



© OCDE, 2004.

© Logiciel, 1987-1996, Acrobat, marque déposée d'ADOBE.

Tous droits du producteur et du propriétaire de ce produit sont réservés. L'OCDE autorise la reproduction d'un seul exemplaire de ce programme pour usage personnel et non commercial uniquement. Sauf autorisation, la duplication, la location, le prêt, l'utilisation de ce produit pour exécution publique sont interdits. Ce programme, les données y afférentes et d'autres éléments doivent donc être traités comme toute autre documentation sur laquelle s'exerce la protection par le droit d'auteur.

Les demandes sont à adresser au :

Chef du Service des Publications,  
Service des Publications de l'OCDE,  
2, rue André-Pascal,  
75775 Paris Cedex 16, France.

# Voitures propres

Stratégies pour des véhicules peu polluants



ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT

## ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

En vertu de l'article 1<sup>er</sup> de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale ;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique ;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996), la Corée (12 décembre 1996) et la République slovaque (14 décembre 2000). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

*Also available in English under the title:*

### **Can Cars Come Clean?**

Strategies for Low-Emission Vehicles

© OCDE 2004

---

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France, tél. (33-1) 44 07 47 70, fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, ou CCC Online : [www.copyright.com](http://www.copyright.com). Toute autre demande d'autorisation de reproduction ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

---

## AVANT-PROPOS

L'OCDE réunit 30 pays membres et aide les gouvernements à faire face aux défis d'une économie mondialisée. Le Programme de recherche en matière de transports routiers et liaisons intermodales (RTR) est une approche de coopération parmi les pays membres de l'OCDE visant à traiter de questions liées au transport.

La mission du Programme RTR est de promouvoir le développement économique dans les pays membres de l'OCDE en améliorant la sécurité, l'efficacité et la durabilité des transports grâce à un programme de recherche en coopération sur les transports routiers et intermodaux qui produise des recommandations relatives à des options pour l'élaboration et la mise en œuvre de politiques efficaces de transport dans les membres de l'OCDE et qui favorise la vulgarisation pour les pays non membres.

Cette étude a été réalisée par le Groupe de travail de l'OCDE sur les véhicules à faibles émissions. Elle évalue l'impact d'une utilisation accrue des véhicules à faibles émissions dans les pays membres, en se fondant sur les expériences réunies à ce jour, les résultats de la recherche, et les réponses à une enquête à laquelle 18 pays de l'OCDE ont répondu. Ce rapport final est composé de deux parties. La partie principale du rapport – Options stratégiques – décrit dans un vocabulaire non technique les performances actuelles et attendues des technologies conventionnelles et innovantes ainsi que les questions de mise en œuvre associées à chaque technologie. Il analyse les mesures possibles pour faciliter l'introduction des véhicules à faibles émissions. Il propose des recommandations pour des actions de politique axées sur le marché visant à promouvoir l'achat ou l'utilisation accrue de véhicules considérés comme propres en termes d'émissions de polluants et de gaz à effet de serre. La seconde partie – Annexes techniques – présente plus en détail la réglementation sur les émissions des véhicules en vigueur en Europe, en Amérique du Nord et au Japon, décrit les performances en termes d'émissions de chaque technologie, propose des études de cas et donne des exemples de mesures adoptées dans les pays de l'OCDE pour promouvoir les véhicules à faibles émissions.

Ce rapport est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE.

## RÉSUMÉ ANALYTIQUE

N° ITRD\* : F100570

Les émissions de polluants émis par les véhicules à moteur sont depuis longtemps source de préoccupations pour les gouvernements et le public dans son ensemble en raison de leur impact sur la qualité de l'air et la santé. Plus récemment, les émissions de gaz à effet de serre ont suscité des inquiétudes croissantes du fait de leur impact sur le réchauffement de la planète.

Malgré le nombre croissant de véhicules et l'augmentation des distances parcourues, les progrès technologiques apportés aux véhicules conventionnels et aux carburants ont conduit, au cours des dix dernières années, à des réductions considérables des émissions de polluants. Celles-ci ont contribué à une amélioration de la qualité de l'air dans les zones urbaines dans la plupart des pays de l'OCDE.

Dans le même temps, les émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules à moteur – qui contribuent à environ 23% des émissions totales de CO<sub>2</sub> dans les pays de l'OCDE — ont continué à augmenter de près de 2% par an.

Ce rapport réalisé par un groupe de travail de l'OCDE examine le potentiel des techniques classiques et innovantes (comme les véhicules hybrides ou à pile à combustible) pour réduire à la fois les émissions de polluants atmosphériques locaux et de gaz à effet de serre. Il analyse également les questions de mise en œuvre liées au déploiement et à l'utilisation à grande échelle des véhicules à faibles émissions et décrit les stratégies déployées dans les pays de l'OCDE pour promouvoir ces véhicules.

Le rapport est complété par des annexes techniques qui donne des informations détaillées sur les réglementations internationales en vigueur concernant les émissions des véhicules, le développement des technologies conventionnelles (véhicules à essence et diesel) et innovantes – illustré par des études de cas d'expériences pratiques portant sur une variété de technologies – et sur les mesures d'incitation mises en œuvre dans les pays de l'OCDE pour promouvoir les véhicules à faibles émissions.

**Domaines :** Environnement (15) ; Véhicules (90)

**Mots-clés :** Batterie, contrôle des émissions, émissions, international, législation, OCDE, politique, pollution atmosphérique, technologie, véhicule, véhicule électrique, véhicule hybride, voiture particulière, zone urbaine.

---

\* La Documentation Internationale de Recherche sur les Transports de l'OCDE (ITRD) est une base de données qui contient plus de 300 000 références bibliographiques sur la littérature dans le domaine de la recherche sur les transports. Près de 10 000 références sont ajoutées chaque année. L'ITRD est un outil puissant qui permet d'identifier les recherches conduites dans le monde sur les transports, grâce à une extraction rapide de résumés détaillés des rapports de recherche répondant aux critères sélectionnés.

## TABLE DES MATIÈRES

Messages clés	7
Résumé et conclusions	9
Chapitre 1. Introduction	27
Chapitre 2. Polluants atmosphériques réglementés	31
Chapitre 3. Émissions de gaz à effet de serre	47
Chapitre 4. Facteurs influant sur la généralisation de l'utilisation des véhicules à faibles émissions	81
Chapitre 5. Stratégies de promotion des véhicules à faibles émissions	91
Annexes techniques	109
Annexe A. Situation de la réglementation internationale relative aux émissions des véhicules, à l'effet de serre et aux véhicules issus de technologies avancées	111
Annexe B. Technologies traditionnelles et nouvelles	133
Annexe C. Aperçu de l'utilisation des véhicules à faibles émissions	173
Annexe D. Informations et incitations dans les pays de l'OCDE	213
Annexe E. Production d'hydrogène à partir de sources fossiles	221
Liste des abréviations	227
Membres du Groupe de travail de l'OCDE sur les véhicules à faibles émissions	229

## MESSAGES CLÉS

### Pollution atmosphérique locale

Le renforcement des mesures de lutte contre les émissions de polluants atmosphériques mises en œuvre au cours des dix dernières années a permis une réduction, dans la plupart des cas significative, du volume des polluants locaux émis par les véhicules automobiles, et ce malgré l'augmentation de la taille des parcs de véhicules et l'accroissement des distances parcourues.

La plupart des pays de l'OCDE ont introduit dans leur législation des nouvelles normes d'émissions plus strictes concernant les polluants atmosphériques locaux ; ces normes entreront pour la plupart en vigueur en 2004 ou 2005.

Les véhicules classiques dotés des meilleures technologies actuelles sont "peu polluants" en termes de pollution atmosphérique locale. Ils satisfont déjà aux nouvelles normes et on peut les considérer, du point de vue des polluants locaux, comme des véhicules à faibles émissions (LEV).

Les émissions totales des parcs de véhicules actuels continueront de diminuer, à mesure que les véhicules anciens seront remplacés par des véhicules neufs faisant appel aux technologies de pointe.

Certaines technologies nouvelles, notamment celles des véhicules hybrides, peuvent aussi offrir la possibilité de réduire les émissions locales de polluants atmosphériques. Toutefois, la pénétration sur le marché des nouvelles technologies a été jusqu'à maintenant relativement faible. Au moins dans le court terme, les véhicules classiques à moteur diesel et à essence demeureront extrêmement compétitifs et conserveront leurs parts de marché.

### Émissions de gaz à effet de serre - CO<sub>2</sub>

L'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> imputables au secteur du transport routier constitue aujourd'hui l'un des principaux motifs de préoccupation, puisqu'elles représentent, dans les pays de l'OCDE, environ 23% des émissions totales de CO<sub>2</sub> en pourcentage, et qu'elles augmentent en valeur absolue à un taux de 2% par an.

Il existe des moyens technologiques permettant de réduire sensiblement la consommation de carburant et, par voie de conséquence, le volume de CO<sub>2</sub> et de gaz à effet de serre émis par véhicule.

Malgré les progrès technologiques, les efforts visant à réduire la consommation de carburant par véhicule ont été en partie neutralisés par une augmentation de la puissance et du poids des véhicules, qui correspond au choix des consommateurs, qui préfèrent des véhicules de plus grande taille, plus confortables et offrant de meilleures performances.

Il existe encore une marge de réduction de la consommation de carburant et des émissions de CO<sub>2</sub> par véhicule pour ce qui concerne les véhicules automobiles classiques, les meilleures perspectives étant celles offertes par les moteurs diesel à injection directe à haute pression.

Du point de vue des émissions totales des parcs de véhicules, les progrès en termes d'émissions par véhicule ont à ce jour été anéantis par l'augmentation de la taille des parcs de véhicules et par l'accroissement des distances annuelles parcourues et cette tendance devrait se poursuivre.

Parmi les nouvelles technologies, celles des véhicules hybrides (diesel / électrique) et, à plus long terme, celles des véhicules à pile à combustible, semblent être les plus prometteuses dans la perspective d'une amélioration des performances en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules automobiles classiques à essence ou diesel tout en répondant aux exigences du marché en termes de performances du véhicule.

Les performances futures des parcs de véhicules en matière d'émissions dépendent des décisions d'achat du consommateur. Les cycles d'essais officiels ne donnent pas aux consommateurs une information complète sur les performances en matière d'émissions et sur la consommation de carburant des nouveaux véhicules en conditions réelles d'utilisation car ils ne sont pas représentatifs des conditions réelles de conduite et ne tiennent pas compte de l'utilisation des équipements et des accessoires du véhicule.

## RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

### Vue d'ensemble

Répondant aux besoins des personnes et facilitant le commerce et l'industrie, les réseaux de transport jouent un rôle essentiel dans les sociétés modernes. Le transport routier est l'élément central de ces réseaux, et la circulation des véhicules routiers, bien qu'apportant de nombreux avantages, peut aussi induire des effets négatifs sur l'environnement, parmi lesquels les émissions de polluants atmosphériques locaux et de gaz à effet de serre.

Au niveau mondial, ce sont les carburants issus du pétrole qui dominent le marché, puisqu'ils couvrent environ 96% de la demande de transport. Toujours au niveau mondial, la consommation des différents carburants de remplacement, comme le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le gaz naturel comprimé (GNC) ou les biocarburants, est négligeable dans le secteur du transport, même s'il en est fait très largement usage dans certains pays.

Dans les pays de l'OCDE, le transport (y compris le transport routier) représentait en 2000 environ 62% de la consommation finale de pétrole. Dans le secteur du transport, la plus grande partie de la consommation de pétrole est le fait du transport routier.

Afin de limiter le volume de polluants locaux émis par les véhicules automobiles, les pays membres ont adopté, en ce qui concerne ces émissions, des réglementations qui ont été considérablement durcies au cours des vingt dernières années. En Europe, aux États-Unis et au Japon, les normes actuelles et futures d'émission des véhicules imposent des limites strictes aux émissions de polluants atmosphériques dont on sait qu'ils ont le plus d'effet sur la pollution locale (CO, NO<sub>x</sub>, COV, PM<sub>10</sub>). Des normes équivalentes sont aussi en voie d'adoption dans plusieurs autres pays de l'OCDE. D'autres émissions dues aux véhicules automobiles ne sont pas spécifiquement recensées parmi les polluants atmosphériques actuellement visés par les diverses normes d'émission. On ne dispose pas de connaissances suffisantes sur l'impact de ces émissions non réglementées sur la santé humaine et l'environnement.

A l'heure actuelle, l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre liée à l'emploi des carburants issus du pétrole, à laquelle le secteur du transport contribue très fortement, constitue l'un des principaux motifs de préoccupation. Au niveau mondial, en 2000, le secteur du transport (y compris le transport routier) était à l'origine de 23% des émissions totales de CO<sub>2</sub>, le transport routier étant à lui seul responsable de 18% des émissions totales de CO<sub>2</sub>. Dans les pays de l'OCDE, en 2000, le secteur du transport (y compris le transport routier) comptait pour 27% des émissions de CO<sub>2</sub>, le transport routier représentant à lui seul 23% des émissions de CO<sub>2</sub> (soit 86% des émissions du secteur du transport) (AIE, 2002a).

Pour répondre à ces préoccupations, les décideurs ont principalement mis l'accent sur les mesures visant les véhicules et les carburants, étant donné qu'elles sont souvent plus simples à mettre en œuvre et moins sensibles, d'un point de vue politique, que les mesures ayant un impact direct sur l'utilisation des véhicules, comme la tarification routière - bien qu'il y ait des raisons de penser que la tarification de l'utilisation des véhicules pourrait être plus efficace. Par ailleurs, il est souvent difficile de mettre en œuvre les mesures qui impliqueraient des modifications substantielles à l'infrastructure urbaine existante, et notamment la localisation des écoles, des bureaux, des usines, des logements, etc.

