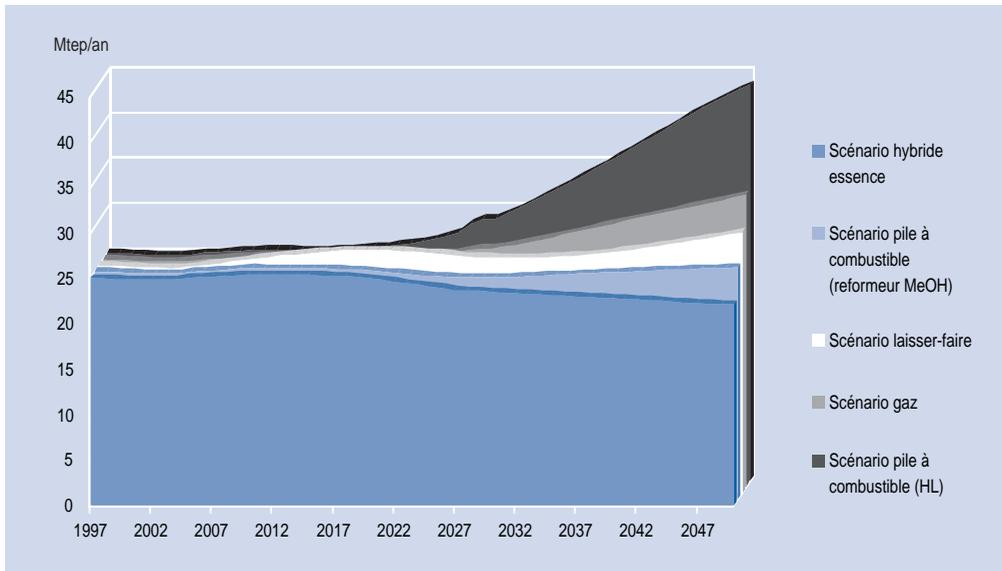


Figure 13

Evolution comparée de la consommation d'énergie du parc V.P. français suivant différents scénarios

meilleure efficacité énergétique, celle réalisée à partir du gaz naturel rejette le moins de CO_2 (cf. tableau 5).

Le scénario pile à combustible méthanol, malgré de bonnes performances au niveau de la consommation unitaire (3,5 l/100 km en équivalent essence), est pénalisé par le mauvais rendement énergétique de la mise à disposition du méthanol (60 %).

Bien que les véhicules essence et diesel enregistrent une diminution de leur besoin unitaire d'au moins 20 %, cette baisse ne suffit pas à compenser la croissance du parc ; la demande globale d'énergie du parc est orientée à la hausse dès 2030 pour atteindre 70 % de plus en 2050 par rapport à 1997.

Enfin, le scénario "gaz" engendre une plus forte consommation d'énergie que la variante "laisser-faire", car les véhicules diesel sont remplacés par des véhicules au gaz qui sont plus "énergivores".

Emissions de CO_2 du parc V.P. français : exercice prospectif

Les émissions de CO_2 suivent le même type d'évolution que la consommation d'énergie (figure 14) à ceci près que les rejets du scénario "gaz" sont moindres que ceux de son équivalent "laisser-faire", malgré une demande énergétique plus importante. L'explication provient du rapport H/C plus favorable au gaz : lors de la combustion d'une tep de gaz, on émet 25 % de

moins de CO_2 que lorsqu'il s'agit de pétrole.

La mauvaise performance du scénario "pile à combustible hydrogène" a pour origine la production du carburant par électrolyse. En effet, le parc des centrales électriques utilisé pour l'exercice est représentatif de la situation européenne. Si cette électricité était produite par des centrales nucléaires comme c'est le cas en France, les émissions de CO_2 seraient beaucoup plus basses (au niveau des meilleures perspectives présentées). Mais, si l'hydrogène devient un carburant automobile majeur, sa production a peu de chance de se trouver limitée à la France.

Emissions de polluants du parc V.P. français : exercice prospectif

Quel que soit le scénario, l'évolution des normes et le simple renouvellement du parc automobile assurent une chute importante des quantités de CO, d'HC et de NO_x et cela dès 2015. Les différences, entre les divers scénarios, n'apparaissent que sur les dernières années étudiées, vers 2050 (figure 15). La prise en compte des filières carburants modifie très peu cette tendance.

Le scénario "pile à combustible hydrogène électrolytique" fournit des résultats bien différents. Il est dramatiquement affecté par la production d'électricité nécessaire à l'électrolyse de l'eau. Seul ce scénario donne une hausse très importante des rejets atmosphériques. Le fait d'avoir

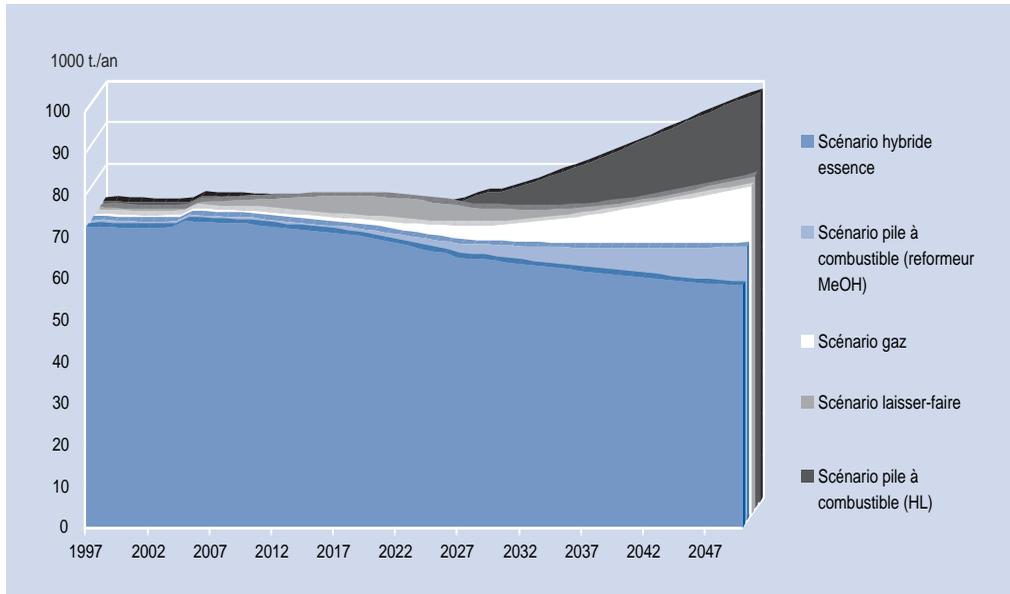


Figure 14

Evolution comparée des émissions de CO₂ suivant différents scénarios

considéré dans les calculs une production d'électricité réalisée à partir d'un parc de centrales représentatif de la situation européenne explique cette contre performance. Il est évident que les résultats auraient été bien différents avec le parc français actuel.

Les émissions de SO_x se comportent très différemment de celles de CO, d'HC et de NO_x. En effet, elles ont lieu essentiellement à la source, lors des opérations de désulfuration des produits pétroliers. En conséquence, quels que

soient les scénarios, compte tenu des normes programmées d'ici 2005, on observe une très nette chute des quantités de SO_x émises au niveau des véhicules. En revanche, si on incorpore les émissions de la filière carburant le niveau d'émission globale reste stable dans un cadre "laisser-faire".

La réduction de la teneur en soufre des carburants pétroliers n'entraînera qu'une diminution relative des quantités de SO_x émises. A l'avenir, au lieu d'être générées à l'échappement, elles

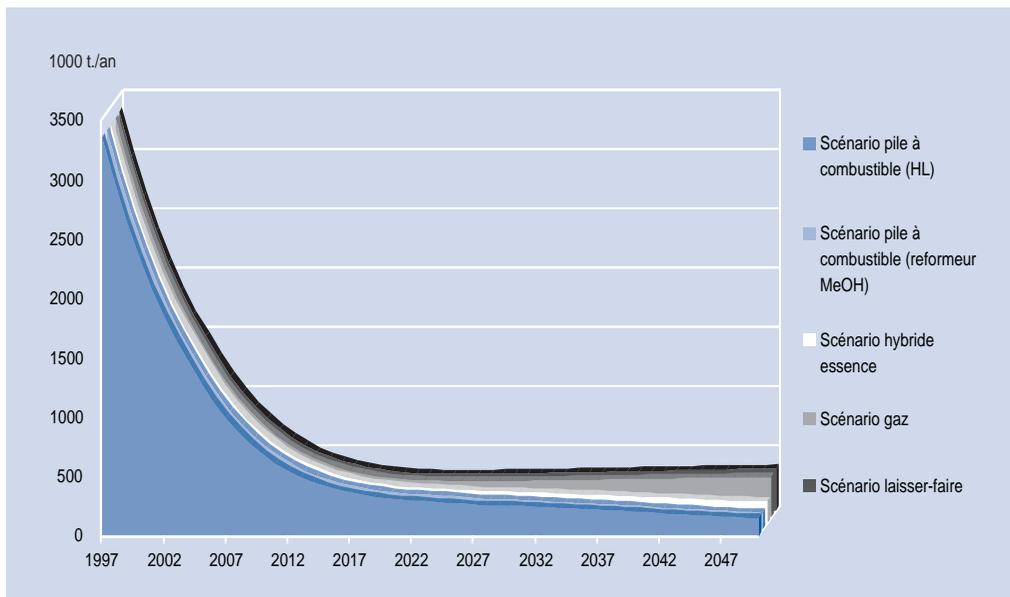


Figure 15

Evolution comparée des émissions globales de CO (filières carburants incluses)

seront traitées en raffinerie. Mais, la diminution des rejets de la filière (en g/kg de carburant produit) sera compensée par l'augmentation des besoins en énergie du parc de véhicules particuliers. Ainsi, l'impact de la désulfuration des carburants pétroliers se répercutera essentiellement au niveau local sur l'amélioration de la qualité de l'air des villes.

Cette sévère désulfuration permettra, d'autre part, le fonctionnement des pots catalytiques d'oxydation des véhicules diesel et à plus long terme des versions "De-NO_x" des voitures

essence, dont l'efficacité est affectée par la présence d'oxydes de soufre. Le développement de ces équipements conditionnera d'ailleurs en grande partie l'avenir des moteurs à mélange pauvre qui produisent des quantités importantes de NO_x.

On remarquera sur la figure 17 l'absence de valeurs pour la pile à hydrogène électrolytique. En effet, des projections à moyen et long termes des normes d'émissions de SO_x pour les centrales thermiques en France et en Europe n'étaient pas disponibles.

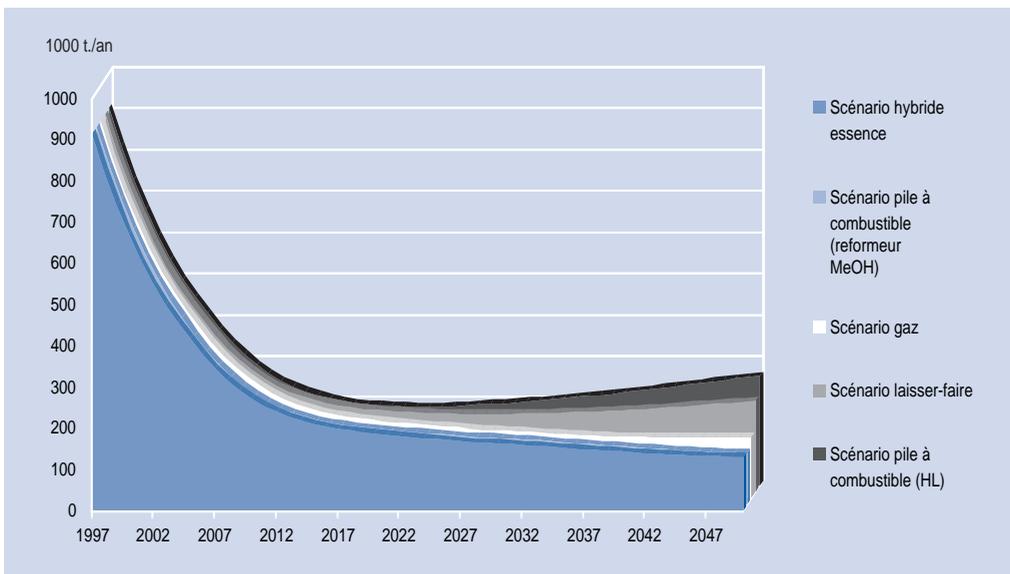


Figure 16
Evolution comparée des émissions globales de HC+NO_x (filières carburants incluses) du parc V.P. français suivant différents scénarios

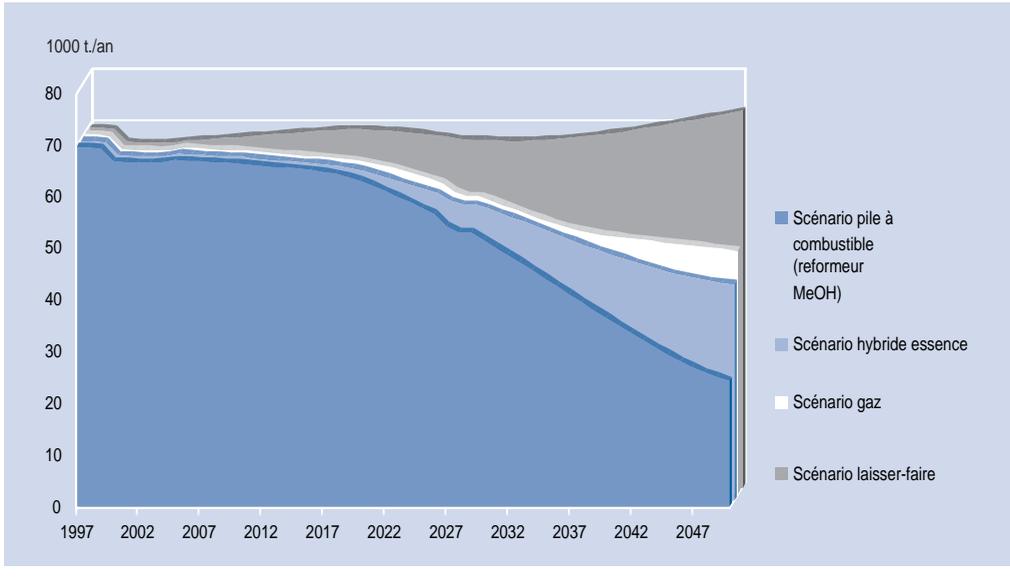


Figure 17
Evolution comparée des émissions globales de SO_x (filières carburants incluses) du parc V.P. français suivant différents scénarios

Synthèse des résultats

Parmi les solutions abordées, les motorisations hybrides de nouvelle génération semblent posséder le meilleur potentiel. Ces véhicules sont différents des voitures de ce type conçues jusqu'à aujourd'hui. Quelle que soit l'architecture retenue pour l'association des deux motorisations (en parallèle ou en série), les constructeurs cherchaient à mettre au point un véhicule qui n'émet aucun polluant en ville (propulsion uniquement électrique), et devienne un véhicule thermique classique en zones extra urbaines. A titre d'exemple l'AUDI DUO qui possède 320 kg de batteries au plomb est issue de cette conception "deux en un".

Les nouvelles automobiles hybrides sont élaborées dans un esprit bien différent. Les constructeurs cherchent à mettre au point des véhicules au comportement beaucoup plus homogène. La double motorisation est utilisée de façon à ce que l'électrique soutienne la propulsion thermique pour qu'elle fonctionne dans les meilleures conditions possibles (en termes de rendement et d'émissions de polluants).

Physiquement, les deux moteurs ne sont plus séparés. Ils sont imbriqués l'un dans l'autre. Cette proximité permet l'emploi d'un élément essentiel,

la transmission "continûment variable" autrement dit, la boîte de vitesse à rapport continu. C'est grâce à elle que sont obtenus les principaux gains sur le rendement. La gestion électronique de l'ensemble du groupe motopropulseur est le second élément important de ces nouvelles automobiles. C'est lui qui répartit la puissance demandée entre les deux moteurs et qui fait que la voiture se comporte soit comme un hybride série, soit comme un hybride parallèle.

Au niveau de la consommation, leurs performances s'expliquent par trois facteurs majeurs : la récupération de l'énergie de freinage, le fonctionnement en mode "stop and go"²¹ (également possible avec le système Dynalto de Citroën) et l'utilisation du moteur thermique dans des plages de régime où le rendement est le meilleur. Au total, une amélioration de l'efficacité énergétique de 100 % peut être atteinte par rapport à un véhicule classique essence, au moins pour l'instant sur cycle urbain.

Au niveau des émissions, le fait de limiter pour le moteur thermique les phases de transition permet d'éliminer celles qui sont les plus productrices de polluants. Le véhicule hybride permettrait donc de sortir du dilemme qui met dos à dos la réduction des émissions de CO₂ et celle des rejets de NO_x. En effet, si la réduction de la consommation

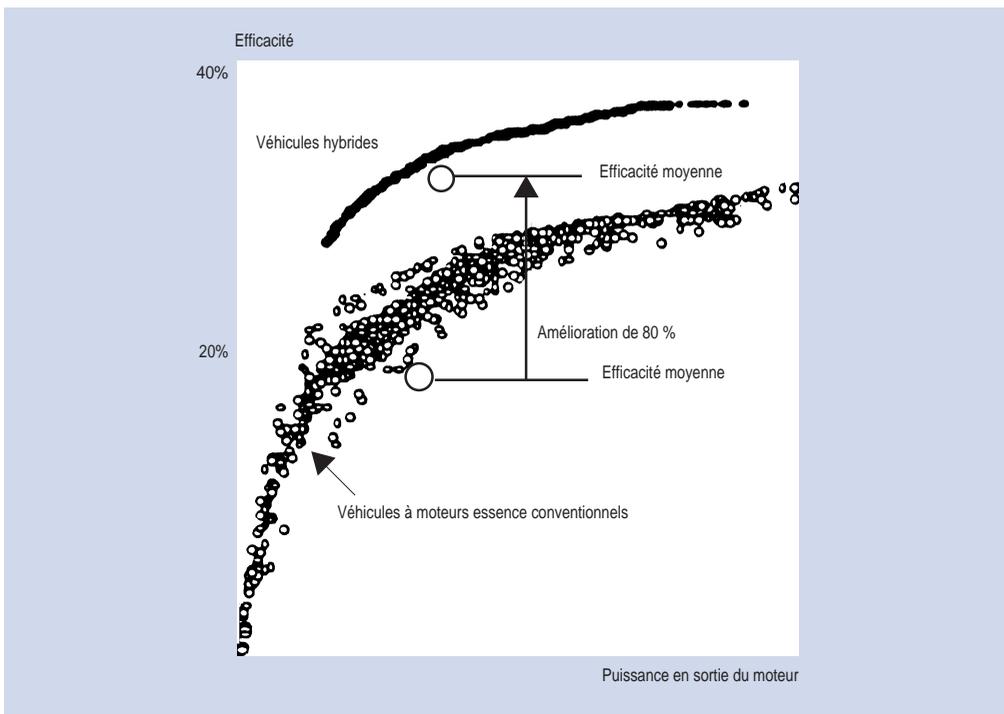


Figure 18

Amélioration du rendement énergétique d'un véhicule hybride par rapport à un véhicule équivalent essence d'après Toyota. Amélioration observée sur la PRIUS en cycle urbain avec utilisation de l'énergie électrique récupérée lors du freinage du véhicule.

est uniquement abordée par le développement de moteurs à injection directe, les émissions de CO et HC sont diminuées, mais celles de NO_x sont augmentées. Un gain de 10 % sur la consommation se traduit par une augmentation d'environ 0,1 g/km de NO_x²². La solution la plus couramment citée pour contrer ce phénomène est l'emploi de pots "De-NO_x". Mais, malgré les moyens importants investis jusqu'à présent, les résultats ne sont pas encore satisfaisants.