Les véhicules à faibles émissions (LEV) n'apportent pas de solution miracle au problème des émissions de polluants et de gaz à effet de serre. Toutefois, l'adoption généralisée de LEV - en particulier les véhicules à très faibles émissions libérant une moindre quantité de carbone sur l'ensemble du cycle de vie - rendrait possibles des réductions significatives des émissions du secteur du transport, même dans un contexte d'accroissement de l'activité de transport.

On trouvera énoncées ci-dessous les observations et conclusions principales sur les questions clés en rapport avec les émissions, ainsi qu'une description de la contribution que pourraient apporter les LEV à la solution de ces problèmes.

## Émissions des véhicules automobiles

### *Véhicules classiques*

#### *Émissions provoquant une pollution atmosphérique locale*

La stratégie consistant à soumettre les émissions des véhicules automobiles classiques à des normes et des réglementations progressivement plus strictes s'est avérée fructueuse en termes de réduction du volume de polluants atmosphériques locaux et régionaux émis par ces véhicules.

La sévérité accrue des normes a été à l'origine, au cours des 20 dernières années, de progrès dans la technologie des véhicules. Les améliorations des technologies des moteurs et des carburants ont contribué à réduire de manière significative les émissions de polluants atmosphériques locaux des véhicules neufs. Les émissions de CO, de NO<sub>x</sub> et d'hydrocarbures (HC) des véhicules neufs à moteur à essence vendus en Europe depuis 2000 (et donc conformes aux normes 'Euro 3') sont inférieures d'environ 90% à celles des véhicules vendus au cours des années 80, et les émissions des nouveaux véhicules à moteur diesel ont également été sensiblement réduites. Cette évolution a contribué à la réduction du volume des polluants locaux, puisque des véhicules neufs à émissions réduites ont remplacé les anciens véhicules plus polluants.

Dans la plupart des pays de l'OCDE, les émissions de NO<sub>x</sub>, de CO et de HC des parcs étaient à leur point culminant au début des années 90. Depuis lors, elles ont fortement reculé (de 20 à 50%), malgré une augmentation constante du nombre de kilomètres parcourus par véhicule (+25% entre 1990 et 2000). Le résultat d'ensemble montre que les progrès technologiques réalisés ont contribué de manière significative, au cours de cette période, à l'amélioration de la qualité locale de l'air dans la plupart des pays de l'OCDE.

Il est prévu de rendre encore plus rigoureuses les normes actuellement en vigueur concernant les émissions des véhicules (Tier 2 aux États-Unis en 2004, 'Euro 4' en Europe en 2005 et nouvelle réglementation à long terme au Japon en 2005). Après

l'introduction programmée de ces nouvelles normes (et l'adoption, dans d'autres pays, de normes équivalentes), tous les véhicules neufs classiques, à moteur à essence ou diesel, conformes à ces normes auront des taux extrêmement faibles d'émission de polluants atmosphériques locaux (et seront par conséquent « peu polluants »). La disponibilité attendue de véhicules automobiles classiques à faible taux d'émission de polluants locaux constitue un fait nouveau important, qui améliore sensiblement les perspectives d'utilisation généralisée de LEV à l'avenir.

On peut déjà considérer comme peu polluantes, du point de vue de la pollution atmosphérique, les automobiles à moteur à essence classiques répondant aux normes Euro 4 et/ou Tier 2. Il pourrait en être de même pour ce qui concerne les véhicules diesel, selon ou non qu'ils sont dotés de systèmes évolués de post-traitement (les moteurs diesel pourraient être conformes aux normes Euro 4 sans qu'il soit nécessaire de les équiper de filtres à particules ou de dispositifs de destruction des NOx). Le recours à un dispositif de post-traitement des gaz d'échappement et à des filtres à particules permettrait de disposer de véhicules légers à moteur diesel ayant des performances équivalentes à celles des véhicules à moteur à essence - même en termes d'émissions de NOx et de particules - qui pourraient par conséquent être considérés, à juste titre, comme des « véhicules à faibles émissions ».

Avec la mise en œuvre programmée de normes plus rigoureuses et le remplacement des véhicules des parcs actuels faisant appel à des technologies anciennes par des véhicules classiques dotés des meilleures technologies actuelles, on verra se poursuivre la diminution des émissions de polluants locaux par véhicule, tandis que les niveaux d'ensemble des émissions de polluants locaux imputables aux parcs de véhicules automobiles continueront de décroître.

### *Émissions contribuant au réchauffement planétaire*

La situation est totalement différente en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre.

Le niveau des émissions de gaz à effet de serre - en particulier le CO<sub>2</sub> - constitue toujours un motif de préoccupation dans le contexte du réchauffement planétaire et du changement climatique. Les émissions de gaz à effet de serre liées au transport dans les pays de l'OCDE représentent environ 27% du total des émissions de gaz à effet de serre imputables aux activités humaines et, en valeur absolue, on estime à l'heure actuelle qu'elles augmentent à un taux de l'ordre de 2% par an. Au cours de la décennie écoulée, les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport routier ont augmenté de 24 % dans les pays de l'OCDE.

Il n'existe aucune norme ayant fait l'objet d'un accord international et définissant le niveau maximum des émissions de gaz à effet de serre des automobiles neuves ; un certain nombre de pays ont toutefois fixé des objectifs quant à la consommation de carburant des automobiles (individuellement et pour l'ensemble des parcs) ou élaboré des accords volontaires avec les industries du secteur en vue de réduire les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> des automobiles neuves. Ainsi :

- En Europe, la Commission européenne et l'Association des constructeurs européens d'automobiles (ACEA) ont conclu en 1998 un accord visant à réduire en moyenne de 25% (par rapport à 1995) les émissions de CO<sub>2</sub> des voitures neuves vendues en 2008 et à les ramener à un niveau moyen de 140 g/km. Des

accords du même ordre ont été conclus entre la Commission et les industries automobiles japonaise et coréenne (JAMA, KAMA).

- Au Japon, on a établi des objectifs de rendement énergétique des véhicules que tous les constructeurs d'automobiles japonais devront atteindre. Étant donné qu'il existe une relation étroite entre la consommation de carburant et les émissions de GES, ces objectifs de rendement exerceront une influence sur les émissions de GES.
- En Californie, une loi exige des constructeurs d'automobiles qu'ils réduisent les émissions de gaz à effet de serre des véhicules non utilitaires, les premiers modèles améliorés devant sortir en 2009. La nouvelle loi ne fixe pas de limites ou d'objectifs spécifiques, mais donne pour mandat impératif au California Air Resources Board (CARB) d'élaborer et d'adopter une réglementation avant le 1<sup>er</sup> janvier 2005. L'industrie a toutefois introduit un recours contre cette loi devant les tribunaux, ce qui entraînera probablement des retards dans sa mise en œuvre.

Il existe des moyens technologiques permettant de réduire sensiblement la consommation de carburant et, par voie de conséquence, le volume de gaz à effet de serre émis par véhicule. Toutefois, malgré les progrès technologiques en matière de rendement des moteurs, les efforts visant à réduire la consommation de carburant par véhicule ont été en partie neutralisés par les tendances qui se manifestent sur le marché dans le sens d'une augmentation de la puissance et du poids des véhicules, ce qui correspond au choix des consommateurs, qui préfèrent des véhicules de plus grande taille, plus confortables et offrant de meilleures performances. En outre, l'amélioration du rendement des véhicules a été anéantie par l'accroissement des parcs de véhicules et par celui des distances annuelles parcourues.

La technologie des moteurs diesel à injection directe à haute pression est celle qui peut offrir, pour les automobiles classiques, dans l'immédiat et dans l'avenir proche, les meilleurs résultats du point de vue de la consommation de carburant et des émissions de CO<sub>2</sub>, compte tenu des technologies actuellement disponibles et de tous les aspects des performances des véhicules que recherchent les consommateurs (y compris les performances sur la route). Il devrait être possible, avec les technologies hybrides et de freinage par récupération, de réduire encore les émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules à moteur diesel.

On peut cependant prévoir, au cas où se maintiendraient les tendances actuelles sur les plans de la construction, de l'acquisition et de l'utilisation des véhicules automobiles - c'est-à-dire à moins d'une innovation technologique radicale ou d'une utilisation en quantités suffisantes de carburants de remplacement - que les émissions totales de CO<sub>2</sub> des véhicules automobiles continueront d'augmenter.

### ***Véhicules utilisant des carburants de remplacement***

Il existe, pour les véhicules de transport routier, tout un éventail de carburants de remplacement; beaucoup d'entre eux sont déjà utilisés depuis un certain nombre d'années. L'expérience acquise à propos des véhicules utilisant des carburants de remplacement est suffisante pour permettre une évaluation approfondie sur la base d'une comparaison avec les carburants classiques, essence et gazole.

Les véhicules équipés de moteurs au GPL (gaz de pétrole liquéfié) sont, au plan mondial, les plus largement produits parmi les véhicules utilisant des carburants de remplacement. Par rapport aux véhicules à *essence*, les véhicules au GPL ont des

performances comparables pour ce qui concerne les émissions de polluants, mais ils émettent moins de CO<sub>2</sub>. La comparaison avec les véhicules à moteur *diesel* montre que les technologies du GPL offrent d'excellents résultats en termes d'émissions de particules, mais leurs émissions de CO<sub>2</sub> sont légèrement plus élevées. L'amélioration de la technologie des moteurs diesel et l'engouement pour le diesel en Europe ont fait que certains grands constructeurs ont décidé d'arrêter la production de véhicules au GPL.

Les moteurs fonctionnant au *GNC* (gaz naturel comprimé) émettent très peu de particules par rapport aux moteurs diesels actuels. Les niveaux de bruit et de vibration des véhicules au GNC sont aussi très inférieurs à ceux des véhicules à moteur diesel. Leurs inconvénients tiennent à la faible autonomie, à la perte de volume utile due aux cylindres de GNC, et aux infrastructures souvent limitées d'alimentation en carburant. En outre, la nécessité d'installer dans le véhicule des cylindres sous pression contenant le carburant constitue un problème sérieux. Les émissions de CO<sub>2</sub> des moteurs au GNC sont équivalentes ou supérieures à celles des moteurs diesel.

Le *méthanol* est un carburant de remplacement que l'on peut produire à partir de diverses matières premières, parmi lesquelles la biomasse. Il est de moins en moins couramment utilisé comme carburant à cause des problèmes liés à sa corrosivité, à la contamination des eaux souterraines et à son caractère toxique pour la santé.

Les *biocarburants* peuvent être produits à partir de divers gisements de biomasse, y compris des produits agricoles. Ils présentent un avantage important, qui est celui de pouvoir être mélangés à des carburants issus du pétrole et utilisés par des véhicules classiques. L'emploi de biodiesel dans les moteurs diesel classiques peut réduire sensiblement les émissions d'hydrocarbures imbrûlés, de monoxyde de carbone, de sulfates et de particules. Cependant, les coûts de l'éthanol et du biodiesel sont généralement deux à trois fois plus élevés que ceux des carburants issus du pétrole. Une production à grande échelle de biocarburant, en utilisant des céréales comme matière première, exigerait d'énormes superficies. Par exemple, si tous les besoins en carburant de la France devaient être satisfaits par des biocarburants, il faudrait y consacrer plus de 25% de son territoire, au détriment des activités agricoles normales. D'autres méthodes de production de l'éthanol ou du méthanol sont possibles, à partir de la cellulose par exemple, mais il semble qu'elles soient encore plus coûteuses.

### ***Nouvelles technologies***

*Véhicules électriques.* Le fonctionnement des véhicules électriques n'entraîne aucune émission locale, de sorte que cette technologie est souvent considérée comme potentiellement souhaitable dans les zones urbaines. Les véhicules électriques offrent un niveau de confort élevé et leur accélération est en général excellente. Ils ont néanmoins été confrontés, dans le monde réel, à divers problèmes : coût élevé, faible autonomie, long délais de charge des batteries, et absence d'infrastructures à cet effet. Au stade actuel, seuls de petits véhicules et des motocycles électriques sont compétitifs sur le marché. L'amélioration des performances des batteries constitue la clé du succès de la technologie des véhicules électriques. Bien que divers types de batteries évoluées soient en cours de mise au point, il semble peu probable que l'on assiste à un progrès décisif qui ouvrirait la voie à des applications généralisées de véhicules tout électrique. De nouveaux concepts sont toutefois en cours d'élaboration, le plus prometteur étant celui de l'hybridation du véhicule électrique.

*Véhicules hybrides.* Il s'agit soit de véhicules électriques équipés d'un dispositif d'augmentation de l'autonomie<sup>1</sup> ou surtout de véhicules à essence/diesel équipés d'une motorisation électrique et de batterie électrique pour en améliorer le rendement global. La tendance récente est à la mise au point de technologies hybrides légères faisant appel à un système d'alternateur-démarrateur pour améliorer le rendement de moteurs à essence/diesel. Un véhicule hybride peut offrir un meilleur rendement du moteur et l'énergie de freinage est en partie récupérée. La technologie des véhicules hybrides est surtout prometteuse pour ce qui concerne la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, tout en réduisant les émissions de polluants atmosphériques. De ce point de vue, les performances des véhicules hybrides sont supérieures à celles des meilleurs véhicules à essence ou diesel, mais leurs coûts de production sont à l'heure actuelle sensiblement plus élevés que ceux des véhicules classiques offrant sur la route des performances du même ordre. Environ 130 000 véhicules hybrides sont déjà en circulation dans le monde, mais le succès de ce type de véhicules dépendra dans une large mesure de la capacité des constructeurs à réduire leur coût marginal de production.