En revanche, les différents points soulevés plaident en faveur du véhicule hybride puisque les gains sur la consommation sont obtenus par d'autres voies que l'appauvrissement du mélange air/carburant. Le potentiel de la voiture à propulsion hybride semble, par ailleurs, d'autant plus important que ses performances peuvent être améliorées par l'emploi de moteurs à injection directe (essence ou diesel).

La réduction de la masse des véhicules

Le rôle tout à fait déterminant du couple moteur/carburant a pu être apprécié précédemment. Une fois ce paramètre fixé, les performances environnementales du véhicule peuvent encore être améliorées par de nombreuses dispositions.

Un des facteurs majeurs est la masse. Moins l'automobile aura d'inertie, moins elle consommera de carburant. De plus, en diminuant la masse de la voiture, on améliore son comportement dynamique et sa sécurité (avec une masse moindre, on réduit la distance de freinage ou l'énergie à dissiper en cas de choc entre deux véhicules, à condition que celui d'en face reste de dimension comparable).

Mais, il y a encore un compromis à trouver, car en général les matériaux plus légers sont plus "énergivores". En d'autres termes, pour analyser la validité de la préconisation de tel ou tel matériau, il faut non seulement prendre en compte la phase d'utilisation du véhicule mais également ses phases de production et de recyclage.

Il s'agit alors d'évaluer si la surconsommation énergétique effectuée en amont de l'utilisation du véhicule est réellement contrebalancée par l'économie de carburant obtenue par la réduction de la masse.

La caisse en blanc aluminium : méthodologie

Un exercice prospectif sur l'introduction d'un véhicule équipé d'une caisse en blanc en aluminium²³ a été réalisé. Trois évolutions ont été envisagées : un scénario "laisser-faire caisse en blanc acier"²⁴, un autre "hybride essence caisse en blanc acier" et un dernier "hybride essence caisse en blanc aluminium"²⁵.

Sachant que la masse d'une caisse en blanc acier représente entre 20 % et 30 % du poids total d'un véhicule et que la caisse en aluminium pèse environ 40 % de moins que son équivalent en acier, la masse globale de l'automobile "aluminium" est réduite de 10 % par rapport à une voiture classique. Cela se traduit par une économie en terme de consommation de 0,5 l/100 km, valeur qui prend en compte le nécessaire redimensionnement du moteur. En l'absence de données spécifiques sur le véhicule hybride, on peut supposer que cette réduction de 0,5 l/100 km constitue pour l'hybride une valeur maximale. En effet, dans ce cas, la diminution du poids ne devrait pas entraîner un redimensionnement aussi important du moteur thermique qui est en général déjà de faible cylindrée.

La caisse en blanc aluminium : résultats

La consommation d'énergie pour le scénario hybride caisse en blanc aluminium est légèrement inférieure à celle de la variante hybride caisse en blanc acier (de l'ordre de 1 Mtep d'écart en 2050 sur 25 Mtep, c'est-à-dire environ 4 %). On observe le même type de comportement pour les émis-

sions de CO₂, où le cas hybride caisse en blanc aluminium garde les meilleures performances. Pour atteindre un objectif de baisse importante de la consommation par la réduction de la masse, on doit intervenir sur l'ensemble des éléments d'un véhicule. A titre d'exemple, on donne dans le tableau 9 une répartition de la masse d'une automobile où l'on voit qu'aucun élément n'est majoritairement représenté.

Exemple de répartition du poids d'une automobile

Carrosserie nue	26 %
Ouvrants	6 %
Groupe motopropulseur	18 %
Liaison au sol	21 %
Poste de conduite, sièges et habillages	12 %
Divers	17 %

Tableau 9
Répartition du poids d'une automobile
Source :RENAULT²⁶

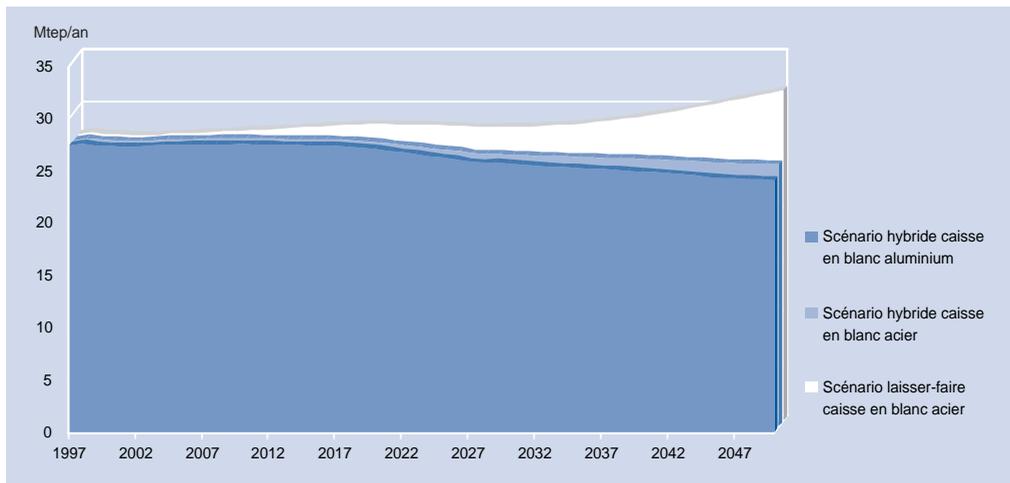


Figure 19

Evolution comparée des consommations globales (filiales carburants, construction et recyclage des voitures inclus) d'énergie du parc V.P. français suivant différents scénarios

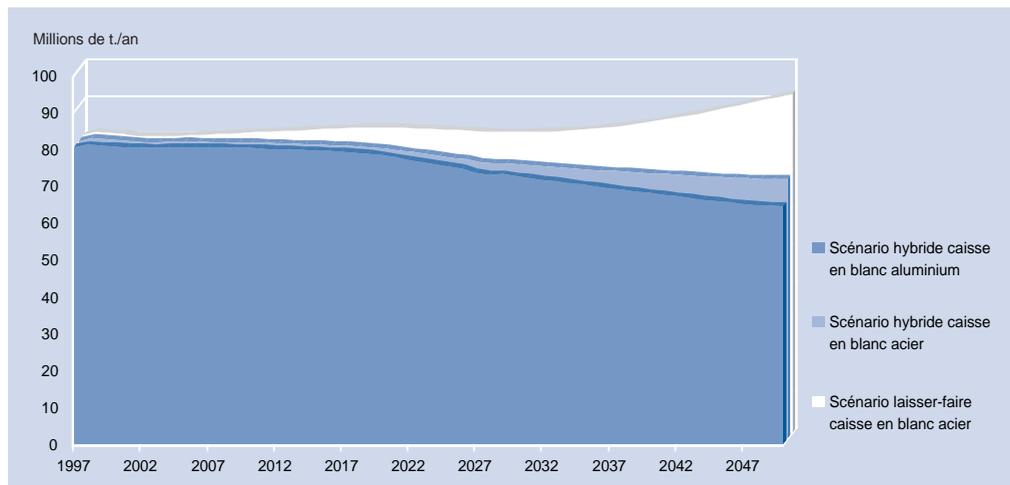


Figure 20

Evolution comparée des émissions globales de CO₂ (filiales carburants, construction et recyclage des voitures inclus) du parc V.P. français suivant différents scénarios

Conclusion

L'objectif de l'analyse prospective de la filière automobile en France était de mesurer l'effet comparé sur les consommations d'énergie et les émissions globales de polluants de la pénétration de nouvelles technologies dans le parc automobile à l'horizon 2050.

Cette étude a permis d'établir une hiérarchie entre différentes technologies, en fonction de leur intérêt au regard d'un des défis majeurs des prochaines décennies en matière de développement durable : diminuer à la fois les demandes d'énergie et l'ensemble des émissions de polluants imputables aux transports, même dans un contexte d'accroissement élevé du trafic automobile. Les travaux prospectifs réalisés sont riches d'enseignements. Plusieurs points méritent, en effet, d'être soulignés.

Il apparaît en premier lieu, que **la réduction de la consommation d'énergie des véhicules est le principal défi du point de vue du développement durable, que doivent aujourd'hui relever les constructeurs automobiles**. En effet, à l'exception des émissions de CO₂ qui évoluent parallèlement aux besoins énergétiques, les rejets de l'ensemble des autres polluants sont en 2050 au moins trois fois inférieurs à leur niveau actuel, quel que soit le scénario étudié. L'objectif de réduction des pollutions locale ou régionale devrait donc être atteint sans difficulté majeure si, grâce au seul renouvellement du parc, tous les véhicules en circulation sont équipés d'un pot catalytique (ce qui devrait être le cas dès 2015).

Le GPL et plus encore le gaz naturel, se distinguent tout particulièrement par leurs faibles niveaux d'émissions lors de la combustion. Ce constat est d'autant plus vrai que pour le GNV, les HC-NO_x, polluants impliqués dans la formation d'ozone, sont en moyenne deux fois moins réactifs que ceux issus de la combustion de l'essence. En ce qui concerne le bilan énergétique et l'environnement global, les résultats sont plus nuancés.

Comment relever le défi d'une réduction de la consommation globale d'énergie et des émissions de CO₂ imputables aux transports automobiles ? Les constructeurs automobiles peuvent-ils concevoir des technologies nouvelles dont la pénétration contribuerait à la satisfaction de cet objectif ? Au regard des scénarios étudiés, la réponse est positive. Deux voies principales d'innovations technologiques ont été examinées : le développement de nouveaux couples moteur/carburant et la réduction de la masse des véhicules.

De cet examen, on tire l'enseignement suivant : **pour réduire les consommations unitaires de carburant des voitures particulières, il apparaît plus efficace d'agir en priorité sur le rendement des véhicules que sur la masse**. En effet, une réduction de 10 % de la masse d'une automobile n'entraîne pas de diminution équivalente des besoins en carburant. A l'inverse, les gains enregistrés au niveau des rendements moteurs se répercutent directement sur la consommation. Le développement de nouveaux couples moteur/carburant apparaît donc comme un axe de recherche prioritaire. La réduction de la masse des véhicules ou le développement d'autres mesures techniques visant, par exemple à améliorer le Scx ou à réduire les frottements, sont des axes de recherche complémentaires. Il convient toutefois de ne pas les négliger pour diminuer rapidement les consommations.

tions d'énergie du secteur des transports, surtout dans un contexte de fort accroissement des trafics. Fort de ce constat, reste à identifier le ou les couples moteur/carburant offrant les meilleures perspectives de réduction de la dépense en carburant et de la consommation globale d'énergie sur l'ensemble de la filière. Les scénarios prospectifs construits pour comparer les différentes solutions ont permis d'identifier ceux qui entrent dans cette catégorie et ceux qui à l'inverse, n'offrent que peu d'intérêt du point de vue de l'environnement global. On constate en particulier que la pile à combustible hydrogène électrolytique, contrairement à l'opinion couramment admise, n'apparaît pas comme une solution performante, tant du point de vue du rendement global que des émissions de polluants sur l'ensemble de la filière. La diminution des rejets est inférieure à celle enregistrée pour les autres couples moteur/carburant compte tenu des caractéristiques du parc électrique européen. Cela dit, l'intérêt au plan local des piles à combustible n'est bien sûr pas remis en cause. La pile à combustible reformeur méthanol et la pile à hydrogène électrolytique présentent par contre un avantage très net d'émissions au niveau local.

La technologie pile à combustible hydrogène électrolytique est, en fait, pénalisée par la production du carburant. Les récents progrès enregistrés sur le rendement des piles à combustibles (jusqu'à 55 % sur les piles PEMFC²⁷) ne compensent pas le faible rendement de la production d'hydrogène. Seule la pénétration massive des énergies renouvelables ou du nucléaire dans la production d'électricité pourrait rendre intéressante l'utilisation de ces piles du point de vue de l'environnement global. Mais, compte tenu du rendement global de la filière (10 % contre 41 % au maximum pour l'hybride essence en cycle urbain par exemple), il faudrait que la part des énergies non émettrices de CO₂ dans le parc électrique dépasse 75 %, pour que cette technologie soit au moins aussi intéressante que les véhicules hybrides en terme d'environnement global. C'est le cas aujourd'hui en France, mais c'est loin d'être la situation en Europe et encore moins dans l'ensemble du monde. Dans le cas où la pile à combustible utilise du méthanol, le rendement ne dépasse pas 33 %, à comparer à celui des véhicules hybrides qui peut atteindre 40 % au maximum en cycle urbain. Là encore, la pile à combustible se place moins favorablement que l'ensemble des véhicules hybrides.

En outre, il faudrait également surmonter certains obstacles inhérents aux oppositions diverses qu'un développement en série de cette technologie ne manquerait pas de soulever. En effet, en plus des problèmes de distribution et de stockage de l'hydrogène, les efforts de R&D dans le domaine des piles à combustible relèvent d'une stratégie de saut technologique ou encore de rupture, que bon nombre de constructeurs, équipementiers et pétroliers sont loin de pouvoir adopter.

Le véhicule hybride essence offre de meilleures perspectives de réduction des consommations d'énergie primaire et des problèmes d'environnement global. De plus, son développement ne suppose pas de rupture technologique majeure, mais relève plutôt d'une stratégie "de petits pas" qui devrait être à terme gagnante à bien des égards. En particulier, cette filière permet de bénéficier de l'ensemble des progrès effectués sur les moteurs thermiques, ainsi que sur la transmission et les moteurs électriques, d'utiliser les réseaux de distribution de carburants existants et de ne pas bouleverser le paysage industriel.

A l'horizon 2050, dans un contexte d'accroissement du parc (+40 % en cinquante ans) et donc des trafics automobiles, seul le véhicule hybride essence (ou diesel) permet d'envisager une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de polluants et de gaz à effet de serre.

Bien entendu, dans les pays pourvus d'un important parc automobile, l'hypothèse d'une forte accélération de la pénétration des énergies non polluantes pourraient remettre en cause les conclusions de cette étude. Cependant, le développement de la filière hybride présente l'avantage de permettre des avancées sur toute la partie électrique des véhicules. Avancées directement utilisables dans le cas où la pile à combustible se trouverait mieux placée à long terme vis-à-vis des problèmes d'environnement. Les deux stratégies ne s'opposent donc pas. Le développement des véhicules hybrides dans un premier temps peut constituer le tremplin nécessaire à celui des piles à combustible dont l'intérêt deviendrait croissant dans un contexte d'accentuation des problèmes liés à l'épuisement des réserves pétrolières.

Les multiples solutions envisagées jusqu'à présent et développées pour mettre au point un véhicule "vert" convergent actuellement vers ce type de solution. La PRIUS conçue par Toyota et le système Dynalco de Citroën qui devrait être industrialisé d'ici 2001, montrent l'intérêt que les constructeurs portent aujourd'hui à l'hybridation et à la pénétration toujours croissante de l'électricité dans l'automobile. Les Américains ne sont pas en reste, car toutes les solutions envisagées pour satisfaire les

critères environnementaux du PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicle) reposent sur le développement du véhicule hybride²⁸.

En outre, les performances de ce type de voiture peuvent être améliorées par la réduction de la masse ou l'emploi de moteurs à injection directe. Les derniers résultats obtenus sur les moteurs (injection directe) et sur les véhicules hybrides permettent une vision optimiste de l'avenir. Une automobile cumulant ces solutions (moteur injection directe, propulsion hybride) pourrait avoir des performances remarquables.

Reste qu'avec la multiplication des éléments (plusieurs moteurs, etc.) et malgré les progrès réalisés notamment sur les batteries, le poids devient l'ennemi numéro un du véhicule hybride. Les solutions présentées jusqu'à maintenant peuvent être optimisées par l'emploi de matériaux plus légers : l'aluminium, le magnésium, le titane, les produits de synthèse (fibre de carbone, etc.). On peut ajouter que cette concurrence incite à la recherche d'un allègement de l'acier. A ce propos, les résultats atteints par le consortium USLAB sont tout à fait encourageants : réduction de 25 % de la masse d'une caisse en blanc acier sans surcoût, ni problème pour la sécurité des véhicules²⁹.

Enfin, la réduction des pertes d'énergie dues aux frottements mécaniques ou à l'air (diminution du C_x et de la surface frontale des véhicules³⁰) ne doit pas être oubliée.

Ces progrès doivent bien sûr se généraliser aux véhicules des particuliers. En effet, les techniques déjà disponibles sur le marché, qui pourraient engendrer une baisse sensible de l'impact de la filière automobile sur l'environnement, ne sont pas utilisées au maximum de leurs possibilités. A titre d'exemple, les gains sur la consommation obtenus par l'injection directe diesel sont compensés par la multiplication des équipements. De même, la caisse en aluminium proposée par AUDI sur son modèle haut de gamme A8 sert surtout à améliorer les qualités dynamiques du véhicule. Au vu des équipements proposés sur cette automobile, les gains en termes de consommation du fait de l'utilisation d'une caisse plus légère sont négligeables. D'une manière plus générale, l'amélioration du rendement du moteur thermique ne s'est que partiellement répercutée sur les consommations des véhicules particuliers ces dernières années. Paradoxalement, on a même observé une tendance à la hausse des consommations unitaires.

Enfin, ces nouvelles technologies qui ont un réel potentiel pour réduire l'impact de la filière automobile sur l'environnement mettront du temps non seulement à être produites, mais aussi à être diffusées largement dans le parc. Ainsi, la généralisation du pot catalytique n'aura atteint son plein effet qu'à partir de 2015, c'est-à-dire environ 20 ans après son apparition sur le marché. Les véhicules hybrides ne devraient pas être produits en nombre avant 2005. Les premières conséquences de leur pénétration sur le marché ne se révéleront qu'à partir de 2015. Dans un même ordre d'idée, les voitures à pile à combustible (hydrogène électrolytique, ou à reformeur d'hydrocarbures), technologie qui semble moins "mûre", ne devraient pas apparaître avant 2015. Leur impact sur la qualité de l'environnement ne devrait se faire sentir qu'à partir de 2025.

Du point de vue du développement durable, les travaux prospectifs présentés montrent qu'il est possible d'améliorer sensiblement la situation de l'industrie automobile au cours des prochaines décennies. Le véhicule hybride essence ou diesel permettrait, grâce à la bimotorisation électrique et thermique, de réduire la consommation globale d'énergie et l'ensemble des émissions de polluants, en dépit d'un accroissement de 40 % du parc automobile. De plus, à l'inverse des piles à combustible hydrogène, qui malgré un bon rendement (55 %), restent pénalisées par la faible efficacité énergétique de la mise à disposition du carburant (de 60 % pour l'hydrogène issu des résidus sous vide pétroliers à 18 % pour l'hydrogène obtenu par électrolyse), les véhicules hybrides essence ou diesel bénéficient de la bonne efficacité énergétique des filières issues du pétrole. L'autre avantage de ces mêmes filières est qu'elles n'exigent pas de modifications d'infrastructure pour la distribution des carburants. Du point de vue du développement durable, le problème se présente alors en termes d'évolution du prix du pétrole et d'épuisement des réserves.



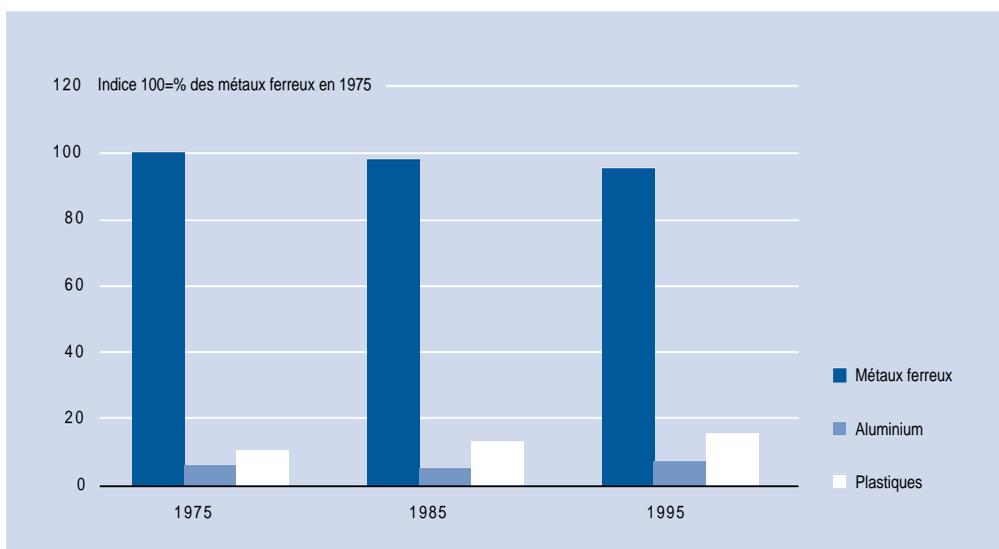
Annexes

Tableau 10
Evolution des consommations spécifiques de matières premières

	1975	1985	1995
Minerai de fer	1,74	1,33	1,01
Ferraille	0,36	0,36	0,52
Charbon	0,24	0,22	0,18
Bauxite	1,80	1,80	1,80
Déchets d'aluminium	0,60	0,60	0,60
Pétrole (plastiques)	1,02	0,96	0,98
Gaz (Plastiques)	0,18	0,24	0,22

Source : d'après les statistiques de l'Agence Internationale de l'énergie, de la Fédération Française des Aciers, et de 'European Aluminium Association. Egalement à partir de : A. Gérard, "L'aluminium, facteur d'économie d'énergie dans la construction automobile", Revue de l'aluminium, mai 1974 et C. RAIMBAULT, J.P. ARLIE, A. CHAUVEL, P. LEPRINCE, "Evolution of the refining and petrochemical industry in energy conservation in refining and petrochemistry", 1975, éditions Technip.

Figure 21
Evolution de la répartition des différents matériaux pour une voiture - Source : PAS



ANNEXES

Tableau 11

Récapitulatif des filières moteur/carburant

Source : d'après IFP, PSA, et "The Life of Fuels, motor fuels from source to end use", Ecotrafic AB, Stockholm, mars 1992

Essence	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
injection classique (1996)	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	1,15	41,62	0,00001	0,00027	0,0002
Utilisation	6,53	189,57	2,20	0,50	0,0001
Total	7,69	231,18	2,20	0,50	0,0002
Essence	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
injection directe (2005)	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	1,23	34,94	0,000001	0,00025	0,0002
Utilisation	5,23	151,65	1,00	0,18	0,0000
Total	6,45	186,59	1,00	0,1 CO2 8	0,0002
Diesel	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
injection classique (1996)	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	0,63	22,35	0,000005	0,0002	0,0001
Utilisation	5,69	176,33	1,00	0,70	0,0001
Total	6,32	198,67	1,00	0,70	0,0002
Diesel	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
injection directe (2005)	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	0,87	19,15	0,000004	0,00016	0,0001
Utilisation	4,55	141,06	0,50	0,30	0,0000
Total	5,42	160,22	0,50	0,30	0,0001
GPL	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
injection classique (1996)	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	1,15	42,19	0,00001	0,0003	0,0002
Utilisation	6,53	172,52	0,37	0,15	-
Total	7,69	214,71	0,37	0,15	0,0002
GPL	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
injection directe (2005)	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	1,23	35,42	0,000001	0,0003	0,0002
Utilisation	5,23	138,01	0,16	0,05	-
Total	6,45	173,43	0,16	0,05	0,0002
GNV	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
injection classique (1996)	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	0,98	14,42	0,00002	0,00005	-
Utilisation	6,53	153,46	0,80	0,20	-
Total	7,51	167,88	0,80	0,20	-
GNV	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
injection directe (2005)	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	0,78	11,53	0,000016	0,00003	-
Utilisation	5,23	122,77	0,40	0,21	-
Total	6,01	134,30	0,40	0,21	-
Hybride	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
essence (2005)	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	0,55	15,76	0,0000002	0,0001	0,0001
Utilisation	2,36	68,40	1,00	0,18	0,0000
Total	2,91	84,16	1,00	0,18	0,0001
Pile à combustible	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
hydrogène liquide	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	9,74	244,90	0,00017	0,00226	nd
Utilisation	2,36	-	-	-	-
Total	12,10	244,90	0,00017	0,00226	nd
Pile à combustible	Consommation	CO2	CO	HC+NOx	SO2
méthanol	(kep/100 km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
Amont	1,83	71,93	0,000017	0,000136	0,0001
Utilisation	2,75	79,17	-	-	-
Total	4,59	151,10	0,000017	0,000136	0,0001

Bibliographie

- ▶ ADEME – “Recyclage automobile : vers une valorisation totale”, 7-8 octobre 1996.
- ▶ ADEME, “Les déchets en chiffres : données et références”, Paris, Ademe, 1994, 146 p.
- ▶ APME, “Eco-profiles of the European polymer industry”, report n° 1-10, APME, 1992-1997.
- ▶ Armengol C., Ben-Saïd B., “Emissions de gaz à effet de serre associées aux véhicules thermiques et électriques sur toute la chaîne énergétique”, IFP, rapport interne 41086, janvier 1994
- ▶ AFNOR, “Conception des véhicules en vue de l’optimisation de leur valorisation en fin de vie”, norme n° XP R10-402, Paris La Défense, AFNOR, juillet 1996, 27 p.
- ▶ Balestrini A., Levizzari A., “Life Cycle Analysis of Automotive Glass : Production and Recycling”, SAE Technical Paper Series 970697.
- ▶ Barbier C., Martinez N., Dessus B., “Le moteur à explosion, un exercice de prospective mondiale des transports routiers”, dans *Cahiers du CLIP n°1*, c/o CNRS ECOTECH Meudon, octobre 1993, pp 5-38
- ▶ Bayer H.M., “Life cycle Assessment - combined efforts of the European Automotive Industry”, SAE Technical Paper Series 971172.
- ▶ Béranger G., Henry G., Sanz G., “Le livre de l’acier”, Paris, Lavoisier, 1994.
- ▶ Bourdeau B , “Evolution du parc automobile Français entre 1970 et 2020”, Thèse de Doctorat, Université de Savoie, Chambéry, 1998.
- ▶ Buxmann E.K., “Ecological aspects of the use of aluminium in cars, with particular regard to recycling techniques”, *Resource, conservation and recycling*, n°10, 1996, pp. 17-23.
- ▶ CEE, “Energy Efficient Technology in the Glass Industry”, Rapport de la Commission Européenne, Septembre 1994.
- ▶ Chapelle A., “L’accord cadre sur le traitement des VHU : une opportunité pour les matières plastiques”, Paris, Colloque ADEME - Recyclage automobile : vers une valorisation totale, 7-8 octobre 1996.
- ▶ CITEPA, “Les émissions atmosphériques dans l’industrie du verre”, Rapport CITEPA, n°140, septembre 1993.
- ▶ Delacroix F. , “Point d’avancement sur les travaux du Comité de suivi du Verre”, dans *Verre*, vol 2, n°6, nov. déc. 1996, pp 17. 21.
- ▶ Deluchi M.A., “Emissions of greenhouse gases from the use of transportation fuels and electricity”, Center for Transportation Research, Argonne, Illinois, novembre 1991, vol. 1.
- ▶ Dessus Benjamin, “Incertitudes et promesses technologiques à long terme dans le domaine énergétique”, Paris.
- ▶ EAA, “Ecological profile report for the European Aluminium Industry”, EAA, Brussels, 1996.
- ▶ Eliasco E., “L’aluminium dans l’automobile : nouvelles perspectives d’utilisation et de recyclage”, Paris, Colloque ADEME - Recyclage automobile : vers une valorisation totale, 7-8 octobre 1996.
- ▶ Fusslar Cod., Krummenocchar B., “Eco balance as : a key to better environmental material choices dans automobiles design”, in *Materials & Design*, Vol. 12, n°3, June 1991.
- ▶ Gérard A., “L’aluminium facteur d’économie d’énergie dans la construction automobile”, in *Revue de l’aluminium*, n°429, mai 1974.
- ▶ Gros B., “Contribution de l’acier au recyclage et à la recyclabilité des VHU”, Paris, Colloque
- ▶ Gros B., “Le recyclage, les écobilans (Usinor Sacilor)”, dans *Revue annuelle de l’UE-ENSAM*, Automobile et progrès, n°25, 1992, pp 60-66.

- ▶ N. Han-H. "The Environmental Impact of steel and aluminium Body in whites", dans *JOM*, février 1996, Vol. 48, n°2, pp. 33-38.
- ▶ L. Hivert, "Le parc automobile des ménages. Etude en fin d'année 1995", INRETS, Arcueil, 1996.
- ▶ IEA, "CO₂ emissions from fuel combustion", 1997
- ▶ IISI, "La concurrence entre l'acier et l'aluminium dans les automobiles", IISI, Brussels, 1994.
- ▶ IISI, "Statistics on Energy in the steel industry", Brussels, International Iron and Steel Institute (IISI), report 1996.
- ▶ Jean Alain, "La co-combustion des RBA", Paris, Colloque ADEME - Recyclage automobile : vers une valorisation totale, 7-8 octobre 1996.
- ▶ Kabayashi O., "Car life cycle Inventory Assessment", SAE Technical Paper Series 971109.
- ▶ Kaiser M., "Utilization and development of Aluminiums in the car Body", Paris, Colloque ADEME - Recyclage automobile : vers une valorisation totale, 7-8 octobre 1996.
- ▶ Kaniut C., Cotiner H, Franzeck J., "Life cycle Assessment of a complete car - the Mercedes Benz Approach", SAE Technical Paper Series 971166.
- ▶ Kassamaly A. & al., "La valorisation énergétique des résidus de broyage (Renault)", dans *Revue annuelle de l'UE-ENSAM*, Automobile et progrès, n°25, 1992, pp 150-153.
- ▶ Kurihara Y., "The role of Aluminium in automotive weight reduction", Part I & II & II, dans *JOM*, Nov. 1993, 02/94 et 05/94, Vol. 45 n° 11, Vol. 46 n°2, Vol. 46 n° 5. pp. 32-33, et pp. 32-35 et pp. 12-13.
- ▶ Le Borgne R., SAE, 971160.
- ▶ Le Roy Etienne, "L'automobile et ses déchets", dans *Revue annuelle de l'UE-ENSAM*, Automobile et progrès, n°25, 1992, pp 139-143.
- ▶ Lucchita J.C., "Le recyclage du verre", dans *Revue annuelle de l'UE-ENSAM*, Automobile et progrès, n°25, 1992, pp 104-107.
- ▶ Maroger Y., "Politique d'allègement et réduction de la consommation", Symposium Acier et carrosserie automobile, 14-15 septembre 1995
- ▶ Martinez Nathalie, Dessus Benjamin, "Les enjeux environnementaux de la pénétration du véhicule électrique en Europe", dans *La Revue de l'Energie*, n°463, novembre 1994, pp.636-648.
- ▶ Meny H. & al., "Le recyclage des matériaux automobiles (cas de Renault)", dans *Revue annuelle de l'UE-ENSAM*, Automobile et progrès, n°25, 1992, pp 80-84.
- ▶ Messrs Meunier Y., De Bruyer Kops O., "Energy Efficiency in the steel Industry with Emphasis on developing countries", in *World Bank technical Data*, N°22, 1984.
- ▶ Moreau F., "La conception des véhicules en vue du recyclage (Renault)", dans *Revue annuelle de l'UE-ENSAM*, Automobile et progrès, n°25, 1992, pp 48-51
- ▶ Payet-Gaspard P., "Les nouveaux matériaux dans l'automobile", congrès Les Échos, Paris, 27 juin 1996.
- ▶ Peuch P., "Car evolution and-of-life vehicles treatment and recovery technologies dans Europe 1995-2015", Brussels, APME
- ▶ Pichant P., "Analyse du cycle de vie d'une carrosserie", Symposium Acier et carrosserie automobile, 14 et 15, Cannes, septembre 1995.
- ▶ Porcet G.D., "La carrosserie en acier du futur", dans *Carrosserie*, Janvier- février 1996, pages 48 à 51.
- ▶ Raimbault C. , Arlie J.P., Chauvel A., Leprince P., "Evolution of the refining and petrochemical industry in Energy conservation in refining and petrochemistry", IFP, Editions Technip, 1975
- ▶ Roos Philippe, "L'automobile", Paris, Economica, collection Cyclope, 1992, 126 p.
- ▶ Ruffier Mireille, "La prise en compte du recyclage chez PSA Peugeot Citroën", dans *Revue annuelle de l'UE-ENSAM*, Automobile et progrès, n°25, 1992, pp 74-77
- ▶ Segalen Laurent, "Le recyclage des pneus usagers : valorisation énergie ou valorisation matière", dans *Revue annuelle de l'UE-ENSAM*, Automobile et progrès, n°25, 1992, pp 54-58.
- ▶ SOLLAC, "Ecobilan de la filière aciers pour emballage", dans *Magnetic*, numéro spécial, 4^e trimestre 1991.
- ▶ Vallat J.P., "Renault et le recyclage : agir aujourd'hui et préparer demain", Paris, Colloque ADEME - Recyclage automobile : vers une valorisation totale, 7-8 octobre 1996.
- ▶ Wolskswagen, "Le rapport sur l'environnement de Wolskswagen", Allemagne, 1995, p. 111.
- ▶ Yoshiki-Gravelsinis-K., Toguri-Choo-R.T.C., "Metals Production, Energy, and the Environment", Part I & II, dans *JOM*, mai 1993, aout 1993, vol. 45, n° 5 et 8, pp.15-20 et pp.23-29.
- ▶ Young S.B., Vanderburg W.H., "Applying Environmental life cycle Analysis to Materials" *JOM*, April 1994, Vol. 46, n° 4, pp. 22-27.