*Véhicules à pile à combustible.* Les véhicules à pile à combustible font à l'heure actuelle l'objet d'un très grand volume de recherches. Cette technologie est prometteuse pour les véhicules routiers, et pourrait offrir à la fois un rendement élevé et des émissions réduites. Des véhicules électriques à pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène pur, produit à partir de sources renouvelables ou d'autres sources à émission zéro de carbone, pourraient être considérés comme des véhicules « zéro émission », puisque seule de l'eau est produite si le combustible est de l'hydrogène.

Si, par contre, le véhicule à pile à combustible est équipé d'un reformeur afin de produire l'hydrogène à partir de l'essence, du diesel ou du méthanol, les émissions d'hydrocarbures (HC) et de CO<sub>2</sub> seront probablement du même ordre que celles des futurs véhicules diesel évolués. Les émissions de NO<sub>x</sub> seront sans doute du même ordre que celles des futurs véhicules à essence.

D'importants travaux de recherche et de développement doivent encore être consacrés aux véhicules à pile à combustible pour en affiner la technologie, et des crédits considérables leur ont été récemment consacrés. Outre les questions de coût, la commercialisation des véhicules à pile à combustible est également confrontée à un certain nombre de problèmes concrets. Le premier est celui du choix du combustible : hydrogène, essence ou méthanol ? Choisir l'hydrogène exigerait la mise en place, très coûteuse, d'un nouveau réseau complet de distribution. Retenir le méthanol ou l'essence supposerait que le véhicule soit équipé d'un reformeur, ce qui ne produirait aucun avantage significatif par rapport aux véhicules à essence et diesel de nouvelles générations, en termes d'émissions de polluants atmosphériques. Compte tenu des défis techniques actuels à surmonter, il est peu probable que les piles à combustibles constituent avant longtemps une solution optimale pour les automobiles.

En 2002, les constructeurs d'automobiles japonais ont livré un petit nombre de véhicules à pile à combustible en vue d'essais à mener par des organismes officiels clés au Japon et aux États-Unis.

---

<sup>1</sup> Un dispositif d'augmentation de l'autonomie prend la forme d'un petit moteur thermique produisant l'électricité nécessaire lorsque l'alimentation fournie par la batterie commence à s'épuiser.

## *Évaluations du puits à la roue*

### *Rendement énergétique*

Calculé sur la base « du puits à la roue », le rendement énergétique d'un véhicule à essence est d'environ 14%, et celui d'un véhicule *diesel* d'environ 18% de la teneur originelle en énergie du carburant, pour l'essence et le diesel produits à partir de pétrole brut. Pour un véhicule au GNC, le chiffre pourrait atteindre les 17%. Un véhicule à moteur thermique à combustion interne fonctionnant à l'*hydrogène* a un rendement d'environ 14%.

Les pertes thermodynamiques, du moteur et dans la transmission représentent environ 75% de la teneur originelle en énergie du carburant. Pour de nombreux carburants, on doit aussi tenir compte d'importantes pertes « du puits au réservoir », dues à l'extraction, à la production et au transport du carburant. Ces pertes se situent entre 15 et 20% pour l'essence et le diesel. Elles sont d'environ 35% pour le méthanol provenant du gaz naturel, et d'environ 25% pour l'hydrogène provenant du gaz naturel.

### *Émissions de CO<sub>2</sub>*

*Moteurs thermiques en configurations simple et hybride.* Grâce à l'application de nouvelles technologies des moteurs, les futurs moteurs à essence évolués pourraient parvenir à une réduction d'environ 20% des émissions de CO<sub>2</sub>, du puits à la roue, par rapport aux véhicules utilisant les plus récentes des technologies actuelles. Pour un même modèle de véhicule, la réduction pourrait atteindre 50% si l'on applique des concepts de transmission hybride. Les configurations faisant appel à une technologie hybride légère ne permettront pas une amélioration de 50%, mais pourraient toutefois rendre possibles, à un coût relativement faible, des améliorations sensibles sur les plans de la consommation de carburant et des émissions de CO<sub>2</sub>. Pour ce qui concerne les moteurs diesel, la réduction serait plus modeste, de l'ordre de 15%, mais elle pourrait atteindre 40 à 50 % avec l'hybridation du moteur. La réduction du poids, une meilleure aérodynamique et de nouvelles conceptions de pneumatiques rendraient possibles des économies supplémentaires.

*Biocarburants.* Du point de vue du cycle de vie, les émissions de CO<sub>2</sub> dépendent dans une très grande mesure de la source de la biomasse et de sa méthode de production. Si l'on prend en compte l'énergie nécessaire à la production végétale (y compris, par exemple, les engrais et les pesticides), à la transformation et à la distribution du carburant, une réduction de 30 à 60% des émissions de CO<sub>2</sub> serait possible par rapport à celles des véhicules à moteurs à essence ou diesel.

*Véhicules électriques.* Le niveau des émissions de CO<sub>2</sub>, envisagé du puits à la roue, dépend de la manière dont est produite l'électricité. Lorsqu'elle est produite à partir du charbon ou du gaz (qui constituent la source la plus courante dans les pays de l'OCDE), le solde du CO<sub>2</sub> n'est pas meilleur que pour les véhicules à moteur à essence ou diesel. Lorsqu'elle provient de l'énergie nucléaire ou de sources renouvelables (énergie hydroélectrique, par exemple), on peut considérer les véhicules électriques comme des véhicules « zéro émission ».

*Véhicules à pile à combustible.* Du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, les véhicules à pile à combustible alimentés à l'essence, au diesel ou au méthanol n'offrent aucun avantage par rapport aux véhicules classiques actuels. Par contre, si c'est l'hydrogène qui est la source de combustible, et qu'il provient de sources renouvelables,

les véhicules à pile à combustibles pourraient, théoriquement, offrir les meilleures performances en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>.

### ***Comparaison des performances sur la route***

Les expériences menées sur la route ont montré que les véhicules faisant appel à des technologies de substitution ou des technologies nouvelles n'ont pas été, à ce jour, en mesure de concurrencer les véhicules équipés de transmissions classiques. Leurs principales faiblesses se situent au niveau des performances, du coût, de la disponibilité de nouveaux carburants (hydrogène, biocarburants), de l'autonomie (en particulier pour les véhicules au GNC et les véhicules électriques), de la fiabilité, du confort et de la sécurité (résistance aux chocs des automobiles faisant appel aux nouvelles technologies, sûreté de manipulation des nouveaux carburants et sûreté des stations de ravitaillement). Cela signifie qu'il faudra consacrer des efforts considérables à la mise au point des véhicules et que d'importants investissements seront nécessaires pour la production et la distribution de nouveaux carburants comme l'hydrogène pour combler l'écart entre les technologies classiques et celles faisant appel à des carburants nouveaux ou de remplacement.

### ***Émissions des véhicules : cycles d'essai officiels***

La performance des véhicules sur la route constitue le test ultime de l'efficacité de tous les efforts visant à réduire les émissions de polluants et à améliorer le rendement énergétique. Des procédures d'essai normalisées, comme celles adoptées dans les cycles d'essai officiels (FTP aux États-Unis et MVEG en Europe), peuvent donner une indication des niveaux réels et des tendances en matière de consommation de carburant et d'émissions des véhicules. En pratique, toutefois, il existe un certain nombre de paramètres susceptibles d'influer de manière significative sur la consommation et les émissions effectives, notamment le style de conduite, le réglage du moteur, l'utilisation d'un climatiseur et d'autres équipements auxiliaires, la circulation en ville ou sur autoroute, et l'état du véhicule.

Indépendamment des véhicules et des technologies, l'écart est généralement sensible entre les résultats obtenus au cours des cycles d'essai officiels et ceux relevés en conditions de conduite réelles. Les recherches menées, s'étalant sur de nombreuses années, ont montré que les niveaux de consommation de carburant observés en conditions de conduite réelles sont habituellement beaucoup plus élevés (de l'ordre de 25% ou davantage) que ceux dont font état les résultats des cycles d'essai officiels.

Bien que ces conclusions ne soient pas nouvelles, elles sont de plus en plus importantes dans le contexte des économies de carburant et des LEV. Elles présentent aussi une importance croissante pour les consommateurs, compte tenu des prévisions d'utilisation accrue, à l'avenir, de la climatisation et d'autres accessoires, qui se traduiront par de plus fortes différences entre les résultats des cycles d'essai officiels et ceux de la conduite en conditions réelles.

## Information et comportement du consommateur

### *Information du consommateur*

Rien n'indique, à ce jour, qu'un terme ait été mis à la tendance actuelle à l'acquisition de véhicules plus puissants et plus lourds. Au contraire, et mise à part la vogue croissante de la catégorie des véhicules loisir-travail (SUV), qui regroupe les 4x4 et les monospaces, et des voitures particulières plus puissantes, il existe une tendance continue à l'installation d'un nombre croissant d'équipements de sécurité, de confort et de service, et entre autres la climatisation (notamment en Europe, où la part de marché des automobiles équipées d'un climatiseur est en forte augmentation).

Nombreux sont les consommateurs qui, lorsqu'ils prennent leurs décisions en matière d'acquisition d'un nouveau véhicule, sont très peu informés de la consommation effective de carburant et des performances environnementales relatives des différents modèles de véhicules. Un tel état de choses est regrettable, étant donné qu'un consommateur bien informé est un élément clé pour l'efficacité des stratégies visant à favoriser la présence sur le marché d'un pourcentage croissant de LEV. D'un modèle à l'autre, même dans le cas des véhicules classiques et même parmi les véhicules du même type, les performances en matière d'émissions et de consommation de carburant varient considérablement.

Les consommateurs doivent être conscients de ces différences pour pouvoir intégrer le facteur performance environnementale dans leurs décisions d'achat d'un véhicule. Des guides diffusés sur l'Internet, auxquels s'ajoute l'étiquetage des véhicules, constituent l'un des moyens actuellement utilisés avec succès pour transmettre cette information aux consommateurs. Pour être efficaces, les guides et les étiquettes doivent présenter l'information de manière précise, mais aussi sous une forme facile à comprendre par les consommateurs.

### *Incitations*

Le comportement du consommateur peut être influencé par un ensemble adéquat d'incitations soigneusement ciblées ayant pour objectif de réduire la consommation de carburant et/ou les émissions.

L'une des raisons justifiant des incitations en faveur des LEV est que le marché ne fonctionne généralement pas de manière parfaite. Dans la plupart des pays, en effet, il n'existe pas de charges explicites directement liées à l'utilisation effective et donc à la pollution réelle imputable aux véhicules au lieu et au moment de leur utilisation. Dans un tel contexte, les décisions d'acquisition d'un véhicule continueront d'être prises sans qu'il soit tenu pleinement compte des effets sociaux et environnementaux à plus long terme.

Les formules les plus couramment employées sont les incitations fiscales, les incitations à l'utilisation de carburant propre, les subventions aux infrastructures et les incitations à l'utilisation de LEV.

Les *incitations fiscales* (appliquées au moment de l'acquisition et/ou par le biais de réductions d'impôt annuelles) sont le plus souvent employées, par les gouvernements des pays de l'OCDE, pour favoriser l'adoption des LEV. En fonction de leur importance, les incitations offertes peuvent influencer de manière sensible sur le choix du consommateur, en particulier lorsque ce dernier est informé de façon fiable, que la technologie ciblée et l'infrastructure associée sont crédibles, et que les performances du véhicule répondent aux attentes du consommateur.

Les *incitations à l'utilisation de carburant propre*, comme celles offertes dans certains pays pour la production de carburants à faible teneur en soufre, ont efficacement contribué à accroître la disponibilité de carburants permettant aux véhicules de réaliser des performances optimales en matière d'émissions et apportant un appui aux constructeurs automobiles dans la mise sur le marché de véhicules de technologie de pointe.

Les *incitations en rapport avec l'infrastructure* pourraient être importantes et contribuer utilement à favoriser le développement de nouveaux réseaux de distribution pour les carburants de remplacement (gaz naturel ou hydrogène, par exemple).

Les *incitations à l'utilisation de véhicules à faibles émissions*, comme la création de zones réservées à ce type de véhicules, l'accès à des voies réservées aux véhicules à fort taux d'occupation, l'accès spécial ou limité les jours de pics de pollution ou des concessions de stationnement sont des mesures peu coûteuses, appliquées dans certains pays.

*Exemple donné par les pouvoirs publics/incitations appliquées aux achats du gouvernement.* Les gouvernements peuvent aussi jouer un rôle moteur et encourager leurs administrations à adopter, pour leurs propres véhicules, des politiques favorisant les LEV.

## PERSPECTIVES

### *Polluants locaux*

Les normes approuvées, dont l'introduction est prévue pour 2004/2005 (comme Euro 4 ou Tier 2), se traduiront par une nouvelle réduction sensible des émissions de polluants locaux (CO, NO<sub>x</sub>, COV, PM). Ainsi, les normes Euro 4 (qui entreront en vigueur en 2005) permettront de réduire de 50% par rapport aux normes Euro 3 les émissions de CO, de HC et de NO<sub>x</sub> des nouveaux véhicules à essence. Pour les véhicules à moteur diesel, elles permettront de réduire de 50% par rapport aux normes Euro 3 les émissions de NO<sub>x</sub> et de PM, et de 20% les émissions de CO.