Notes

- 1 D'autres types de nuisances comme le bruit, l'occupation de l'espace ou tout ce qui peut être lié aux infrastructures ont été exclus du champ de l'étude.
- 2 baisse des émissions de polluants et chute de la consommation de carburant
- 3 Pour l'instant, les prototypes utilisant le principe d'une production embarquée d'hydrogène ne fonctionnent qu'avec un reformeur méthanol.
- 4 Cette valeur diffère de celle retenue au chapitre précédent (1,6 tep). Les étapes de production et de transport des matières premières, ainsi que celles de mise en forme de matériaux ne sont pas considérées dans ce chapitre devant la difficulté d'obtenir des évolutions cohérentes.
- 5 Accroissement de la taille des hauts-fourneaux, généralisation de l'utilisation du laminage continu, de l'affinage de la fonte à l'oxygène et de la coulée continue et du développement des aciéries électriques pour le recyclage de ferraille.
- 6 Remarque : devant la difficulté de trouver des données fiables remontant suffisamment loin dans le temps sur les émissions de polluants associées à la production des matériaux, cette étape n'a pu être prise en compte. Ceci n'affectera pas réellement la représentativité des résultats présentés au chapitre suivant, car les polluants sont très majoritairement générés durant la phase d'utilisation du véhicule.
- 7 Statistiques annuelles du Comité des Constructeurs Français d'Automobiles
- 8 I. Hivert, " Le parc automobile des ménages. Etude en fin d'année 1995 ", INRETS, Arcueil, 1996.
- 9 70% à 75% pour le CO₂, 85% à 90% pour les HC et 80% à 85% pour les NO_x, gain obtenu par rapport à des véhicules essence sans catalyseur répondant aux normes 1987 et sur les mêmes cycles.
- 10 Coefficient IPCC équivalent CO₂ à 100 ans de l'ordre de 300.
- 11 Yves MAROGER, *Politique d'allègement et réduction de la consommation*, Symposium acier et carrosserie automobile, 14 et 15 Septembre 1995, Cannes.
- 12 La valeur de consommation retenue (3 l/100 km), tient compte de la surconsommation de carburant engendrée par l'accroissement de la masse du véhicule hybride. Le poids est, en effet, le " point noir " de ce type de voitures qui nécessitent une double motorisation et une batterie.
- 13 Valeur à comparer à une consommation de 8,2/100 km pour le Renault Scénic ou 7,3 l/100 km pour la 306 1,6 l de Peugeot.
- 14 "Review of the research program of the PNGV, fourth report ", National Academy Press, Washington, D.C. 1998.
- 15 Sur une pile avec reformeur au méthanol ou à essence, le temps de mise en marche varierait entre 60 et 30 minutes et le prochain objectif serait d'arriver à 10 minutes. Source " Multi-fuel reformer for fuel cell powered vehicles ", R. Stobart, Arthur D Little UK, J. M. Bentley, EPYX corp. USA, Paris, Septembre 1998, FISITA.
- 16 " Hydrogen Power, The commercial future of the 'ultimate fuel' ", DAVID HART, 1997
- 17 Valeurs obtenues⁹ avec un stockage par adsorption d'hydrogène sous une pression de 30 bars.
- 18 valeurs et estimations d'après " Carburants et moteurs ", J.C. GUIBET, éd Technip, 1997.
- 19 D'après dossier paru dans " L'usine nouvelle ", *Technologie de l'automobile, de nouvelles solutions pour la voiture " verte "* , Octobre 1997, n° 2611.
- 20 " Émissions de gaz à effet de serre : de la production d'hydrogène à son utilisation en tant que carburant automobile ", C. Armengol, Cahier du CLIP n°2, Mai 1994.
- 21 Mode dans lequel le moteur thermique est coupé au bout de quelques secondes d'arrêt du véhicule et est relancé automatiquement dès que l'on ré-accélère.
- 22 IFP, A. Douaud et p. 114, Commissariat Général du Plan, " Energie 2010-2020, les chemins d'une croissance propre ", Septembre 1998, La documentation Française.
- 23 Caisse en blanc: structure en métal qui constitue l'ossature sur laquelle se fixe l'ensemble des éléments d'une automobile.
- 24 La prospective est réalisée à partir des données sur le parc du scénario " laisser-faire "
- 25 La prospective est réalisée à partir des données sur le parc du scénario " voitures évoluées "
- 26 Yves MAROGER, *Politique d'allègement et réduction de la consommation*, Symposium acier et carrosserie automobile, 14 et 15 Septembre 1995, Cannes.
- 27 Proton Exchange Membran Fuel Cell
- 28 4^{ème} rapport d'évaluation du PNGV
- 29 Ingénieurs de l'automobile - Janvier - Février 1998, pp 12 - 13.
- 30 La hausse des ventes de 4*4 et des monospaces de gamme moyenne (Renault Scenic et Kangoo, Citroën Berlingo et Peugeot Partner, Fiat Multipla, Mercedes classe A, etc.), qui ont des surfaces frontales élevées, ne manquera pas d'avoir des conséquences négatives sur les consommations d'énergie.

AUTOMOBILE et GAZ NATUREL

*Scénarios prospectifs et impact
sur l'environnement*

Synthèse

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) dus au secteur des transports représentent actuellement dans le monde, environ 21 % des émissions totales, mais leur augmentation est exceptionnellement soutenue. En progression de 2,4 % par an depuis 1977, elles pourraient croître de 20 à 100 % d'ici 2020. Pour enrayer cette augmentation, il existe essentiellement trois axes de lutte : économiser l'énergie, changer d'énergie ou rouler moins. D'une manière générale, et quelle que soit la région observée, la tendance est à l'augmentation du volume du parc automobile et à la baisse des consommations unitaires (engendrée principalement par l'amélioration du rendement des moteurs). Mais on constate que les gains énergétiques attribués à la baisse des consommations unitaires ne se traduisent pas par une diminution de la consommation finale en raison de l'accroissement continu du trafic. Une des solutions possibles pour diminuer les émissions de CO₂ réside donc dans l'utilisation de carburants dont la combustion émet moins de CO₂. On pense évidemment au gaz naturel, ressource toute aussi abondante que le pétrole, géographiquement mieux distribuée, et dont la combustion produit 25 % de moins par unité d'énergie que le pétrole.

Le gaz naturel peut être utilisé comme source d'énergie dans les transports de différentes manières :

- comme carburant direct dans les moteurs, stocké à bord sous forme comprimée (le GNV, Gaz Naturel Véhicule)
- comme matière première pour la synthèse de carburants (Diméthylether (DME) ou "gazole ex-gaz" issus respectivement des procédés de synthèse Topsoe et Fischer-Tropsch).

- comme combustible dans des centrales électriques, l'électricité permettant d'alimenter des véhicules électriques.

Conscient de la nécessité de trouver dès aujourd'hui des solutions alternatives pour lutter contre l'augmentation des émissions de GES imputables au transport routier, le CLIP, sur proposition du GIE PSA-RENAULT, s'est interrogé sur l'intérêt, en terme d'impact sur l'effet de serre, d'un accroissement d'utilisation du gaz naturel comme source d'énergie dans le transport automobile.

Pour fournir des éléments de réponses, nous avons dans un premier temps comparé les émissions atmosphériques "des filières gaz" avec celles des filières classiques essence et diesel. La comparaison s'est effectuée sur l'ensemble du cycle du carburant, en évaluant à chaque étape de la filière, depuis l'extraction jusqu'à l'utilisation du véhicule, les consommations énergétiques et les émissions associées.

Parmi les trois filières étudiées, seules deux permettent aujourd'hui de réduire de manière significative les émissions de GES par rapport aux carburants classiques. Il s'agit du véhicule GNV et du véhicule électrique. Le véhicule GNV permet une réduction des émissions de GES d'environ 20 % (+ ou - 4 % selon l'origine de l'électricité avec laquelle est comprimé le gaz) par rapport au véhicule essence. Les émissions imputables au véhicule électrique varient avec les modes de production propres à chaque pays. Dans la quasi totalité des cas, le véhicule électrique permet une réduction considérable des émissions de GES par rapport à un véhicule essence, de l'ordre de 50 % en Amérique du Nord, 60 % en Europe, 90 % au Mercosur et

enfin 40 % pour la CEI. Dans l'hypothèse où l'électricité est produite uniquement à partir du gaz naturel dans des cycles combinés, la réduction est d'environ 60 %. L'utilisation du véhicule électrique offre donc sans conteste, les meilleurs avantages en terme d'environnement. D'une part, parce qu'il ne participe en aucune façon à la pollution urbaine, et d'autre part, parce qu'il permet quasiment dans tous les cas une réduction importante des émissions de GES. En effet, seul un véhicule électrique qui utiliserait exclusivement de l'électricité produite à partir du charbon n'offrirait aucun avantage en terme d'effet de serre.

Par contre, le DME ne semble pas présenter d'intérêt majeur, les émissions de GES qui lui sont associées sur l'ensemble du cycle, étant d'un niveau comparable à celui de l'essence. Quant au "gazole ex-gaz", son utilisation conduit à une augmentation tout à fait significative (+ 20 %) des émissions de GES. Le rendement encore trop faible des procédés de conversion de gaz en liquide (environ 60 %) explique ce résultat.

En ce qui concerne l'horizon 2020

Dans quelle mesure la pénétration de véhicules qui, pris individuellement, offrent des avantages incontestables en terme d'émissions de CO₂, peut-elle influencer à la baisse le niveau global des émissions de CO₂ imputables aux véhicules particuliers à l'horizon 2020 ? Pour répondre à cette question, nous avons, à partir d'hypothèses concernant l'évolution du parc de véhicules particuliers, de leur consommation unitaire et de leur kilométrage moyen, construit des scénarios de pénétration de véhicules GNV et de véhicules électriques. Selon ces scénarios,

le parc de VP en 2020 serait composé de 3 à 15 % selon les pays de véhicules GNV, et de 3 à 6 % de véhicules électriques. Les émissions imputables aux VE dépendent étroitement des modes de production électrique propres à chaque pays. Nous avons donc également fait l'hypothèse dans notre scénario, d'un accroissement continu de la part du gaz dans la production électrique. La part du gaz passe en effet de 11 % en 1995 à 31 % en 2020 en Europe, de 15 % à 38 % aux Etats-Unis, de 4 % à 20 % au Canada, de 40 % à 53 % en Argentine, de 1 % à 38 % au Brésil, et enfin de 37 % à 68 % dans la CEI.

Malgré les hypothèses de pénétration relativement optimistes utilisées dans notre scénario, les résultats obtenus montrent que l'impact sur la diminution des émissions de CO₂ reste faible, de l'ordre de 1 à 3 %. Par contre, l'impact d'une diminution de la consommation unitaire des véhicules essence amorcée dès aujourd'hui pour atteindre 20 % en 2020 est considérable. En effet, par rapport à un scénario "laisser faire", c'est-à-dire, une situation où la consommation unitaire et le kilométrage moyen demeurent à leur niveau observé en 1995, la pénétration cumulée de véhicules GNV et de véhicules électriques permettrait, une réduction des émissions de CO₂ en Europe entre 1995 et 2020 de l'ordre de 120 Mt, soit en moyenne 5 Mt/an. A titre de comparaison, le potentiel de réduction lié à l'amélioration des moteurs essence est estimé à 60 Mt/an. Le potentiel lié à la baisse du kilométrage moyen est estimé quant à lui à 20 Mt/an. Par conséquent, en ce qui concerne l'effet de serre, on ne peut pas attendre des véhicules GNV et des véhicules électriques un impact important avant 2020. La priorité reste donc à l'amélioration des véhicules essence et diesel, ainsi qu'aux mesures facilitant les transferts modaux.

Introduction

Le gaz naturel est l'une des ressources naturelles les plus abondantes après le charbon. Les réserves prouvées de gaz naturel dans le monde ont été évaluées à 135 Gtep en 1994, ce qui représente l'équivalent de 62 ans au taux actuel de production, contre 42 ans pour le pétrole. En outre, le gaz naturel possède des qualités environnementales incontestables. Sa combustion n'émet ni oxyde de soufre, ni plomb, ni particules solides. Le principal imbrûlé est le méthane (CH_4) qui est un gaz à effet de serre important, mais compte tenu de son rapport H/C élevé, les émissions de CO_2 associées sa combustion sont bien inférieures à celles associées à la combustion des essences. Dans un contexte, marqué par la nécessité pour les pays industrialisés de réduire leurs émissions de GES, le gaz naturel utilisé comme carburant automobile pourrait donc contribuer à limiter les atteintes à l'environnement imputables à la circulation routière.

On peut envisager trois filières d'utilisation du gaz naturel dans le secteur des transports :

- comme carburant direct dans les moteurs, stocké à bord sous forme comprimée (le GNV)
- comme matière première pour la synthèse de carburants synthétiques : le Diméthyl Ether (DME), obtenu par conversion directe (procédé Topsoe) du gaz naturel et le "gazole ex-gaz" issu des procédés de synthèse Fischer-Tropsch.
- comme combustible dans des centrales électriques, l'électricité permettant d'alimenter les batteries des véhicules électriques.

L'objectif de l'étude réalisée dans le cadre du CLIP est de déterminer les avantages et les inconvénients en terme d'environnement des trois filières d'utilisation du gaz naturel. Ce travail a été réalisé en deux phases distinctes. La première consiste à décrire les différentes étapes conduisant à la production, puis l'utilisation dans les véhicules des vecteurs énergétiques considérés, avec pour chaque étape une évaluation des consommations d'énergie et émissions de polluants associées. La seconde consiste à établir des scénarios de pénétration du gaz naturel dans le secteur de l'automobile, ainsi que dans les parcs de production électrique.

Les zones géographiques couvertes par l'étude sont :

- l'Union Européenne
- la Communauté des Etats Indépendants (ex-URSS)
- l'Amérique du Nord (Etats Unis, Canada)
- le Mercosur (Argentine, Brésil)

Les polluants retenus pour l'analyse des chaînes de production, distribution de carburants et d'électricité sont : le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les hydrocarbures (HC), le dioxyde de soufre (SO_2), le méthane (CH_4), les particules. A partir des coefficients d'équivalence actuellement indiqués par l'IPCC, nous avons établi une comparaison des émissions unitaires d'équivalent CO_2 pour les différentes filières conduisant à la satisfaction du service de transport considéré.



Intérêt environnemental

Intérêt environnemental comparé des différents usages du gaz naturel dans la carburation automobile

La méthodologie utilisée

La méthodologie employée doit permettre d'estimer les émissions sur tout le cycle du combustible : de l'extraction jusqu'au pot d'échappement du véhicule. Pour cela on utilise la méthode déjà utilisée par N.J EYRE pour l'ETSU (Energy Technology Support Unit) en 1991 dans son rapport "Gaseous emissions due to electricity fuel cycles in the UK" et par le CLIP en 1993 pour son étude "les enjeux environnementaux de la pénétration du véhicule électrique en Europe".

Chaque filière est décomposée (essence, gazole, DME, GNV, électrique, gazole ex-gaz) en plusieurs modules. Chaque module correspond à une étape précise de la filière: extraction, transport, raffinage... Assemblés, ces modules conduisent à l'élaboration d'un organigramme pour chaque chaîne de production et distribution. L'analyse comporte donc les phases suivantes:

- identification des différents modules;
- élaboration de l'organigramme pour chaque filière;
- description des entrées et sorties de chaque module;

Chaque module est caractérisé par :

- un vecteur énergétique entrant ;
- l'énergie utilisée au cours de l'étape ;
- un vecteur énergétique sortant ;
- un rendement de transformation ;
- des émissions de polluants associées aux consommations énergétiques ;
- des émissions de polluants associées aux pertes éventuelles lors de la transformation.

Il est essentiel pour chaque module de déterminer un rendement associé à l'étape considérée ainsi que pour chaque polluant un facteur d'émission proportionnel au flux sortant. Une fois chaque module identifié, il convient de les assembler, on peut donc déterminer de cette manière les émissions et les besoins énergétiques associés à chaque étape. Le schéma qui suit illustre bien la méthode utilisée pour calculer les besoins énergétiques et les émissions à chaque étape pour un véhicule utilisant une unité d'énergie par kilomètre (la démarche est ascendante et part de l'énergie utile consommée au kilomètre).

Les schémas qui suivent présentent pour chaque filière (considérée dans l'étude) l'ensemble des étapes (ou modules qui ont été identifiés), depuis l'extraction du combustible jusqu'à l'utilisation dans le véhicule.

Pour la contribution à l'effet de serre des quantités de polluants émises sur l'ensemble de chaque filière, on a utilisé l'échelle d'équivalence mise en place dans le cadre de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Ce groupe de travail a défini le concept de "potentiel de réchauffement global" afin de comparer l'efficacité thermique des gaz intervenant dans l'effet de serre. Les équivalences utili-

sées caractérisent l'impact, sur une durée de 20 ans, de l'émission dans l'atmosphère d'une unité de masse (1kg) d'un gaz à effet de serre donné, par rapport à une quantité identique de CO₂. Les gaz concernés et leur coefficient d'équivalence sont les suivants:

- CO₂: 1
- CH₄: 56
- N₂O : 300 (coefficient à 100 ans)

Nous n'avons pas inclus les émissions de N₂O dans notre analyse. A l'heure actuelle, on ne dispose pas d'informations précises sur les émissions de N₂O liées à la production de carburants et à

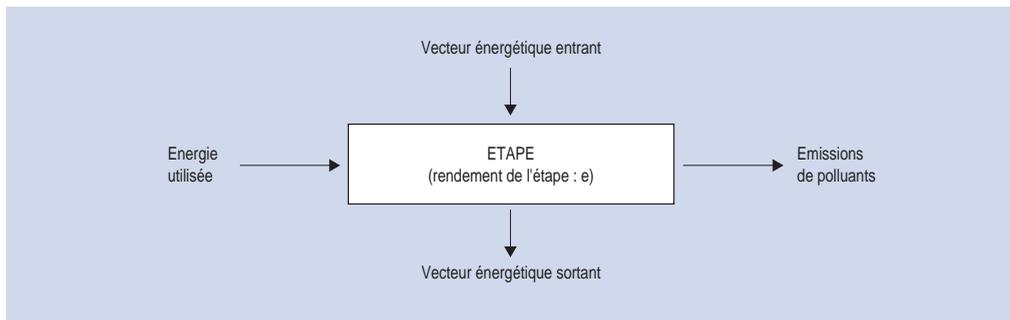


Figure 1

Schéma d'un module type

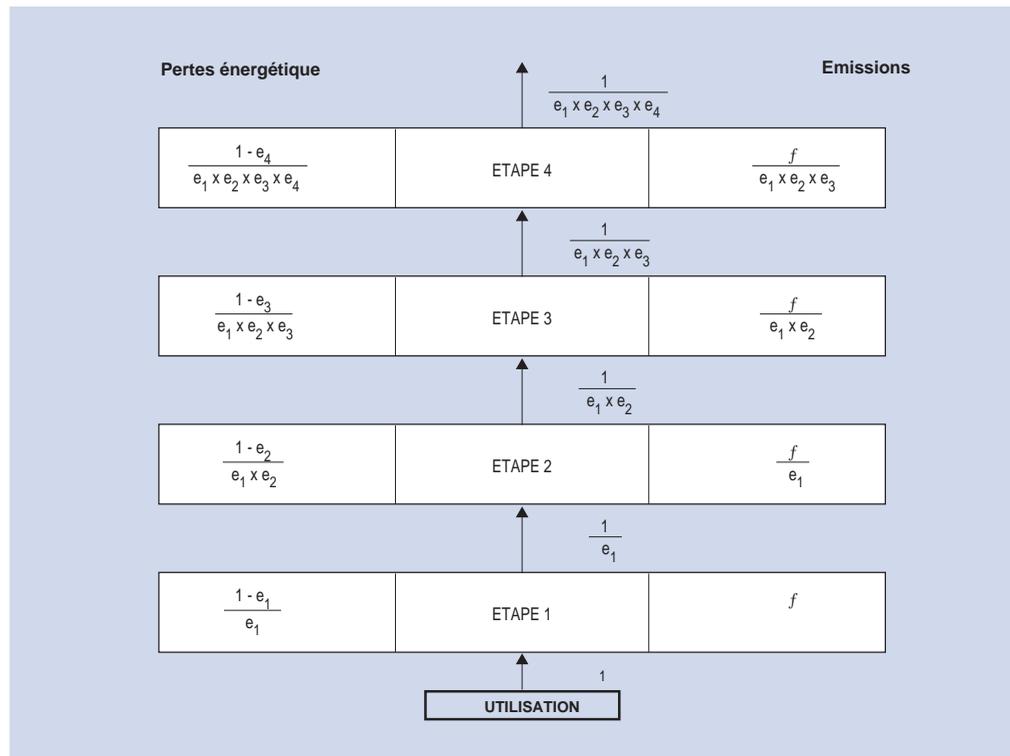


Figure 2

Schéma méthodologique (eⁿ représente le rendement à l'étape n et f représente le facteur d'émission)

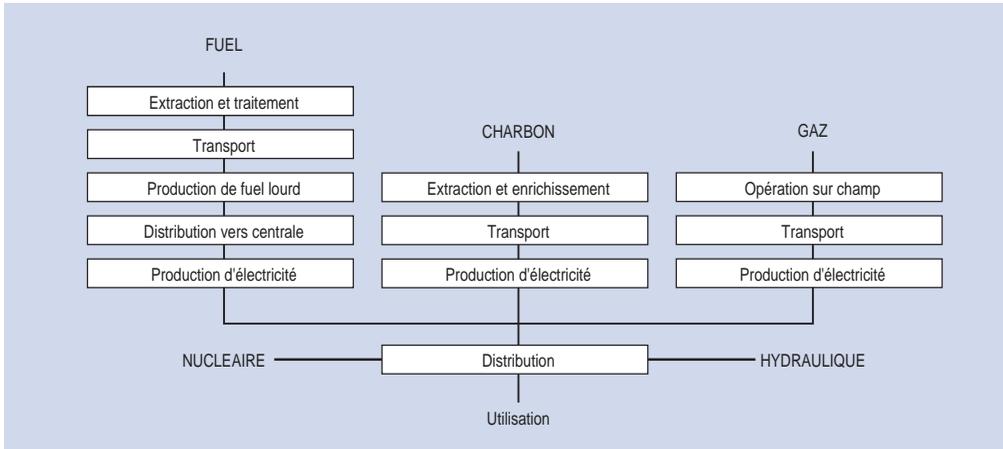


Figure 3
Modules retenus pour la filière électrique

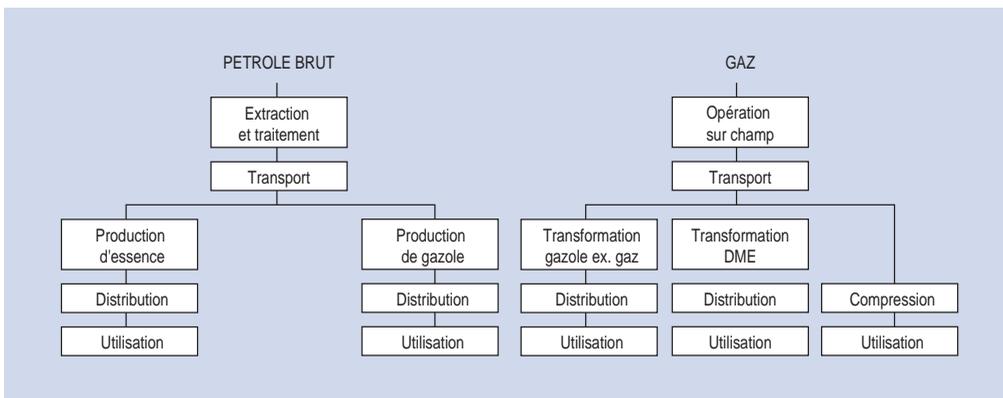


Figure 4
Modules retenus pour les filières de production de carburants

leur combustion. A priori, il n'existe aucune raison pour que les émissions de N_2O liées à l'utilisation du gaz naturel dans les transports soient supérieures à celles observées pour l'essence et le diesel, néanmoins, cela reste à vérifier. Par ailleurs, le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique estime que les émissions de N_2O imputables au transport routier en France représentent à peine plus de 1 % des GES du secteur, et cela même avec un coef-

ficient d'équivalence élevé. Il est donc vraisemblable que prendre en compte les N_2O ne modifierait pas significativement les résultats. Pour comparer de manière objective les consommations et les émissions des différentes filières, les conditions d'utilisation ou le service rendu par le véhicule doivent être rigoureusement identiques quelque soit le carburant utilisé. Nous avons retenu une Clio utilisée sur cycle Euro 96.

Bilan des émissions actuelles

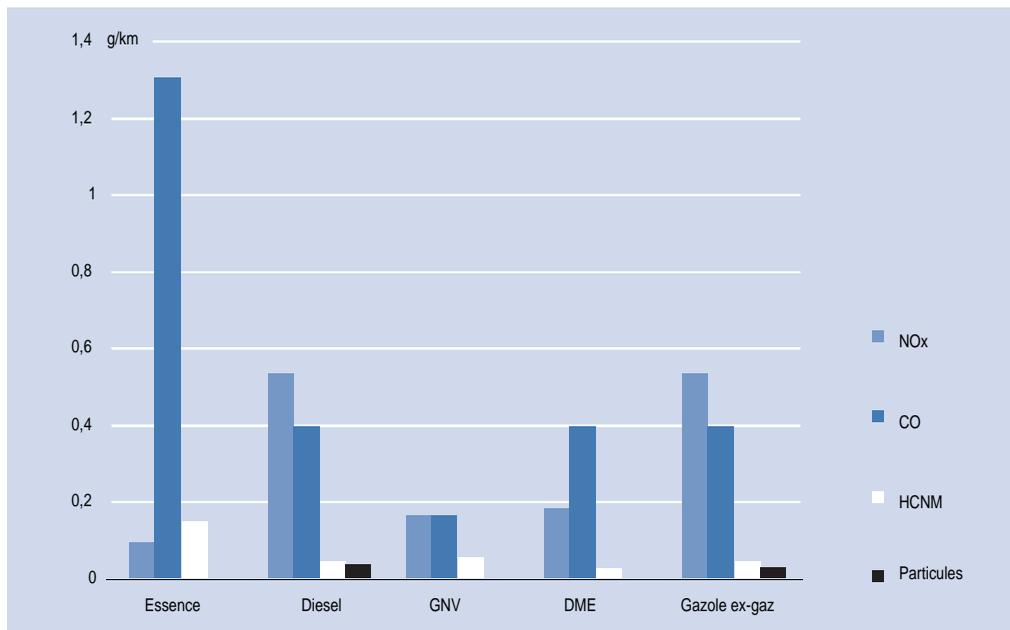
Bilan des émissions associées aux différentes filières aux conditions actuelles

Pour mesurer l'impact d'un carburant sur la pollution urbaine, seul l'examen des émissions à l'échappement est nécessaire. En effet, les émissions liées à la production des hydrocarbures ne jouent pas un rôle déterminant puisque les sites de production sont relativement éloignés des zones urbaines. Comme le montre le graphique n° 1, d'un point de vue local, l'utilisation comme carburant du GNV, du DME et bien sur de l'électricité offre un avantage certain.

Pour mesurer l'impact de l'utilisation d'un carburant sur les émissions de GES, il est par contre nécessaire de tenir compte des émissions sur tout le cycle du carburant. Les quantités de GES émises sur l'ensemble du cycle dépendent pour chaque étape de la nature du carburant utilisé ainsi que des besoins énergétiques nécessaires. On a donc, à partir de données relatives à chaque filière de production, calculé les consommations énergétiques et les émissions induites par une Clio selon le carburant qu'elle

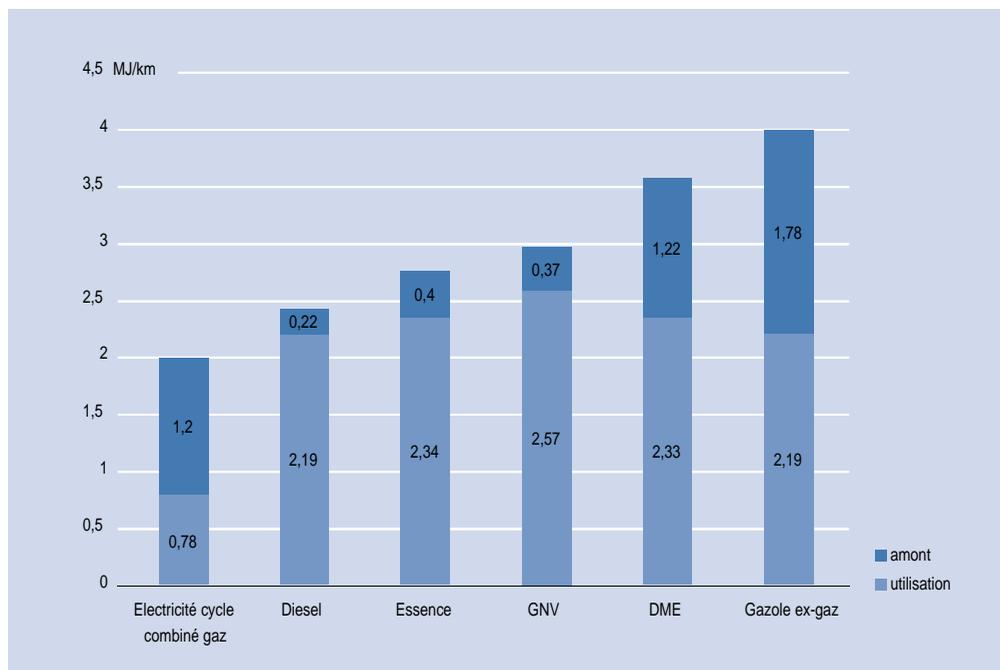
utilise. Comme le montre le tableau 1 et le graphique 2, à l'exception du VE, le poste le plus important reste l'utilisation du véhicule. En amont de l'utilisation, les émissions de GES sont principalement liées au rendement associé à la production du carburant (90 % pour l'essence, 95 % pour le gasoil, 72 % pour le DME, 60 % pour le gazole ex-gaz et 45 % pour l'électricité ex-gaz), les émissions associées aux autres étapes telles que les opérations sur champ ou le transport du carburant restent marginales.

Les niveaux des émissions de GES présentés dans le graphique 3 sont directement calculés à partir des résultats présentés dans le tableau 1, en appliquant simplement les coefficients IPCC. A noter, que ces niveaux sont identiques ceux observés pour le CO₂ dans le tableau 1. En effet, malgré un coefficient IPCC élevé, l'impact des émissions de méthane est négligeable en comparaison des émissions de CO₂.



Graphique 1

Emissions à l'échappement de Nox, de HCNM, de CO et de particules en fonction du carburant utilisé pour une Clio 1,4 l sur cycle Euro 96



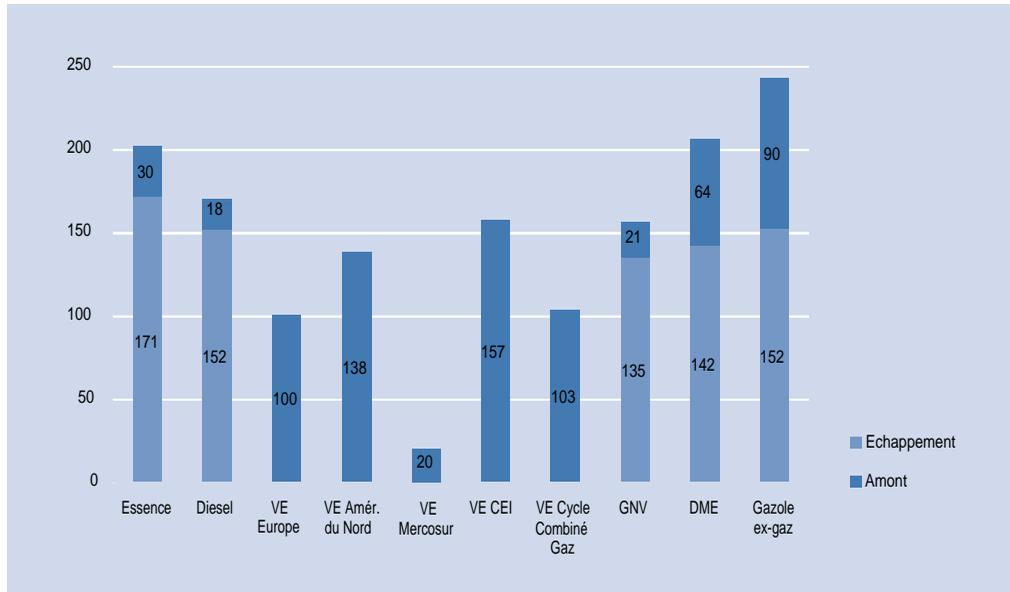
Graphique 2

Consommation moyenne au km d'une Clio sur cycle Euro 96 (MJ/km)

g/km	CO ₂	NO _x	HC	CO	SO ₂	CH ₄	Part
filière essence							
Amont	30,3	0,176	0,25	0,012	0,213	nd	nd
Echappement	171	0,088	0,1445	1,3	nd	0,0015	0
TOTAL	201,3	0,264	0,398	1,312	nd	0,0015	0
filière gazole							
Amont	18,47	0,141	0,165	0,011	0,202	nd	nd
Echappement	152	0,531	0,0394	0,393	nd	0,0004	0,031
TOTAL	170,47	0,672	0,204	0,403	0,202	0,0004	0,031
filière DME							
Amont	62,7	0,237	0,018	0,032	nd	0,0178	nd
Echappement	142	0,177	0,02	0,393	nd	nd	0,001
TOTAL	204,7	0,414	0,0388	0,425	nd	0,0178	0,001
filière gazole ex-gaz							
Amont	88,45	0,259	0,02	0,031	nd	0,0199	nd
Echappement	152	0,531	0,0394	0,393	nd	0,0004	0,023
TOTAL	240,44	0,790	0,0594	0,423	nd	0,0203	0,023
filière GNV							
Amont	18,32	0,036	0,017	0,018	0,025	0,048	0,0025
Echappement	125	0,193	0,05	0,16	0	0,18	0
TOTAL	143,32	0,229	0,067	0,178	0,025	0,228	0,025
filière électrique							
Electricité ex-gaz	100,5	0,174	0,014	0,099	0,0005	0,0369	0,0004
Europe (1)	99,4	0,247	0,046	0,025	0,361	0,005	0,037
Am. du Nord (1)	137,9	0,342	0,022	0,034	0,514	0,007	0,057
Mercosur (1)	20	0,046	0,022	0,01	0,04	0,0027	0,003
CEI (1)	141,6	0,309	0,077	0,081	0,224	0,278	0,0174

Tableau 1

Bilan des émissions sur les différentes filières en g/km



Graphique 3

Bilan des émissions de GES par type de carburant utilisé (en g éq. CO₂ à l'échéance de 20 ans / km)

L'utilisation de carburants synthétiques

Dans les conditions actuelles de production (voir annexe III), l'utilisation du gazole ex-gaz dans les véhicules particuliers conduit à une augmentation tout à fait significative des émissions de GES : + 20 % par rapport à l'essence et + 40 % par rapport au diesel. Néanmoins, actuellement la conversion de gaz en liquide n'est économiquement envisageable que s'il s'agit de valoriser du gaz destiné à être brûlé à la torche. Dans ces conditions, le bilan en terme d'émissions de GES est globalement positif.

Concernant le DME, les émissions de GES sur tout le cycle du carburant sont quasiment équivalentes à celles associées au véhicule essence (+ 2 % de GES par rapport à l'essence et + 21 % par rapport au diesel). Il faut néanmoins citer une étude réalisée par Amoco Oil Company dont les résultats montrent que l'utilisation du DME pourrait réduire d'environ 14 % les émissions de gaz à effet de serre par rapport à l'essence. Ce résultat repose néanmoins sur une hypothèse de rendement du DME à l'utilisation très supérieur à celui de l'essence (60 %) que nous n'avons pas retenu comme vraisemblable.

Le gaz naturel comme matière première pour la synthèse de carburants synthétiques n'apparaît donc pas comme une solution efficace pour lutter contre l'effet de serre. Plusieurs raisons

expliquent en partie cette relative contre-performance :

- à l'échappement les émissions de CO₂ sont analogues qu'il s'agisse de diesel, de DME ou de gazole ex-gaz ;
- le rendement amont (quantité d'énergie utilisée dans le véhicule/énergie extraite) est très favorable aux carburants pétroliers (respectivement 85,7 % et 90,1 % pour l'essence et le gazole contre 65,5 % et 55 % pour le DME et le gazole ex-gaz). Les rendements de production des carburants synthétiques (72 % pour le DME et 60 % pour le gazole ex-gaz) sont en effet beaucoup plus faibles que pour un carburant classique. Le processus utilise plus d'énergie et émet donc plus de CO₂.

Il serait cependant hâtif de conclure que les carburants synthétiques issus du gaz naturel sont nocifs pour l'environnement. S'ils n'offrent à l'heure actuelle aucun intérêt significatif pour lutter contre l'effet de serre, le DME pourrait par contre réduire de manière importante les émissions de NOx, de SOx, d'HC et de particules responsables pour une grande part de la "pollution urbaine". Le DME utilisé comme substitut du diesel permettrait alors de répondre au problème très actuel des particules générées par les moteurs diesel, et qui selon un rapport du Comité de prévention et de précaution mis en place par Corinne Lepage constituerait "un facteur de risque sanitaire".

L'utilisation du gaz naturel comme carburant direct (le GNV)

La chaîne énergétique du GNV est, contrairement à celle des carburants synthétiques bien établie. En effet, plusieurs pays disposent déjà de véhicules fonctionnant au GNV. L'Italie par exemple, possède un parc de plus de 240 000 voitures GNV s'alimentant auprès de 240 stations-service publiques. Le GNV qui n'est autre que du gaz naturel composé d'environ 90 % de méthane, offre de grandes possibilités de réduction des émissions polluantes, sa combustion émet en effet moins de CO_2 que les autres carburants et son utilisation dans les moteurs permet de réduire considérablement les émissions de NO_x , de SO_x , d'HC et de particules.

Les résultats obtenus pour le GNV sont sans surprise et confirment ceux de beaucoup d'études. Dans la plupart des pays étudiés, l'utilisation du GNV comme carburant permettrait une réduction de plus de 20 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à un véhicule essence et d'environ 10 % par rapport à un véhicule diesel. Les mauvais résultats obtenus pour la CEI (167 g éq. CO_2/km) sont essentiellement dus à l'hypothèse d'un taux de perte de gaz élevé sur le réseau de transport (0,25 % des quantités commercialisées). En revanche les bons résultats obtenus pour la zone Mercosur (147 g éq. CO_2/km) sont dus à l'utilisation d'électricité hydraulique pour la compression.

Le véhicule électrique

Le véhicule électrique, contrairement aux véhicules thermiques, n'émet aucun polluant lors de son utilisation. Néanmoins, il faut prendre en compte les émissions associées à la production d'électricité lorsque celle-ci est d'origine thermique (les émissions associées à la production de l'électricité nucléaire et hydraulique sont considérées comme négligeables). On comprend donc aisément que les émissions dépendent des modes de production propres à chaque pays. On a envisagé deux cas :

► l'électricité utilisée par le véhicule électrique est produite à partir des modes de production nationaux actuels.