Dans une perspective encore plus lointaine, il semble techniquement possible, pour les futurs véhicules à essence, de réduire de 80% par rapport aux normes européennes actuelles (Euro 3) les émissions de CO, de COV et de NO<sub>x</sub>.

Pour ce qui est des futurs moteurs diesel équipés de systèmes évolués de post-traitement des gaz d'échappement et bénéficiant d'améliorations progressives du moteur, il semble également possible du point de vue technique de réduire, par rapport aux normes Euro 3, de 75% les émissions de CO, de COV et de NO<sub>x</sub>, et de 90% les émissions de PM (autrement dit, à peu près autant que pour les moteurs à essence). Toutefois, même si les émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures des moteurs diesel seront considérablement inférieures à celles des moteurs à essence, leurs émissions de NO<sub>x</sub> et de particules demeureront relativement plus élevées. Il faudra, pour parvenir à de nouvelles réductions des émissions de NO<sub>x</sub> et de PM des véhicules diesel légers, que la technologie diesel soit capable de répondre aux deux objectifs contradictoires consistant à réduire à la fois les émissions de NO<sub>x</sub> et celles de CO<sub>2</sub>. Cette capacité dépendra aussi de la mesure dans laquelle les constructeurs produiront de nouveaux véhicules utilisant les technologies les plus récentes (filtres à particules, par exemple). Il faut par ailleurs tenir compte de la performance des moteurs diesel sur l'ensemble de la durée de vie des véhicules, qui dépendra de la fiabilité et de l'efficacité à long terme de leurs systèmes de post-traitement.

Des normes encore plus strictes (allant au-delà d'Euro 4, par exemple) n'apporteraient que des avantages marginaux en termes d'émissions de CO et de COV, mais pourraient se traduire par des avantages beaucoup plus sensibles concernant les PM et le NOx, principalement ceux émis par les véhicules diesel.

### ***Consommation de carburant et émissions de CO<sub>2</sub>***

Le rendement énergétique « du puits à la roue » des voitures particulières de niveau technologique actuel utilisant comme carburant l'essence, le diesel, le GPL ou le GNC est de l'ordre de 15 à 20%. Une adoption généralisée de technologies améliorées dans les véhicules classiques pourrait augmenter, dans une proportion pouvant atteindre 30%, le rendement du puits à la roue. Toutes choses égales par ailleurs, une utilisation maximum de ces technologies (y compris les hybrides) permettrait de réduire de 50% les émissions de gaz à effet de serre des futurs parcs automobiles par rapport aux véhicules de technologie actuelle. Les réductions réelles dépendront naturellement des types de véhicules qui seront effectivement achetés. Si la tendance à l'acquisition de véhicules plus lourds, plus puissants et dotés d'un équipement électrique accru se maintient, ce gain potentiel sera considérablement réduit.

Théoriquement, la technologie de la pile à combustible pourrait améliorer encore le rendement énergétique, en fonction du combustible effectivement employé. A moyen terme toutefois (jusque vers 2020 environ) l'utilisation des piles à combustible pour la traction devrait demeurer très faible par rapport à l'ensemble des parcs.

Les véhicules employant des carburants libérant une moindre quantité de carbone sur l'ensemble du cycle de vie offrent aussi un potentiel de réduction sensible des émissions. Les véhicules employant des biocarburants ou de l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables peuvent produire des émissions relativement faibles de CO<sub>2</sub> sur l'ensemble du cycle de vie. A l'heure actuelle, le coût de ces carburants est sensiblement supérieur à celui des carburants fossiles et se situe dans une fourchette allant de 2 à 5 fois le coût de l'essence. Les véhicules et les carburants mentionnés plus haut pourraient pénétrer plus rapidement sur le marché en cas de hausse significative des prix des carburants classiques, peut-être du fait de variations internationales du prix du pétrole brut ou de l'adoption de politiques visant à une plus forte internalisation des coûts externes.

### ***Émissions et sécurité***

La recherche a démontré que l'augmentation de la puissance des véhicules automobiles a pour effet une augmentation de leurs émissions en conditions d'utilisation quotidienne normale. En outre, des augmentations significatives de la puissance auront une incidence sur la maîtrise du véhicule par le conducteur et donc sur la sécurité routière. La réduction du rapport puissance/poids des véhicules automobiles serait l'un des moyens les plus efficaces dont on dispose pour réduire la consommation de carburant du véhicule, indépendamment de la technologie du moteur. L'imposition de limites maximales aux rapports puissance/poids pourrait aussi apporter des avantages significatifs sur le plan de la sécurité.

### ***Santé***

Dans les pays de l'OCDE, où les émissions de polluants atmosphériques soumis à une réglementation diminuent constamment, le risque que présentent les émissions des véhicules pour la santé humaine se réduit progressivement. Les émissions de particules des moteurs diesel demeurent toutefois une importante source de préoccupation. La

situation est totalement différente dans certains pays non-membres de l'OCDE, où la pollution locale due aux véhicules routiers est en augmentation et provoque des problèmes de santé d'une gravité croissante.

L'impact sur la santé humaine et sur l'environnement des émissions non réglementées (aldéhydes, cétones, polyaromatiques, métaux lourds, N<sub>2</sub>O) est insuffisamment connu. Si des effets négatifs apparaissaient clairement à l'avenir, des réglementations concernant spécifiquement les véhicules pourraient être nécessaires.

## **Conclusions orientées vers l'action**

Dans leurs efforts visant à minimiser l'impact sur l'environnement des véhicules automobiles, les décideurs ont choisi de mettre l'accent sur les mesures liées aux carburants et aux émissions des véhicules. A ce jour, les politiques et stratégies de réduction des émissions mises en œuvre par les pays membres de l'OCDE ont parfaitement réussi à susciter la mise au point de véhicules moins polluants. Les technologies élaborées et adoptées par les constructeurs ont permis de réduire de manière spectaculaire les émissions de polluants par véhicule-kilomètre parcouru.

Les progrès de la technologie des véhicules ont été si importants qu'ils ont eu pour effet de réduire non seulement les émissions locales de polluants par véhicule, mais aussi les émissions de polluants des parcs de véhicules, malgré une augmentation moyenne de 50% des distances parcourues (en véhicules-kilomètres) par les voitures particulières dans les pays de l'OCDE au cours des vingt dernières années. Les niveaux des émissions locales de polluants devraient continuer à baisser pendant de nombreuses années encore, à mesure que les véhicules de technologie récente remplaceront les véhicules de technologie plus ancienne, plus polluants, dans les parcs nationaux de véhicules.

Les émissions de gaz à effet de serre des véhicules automobiles, et spécialement les émissions de CO<sub>2</sub>, dont on prévoit qu'elles continueront d'augmenter, suscitent toutefois d'importantes préoccupations.

Du point de vue des politiques, il est important de reconnaître que, si l'on en juge par les tendances actuelles, les perspectives fondées sur le jeu du marché laissent prévoir une augmentation constante de la taille, de la puissance et du poids des véhicules - et, par voie de conséquence, de la consommation moyenne de carburant par véhicule - ainsi qu'une augmentation constante du taux de motorisation et des distances parcourues par véhicule.

Une utilisation généralisée des véhicules de type classique relevant de la technologie la plus récente peut contribuer à ralentir les augmentations des émissions de CO<sub>2</sub>. Ces avantages pourraient être étendus grâce à la mise au point et à l'utilisation croissante de véhicules à très faibles émissions employant des carburants libérant une moindre quantité de carbone sur l'ensemble du cycle de vie.

On s'attend toutefois, sur la base des prévisions les plus récentes, à ce que la distance totale parcourue (en véhicules-kilomètres) par les voitures particulières dans les pays de l'OCDE augmente de 16% entre 2000 et 2010, et au total de 32% entre 2000 et 2020. Cela signifie que, toutes choses étant égales par ailleurs, la compensation de cette augmentation permettant la stabilisation des émissions de CO<sub>2</sub> à leur niveau d'aujourd'hui exigerait une amélioration de la même ampleur du rendement énergétique de l'ensemble du parc, ce qui constituerait un véritable défi. On peut donc penser que, contrairement à ce qui se passe pour les émissions de polluants atmosphériques, on ne

peut pas compter sur la seule technologie des véhicules pour éviter, à court/moyen termes, l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

Si ces tendances se maintiennent à moyen terme, les préférences actuelles des consommateurs et les tendances à l'augmentation du nombre de véhicules-kilomètres parcourus risquent d'annuler l'impact des réductions prévisibles de la consommation de carburant par véhicule et des émissions de CO<sub>2</sub> qui devraient découler des améliorations du rendement des véhicules classiques à moteur à essence et diesel.

Les pouvoirs publics doivent donc envisager d'autres mesures susceptibles de modifier les tendances actuelles - si les pays veulent atteindre les objectifs fixés à leurs politiques d'environnement et leurs politiques énergétiques, y compris celles qui se rapportent aux émissions de gaz à effet de serre. Bien qu'elles n'entrent pas dans le cadre du présent rapport, toutes les mesures réalisables de ce type devraient être explorées et, si elles conviennent, être intégrées aux mesures axées sur les véhicules dans le cadre d'un paquet de mesures gouvernementales visant à atteindre des objectifs globaux, et notamment maîtriser les augmentations prévues des émissions de gaz à effet de serre.

On peut envisager d'autres interventions des pouvoirs publics, plus délicates du point de vue politique - mais qui pourraient être plus efficaces à l'avenir - parmi lesquelles des mesures ayant une incidence directe sur l'utilisation des véhicules (comme la tarification routière) ou des mesures visant à réduire la nécessité des déplacements et du transport. Ces dernières pourraient exiger des changements significatifs des politiques sur les plans de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de la logistique et des infrastructures existantes, et seraient plus difficiles à mettre en œuvre.

Les résultats d'une recherche entreprise par l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2002b) montrent qu'un paquet de mesures de remplacement de ce type - comprenant une amélioration du rendement énergétique des véhicules, un recours accru aux carburants de remplacement, un pourcentage croissant de véhicules faisant appel aux technologies nouvelles, ainsi qu'une réduction de la demande de déplacements et une évolution vers des modes à moindre intensité énergétique - pourrait seulement ralentir le taux de croissance prévu de la consommation de pétrole. Cette conclusion donne à penser que des mesures supplémentaires sont nécessaires.

### ***Stratégies visant à favoriser les véhicules à faibles émissions***

Il convient d'envisager une gamme de stratégies répondant aux préoccupations esquissées.

#### *Réduction des polluants atmosphériques locaux*

Dans tous les pays, qu'ils soient ou non membres de l'OCDE, la majorité des véhicules composant les parcs nationaux répondent à des normes qui s'appliquaient aux véhicules neufs il y a déjà un certain nombre d'années. De ce fait, les niveaux de performance en matière d'émissions de la plus grande partie des véhicules sont inférieurs à ceux que les normes les plus récentes imposent aux véhicules neufs. La technologie des véhicules a évolué en prévision des normes obligatoires qui seront introduites en 2004/5. Certains modèles intègrent déjà des technologies de pointe allant, dans certains cas, au-delà des exigences définies par les futures normes.

Les performances en matière d'émissions des véhicules actuellement sur le marché pourraient être améliorées si les consommateurs achetaient des véhicules équipés des technologies de pointe dans la lutte contre la pollution. Dans nombre de cas, ils

achèteraient des LEV avant l'adoption des normes obligatoires uniquement s'ils bénéficiaient d'incitations à cet effet.

### *Réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre*

A ce jour, les objectifs de ralentissement de la croissance, puis de réduction des émissions de gaz à effet de serre dues aux véhicules ont été poursuivis de différentes manières dans diverses régions du monde. L'Union européenne et l'Australie, par exemple, ont cherché à obtenir ces réductions principalement par le biais d'accords volontaires entre les pouvoirs publics et l'industrie. Cette approche conduit à des résultats positifs, puisque la moyenne des émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules neufs actuellement vendus dans l'UE a diminué.

Certaines autres régions ont choisi d'autres approches réglementaires, rendant possible la fixation, dès le départ, de normes de consommation de carburant. Des pays comme le Japon (Programme Top Runner), les Etats-Unis (Programme Corporate Average Fuel Economy (CAFE) - indice de consommation moyenne des modèles produits par un constructeur) et quelques autres ont fixé des normes obligatoires d'économie de carburant.

A l'avenir, si les résultats des accords volontaires ne s'avèrent pas suffisants, les pouvoirs publics pourraient être conduits à envisager l'élaboration et l'adoption de normes obligatoires adéquates. On espère qu'une stratégie consistant à fixer des limites progressivement plus rigoureuses aux émissions de gaz à effet de serre pourrait réduire ces émissions aussi efficacement qu'elle a réduit celles de polluants locaux, encore qu'une telle stratégie sera vraisemblablement plus complexe à gérer.

Une autre solution, qui a au moins le mérite d'être réalisable du point de vue technique, et qui pourrait être efficace si elle était publiquement soutenue, consisterait à prendre des initiatives pour encourager l'acquisition de véhicules de moindre puissance. La réduction des rapports puissance/poids constituerait un moyen efficace de réduire la consommation de carburant, quelle que soit la technologie du moteur. Elle aurait des effets positifs immédiats sur les émissions, aussi bien de polluants locaux qu'au niveau global (et on pourrait aussi s'attendre à des incidences positives sur la sécurité routière). A l'heure actuelle, et bien que les constructeurs proposent des modèles de véhicules offrant des rapports puissance/poids moins élevés, les consommateurs continuent d'acheter des véhicules de plus en plus puissants et de plus en plus lourds, avec des rapports puissance/poids plus élevés.