Ici, on considère que le véhicule électrique peut être rechargé à toute heure du jour et de la nuit. On ne tient donc pas compte des périodes creuses et des périodes de pointe. Les modes de production utilisés dans l'étude sont présentés dans le tableau n°2.

► l'électricité utilisée par le véhicule est produite uniquement à partir du gaz.

Dans ce cas, on considère que l'accroissement de la demande d'électricité engendré par le marché du véhicule électrique est satisfait par de nouvelles capacités de production. On fait l'hypothèse que cette production supplémentaire est issue de centrales utilisant du gaz naturel de type "cycle combiné" fonctionnant avec un rendement de 45 %.

Les résultats montrent que les véhicules électriques permettent de réduire de manière tout à fait significative les émissions de gaz à effet de serre dans toutes les zones étudiées. Ces réductions seraient de l'ordre de 50 % en Amérique du nord, 60 % en Europe, 90 % au Mercosur, et 40 % pour la CEI dans le cas où les modes de production électrique restent inchangés. Dans l'hypothèse où l'électricité est produite uniquement à partir du gaz naturel dans des cycles combinés la réduction des émissions au km de gaz à effet de serre est d'environ 60 % par rapport aux carburants classiques.

L'utilisation du véhicule électrique offre donc sans conteste les meilleurs avantages en terme d'environnement. D'une part, parce qu'il ne participe en aucune façon à la pollution urbaine, et d'autre part, parce qu'il permet quasiment dans tous les cas une réduction importante des émissions de CO_2 et de CH_4 . Seul un véhicule consommant une électricité produite à partir de charbon uniquement engendre une augmentation des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux véhicules essence et diesel.

	Charbon	Pétrole	Gaz	Nucléaire	Hydrau
Europe (1995)	29,9 %	7,9 %	8,8 %	32,3 %	19,8 %
USA+Canada (1995)	47,2 %	3,22 %	12,6 %	19,53 %	15,2 %
Mercosur (1995)	1,84 %	3,5 %	4,9 %	2,5 %	85 %
CEI (1993)	11,8 %	8,4 %	49,13 %	11,16 %	20,2%

Tableau 2
Modes de production utilisés dans l'étude

Les résultats

Les tableaux 3 et 4 résument les résultats obtenus dans cette première partie. Parmi les quatre voies étudiées, seules deux offrent pour l'instant des perspectives de réduction de GES par rapport aux voies classiques que sont l'essence et le diesel. Il s'agit du véhicule électrique, et du GNV.

Le véhicule électrique

Le principal attrait des véhicules électriques est la promesse d'une amélioration de la qualité de l'air dans les villes. Quant aux émissions imputables aux combustibles utilisés pour produire l'électricité, leurs niveaux restent dans bien des cas très

inférieurs à celles engendrées par les véhicules à moteur à combustion interne. En effet, que l'électricité soit produite à partir des parcs de production nationaux ou qu'elle le soit uniquement à partir du gaz, la réduction des émissions de GES par rapport à tout autre véhicule possédant un moteur à combustion interne est considérable. Cependant, même si le V.E possède des avantages inégalables en terme d'environnement, sa faible autonomie et son coût l'empêchent pour l'instant de rivaliser avec ses concurrentes "thermiques". A titre de comparaison, l'autonomie d'un VE est estimée à 100 km, celle d'un véhicule essence à 500 km et celle d'un véhicule GNV à 300 km.

Sur tout le cycle du carburant

	Référence essence 1998		Référence diesel 1998	
	éq. CO ₂	CO ₂	éq. CO ₂	CO ₂
Essence	/	/	+ 18 %	+ 18 %
Diesel	-15 %	- 15 %	/	/
VE Europe	- 50 %	- 51 %	- 41 %	- 42 %
VE Mercosur	- 90 %	- 90 %	- 88 %	- 88 %
VE CEI	- 22 %	- 29 %	- 7,5 %	- 16 %
VE Amérique du Nord	- 31 %	- 31 %	- 19 %	- 19 %
VE (cycle combiné gaz)	- 49 %	- 50 %	- 39,5 %	- 41 %
GNV	- 22 %	- 28 %	- 14 %	- 15 %
DME	+ 2,5 %	+ 2 %	+ 21 %	+ 20 %
gazole ex-gaz	+ 20 %	+ 19 %	+ 42 %	+ 41 %

A l'échappement uniquement

Essence	/	/	+ 12,5 %	+ 12,5 %
Diesel	- 11 %	- 11 %	/	/
VE	- 100 %	- 100 %	- 100 %	- 100 %
GNV	- 20 %	- 25 %	- 10 %	- 16 %
DME	- 19 %	- 19 %	- 6,5 %	- 6,5 %
Gazole ex-gaz	- 11 %	- 11 %	=	=

* il faut lire ce tableau de la manière suivante :
exemple : l'intersection de la colonne "Référence essence 1998, éq. CO₂" et de la ligne "VE Europe" donne - 50 %. Il faut donc lire : dans les mêmes conditions d'utilisation un véhicule électrique utilisé en Europe émet moitié moins de gaz à effet de serre qu'un véhicule essence.

Tableau 3

Impact comparé sur l'effet de serre par rapport à l'essence et au diesel en fonction du type de carburant de substitution utilisé dans les conditions 1998

	Besoins énergétiques amonts associés à la consommation d'1 tep dans le véhicule (tep)	Répartition des émissions de CO ₂	
		Echappement	Amont
Essence	0,166	85 %	15 %
Diesel	0,097	89 %	11 %
GNV	0,144	87 %	13 %
DME	0,524	69 %	31 %
Gazole ex-gaz	0,812	63 %	37 %
Electricité ex-gaz	1,536	0 %	100 %

Tableau 4

Besoins énergétiques amont et répartition des émissions de CO₂

Le véhicule GNV

A l'exception de la CEI, où les résultats médiocres obtenus par le GNV sont dus à une estimation des pertes de méthane sur le réseau de transport relativement élevée, le GNV obtient des résultats tout à fait positifs en terme de réduction des GES. Cette réduction est de l'ordre de 15 à 20 % par rapport à l'essence et au diesel. A l'échappement il n'émet pas de particules et permet de réduire très significativement les émissions de CO et d'HC par rapport à l'essence.

Les carburants synthétiques

Les résultats obtenus pour les carburants synthétiques sont loin d'être satisfaisants du point de vue de l'effet de serre. Les besoins énergétiques nécessaires à la production de tels carburants sont pour

l'instant trop importants pour espérer rivaliser, en terme d'émissions associées au process, avec les carburants issus de pétrole. En fait, seul le DME permet d'égaliser la filière essence pour les émissions de GES. Par rapport au diesel, le DME émet sur l'ensemble de la chaîne énergétique plus de GES. Néanmoins à l'échappement il permet de réduire de manière significative les émissions de NOx, de HC et surtout de particules. Il est donc clair que son utilisation contribuerait de manière positive à la diminution du niveau de pollution urbaine. Le gazole ex-gaz issu des procédés Fisher-Tropsch n'offre quant à lui aucun avantage environnemental, au contraire, sa production engendre une augmentation importante des émissions de GES et son utilisation est, en terme d'émissions, quasi équivalente à l'utilisation du gasoil dans les moteurs diesel.



Impact sur l'effet de serre

Impact sur l'effet de serre de la pénétration, à l'horizon 2020, des véhicules électriques et des véhicules GNV

Scénarios à l'horizon 2020

Dans la partie précédente, les véhicules fonctionnant au gaz naturel comprimé (GNV) et les véhicules électriques (VE) ont été identifiés de manière individuelle comme les plus aptes à réduire les émissions de gaz à effet de serre imputables aux véhicules particuliers (VP). L'objectif de cette "seconde partie" est de déterminer dans quelle mesure, la pénétration de ces véhicules dans le parc automobile peut à l'horizon 2020, influencer à la baisse le niveau global des émissions de CO₂ imputables aux véhicules particuliers.

L'exercice de prospective s'appuie sur des hypothèses concernant l'évolution des parcs de véhicules particuliers d'une part, et le volume de véhicules GNV et de véhicules électriques d'autre part. Nous n'avons pas retenu l'hypothèse selon laquelle les carburants synthétiques pouvaient être utilisés par des véhicules particuliers d'ici 2020. L'avenir des carburants synthétiques est en effet

trop incertain. Beaucoup de compagnies pétrolières s'intéressent aux procédés Fischer-Tropsch, mais très peu envisagent la production de carburants synthétiques à grande échelle. En outre, l'expérience de Shell avec son usine de conversion de Bintulu (Malaisie), a permis de mettre en évidence des coûts de production très élevés, entre 35 et 37 \$/bl. Michel Daubenfeld (Chargé de l'évaluation économique de projets de conversion de gaz en liquide chez Total), estime qu'il faut un prix du baril de pétrole situé entre 20 et 25 \$ pour asseoir la compétitivité de la conversion du gaz naturel, et encore, uniquement dans les cas où l'on a du gaz "associé" ou riche en condensats qui ne rapporte rien s'il est brûlé à la torche ou coûte s'il doit être réinjecté. Lorsque l'on sait qu'actuellement les prix du pétrole varient entre 11 et 16 \$/bl, on imagine difficilement que les carburants synthétiques puissent concurrencer demain les carburants pétroliers.

Les parcs de véhicules particuliers à l'horizon 2020

Les volumes des parcs de véhicules particuliers à l'horizon 2020 sont estimés selon l'hypothèse qu'il existe, dans un contexte de croissance économique, une relation de forme sigmoïde (voir figure n° 5) entre la densité automobile et le PIB à parité de pouvoir d'achat par habitant. L'évolution du nombre de VP dépend donc principalement des hypothèses concernant la croissance du PIB et la croissance démographique. Le pouvoir d'achat (PIB \$₁₉₉₀ ppa/hab) n'est évidemment pas la seule variable explicative de la densité automobile. D'autres facteurs comme les prix à la consommation, le prix des carburants, la densité de population, le taux d'urbanisation, et enfin les paramètres "institutionnels" comme les infrastructures routières ou la qualité des transports en commun sont susceptibles d'influencer la densité automobile. Dans le modèle utilisé ici, certains de ces facteurs sont pris en compte, le poids du pouvoir d'achat restant toutefois considérable. Les hypothèses retenues pour l'évolution du PIB et de la population sont celles utilisées par l'IEPE dans le modèle POLES. Les taux moyens de croissance annuelle du PIB entre 1995 et 2020 sont estimés à environ 2 % pour l'Europe, le Canada et les Etats-Unis, 4 % pour le Brésil et l'Argentine et enfin 5 % pour la CEI (1 % seulement pour la CEI si l'on prend 1990 comme année de référence, en raison de la forte récession enregistrée entre 1990 et 1997).

Dans ces conditions, on estime que, d'ici 2020 le parc de VP pourrait croître d'environ 35 % en Europe et en Amérique du Nord, tandis que

dans le même temps il pourrait être multiplié par trois ou quatre dans les pays d'Amérique du Sud. Cela conduit à une densité automobile de 550 véhicules pour 1000 habitants en 2020 en Europe, contre 424 en 1995.

La part des véhicules électriques et GNV dans le parc dépendra quant à elle de plusieurs facteurs. Dans les pays où le GNV s'est implanté, même marginalement, les principaux facteurs qui ont motivé son émergence sont :

- la présence de ressources en gaz naturel (cas de l'URSS) ;
- la recherche d'un équilibre des approvisionnements (Argentine, Nouvelle-Zélande), la production de gaz naturel étant amplifiée pour se substituer à des produits pétroliers importés et accroître ainsi l'indépendance énergétique ;
- le développement d'une politique en faveur de la protection de l'environnement (Etats-Unis).

Mais, quelles que soient les raisons qui motivent l'émergence de programmes GNV, pour que l'usage du GNV ne se cantonne pas à des flottes captives, il est nécessaire de le rendre économiquement avantageux. Ainsi, dans tous les pays où son utilisation est importante, le moteur du développement est la politique fiscale. Par exemple, l'Argentine l'a rendu compétitif grâce à une taxation très faible et à une marge très attractive accordée aux distributeurs. La Nouvelle-Zélande avait développé une politique volontariste d'incitation pour l'utilisation du GNV après les chocs pétroliers, mais ne l'a pas



Figure 5
Graphique simplifié illustrant la relation entre la densité automobile et le pouvoir d'achat

maintenue après le contre-choc de 1985 (taxes sur le GNV ramenées au même niveau que les taxes sur les produits pétroliers, suppression des primes à la conversion). Le parc GNV a chuté de 110 000 véhicules en 1985 à 50 000 véhicules en 1993. Comme le montre ce dernier exemple, pour être efficace, l'avantage fiscal accordé au GNV doit être durable si l'on veut pouvoir compter à long terme sur une pénétration significative du gaz naturel dans les transports routiers, comme c'est le cas en Argentine où près de 6 % des VP peuvent fonctionner au gaz. Un différentiel d'accise est donc nécessaire, mais il n'est pas suffisant. La création d'un réseau de distribution de GNV est également indispensable pour inciter les utilisateurs de véhicules particuliers à s'équiper. Deux solutions (qui peuvent être complémentaires) sont alors envisageables : la distribution du gaz dans des stations-services publiques ; l'utilisation de compresseurs domestiques permettant de remplir le réservoir pendant la nuit à partir du réseau de distribution basse pression existant. Dans les deux cas, le réseau de distribution gazier doit être suffisamment dense pour permettre à un pays, une région ou une ville de s'équiper en compresseurs domestiques et en stations service capables de fournir du gaz. On peut envisager la pénétration du GNV dans le parc de VP de deux manières différentes : la

conversion de véhicules en service, souvent des véhicules essence (la conversion des moteurs essence est simple et peu coûteuse contrairement aux moteurs diesel) ; l'acquisition de véhicules neufs. Lorsqu'il s'agit de convertir des véhicules existants, on conserve souvent la possibilité de fonctionner soit au gaz, soit à l'essence. Dans ce cas cependant, le moteur fonctionne sans optimisation poussée pour l'un ou l'autre des combustibles. Pour cette raison, lorsque l'utilisation du GNV est motivée par des facteurs environnementaux, il est préférable de favoriser l'implantation de véhicules neufs exclusivement dédiés au GNV, les véhicules convertis n'offrant pas les mêmes avantages en terme d'émissions de polluants. Nous avons donc considéré, à l'exception de l'Argentine où il faut tenir compte des véhicules convertis existants, que l'introduction du GNV dans le parc s'effectuait via l'acquisition par les particuliers de véhicules neufs dédiés au gaz.

Pour construire ce scénario, il est difficile de s'inspirer de la diésélisation du parc français entre 1970 et 1995. En 1970 les voitures particulières diesel représentaient 0,9 % du parc et 1,8 % des immatriculations, respectivement 4 % et 10 % en 1980, 14,2 % et 33 % en 1990 pour atteindre 27,6 % et 46,5 % en 1996. Cet exemple montre à quel point un différentiel d'accise important peut influencer les comportements

	1995	2000	2010	2020
Europe				
Nombre de VP (en Milliers)	156 361	166 389	190 330	210 480
Part des véhicules GNV	0 %	0 %	1 %	4,9 %
Part des véhicules électriques	0 %	0,01 %	0,8 %	4,4 %
Canada				
Nombre de VP (en Milliers)	13 814	14 934	17 199	19 141
Part des véhicules GNV	0 %	0 %	0,7 %	3,3 %
Part des véhicules électriques	0 %	0,01 %	0,6 %	3,15 %
Etats-Unis				
Nombre de VP (en Milliers)	151 482	162 776	185 581	206 724
Part des véhicules GNV	0 %	0 %	1 %	4,9 %
Part des véhicules électriques	0 %	0,01 %	0,8 %	4,6 %
Brésil				
Nombre de VP (en Milliers)	12 055	15 036	26 959	45 064
Part des véhicules GNV	0 %	0 %	1,3 %	6,8 %
Part des véhicules électriques	0 %	0,1 %	1,07 %	6,15 %
Argentine				
Nombre de VP (en Milliers)	4 665	5 700	9 487	15 103
Part des véhicules GNV	6,5 %	9,5 %	13,5 %	14,5 %
Part des véhicules électriques	0 %	0,01 %	0,8 %	4,1 %
CEI				
Nombre de VP (en Milliers)	18 215	21 566	39 575	78 252
Part des véhicules GNV	0 %	0,01 %	1,8 %	9 %
Part des véhicules électriques	0 %	0,01 %	1,03 %	6,2 %

Tableau 5
Hypothèses relatives aux
parcs de véhicules particu-
liers à l'horizon 2020

des consommateurs et à terme, bouleverser la composition du parc. Mais, compte tenu des contraintes inhérentes à la distribution du gaz, même en supposant une fiscalité très fortement favorable au GNV, nous n'avons pas envisagé qu'en 2020, le nombre de véhicules GNV puisse, à l'instar des moteurs diesel, représenter un tiers du parc de VP. Un tel degré de pénétration ne peut être obtenu sans l'existence d'un réseau de distribution aussi étendu que celui des carburants pétroliers. D'autres contraintes peuvent également freiner le développement du GNV, les voitures fonctionnant au GNV sont moins performantes et plus chères que les véhicules essence, et leur coffre est moins grand en raison de la place occupée par le réservoir. Les automobilistes seront très certainement influencés par ce type de critères. C'est d'abord en site urbain que l'on peut espérer voir rouler un nombre significatif de véhicules fonctionnant au GNV. Deux raisons principales à cela, d'une part, c'est dans les grands centres urbains que la pression pour l'utilisation de solutions alternatives à l'essence et au diesel imposée par le niveau crucial de pollution est la plus forte, d'autre part, il est difficile, pour des raisons de rentabilité, d'envisager dans les zones à faible densité de population, un réseau dense de distribution.

Pour toutes ces raisons, nous avons retenu l'hypothèse d'un démarrage relativement lent, avec un taux de pénétration dans les immatriculations qui progresse de 0 à 1 % entre 1998 et 2007, le temps de mettre en place, tout du moins en zone urbaine, un réseau de distribution efficace. A partir de 2007, nous considérons que le différentiel d'accise en faveur du gaz naturel peut jouer pleinement son rôle incitatif.

Il en résulte un accroissement important des acquisitions de véhicules GNV, accroissement renforcé à partir de 2013, pour atteindre presque 13 % des immatriculations en 2020. Les hypothèses relatives au taux de pénétration des voitures GNV dans les immatriculations de voitures neuves sont les mêmes pour les pays qui n'ont, vis-à-vis du GNV, qu'une expérience embryonnaire : Etats-Unis, Canada, Europe, Brésil. Pour l'Argentine et la CEI, nous avons considéré, compte tenu du développement déjà important du GNV dans ces pays, que la part des véhicules GNV dans le parc de véhicules particuliers pouvait représenter en 2020, 9 % pour la CEI et presque 15 % pour l'Argentine.