### **Mesures d'incitation**

Un ensemble efficace d'incitations, bénéficiant de l'appui de consommateurs bien informés, offre un potentiel considérable d'accélération de l'entrée de LEV dans les parcs. Dans un certain nombre de pays de l'OCDE, les pouvoirs publics ont déjà introduit une gamme de mesures fondées sur l'offre d'incitations.

Les données disponibles, comme l'expérience accumulée, donnent à penser qu'une combinaison de taxes différenciées sur les véhicules et les carburants, prenant pour base les performances environnementales, peut accroître de manière rentable la proportion de LEV sur le marché. Dans certains pays, les incitations offertes n'ont aucune incidence notable sur les budgets, puisque les fonds nécessaires aux incitations en faveur des LEV sont obtenus par l'imposition de taxes supplémentaires sur les véhicules dont les performances en matière d'émissions ou de consommation de carburant sont médiocres.

Ailleurs, les taxes imposées sur les performances médiocres en matière d'émissions sont supérieures aux incitations offertes pour les bonnes performances. L'absence, dans la plupart des pays, d'une fiscalité explicite sur les émissions de CO<sub>2</sub> (taxe sur le carbone, assise sur la teneur en carbone des carburants, par exemple) pourrait constituer le fondement de l'adoption de ce type d'incitations.

Ces incitations fiscales pourraient être étendues pour encourager un respect anticipé de l'ensemble de normes plus avancées dont l'adoption est prévue (les normes Euro 4, par exemple, seront applicables dans de nombreux pays à compter de 2005), si les pouvoirs publics souhaitent que les avantages offerts par les plus récentes technologies automobiles soient ressentis plus rapidement.

Ces paquets d'incitations doivent être soigneusement ciblés et soutenus par une information adéquate du consommateur. Les pouvoirs publics ne devraient accorder des incitations aux consommateurs pour l'acquisition de véhicules qu'en fonction de leurs performances en matière d'émissions, lesquelles doivent être évaluées au moyen d'un essai objectif agréé (comme celui exigé pour l'homologation du véhicule). Les incitations seront sans doute plus efficaces si elles sont soutenues par une information objective du public sur les performances environnementales des différents modèles de véhicules.

Pour obtenir les meilleurs résultats, les incitations relatives aux véhicules à faible niveau d'émission de polluants et/ou de gaz à effet de serre devraient en règle générale être fondées sur les performances effectives plutôt que sur une technologie ou un type de carburant.

## Mesures recommandées

Tout donne à penser que les LEV deviendront très largement disponibles et qu'ils peuvent jouer un rôle utile dans le contexte des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre du secteur du transport routier. Il faudra sans doute, afin d'optimiser ce potentiel, mettre en œuvre un ensemble de mesures faisant intervenir les pouvoirs publics, l'industrie et les consommateurs. Le présent rapport n'entend pas définir les rôles spécifiques à jouer par chacun de ces groupes pour accroître la pénétration des LEV dans le parc, étant donné que ces rôles varieront d'un pays à l'autre. Ce rapport recommande néanmoins les mesures suivantes, considérées comme essentielles pour maximiser tant les avantages potentiels des LEV que les améliorations effectivement acquises.

### *Élaborer une politique cohérente et intégrée des transports*

Bien que des progrès spectaculaires aient été réalisés et que de nouvelles améliorations soient encore prévues en ce qui concerne les technologies automobiles, il est évident que la technologie ne sera pas en mesure, à elle seule, de résoudre tous les problèmes posés par les émissions des véhicules, et spécialement les émissions de gaz à effet de serre, à court et à moyen termes.

Les mesures en rapport avec la technologie des LEV et des carburants ne devraient constituer que l'un des éléments, essentiel il est vrai, d'une politique plus générale des transports visant à réduire les émissions des véhicules. Pour être efficace, une telle politique devrait cibler la demande de déplacements routiers et, le cas échéant, chercher à transférer une partie de la demande de transport routier vers des modes plus respectueux de l'environnement.

### ***Informers les consommateurs des performances en conditions réelles d'utilisation***

Les consommateurs doivent être mieux informés des performances environnementales des automobiles qu'ils achètent. Dans de nombreux pays, la seule information « officielle » de caractère environnemental communiquée aux consommateurs à propos des différents modèles de véhicules concerne la consommation de carburant et, depuis peu, les émissions de CO<sub>2</sub>. Les sources « officielles » ne donnent généralement que peu ou pas d'informations sur les émissions de polluants atmosphériques des différents modèles et marques et aucune information sur les performances en conditions réelles d'utilisation.

Il est particulièrement souhaitable de diffuser l'information de manière plus systématique, pour permettre aux consommateurs d'évaluer les performances des véhicules en matière d'émissions en conditions réelles d'utilisation et de comparer les carburants et les technologies de remplacement. Dans un souci de promotion d'une viabilité accrue des transports, les informations fournies devraient aussi porter sur les émissions du puits à la roue, étant donné que cela aiderait les consommateurs à prendre des décisions responsables dans leurs choix d'achat, avec les connaissances requises pour comprendre la totalité des impacts que ces décisions peuvent avoir sur l'environnement.

### ***Mettre au point de nouveaux cycles d'essai concernant la consommation de carburant***

Les cycles d'essai officiels actuellement en vigueur ne reflètent pas les conditions réelles d'utilisation et ne prennent pas en compte l'utilisation croissante des climatiseurs et d'autres accessoires. Les cycles d'essai officiels encouragent plutôt les constructeurs à optimiser leurs véhicules pour les conditions de l'essai, ce qui n'est pas nécessairement la meilleure solution pour la réduction des émissions dans les conditions réelles d'utilisation. Par ailleurs, de nombreux consommateurs ne comprennent pas les limites des essais officiels et les différences prévisibles dans les résultats de la conduite en conditions réelles, et c'est là un autre motif de préoccupation. Tel est en particulier le cas lorsque ces essais officiels sont utilisés pour la publication des résultats concernant la consommation de carburant. Il serait extrêmement souhaitable d'étudier la question des limites des cycles d'essai officiels.

Le nouvel essai qu'il conviendrait de mettre au point serait agréé au niveau international et établirait une méthodologie commune pour la mesure et la comparaison de la consommation de carburant et des émissions de gaz à effet de serre — indépendamment de la technologie du véhicule ou du type de carburant. Il prendrait en compte le comportement des conducteurs et l'utilisation des équipements du véhicule en conditions réelles (y compris, par exemple, l'emploi désormais fréquent de la climatisation). En règle générale, les normes ou objectifs fondés sur les performances seraient préférables aux approches privilégiant la technologie ou les carburants, car ils incitent les constructeurs à innover pour atteindre les résultats souhaités. Il faudra aussi réfléchir davantage à la manière dont serait adopté le nouveau cycle d'essai, et décider par exemple s'il serait simplement ajouté aux cycles d'essai officiels existants ou si des changements plus profonds seraient préférables.

## ***Adopter des incitations adéquates et ciblées***

### *Taxes sur les émissions des véhicules*

Une fiscalité explicite sur les émissions de polluants locaux et de gaz à effet de serre donne aux consommateurs des signaux fondés sur les prix concernant les conséquences sociales et environnementales de leurs décisions d'acquisition d'un véhicule. Dans de telles circonstances, les pouvoirs publics devraient mettre au point des paquets de mesures incitatives s'appuyant sur les performances effectives sur la route des véhicules automobiles et non sur la technologie elle-même.

### *Parcs de démonstration*

Les subventions et le soutien des pouvoirs publics sont souvent essentiels à la mise au point et à l'acceptation de nouvelles technologies. Des parcs de démonstration des nouvelles technologies automobiles offrant des avantages sur le plan de l'environnement, et une expérience de leur exploitation, pourraient être nécessaires avant qu'elles ne soient largement adoptées par le public. Dans certains cas, un soutien initial des pouvoirs publics à la constitution et à l'exploitation de ces parcs pourrait être justifié.

L'une des solutions consisterait en l'acquisition, par les pouvoirs publics, de LEV pour leurs propres parcs. Cela permettrait de démontrer au public la fiabilité (ou le contraire) de la nouvelle technologie, et contribuerait en outre à accélérer la mise en place des infrastructures requises.

### *Incitations à la construction d'infrastructures liées aux carburants*

Il n'est guère utile d'encourager les carburants de remplacement ou les nouvelles technologies automobiles capables d'offrir de faibles niveaux d'émissions si l'on ne dispose pas, dans le même temps, d'un réseau adéquat d'approvisionnement en carburant ou de maintenance. Cette absence a été la cause, par le passé, de l'échec de l'introduction de certains nouveaux carburants ou technologies. À l'avenir, les pouvoirs publics devraient prendre des mesures pour faciliter la mise en place, par l'industrie, d'infrastructures suffisantes pour le stockage et la distribution du carburant requis par les nouvelles technologies et les nouveaux carburants capables de faire la preuve d'avantages concrets sur le plan de l'environnement. On pourrait envisager une aide des pouvoirs publics par le biais de projets pilotes ou, éventuellement, d'incitations adéquates pour encourager l'industrie à investir dans les infrastructures, dispersées sur le plan géographique, dont ont besoin les utilisateurs.

### ***Évaluer les résultats obtenus***

Les nouvelles technologies faisant leur entrée sur le marché des véhicules devraient faire l'objet d'une surveillance prolongée, et leurs émissions de polluants (tant locales que globales) mesurées en fonction du vieillissement du véhicule. Continuer à offrir des incitations pour les LEV utilisant une technologie dont les performances se dégradent ou deviennent médiocres après un certain nombre d'années d'utilisation réelle irait à l'encontre du but visé.

### ***Réduire la masse et le rapport puissance/poids***

Il existe une étroite relation entre la puissance du moteur, le poids du véhicule et la consommation de carburant. En modifiant le rapport puissance/poids, on peut agir directement sur la consommation de carburant. La réduction du rapport puissance/poids constituerait l'un des moyens les plus efficaces de réduire la consommation, quelle que soit la technologie du moteur. Des rapports puissance/poids inférieurs se traduiraient par des avantages immédiats du point de vue des émissions locales de polluants et des émissions globales de CO<sub>2</sub> et contribueraient en outre à améliorer la sécurité routière.

Les mesures visant à encourager une réduction de la masse et une réduction des rapports puissance/poids n'exigeraient aucune mise au point technique, mais devraient bénéficier d'un très fort soutien politique — ainsi que de la coopération des constructeurs automobiles — étant donné que ces limitations iraient à l'encontre des préférences de la majorité des consommateurs, et qu'elles ne recueilleraient pas un appui unanime. La réduction des rapports puissance/poids pourrait être recherchée par le biais d'une information du public et avec le soutien des constructeurs, mais le recours à la fiscalité et à des mesures d'incitation pourrait être nécessaire pour que leur impact soit significatif.

### ***Références***

Agence internationale de l'énergie (AIE) (2002a), *Émissions de CO<sub>2</sub> dues à la combustion d'énergie 1971-2000* (édition 2002). AEI-OCDE, Paris.

Agence internationale de l'énergie (AIE) (2002b), *World Energy Outlook*, 2002 Edition. AEI-OCDE, Paris.

## Chapitre 1

### INTRODUCTION

**Résumé.** Ce chapitre définit le champ et les objectifs du rapport et présente un aperçu de l'impact des véhicules à moteur sur l'environnement, y compris leurs émissions de polluants atmosphériques locaux et de gaz à effet de serre.

#### Mandat du groupe de travail sur les véhicules à faibles émissions : questions liées à leur mise en œuvre

Dans le cadre de son programme de travail 2001-2003, le Programme de coopération dans le domaine de la recherche en matière de transports routiers et de liaisons intermodales (RTR) de l'OCDE a mis en place en 2001 un « Groupe de travail sur les véhicules à faibles émissions : questions liées à leur mise en œuvre ». L'objectif était d'évaluer les performances des technologies classiques et novatrices en termes de pollution locale et d'émissions globales, et de recenser et d'analyser les stratégies pour la mise en œuvre des LEV. Le résultat attendu de ces travaux était une analyse de l'incidence, à moyen terme (d'ici à 2020), d'une généralisation des LEV, dans le contexte d'objectifs d'action en vue d'une utilisation plus efficace des ressources énergétiques et d'une réduction des émissions du transport routier (CO, NO<sub>x</sub>, HC, PM et CO<sub>2</sub>).

Il n'existe pas de définition, reconnue au niveau international, des « véhicules à faibles émissions », même si certains pays (par exemple les États-Unis) ont élaborés de telles définitions et si certains concepts comme les « véhicules respectueux de l'environnement » (EFV) sont utilisés (par exemple au Japon ou dans l'Union Européenne). Dans le cadre de ce rapport, le Groupe de travail de l'OCDE a adopté l'approche suivant laquelle un « *véhicule à faibles émissions* » peut être défini comme un véhicule ayant pour caractéristiques :

- a) De faibles niveaux de consommation de carburant (et donc de faibles niveaux d'émissions de CO<sub>2</sub>).
- b) De faibles niveaux d'émissions ayant un impact négatif sur la qualité de l'air et la santé humaine.
- c) A la fois (a) et (b).

Le présent rapport comprend deux parties. La première partie contient des informations de base sur les LEV, les problèmes et les possibilités futures, conduisant à des conclusions et des recommandations. La seconde partie est constituée d'annexes techniques qui donne des informations détaillées sur les réglementations internationales en vigueur concernant les émissions des véhicules, le développement des technologies

conventionnelles (véhicules essence et diesel) et innovantes – illustré par des études de cas d'expériences pratiques portant sur une variété de technologies – et sur les mesures d'incitation mises en oeuvre dans les pays de l'OCDE pour promouvoir les véhicules à faibles émissions.

## Objectifs du rapport et champ couvert

Alors que la circulation automobile est à l'évidence une source d'émissions pouvant avoir des incidences négatives sur la santé humaine et l'environnement mondial, la question qu'il convient d'étudier est celle de déterminer dans quelle mesure les technologies des véhicules et des carburants qu'ils utilisent peuvent contribuer à maîtriser la pollution atmosphérique et les émissions de gaz à effet de serre.

Le premier objectif du présent rapport est de déterminer le potentiel de la technologie des véhicules et des carburants du point de vue de la réduction du niveau des polluants et des émissions de gaz à effet de serre ayant une incidence négative sur la santé humaine et/ou sur l'environnement. Le second objectif est de recenser et d'évaluer les stratégies possibles à mettre en oeuvre pour favoriser l'adoption des LEV.

Le champ couvert par le rapport est limité à l'examen du potentiel des *nouveaux* véhicules. Il ne vise pas à identifier ou à analyser des mesures destinées à améliorer les performances des véhicules *existants*. Le rapport met l'accent sur les aspects liés à la mise en oeuvre des LEV. Bien que la réduction de la pollution atmosphérique, de la consommation de carburant et des émissions de gaz à effet de serre imputables au transport exige le recours à une gamme de stratégies allant au-delà de la technologie des véhicules - comme la maintenance en service et la gestion de la demande de déplacements routiers - le rapport abordera seulement les questions liées aux avantages et aux contributions potentiels des LEV et les mesures qui pourraient faciliter de manière effective une plus large adoption des LEV sur le marché.

Les voitures particulières constituent le centre d'intérêt principal du rapport. Les véhicules à deux roues et les véhicules utilitaires lourds n'y sont pas traités. On trouvera néanmoins en annexe des études de cas sur des autobus urbains faisant appel aux nouvelles technologies.

Certains diront que la réduction du bruit des véhicules pourrait aussi faire partie du « paquet » des LEV, mais on a estimé que les possibilités de réduction du bruit des nouveaux véhicules sur la base des facteurs liés à la technologie du véhicule sont limitées, et c'est pourquoi les émissions de bruit n'ont pas été abordées de manière détaillée dans ce rapport.

## Introduction générale sur les questions environnementales liées aux véhicules

En plus des émissions produites par l'utilisation des véhicules, la construction, l'entretien et la démolition des véhicules automobiles génèrent des polluants atmosphériques, des gaz à effet de serre, des métaux lourds et des déchets toxiques. La production et la distribution des carburants génèrent aussi des émissions et consomment de l'énergie. Les véhicules de transport routier constituent des sources importantes de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre.

Les polluants atmosphériques émis par les véhicules sont notamment :

- Les particules (PM<sub>10</sub> par exemple) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), qui peuvent être à l'origine de problèmes de santé.
- L'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) et les composés organiques volatiles (COV), qui contribuent au smog photochimique.
- Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), qui peut provoquer une acidification des cours d'eau.

Les principaux gaz à effet de serre sont le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'hémioxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), le CO<sub>2</sub> étant de loin le plus important des GES produits par le secteur du transport.

Tous les facteurs en rapport avec les émissions de polluants locaux et de gaz à effet de serre doivent être pris en compte dans la détermination des combinaisons de technologies des véhicules et des carburants grâce auxquelles le niveau des émissions des véhicules pourra être le plus bas possible.

## Chapitre 2

# POLLUANTS ATMOSPHERIQUES RÉGLEMENTÉS<sup>1</sup>

**Résumé.** Après un examen de l'évolution des normes fixées pour réglementer les émissions de polluants atmosphériques dus aux véhicules, le Chapitre passe en revue le développement des technologies et leur contribution à ce jour pour réduire ces émissions. Il analyse également le potentiel des technologies avancées pour parvenir à de nouvelles réductions des émissions de polluants locaux par véhicule.

### Introduction

Il est tout à fait évident que l'exposition aux polluants émis par les véhicules automobiles a des incidences sur la santé humaine et sur l'environnement. Le présent rapport ne vise pas à examiner les liens entre les émissions, par les véhicules, de polluants affectant la qualité de l'air et leurs effets sur la santé et l'environnement, étant donné qu'il existe déjà une abondante littérature sur le sujet<sup>2</sup>. A titre d'illustration, le graphique ci-dessous, issu d'une recherche conduite aux Pays-Bas (de Hollander *et al*, 1999), indique que la pollution par les particules, le bruit et l'ozone a des effets sensibles sur la santé humaine. Les véhicules automobiles contribuent de façon significative à l'exposition de la population à tous ces polluants.

### Historique des normes d'émission des véhicules dans les principaux pays constructeurs d'automobiles<sup>3</sup>

#### *États-Unis*

Il était devenu évident, à la fin des années 60 et au début des années 70, que le nombre croissant de véhicules à moteur à essence en circulation contribuait aux pluies acides et à la pollution atmosphérique. A l'époque, les États-Unis avaient réalisé d'importantes avancées technologiques dans le cadre de leur programme spatial, et étaient en mesure de redéployer dans le domaine de la recherche des ressources qui n'étaient plus nécessaires pour ce programme. Ces conditions ont ainsi offert la possibilité d'appliquer les connaissances nouvellement acquises et les ressources devenues disponibles à la lutte

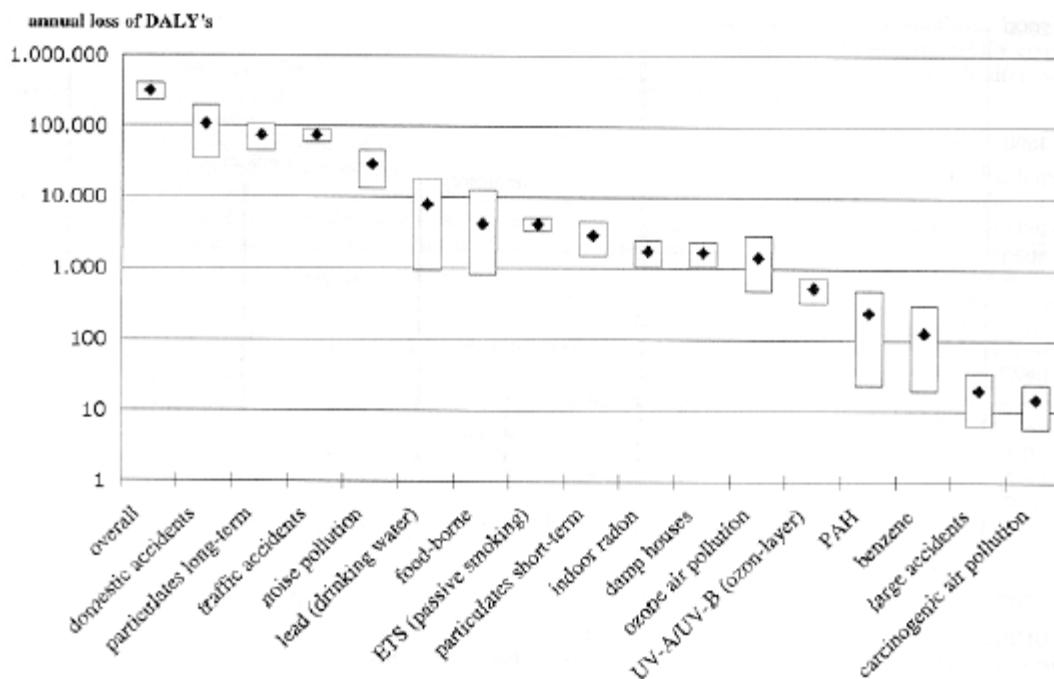
<sup>1</sup> Dans le présent chapitre, le terme émissions désigne les émissions de gaz d'échappement, à moins qu'il ne soit spécifiquement mentionné qu'il s'agit d'émissions du puits à la roue.

<sup>2</sup> On pourra trouver des informations sur les normes en rapport avec les risques pour la santé aux adresses suivantes : <http://www.euro.who.int/document/e71922.pdf>, <http://www.epa.gov/airs/criteria.html> et <http://www.iceline.be>.

<sup>3</sup> On pourra trouver à l'Annexe A des informations plus détaillées sur les normes d'émission.

contre la pollution liée à l'automobile. C'est en 1970 qu'est entrée en vigueur aux Etats-Unis la Loi sur la pureté de l'air (« Clean Air Act »).

**Figure 2.1. Perte annuelle de santé en années de vie corrigées du facteur invalidité (AVCI) pour des expositions environnementales choisies aux Pays-Bas**



Légende : Perte annuelle d'AVCI. Total, accidents domestiques, particules à long terme, accidents de la circulation, pollution acoustique, plomb (eau potable), transmission par les aliments, fumée de tabac ambiante (tabagisme passif), particules à court terme, radon à l'intérieur des logements, logements humides, pollution atmosphérique par l'ozone, UVA/UVB (couche d'ozone), HAP, benzène, grands accidents, pollution atmosphérique cancérigène.

Note : Le diagramme présente des estimations ponctuelles et les 5ème et 95ème centiles des intervalles de probabilité.

UV-A = rayonnement ultraviolet ; HAP = hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Depuis lors, des efforts considérables ont été déployés en vue de réduire, par le biais de l'adoption de textes réglementaires de plus en plus rigoureux, les émissions de polluants par les automobiles. Les premières dispositions réglementaires régissant les émissions de polluants des voitures particulières ont fait leur apparition en Californie, où se posaient de très sérieux problèmes de qualité de l'air. Les premières mesures prises concernant les automobiles à essence consistaient en l'amélioration des réglages des carburateurs et l'utilisation de systèmes de recyclage des gaz d'échappement. Malgré les progrès réalisés tout au long des années 70, ces mesures n'ont pas été suffisantes pour faire respecter les normes d'émissions de plus en plus strictes énoncées dans les textes réglementaires. Cette situation a conduit les constructeurs à introduire, au milieu des années 70, les convertisseurs catalytiques. L'essence sans plomb a été introduite en même temps, pour éviter d'endommager ces convertisseurs, ce qui a éliminé du même coup la pollution au plomb liée au carburant des véhicules, qui était devenue l'un des motifs de préoccupation.

## *Europe*

En Europe, le processus évolutif a enregistré au départ environ dix ans de retard par rapport aux États-Unis. Au cours des années 80, quelques pays européens ont adopté les convertisseurs catalytiques : la Suède, la Suisse, l'Autriche et, pour un petit pourcentage d'automobiles neuves, l'Allemagne. Dans plusieurs autres pays, les premiers convertisseurs catalytiques sont apparus seulement à la fin des années 80, dans le cadre de programmes d'incitations fiscales. Ce n'est qu'avec l'adoption, en 1992, de la norme « Euro 1 » que l'utilisation d'un convertisseur catalytique à trois voies à commande en boucle fermée est devenue la norme dans l'industrie. A partir de 1993, toutes les voitures neuves à essence vendues en Europe (15 pays) devaient obligatoirement être équipées d'un convertisseur catalytique. Par la suite, les dispositions réglementaires européennes sont devenues plus rigoureuses. Euro 2 est devenue la norme en 1997, suivie par Euro 3 en 2000. L'étape suivante sera atteinte en 2005, lorsque la norme Euro 4 remplacera la norme Euro 3 actuelle. Contrairement aux États-Unis, l'Europe possède un important parc de véhicules automobiles légers à moteur diesel. En 2001, 34% des voitures neuves en Europe avaient des moteurs diesel (le pourcentage allant jusqu'à 60% en France et en Autriche). Depuis le début des années 90, la réglementation concernant les moteurs diesel est devenue progressivement plus sévère en Europe.

## *Japon*

Au Japon, le contrôle des émissions d'échappement a commencé en 1966 sous la forme d'une réglementation des émissions de CO, applicable aux véhicules à moteur à essence. Lorsque les problèmes de qualité de l'air sont devenus particulièrement sérieux, notamment dans les grandes villes, la réglementation de l'émission d'échappement a été progressivement durcie pour ce qui concerne le CO, les HC et le NO<sub>x</sub>. En 1978, les bases de la très sévère réglementation aujourd'hui en vigueur pour les émissions d'échappement étaient complètes pour les véhicules à moteur à essence. La réglementation correspondante pour les véhicules à moteur diesel - introduite après celle applicable aux véhicules à essence - a commencé par les dispositions relatives aux fumées noires, en 1972. La réglementation des émissions de particules, également pour les véhicules diesel, a commencé en 1994.

## **Évolution des normes**

Les figures 2.2 et 2.3, concernant respectivement les moteurs à essence et diesel, donnent un aperçu général des tendances en matière d'élaboration des règles sur les émissions des automobiles neuves en Europe. Des tendances très semblables sont observées aux États-Unis et au Japon.