Contrairement aux véhicules GNV, les ventes de VE ne pâtiront pas au départ de l'absence d'un réseau de distribution, celui-ci existant déjà partiellement. Néanmoins, le véhicule électrique souffre de deux handicaps majeurs : son manque d'autonomie et son coût d'achat. On peut imaginer à terme que des économies d'échelle puissent être réalisées, entraînant une diminution du prix de vente des véhicules. Mais, si aucun progrès n'est réalisé en terme d'autonomie, le VE risque, dans le meilleur des cas, d'être limité au rôle de seconde voiture chez les ménages possédant plusieurs automobiles, en dépit des économies qu'il permet de réaliser sur sa durée de vie. La pénétration des VE sur le marché dépendra donc essentiellement de l'évolution de ces deux critères. Tout comme les véhicules GNV, la pénétration des premiers VE devrait être observée en zone urbaine. Nous avons donc également considéré un démarrage relativement lent jusqu'en 2008, puis un accroissement des ventes, soutenu jusqu'en 2020.

Progrès technique et distances parcourues

La prise en compte du progrès technique et des distances parcourues

Nous savons que les émissions de CO₂ sont directement liées à la consommation finale de carburant. Or, les déterminants technico-économiques de la consommation finale des VP sont au nombre de trois : le volume du parc, le kilométrage moyen et la consommation unitaire

moyenne. De l'évolution de ces trois paramètres dépendra donc l'évolution des émissions de CO₂ imputables à l'automobile.

En ce qui concerne l'évolution de la consommation unitaire moyenne, nous avons fait l'hypothèse ambitieuse d'une réduction importante

d'ici 2020 (de l'ordre de - 20 % par rapport à 1990). Compte tenu du nombre d'années qu'il faut au parc pour se renouveler entièrement (approximativement 20 ans pour le parc européen), envisager une réduction de 20 % d'ici 2020 implique qu'il faut dès aujourd'hui commercialiser de façon massive des véhicules dont la consommation conventionnelle ne dépasse pas 6,5 l/100 km. Objectif ambitieux certes, mais raisonnable. En effet, les obstacles qui jusqu'ici limitaient l'application de la technique de l'injection directe aux véhicules particuliers fonctionnant à l'essence sont aujourd'hui surmontés. Cette technique permet d'améliorer notablement le rendement du moteur, et par conséquent d'obtenir des gains de consommation importants (entre 20 et 30 %).

Pour les véhicules fonctionnant au GNV, leur consommation est légèrement supérieure à celle des véhicules essence et diesel. Nous avons considéré que cet écart se maintiendrait, les progrès techniques réalisés sur les moteurs essence étant immédiatement répercutés sur les moteurs GNV (les techniques d'injection directe peuvent être en effet étendues aux moteurs GNV).

Compte tenu du rendement élevé des moteurs électriques, et de la taille relativement standard des VE, nous avons fait l'hypothèse d'une consommation unitaire constante, à savoir 0,22 kWh/km (consommation d'une Clio électrique sur cycle Euro 96). C'est essentiellement sur les performances des batteries que sont attendus des progrès très importants dans les prochaines années. Ainsi, en capacité de stockage, on passerait de 35-50 Wh/kg sur des batteries de type nickel/cadmium, à 70 Wh/kg sur des batteries de type Ni/MH (hydrure métallique), puis à 160 Wh/kg en utilisant le lithium sous forme ionique ou polymère. L'autonomie du véhicule passerait ainsi de 80 km (valeur actuelle) à 300 km, ce qui deviendrait acceptable pour une voiture à vocation urbaine ou extra-urbaine. Par ailleurs, il est bien évident que les émissions de CO₂ imputables aux VE dépendront essentiellement des modes de production électriques propres à chaque pays, ainsi que du rendement des centrales thermiques. En ce qui concerne les modes de

production possibles en 2020, nous avons supposé, un accroissement annuel de la part du gaz naturel dans la production d'électricité : dans notre scénario la part du gaz augmente chaque année pour atteindre en 2020, 31 % en Europe, 38 % aux Etats-Unis, 20 % au Canada, 53 % en Argentine, 38 % au Brésil et enfin 62 % dans la CEI. Pour les rendements des centrales thermiques, nous avons fait l'hypothèse qu'ils atteindraient 36 % pour les centrales au charbon et au fuel et 50 % pour les centrales à gaz. De plus, nous avons considéré que chaque moyen de production est représenté dans le kilowatt-heure utilisé par le véhicule électrique, dans des proportions reflétant la structure moyenne du parc.

Nous avons également envisagé une légère diminution du kilométrage moyen des VP, de 4 à 7 % selon les pays en 2020 par rapport à 1990. On estime en effet que, dans un contexte où la réduction des émissions de polluants imputables au transport routier devient un objectif majeur, tout comme la limitation du trafic routier en milieu urbain, on peut imaginer que certaines mesures influencent les comportements des conducteurs afin qu'ils utilisent moins leur véhicule (taxes élevées sur les carburants, incitations à utiliser les transports en commun, mise en place systématique de péages à l'entrée des grandes villes, interdiction de circuler certains jours...). Dans un tel contexte, il faut probablement s'attendre à une baisse progressive du kilométrage moyen des VP. Pour les véhicules électriques, il est probable qu'ils soient utilisés pour des petits trajets quotidiens. Nous avons donc fait l'hypothèse d'un trajet quotidien de 40 km pour l'Europe et de 50 km pour les autres pays, et cela, 5 jours sur 7. On obtient donc une moyenne annuelle de 10 400 km en Europe et de 13 000 km dans les autres zones. Cette hypothèse est relativement importante, puisque nous considérons dans le calcul des gains d'émissions que ce sont les kilomètres effectués par les véhicules électriques qui se substituent aux kilomètres effectués par des véhicules essence. Ici, un véhicule électrique ne remplace donc que partiellement un véhicule essence.

L'impact sur les émissions de CO₂

L'impact de la pénétration du GNV et des véhicules électriques sur les émissions de CO₂ imputables aux véhicules particuliers

Les émissions de CO₂ imputables aux véhicules particuliers à l'horizon 2020

Afin de mesurer, d'une manière globale, la réduction des émissions de CO₂ imputable à la pénétration du GNV et des véhicules électriques, nous avons estimé les émissions de CO₂ imputables au parc de VP, lorsque celui-ci est composé uniquement de véhicules essence sur la période 1995-2020. En effet, nous faisons l'hypothèse qu'entre 1995 et 2020 l'Argentine, le Brésil, les Etats-Unis, le Canada et la CEI n'ont pas recours au diesel pour leurs véhicules particuliers. Pour l'Europe, nous supposons que la part des VP diesel dans le parc reste constante (les VP diesel représentent actuellement 13 % du parc de VP européen). Cette situation n'est rien d'autre qu'une hypothèse de travail, nous considérons donc cette hypothèse comme une situation de référence que l'on comparera systématiquement avec chacune des trois situations suivantes :

- Le parc de VP se compose de véhicules essence et de véhicules GNV
- Le parc de VP se compose de véhicules essence et de VE
- Le parc de VP se compose de véhicules essence, de véhicules GNV et de VE

Nous présentons dans les tableaux 6, 7 et 8 les résultats selon deux critères : les émissions de CO₂ qui interviennent uniquement à l'échappement et les émissions de CO₂ qui interviennent sur l'ensemble du cycle du carburant. Cette distinction s'avère particulièrement nécessaire dans le cas du véhicule électrique où toutes les émissions interviennent en amont de l'utilisation.

Au regard des résultats présentés dans le tableau n° 6 et calculés à partir des hypothèses décrites précédemment, plusieurs constats s'imposent :

► si le volume du parc atteint les niveaux décrits dans le tableau n° 4, les pays dont la densité automobile est amenée à croître fortement entre 2000 et 2020 (Argentine, Brésil, CEI), connaîtront un accroissement considérable des émissions de CO₂ imputables aux VP. En effet, malgré des hypothèses particulièrement favorables pour limiter l'accroissement de la

consommation finale (baisse du kilométrage et de la consommation unitaire), la quantité de carburant utilisée dans les VP pourrait augmenter d'un facteur 3 d'ici 2020, voire plus si la consommation unitaire n'est que faiblement réduite ;

► en Amérique du Nord et en Europe, les chances de stabiliser en 2010 et même 2020 les émissions de CO₂ par rapport à leur niveau de 1990 sont très limitées, sauf dans l'hypothèse d'une réduction de la consommation unitaire amorcée dès aujourd'hui pour atteindre -20 % en 2020. Dans ce cas, la consommation finale des VP serait stabilisée entre 2000 et 2010, puis diminuerait ensuite. Envisager, une telle réduction est certes optimiste mais l'analyse simultanée des "effets quantités" et des "effets consommation unitaire" montre à quel point il est important d'agir en ce sens.

Impact d'une pénétration significative de véhicules électriques ou fonctionnant au GNV

Même en supposant, comme c'est le cas ici, que d'ici 2 ans certains automobilistes changent leur véhicule essence contre un véhicule GNV ou électrique, et que d'ici 20 ans ces véhicules représentent plus de 20 % des ventes (12 % pour le véhicule GNV et 10 % pour le VE), il ne faut pas s'attendre pour autant à des gains importants en terme de réduction des émissions de CO₂. En effet, un parc de VP composé de plus de 5 % de véhicules GNV ne conduirait en fait qu'à une réduction des émissions de CO₂ d'environ 1 %. De même, un parc composé d'environ 5 % de VE ne conduirait qu'à une réduction de 2 à 4 % des émissions de CO₂ imputables aux VP. Dans ces conditions, il est évident qu'à court terme il est préférable de compter sur la baisse de la consommation unitaire des véhicules essence plutôt que sur l'utilisation de l'électricité et du gaz dans les transports. Les graphiques 4 et 5 illustrent ce constat. La différence de niveau entre la courbe "la consommation unitaire et le kilométrage restent constants /90" et la courbe "évolution sans VE ni GNV" représente les gains induits par une baisse de la consommation unitaire et du kilométrage. Nous avons calculé entre 1995 et 2020 pour

l'Europe, l'aire "A1" qui représente le volume cumulé des émissions de CO₂ que permet d'éviter une baisse simultanée de la consommation unitaire et du kilométrage ainsi que l'aire "A2" qui représente celui évité par la pénétration cumulée de véhicules électriques et GNV. "A2" représente 120 Mt de CO₂ et "A1" représente 2000 Mt de CO₂ dont 1500 imputables à la baisse de la consommation unitaire et 500 imputables à la baisse du kilométrage moyen. Ainsi, d'ici 2020, les émissions de CO₂ imputables aux VP dépendront beaucoup plus des gains réalisés sur la consommation des moteurs essence plutôt que de la pénétration de véhicules GNV ou de véhicules électriques.

	1990	1995	2000	2010	2020	Δ	EQT ^a	ECU ^b	Δ	EQT	ECU
Consommation finale des VP (Mtep)											
Europe	131,26	141,02	143,64	143,13	139,45	+ 9 %	43,24	- 31,37	+ 6 %	61,71	-53,52
Canada	18,12	19,04	20,60	20,87	20,74	+ 15 %	6,18	- 3,43	+ 14 %	8,92	- 6,30
Etats-Unis	204,41	211,27	225,44	224,46	221,95	+ 10 %	60,03	- 39,99	+ 9 %	90,16	- 72,62
Brésil	13,62	15	18,06	29,24	42,23	+ 115 %	20,99	- 6,12	+ 225 %	43,81	-14,56
Argentine	5,75	5,8	6,85	10,29	14,85	+ 79 %	6,79	- 2,25	+ 158 %	14,22	- 5,12
CEI	37,84	21,7	33,16	50,76	92,33	+ 34 %	56,10	-42,53	+ 144 %	151,14	- 93,93
Emissions de CO₂ à l'échappement (Mt)											
Europe	409,67	440,14	448,32	446,73	435,25	+ 9 %	134,95	- 97,90	+ 6 %	192,61	- 167,03
Canada	56,56	59,44	64,28	65,13	64,74	+ 15 %	19,29	- 10,72	+ 14 %	27,85	-19,67
Etats-Unis	637,98	659,38	703,61	700,55	692,73	+ 10 %	187,36	- 124,80	+ 9 %	281,39	- 226,64
Brésil	42,53	46,83	56,37	91,26	138,38	+ 115 %	68,8	-20,06	+ 225 %	143,56	-47,71
Argentine	17,97	18,12	21,37	32,11	46,37	+ 79 %	21,2	- 7,05	+ 158 %	44,4	-16
CEI	118,10	67,74	103,49	158,41	288,18	+ 34 %	166,75	- 126,45	+ 144 %	449,28	- 279,20
Emissions de CO₂ sur tout le cycle du carburant (Mt)											
Europe	477,47	512,99	552,51	520,66	507,28	+ 9 %			+ 6 %		
Canada	65,92	69,27	74,92	75,91	75,45	+ 15 %			+ 14 %		
Etats-Unis	743,57	768,51	820,06	816,49	807,38	+ 10 %			+ 9 %		
Brésil	49,57	54,58	65,7	106,37	161,3	+ 115 %			+ 225 %		
Argentine	20,95	21,11	24,9	37,43	54,05	+ 79 %			+ 158 %		
CEI	137,65	78,95	120,62	184,63	335,88	+ 34 %			+ 144 %		

^a EQT (l'effet quantité) mesure la consommation supplémentaire ou les émissions de CO₂ supplémentaires (par rapport à une année de base, ici 1990) que l'on aurait observées si la consommation unitaire et le kilométrage étaient restés constants.

^b ECU (l'effet consommation unitaire) mesure l'économie d'énergie ou les gains en terme d'émissions de CO₂ induits par la baisse du kilométrage et le progrès technique (ici, la baisse de la consommation unitaire).

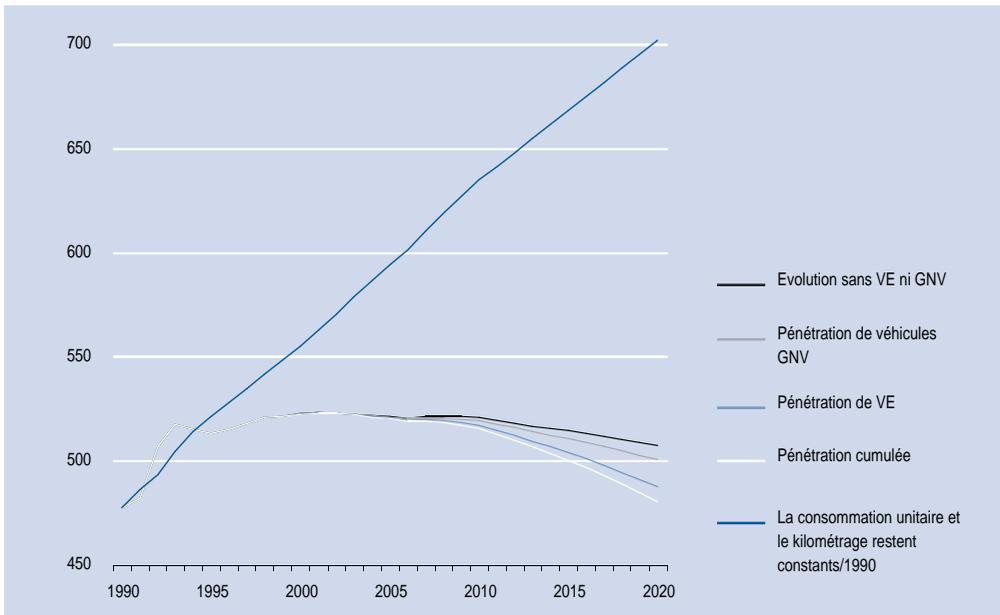
Tableau 6
Consommation finale et émissions de CO₂ imputables aux véhicules particuliers (ici le parc de VP est composé uniquement de véhicules particuliers utilisant des carburants pétroliers)

Automobile et gaz naturel

Mt CO ₂	1990	1995	2000	2010	2020	2010/1990	2020/1990	gain *
Europe								
Carburants pétroliers uniquement	409,67	440,14	448,32	446,73	435,25	+ 9 %	+ 6 %	
Avec GNV			448,31	445,61	429,93	+ 9 %	+ 5 %	-1,22 %
Avec VE			448,28	443,63	418,27	+ 8 %	+ 2 %	- 3,9 %
Avec GNV + VE			448,28	442,51	412,95	+ 8 %	+ 1 %	- 5,12 %
<i>Emissions de CO₂ sur tout le cycle (Mt)</i>								
Carburants pétroliers uniquement	477,47	512,99	522,51	520,66	507,28	+ 9 %	+ 6 %	
Avec GNV			522,51	519,20	500,34	+ 9 %	+ 5 %	-1,37 %
Avec VE			522,49	518,52	496,14	+ 9 %	+ 4 %	- 2,2 %
Avec GNV + VE			522,48	517,06	489,20	+ 8 %	+ 2 %	- 3,56 %
Etats-Unis								
Carburants pétroliers uniquement	637,98	659,38	703,61	700,55	692,73	+ 10 %	+ 9 %	
Avec GNV			703,61	698,75	684,11	+ 10 %	+ 7 %	- 1,24 %
Avec VE			703,56	696,02	666,26	+ 9 %	+ 4 %	- 3,82 %
Avec GNV + VE			703,55	694,22	657,65	+ 9 %	+ 5 %	- 5,06 %
<i>Emissions de CO₂ sur tout le cycle (Mt)</i>								
Carburants pétroliers uniquement	743,57	768,51	820,06	816,49	807,38	+ 10 %	+ 9 %	
Avec GNV			820,05	814,14	796,13	+ 9 %	+ 7 %	-1,39 %
Avec VE			820,03	813,61	791,03	+ 9 %	+ 6 %	-2,03 %
Avec GNV + VE			820,02	811,27	779,78	+ 9 %	+ 5 %	-3,42 %
Canada								
Carburants pétroliers uniquement	56,56	59,44	64,28	65,13	64,74	+ 15 %	+ 14 %	
Avec GNV			64,28	65,01	64,20	+ 15 %	+ 14 %	- 0,83 %
Avec VE			64,28	64,84	63,12	+ 15 %	+ 12 %	- 2,5 %
Avec GNV + VE			64,28	64,72	62,58	+ 14 %	+ 11 %	- 3,34 %
<i>Emissions de CO₂ sur tout le cycle (Mt)</i>								
Carburants pétroliers uniquement	65,92	69,27	74,92	75,91	75,45	+ 15 %	+ 14 %	
Avec GNV			74,92	75,76	74,75	+ 15 %	+ 14 %	- 0,93 %
Avec VE			74,92	75,63	73,96	+ 15 %	+ 12 %	- 1,97 %
Avec GNV + VE			74,92	75,48	73,26	+ 14 %	+ 11 %	- 2,9 %