Figure 2.2. Effet des réglementations ECE (automobiles à essence)

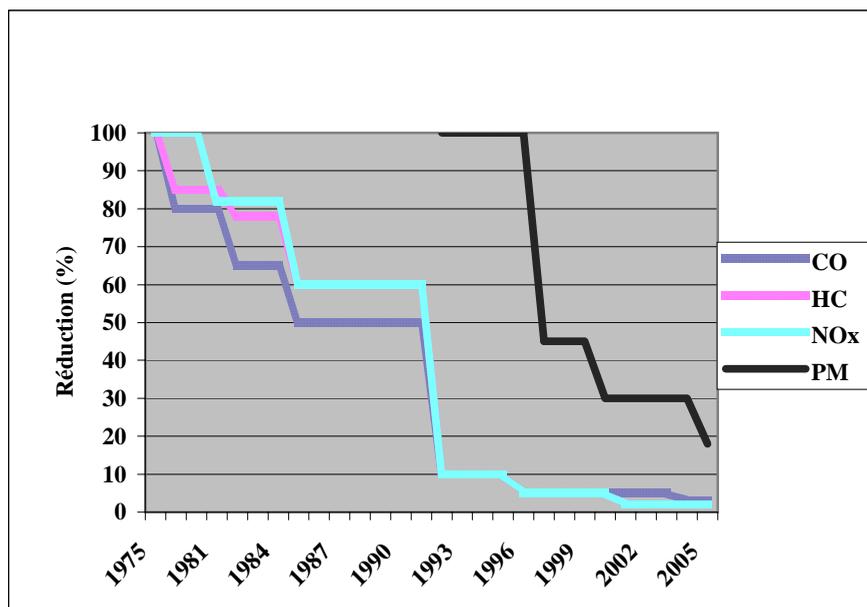
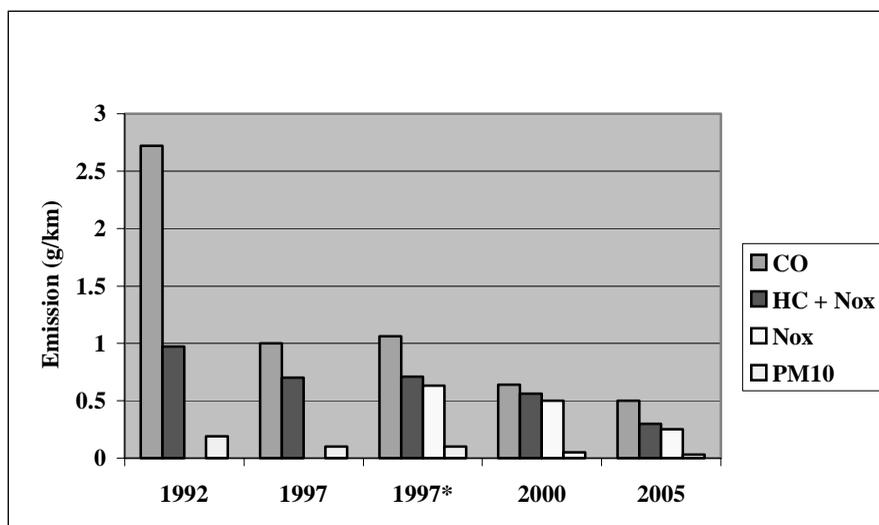


Figure 2.3. Effet des réglementations ECE (automobiles diesel)



\*= Modification du cycle d'essai.

On trouvera à l'Annexe A des précisions supplémentaires sur les normes en vigueur dans les réglementations européenne, américaine et japonaise.

## Évolution de la technologie

### Moteurs à essence

On l'a indiqué ci-dessus, les premières mesures concernant les automobiles à moteur à essence ont consisté à améliorer les réglages des carburateurs et à utiliser des systèmes de recyclage des gaz d'échappement ; elles ont été suivies par l'introduction des convertisseurs catalytiques. Les premiers catalyseurs n'étaient pas réglementés, et le mélange carburé (rapport air-carburant  $\lambda$ ) n'était pas optimisé en vue d'une performance maximum du catalyseur. La réactivité d'un convertisseur catalytique étant, en présence de CO, de COV et de NO<sub>x</sub>, la plus forte lorsque  $\lambda = 1^4$ , un système en boucle fermée comprenant un détecteur d'oxygène est devenu, au cours des années 80, la technologie courante pour les voitures particulières à essence. Ces évolutions se produisaient à la même époque où étaient mis au point les systèmes de gestion électronique du moteur et les systèmes d'injection électronique du carburant, et les carburateurs ont de nos jours virtuellement disparu des voitures particulières modernes. L'imposition de limites encore plus strictes des émissions a conduit les constructeurs à accroître la réactivité des catalyseurs et à mettre au point des systèmes plus sophistiqués de contrôle du moteur, et à prendre par ailleurs d'autres mesures pour réduire les émissions au démarrage à froid et maîtriser les émissions par évaporation.

Le tableau 2.1 montre les niveaux d'émission mesurés pour des automobiles équipées ou non d'un convertisseur catalytique.

**Tableau 2.1. Émissions de polluants de modèles anciens d'automobiles, avec et sans convertisseur catalytique**

	CO g/km	HC g/km	NOx g/km
<b>ECE 15 cycle</b> (urbain, demurrage à froid)			
Sans catalyseur	41.2	6.4	1.8
Avec catalyseur	6.7	0.74	0.54
<b>MVEG cycle</b> (sur route, moteur chaud)			
Sans catalyseur	9.8	1.3	2.7
Avec catalyseur	1.0	0.09	0.54
<b>INRETS cycle</b> (sur route, moteur chaud)			
Sans catalyseur	19.6	2.5	2.3
Avec catalyseur	0.90	0.09	0.44

Source: Delsey (2002).

Note : Les mesures ont été réalisées par l'INRETS (France) en 1995 sur des véhicules prélevés sur le parc existant, avec un kilométrage moyen se situant entre 20 000 et 60 000 km. Les véhicules équipés d'un convertisseur catalytique étaient des modèles de 1993 et 1994. Les véhicules sans convertisseur étaient des modèles de 1991 et 1992.

<sup>4</sup>  $\lambda = 1$ , lorsque la masse d'air est égale à 14.7 fois la masse d'essence.

### *Moteurs diesel*

Pour les voitures particulières à moteur diesel, les principaux défis, du point de vue de la pollution atmosphérique, sont aujourd'hui de réduire les émissions de NO<sub>x</sub> et de particules. Dans le cadre des normes en vigueur, les constructeurs de véhicules légers sont parvenus à respecter, aux Etats-Unis, en Europe et au Japon, les limites imposées aux émissions des véhicules diesel en appliquant diverses techniques : recyclage des gaz d'échappement, sophistication accrue de l'injecteur et de la pompe à gazole, système d'injection directe à rampe haute pression. On prévoit que le durcissement des normes concernant les émissions de particules exigera qu'il soit fait appel à des filtres à particules ou à une autre technologie de post-traitement. Bien que les émissions de CO et de COV des moteurs diesel soient naturellement plutôt faibles, les dispositions plus strictes de la réglementation européenne ont conduit à une utilisation généralisée des convertisseurs catalytiques d'oxydation dans les moteurs diesel à la fin des années 90.

### *Évolution des carburants*

Les carburants ont fait l'objet d'une normalisation dont le but était d'optimiser le fonctionnement des dispositifs antipollution des véhicules. Ces normes comportent trois éléments principaux :

- Contrôles sur la composition du carburant (essence et diesel) pour parvenir à la meilleure combustion possible et pour assurer l'uniformité de la composition du carburant sur une large zone géographique (par exemple, les pays d'Europe occidentale).
- Mise au point d'essence sans plomb pour protéger les convertisseurs catalytiques et réduire l'exposition au plomb de la population (le plomb étant un poison).
- Réduction radicale de la teneur en soufre des carburants, pour améliorer l'efficacité et la durabilité des dispositifs antipollution.

L'essence sans plomb a été mise sur le marché au cours des années 70 aux États-Unis et au début des années 80 au Japon, en Suède et en Suisse. En Europe, l'essence sans plomb est apparue sur le marché en 1985. Du fait des délais nécessaires au renouvellement du parc avec de nouveaux véhicules équipés de moteurs adaptés aux carburants sans plomb, ce n'est qu'en 2001 que l'ensemble du parc européen a pu être considéré comme « sans plomb ». A l'heure actuelle, les véhicules qui utilisent encore de l'essence au plomb ne représentent plus que 2 à 5 % du parc en Europe selon les pays, et la plupart des pays membres et de nombreux pays non-membres de l'OCDE ne produisent plus du tout d'essence au plomb.

La réduction de la teneur en soufre des carburants est un progrès plus récent. Dans l'UE, par exemple, la teneur en soufre du diesel était supérieure à 1000 parties par million (ppm) au cours des années 80 ; depuis le milieu des années 90, les normes ont régulièrement abaissé les limites de cette teneur en soufre à 500 ppm d'abord et aujourd'hui à 350 ppm. D'ici la fin de la décennie, le niveau maximum de soufre dans le diesel (et dans certains cas, dans l'essence également) en Europe, aux États-Unis, au Japon, en Australie et dans plusieurs autres pays sera fixé à environ 10 à 15 ppm.

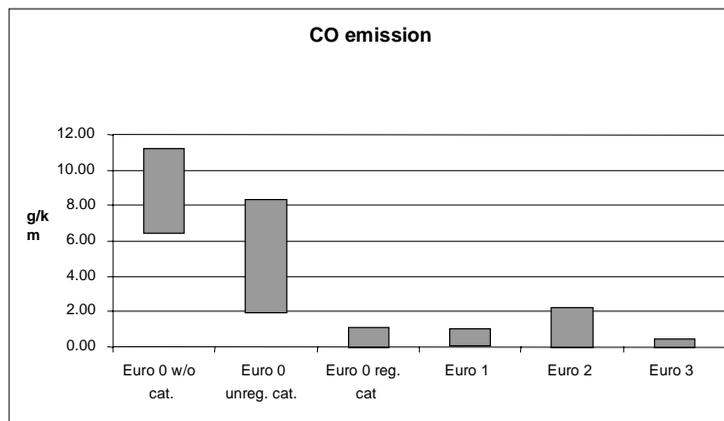
## Impact des normes sur les émissions par véhicule

### Émissions réelles

Les études des émissions par véhicule, menées sur des véhicules en circulation dans plusieurs pays, ont démontré que l'introduction de normes d'émissions plus sévères pour les véhicules neufs s'est traduite, pour les parcs de véhicules légers, par de sensibles améliorations des performances en matière d'émissions en conditions réelles. Cette amélioration s'est produite nonobstant le fait que les cycles d'essai officiels ne tiennent pas pleinement compte des comportements de conduite du monde réel.

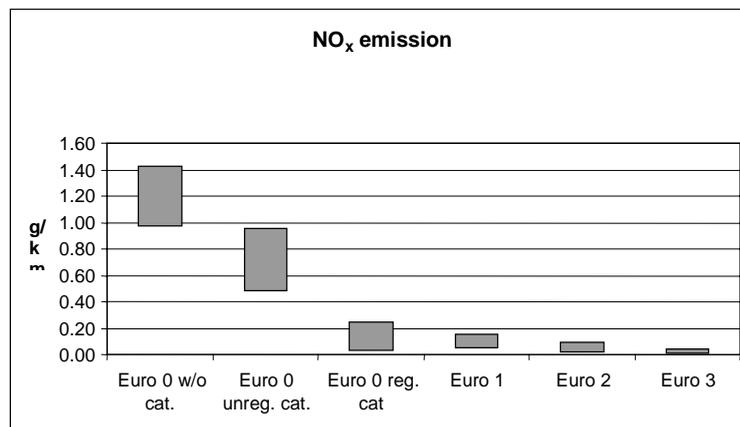
Ainsi, les figures 2.4 à 2.7 présentent, dans le cas du programme néerlandais IUC (In-Use Compliance) - un programme de surveillance qui soumet à des essais des échantillons représentatifs de véhicules prélevés sur le parc de véhicules en circulation - les avantages apportés par les normes dans le « monde réel ». La hauteur des barres indique la fourchette des émissions mesurées. La réduction des émissions de polluant entre 1985 (Euro 0) et 2000 (Euro 3) est spectaculaire pour les trois polluants (CO, NO<sub>x</sub> et PM).

Figure 2.4. Réduction des émissions de CO des voitures particulières en conditions réelles (essence)

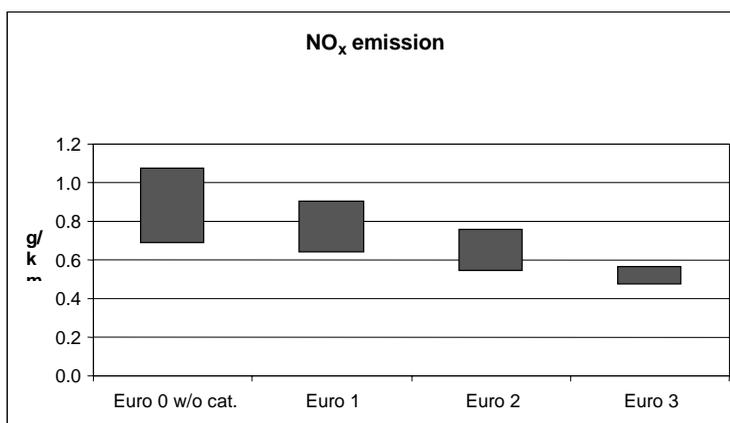


Source : Programme UIC des Pays-Bas.