* la colonne gain correspond à la réduction des émissions de CO₂ en 2020, compte tenu des hypothèses de pénétration dans le parc de voitures GNV et de VE (voir le tableau 5)

Tableau 7
Emissions de CO₂ à l'échappement (Mt) : résultats obtenus pour l'Europe, les Etats-Unis et le Canada



Graphique n° 4
Evolution possible des émissions de CO₂ à l'échappement (calculées sur tout le cycle du carburant) imputables aux VP à l'horizon 2020 en Europe (en Mt de CO₂)

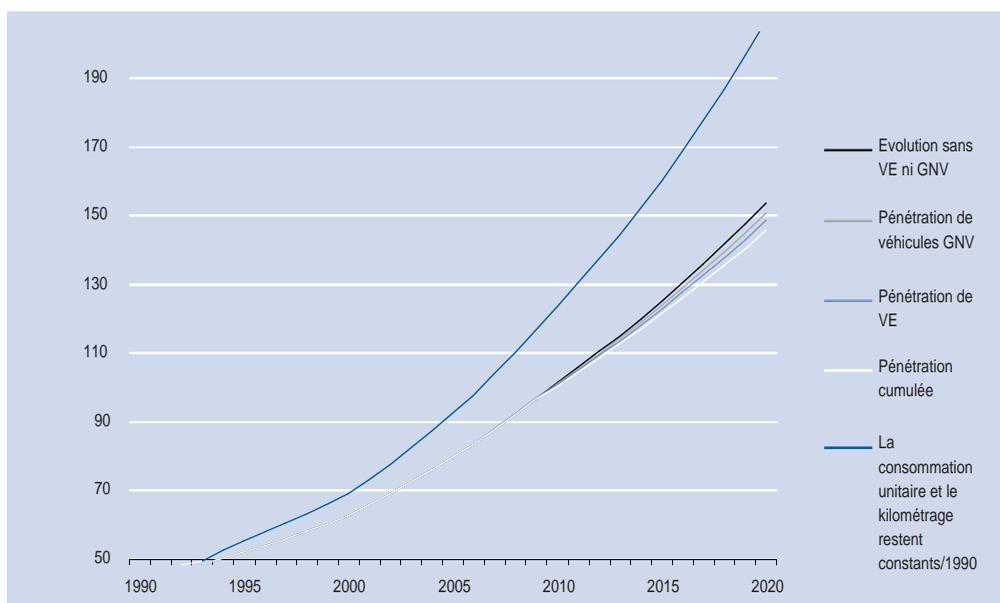
Mt CO ₂	1990	1995	2000	2010	2020	2010/1990	2020/1990	gain *
Argentine								
Carburants pétroliers uniquement	17,97	18,12	21,37	32,11	46,37	+ 79 %	+ 158 %	
Avec GNV			20,86	31,02	44,70	+ 73 %	+ 149 %	-3,62 %
Avec VE			21,36	31,94	44,90	+ 78 %	+ 150 %	- 3,19 %
Avec GNV + VE			20,86	30,86	43,22	+ 72 %	+ 140 %	- 6,81 %
<i>Emissions de CO₂ sur tout le cycle (Mt)</i>								
Carburants pétroliers uniquement	20,95	21,11	24,9	37,43	54,05	+ 79 %	+ 158 %	
Avec GNV			24,24	36,01	51,86	+ 72 %	+ 148 %	-4,06 %
Avec VE			24,90	37,28	52,92	+ 78 %	+ 153 %	- 2,10 %
Avec GNV + VE			24,24	35,87	50,72	+ 71 %	+ 142 %	-6, 16 %
Brésil								
Carburants pétroliers uniquement	42,53	46,83	56,37	91,26	138,38	+ 115 %	+ 225 %	
Avec GNV			56,37	90,96	136,02	+ 114 %	+ 220 %	-1,71 %
Avec VE			56,36	90,51	131,68	+ 113 %	+ 210 %	-4,74 %
Avec GNV + VE			56,36	90,2	129,3	+ 112 %	+ 204 %	-6,56 %
<i>Emissions de CO₂ sur tout le cycle (Mt)</i>								
Carburants pétroliers uniquement	49,57	54,58	65,7	106,37	161,3	+ 115 %	+ 225 %	
Avec GNV			65,7	105,97	158,19	+ 114 %	+ 219 %	-1,92 %
Avec VE			65,7	105,69	155,99	+ 113 %	+ 215 %	- 3,28 %
Avec GNV + VE			65,7	105,29	152,90	+ 112 %	+ 208 %	-5,20 %
CEI								
Carburants pétroliers uniquement	118,10	67,74	103,49	158,41	288,18	+ 34 %	+ 144 %	
Avec GNV			103,49	157,69	281,59	+ 34 %	+ 138 %	-2,29 %
Avec VE			103,48	157,24	275,13	+ 33 %	+ 133 %	-4,53 %
Avec GNV + VE			103,48	156,51	268,54	+ 33 %	+ 127 %	-6,82 %
<i>Emissions de CO₂ sur tout le cycle (Mt)</i>								
Carburants pétroliers uniquement	137,65	78,95	120,62	184,63	335,88	+ 34 %	+ 144 %	
Avec GNV			120,62	183,68	327,27	+ 33 %	+ 138 %	-2,56 %
Avec VE			120,62	183,98	329,59	+ 34 %	+ 139 %	-1,87 %
Avec GNV + VE			120,61	183,03	320,98	+ 33 %	+ 133 %	-4,44 %

* la colonne gain correspond à la réduction des émissions de CO₂ en 2020, compte tenu des hypothèses de pénétration dans le parc de voitures GNV et de VE (voir le tableau 5)

Tableau 8

Emissions de CO₂ à l'échappement (Mt) : résultats obtenus pour l'Argentine, le Brésil et la CE

Graphique n° 5
Evolution possible des émissions de CO₂ (calculées sur tout le cycle du carburant) imputables aux VP à l'horizon 2020 au Brésil



Conclusion

L Parmi les différents moyens envisagés aujourd'hui pour "rouler au gaz", seuls les véhicules GNV et les véhicules électriques permettent de réduire significativement les émissions de GES. Le véhicule GNV permet une réduction d'environ 20 % (+ ou - 4% selon l'origine de l'électricité avec laquelle est comprimé le gaz) par rapport au véhicule essence. Pour le véhicule électrique, il permet dans la quasi totalité des cas une réduction considérable des émissions de GES par rapport à un véhicule essence, de l'ordre de 50 % en Amérique du Nord, 60 % en Europe, 90 % au Mercosur et enfin 40 % pour la CEI. Dans l'hypothèse où l'électricité est produite uniquement à partir du gaz naturel dans des cycles combinés, la réduction est d'environ 60 %. L'utilisation du véhicule électrique offre donc sans conteste, les meilleurs avantages en terme d'environnement. D'une part, parce qu'il ne participe en aucune façon à la pollution urbaine, et d'autre part, parce qu'il permet quasiment dans tous les cas une réduction importante des émissions de GES. En effet, seul un véhicule électrique qui utiliserait exclusivement de l'électricité produite à partir du charbon n'offrirait aucun avantage en terme d'effet de serre.

Néanmoins, compte tenu des contraintes inhérentes à ce type de véhicules (autonomie et coût pour le véhicule électrique, réseau de distribution pour le GNV), mais aussi compte tenu des contraintes liées au renouvellement du parc automobile, la proportion de véhicules GNV et de véhicules électriques envisageable dans le parc automobile à l'horizon 2020 reste faible. En conséquence, l'impact sur les émissions de GES reste très limité.

La pénétration de véhicules GNV et de véhicules électriques dans les parcs se justifie donc d'abord par des considérations d'environnement local. Mais, pour être efficace, leur pénétration ne doit pas se limiter aux flottes captives. En ce qui concerne l'effet de serre et malgré des hypothèses de pénétration "optimistes", on ne peut pas attendre d'impact important avant 2020. Par conséquent pour les 20 prochaines années, la réduction des émissions de GES imputables à l'automobile continuera de reposer très largement sur l'amélioration des véhicules essence et sur les mesures facilitant les transferts modaux.

Annexes

Annexe I : Consommation du véhicule et émissions à l'échappement

Tableau 9
Consommations d'énergie associées à une Clio 1,4 l sur cycle Euro 96

Carburants	g/km	l/100km	MJ/km
Essence	53,25	7,2	2,343
Diesel	52,08	6,2	2,187
GNV		47,5	66,5NI/100 2,569
DME	80,8	12,2	2,327
Gazole ex-gaz	52,08	6,2	2,187
Electrique			0,217 kWh/km

Nous avons considéré dans un premier temps que la consommation et les émissions pour un gazole ex-gaz étaient identiques à celles d'un diesel classique. Les résultats présentés ici concernent une Clio 1,4 l sur cycle Euro 1996.

Tableau 10
Emissions associées à une Clio 1,4 l sur cycle Euro 9

Carburants	CO ₂	NO _x	CO	HCNM	CH ₄ ^a	SO ₂	Part
Essence	171	0,088	1,3	0,1445	0,0015	nd	0
Diesel	152	0,531	0,393	0,0394	0,0004	nd	0,031
GNV	125	0,16	0,16	0,05	0,18	nd	0
DME	142	0,177	0,393	0,02	nd	nd	0,001
Gazole ex-gaz	152	0,531	0,393	0,0394	0,0004	nd	0,023

a) les émissions de CH₄ ont été calculées de la manière suivante : pour l'essence, le diesel et le gazole ex-gaz, le CH₄ représente 1 % des HC.

Annexe II : Typologie des polluants présents dans les gaz d'échappement

Ceux qui participent à la pollution urbaine

les particules, désignent en particulier un ensemble de produits présents dans les effluents diesels. Dans cet ensemble se trouvent des grains de suie dont l'inhalation peut se révéler dangereuse pour les voies respiratoires, car ils viennent se fixer dans les alvéoles des poumons pouvant ainsi provoquer des affections respiratoires ou cardio vasculaires.

Le monoxyde de carbone (CO), dont on estime que 67 % des émissions proviennent des automobiles et particulièrement des véhicules essences. A haute dose, le CO est toxique pour l'homme car il pénètre dans les poumons et bloque la fixation de l'oxygène par l'atome central de Fe de l'hémoglobine, entraînant ainsi une accumulation du CO₂ respiré dans les cellules.

Les oxydes d'azote (NO_x) et les hydrocarbures (HC), participent à la formation du smog photochi-

mique au-dessus des grandes villes à forte densité de circulation. En effet, en réagissant avec les UV ils contribuent à la formation de l'ozone urbain les jours où la température est supérieure à 25 °C et la vitesse des vents inférieure à 2 m/s. On estime aujourd'hui que le transport routier est responsable à hauteur de 69 % des émissions de NO_x et 72 % des émissions de HC.

Les gaz à effet de serre (GES)

Il s'agit du **dioxyde de carbone (CO₂)**, du **méthane (CH₄)**, du **protoxyde d'azote (N₂O)**. Ces gaz sont naturellement présents dans l'atmosphère et jouent un rôle important dans la fixation de la température de la basse atmosphère. On suppose qu'une augmentation des concentrations de ces gaz due aux activités humaines (industrie, transport...), contribuerait au réchauffement de la basse atmosphère.

Annexe III : Les carburants synthétiques

Le DiMéthylEther (DME)

Le DME est relativement proche du gaz pétro-liquide, c'est Haldor Topsoe qui le premier découvrit qu'il pouvait être utilisé dans des moteurs diesels et pouvait être directement produit à partir du gaz de synthèse (mélange de H₂, CO et CO₂). Or, ce gaz de synthèse peut être produit à partir de charbon, de bois ou de gaz naturel. Dans l'étude, nous avons considéré que le gaz de synthèse était issu de gaz naturel et qu'il était directement transformé en DME via le procédé Topsoe.

Ce procédé permet d'effectuer simultanément la synthèse du méthanol et du DME, avec un rendement énergétique d'environ 72 %.

Les principales réactions sont :

- $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$
- $2\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2$

Les deux premières réactions représentent une synthèse conventionnelle du méthanol. D'une façon qualitative on peut dire que l'introduction de la troisième réaction "soulage" les contraintes thermodynamiques inhérentes à la synthèse du méthanol en la transformant en DME.

La réaction globale peut donc s'écrire :

- $4\text{H}_2 + 2\text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2$

La principale caractéristique du DME est d'être un carburant fortement oxygéné (CH₃-O-CH₃) avec une température d'auto inflammation très basse (235 °C) lui permettant de fonctionner en réglage pauvre. De plus, il permet d'obtenir des niveaux d'émission de NOx et de particules très inférieurs à ceux d'un diesel classique.

Le gazole ex-gaz

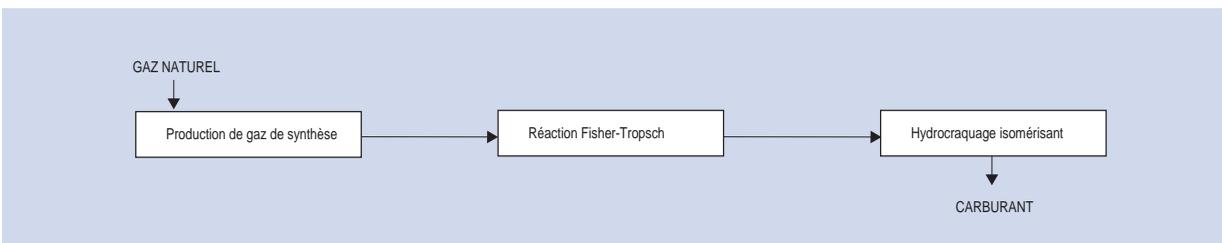
Les procédés Fisher-Tropsch permettent d'obtenir un mélange d'hydrocarbures et de composés oxygénés en traitant le mélange CO + H₂ (syngaz) par des catalyseurs constitués de fer alcalinisés et de cobalt. A l'origine, le gaz de synthèse était produit à partir de charbon, mais plus récemment, la synthèse Fisher-Tropsch a été envisagée comme un moyen de valoriser le gaz naturel.

Nous avons choisi comme référence le procédé SMDS, mis au point par Shell et dont une unité importante fonctionne en Malaisie. Sur ce site, on combine une unité Fisher-Tropsch avec une unité de craquage. On obtient alors trois produits : du naphta, du kérosène et du gasoil. On peut choisir les rapports entre ces trois produits suivant les proportions : 15; 25; 60 ou 25; 50; 25. Au global, l'unité fonctionne avec un rendement énergétique de l'ordre de 60 %.

On ne dispose pas à l'heure actuelle d'informations complètes sur ce carburant. On sait cependant qu'il est équivalent à un gazoil classique à la différence qu'il permettrait de réduire les émissions d'oxyde de soufre lors de son utilisation. Nous avons donc supposé dans un premier temps une consommation et des quantités de polluants émis équivalentes à celles d'un diesel.

Figure 5

Description du procédé Shell (SMDS)



Définition des indicateurs utilisés dans la partie prospective

Dans l'étude, la consommation finale de carburant imputable à l'usage des véhicules particuliers est appréhendée de la manière suivante :

$$Q_t = VP_t \times cu_t \times km_t$$

avec :

Q_t = Consommation finale de carburant imputable aux véhicules particuliers

VP_t = Volume du parc

km_t = Kilométrage moyen des véhicules particuliers

cu_t = Consommation unitaire moyenne

Les données relatives à la consommation unitaire réelle et à son évolution sont difficilement comparables avec la consommation conventionnelle du parc. La consommation unitaire réelle reste une estimation sensée refléter l'égalité "consommation unitaire \times kilométrage moyen \times nombre de VP = ventes de carburants au parc de VP", c'est-à-dire, la consommation unitaire dans les conditions d'utilisation réelles et non la consommation sur cycles de conduite normalisés. La distinction est nécessaire, puisque l'on constate des écarts relativement importants (entre 15 et 30 %) entre la consommation conventionnelle moyenne et la consommation réelle moyenne. Ainsi aux Etats-Unis, la réglementation CAFE (Corporate Average Fuel Economy) autorise un niveau moyen de consommation pour les VP immatriculés en 1990 de 8,55 l/100 km alors que l'U.S Department of Transportation estime la consommation réelle moyenne en 1990 à 11,19 l/100 km, soit un écart de 30 % environ.

Même si les données relatives à la consommation unitaire réelle restent des estimations pouvant comporter de nombreuses incertitudes, il est néanmoins préférable de les utiliser lorsque l'on cherche à déterminer la quantité de carburant effectivement consommée. Utiliser la consommation conventionnelle conduirait inmanquablement à constater un écart considérable entre la quantité de carburant consommée et la quan-

tité vendue. Pour cette raison, nous avons préféré utiliser le concept de consommation unitaire réelle.

D'une manière générale, et quelle que soit la région observée, la tendance est à l'augmentation du volume du parc et à la baisse des consommations unitaires (engendrée principalement par l'amélioration du rendement des moteurs). Mais, on constate que les gains énergétiques attribués à la baisse des consommations unitaires ne se traduisent pas par une diminution de la consommation finale en raison de l'accroissement continu du parc. Pour mesurer ce type d'effet, on dispose de deux indicateurs :

▀ l'effet quantité, se définit comme le produit de la consommation unitaire de l'année de base par la variation de l'activité entre l'année courante et l'année de référence, c'est-à-dire la consommation totale que l'on aurait observée si la consommation unitaire et le kilométrage moyen étaient restés constants. Si l'on note EQT l'effet quantité, on écrit :

$$EQT_{t/10} = \Delta VP_{t/10} \times (cu \times km)_{10}$$

▀ l'effet consommation unitaire, mesure l'impact sur la consommation totale d'une variation simultanée de la consommation unitaire et du kilométrage moyen. D'une manière générale, les variations observées concernant le kilométrage moyen restent relativement faibles. On assimile donc généralement l'effet consommation unitaire comme étant l'économie d'énergie induite par le progrès technique. Si l'on note ECU l'effet consommation unitaire, on écrit :

$$ECU_{t/10} = \Delta (cu \times km)_{t/10} \times VP_t$$

L'étude simultanée de ces deux indicateurs permet de distinguer séparément l'incidence des croissances économiques et démographiques de l'incidence des comportements et du progrès technique sur la consommation d'énergie.