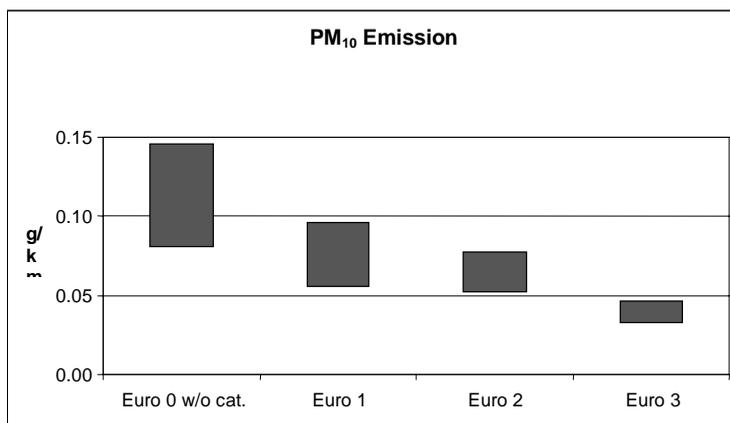
Figure 2.5. Réduction des émissions de NO<sub>x</sub> des voitures particulières en conditions réelles (essence)



Source : Programme UIC des Pays-Bas.

Figure 2.6. Réduction des émissions de NO<sub>x</sub> des voitures particulières en conditions réelles (diesel)

Source : Programme UIC des Pays-Bas.

Figure 2.7. Réduction des émissions de PM<sub>10</sub> des voitures particulières en conditions réelles (diesel)

Source : Programme UIC des Pays-Bas.

Les chiffres montrent clairement que, pour tous les polluants réglementés, les émissions des véhicules à essence ont baissé de manière spectaculaire depuis l'introduction de normes rendant obligatoire l'utilisation de convertisseurs catalytiques à trois voies. Les émissions des véhicules à essence utilisant des technologies antipollution de pointe sont aujourd'hui si faibles qu'il est très difficile de les mesurer au moyen des dispositifs actuels d'analyse.

Pour ce qui concerne les voitures particulières à moteur diesel, la réduction des émissions de NO<sub>x</sub> et de particules est significative, mais plus progressive, selon les catégories de technologie. De nouvelles améliorations sont donc possibles au cours des années à venir, et se concrétiseront, par exemple en Europe, avec l'introduction des normes Euro 4 en 2005.

Après l'introduction programmée de ces nouvelles normes (en Europe, aux Etats-Unis, au Japon et dans d'autres pays), tous les véhicules neufs classiques, à moteur à essence ou diesel, conformes à ces normes auront de très faibles taux d'émission de polluants atmosphériques, et seront par conséquent « peu polluants » en termes de pol-

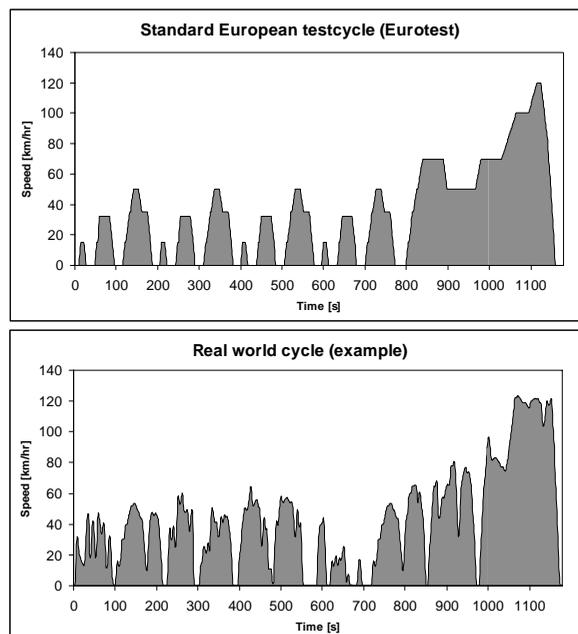
luants locaux. Dans de nombreux pays, toutefois, les normes applicables aux véhicules diesel autorisent des émissions sensiblement supérieures à celles des véhicules à essence équivalents.

### **Cycles d'essai et conduite « réelle »**

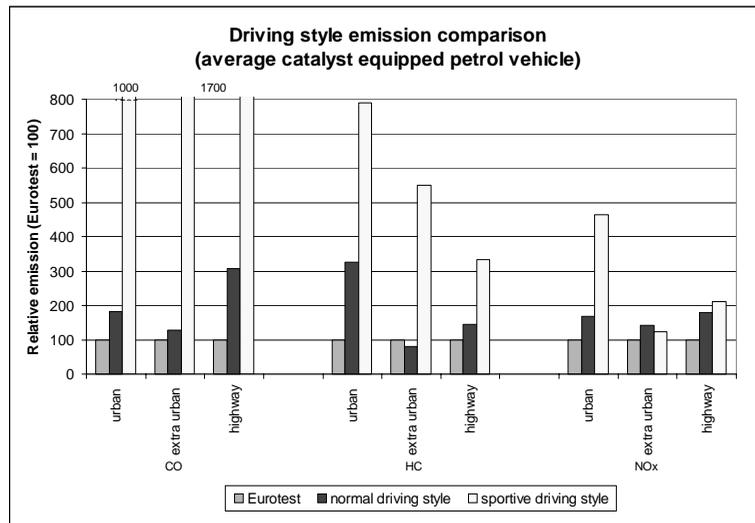
Alors que les normes d'émission ont assurément permis d'améliorer les performances en matière d'émission des véhicules en service, il faut bien comprendre que le cycle d'essai standard utilisé pour démontrer le respect des normes n'est pas nécessairement représentatif du comportement des conducteurs dans le « monde réel ». Cela ressort nettement d'une comparaison des rapports entre vitesse et temps mesurés dans les conditions standard du cycle d'essai européen des émissions (Eurotest) et un cycle plus réaliste en conditions réelles, comme le montre la figure 2.8. Le cycle du monde réel est beaucoup plus dynamique, reflétant ainsi les habitudes d'accélération et de freinage plus rapides observées en conditions réelles. Cette conduite plus dynamique en conditions réelles entraîne une augmentation des niveaux d'émission par rapport à ceux mesurés dans le cycle d'essai standard (voir les figures 2.9 et 2.10). Si on la compare à la procédure des essais d'émission, la conduite réelle impose généralement une plus forte charge pour une automobile (et pour les dispositifs de régulation du carburant et antipollution), spécialement lorsque le style de conduite est plus agressif.

La différence entre les résultats de l'Eurotest et ceux de la conduite réelle peut aussi avoir un rapport avec l'impact des essais d'émission sur les décisions de conception d'un véhicule. Les véhicules sont souvent conçus, et les moteurs étalonnés, de telle manière que les véhicules respectent les limites d'émission dans le cadre du cycle d'essai standard, qui impose une moindre charge globale au moteur, laissant une marge d'étalonnage pour optimiser la maniabilité aux vitesses et aux charges moteur élevées (c'est-à-dire en privilégiant la performance plutôt qu'en cherchant à réduire les émissions).

**Figure 2.8. Cycle standard (Eurotest) et cycle opérationnel**  
Cycle d'essai standard européen (Eurotest) / Cycle en conditions réelles (exemple)



**Figure 2.9. Comparaison des émissions selon le style de conduite (véhicule moyen à essence équipé d'un catalyseur)**



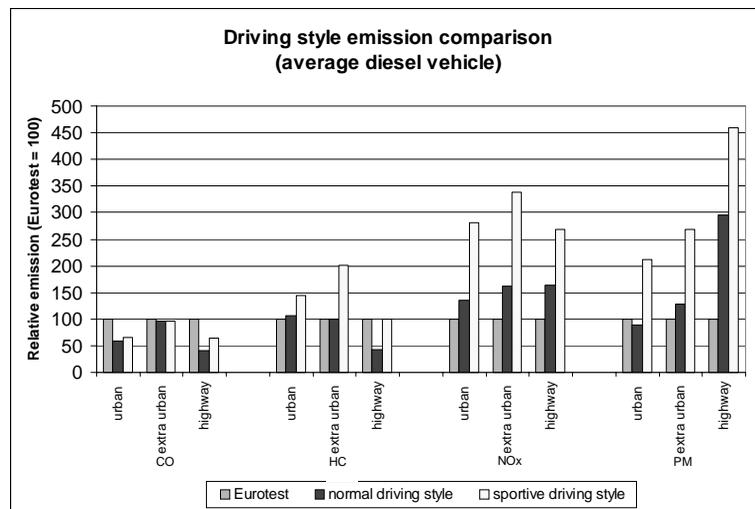
Légende : Émission relative (Eurotest).

Urbain/non urbain/autoroute.

Eurotest/conduite de style normal/conduite de style sportif

Source : Gense (2000).

**Figure 2.10. Comparaison des émissions selon le style de conduite (véhicule diesel moyen)**



Légende : Émission relative (Eurotest).

Urbain/non urbain/autoroute.

Eurotest/conduite de style normal/conduite de style sportif

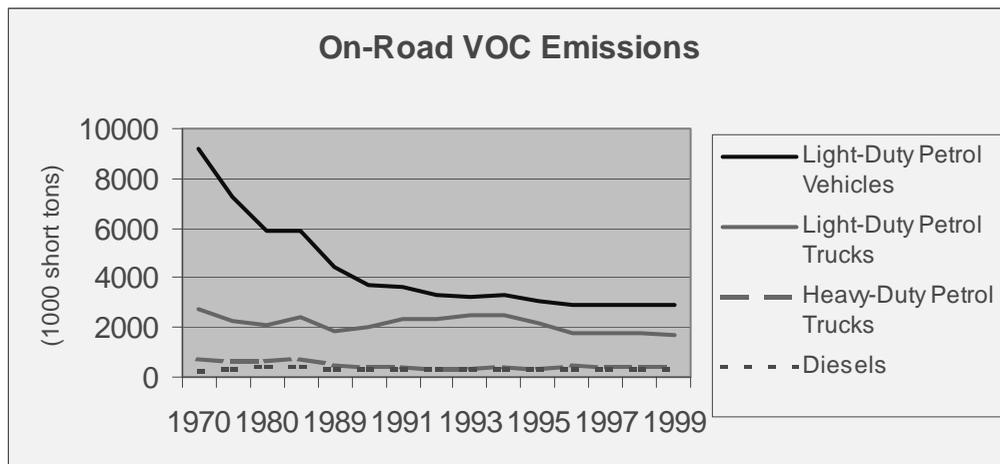
### Impact des normes sur les émissions des parcs de véhicules

Dans les pays ayant adopté des normes avancées d'émission des véhicules, les améliorations de la qualité de l'air sont dues en grande partie à ces normes. Il est important de noter que les progrès des technologies et des carburants nécessaires pour satisfaire aux normes ont contribué à une meilleure qualité de l'air, malgré l'augmentation du nombre de véhicules-kilomètres parcourus par l'ensemble du parc et malgré les

imperfections des cycles d'essai standard. Les diagrammes et tableaux ci-après illustrent les progrès réalisés dans plusieurs pays où des normes avancées d'émission des véhicules sont en vigueur depuis de nombreuses années.

Aux Etats-Unis, les tendances observées sur une période de 30 ans montrent que les émissions totales des principaux polluants imputables aux véhicules (à l'exception du NO<sub>x</sub> émis par les camions) sont en baisse, alors même que la distance totale parcourue par le parc de véhicules a augmenté de 150%. La figure 2.11 présente l'évolution des émissions de COV au cours de la période 1970-1999.

**Figure 2.11. Évolution des émissions de composés organiques volatiles aux Etats-Unis (1970-1999)**  
(en milliers de tonnes américaines)



Légende : Émissions de COV : véhicules légers à essence, camions légers à essence, camions lourds à essence, diesels  
Source : US EPA (1999).

En Suisse, toutes les émissions de polluants ont diminué de manière spectaculaire au cours des 20 dernières années (voir tableau 2.2).

**Tableau 2.2. Réduction des émissions obtenue en Suisse en 2000**

Polluant	Niveaux d'émission en 2000	
	Réduction depuis 1980	Réduction depuis 1990
CO	80%	50%
HC	70%	60%
NO <sub>x</sub>	50%	50%
Particules	50%	40%
Plomb	99%	99%
SO <sub>2</sub>	75%	45%

Des résultats du même ordre ont été obtenus dans de nombreux autres pays, parmi lesquels les Pays-Bas, la France, la Suède, le Royaume-Uni, l'Australie et le Japon. Dans la plupart des pays de l'OCDE, les émissions de NO<sub>x</sub>, de CO et de HC des parcs étaient à leur point culminant au début des années 90. Depuis lors, elles ont fortement reculé (de 20 à 50%), malgré une augmentation constante du nombre de véhicules-kilomètres parcourus (+25% entre 1990 et 2000).

En Europe centrale et orientale, la diminution des émissions de polluants a été retardée par l'entrée en vigueur tardive de normes strictes. En Pologne, par exemple, les niveaux maximums des émissions totales annuelles ont été atteints en 1996 pour le CO, les COV et le NO<sub>x</sub>, en 1997 pour les PM<sub>10</sub> et en 1998 pour le SO<sub>2</sub>. Les émissions de tous les polluants sont aujourd'hui en recul.

## **Évolution des technologies classiques : perspectives pour 2010-2020**

### ***Moteurs à essence à combustion interne***

Les analyses récentes montrent que les plus importantes contributions aux émissions d'échappement actuelles des véhicules légers à essence (normes Euro 3 ou équivalent) peuvent être attribuées aux sources suivantes : démarrage à froid, variations du rapport carburant/air (lambda), effet des températures ambiantes, usages hors cycles officiels et conversion à chaud dans le catalyseur. La technologie actuelle peut permettre des réductions pour chacune de ces causes.

Si l'on pouvait améliorer encore le rendement des moteurs pour s'attaquer à ces sources d'émissions, les émissions en conditions réelles par véhicule pourraient être réduites de 85% à 90% pour le CO, les COV et le NO<sub>x</sub>.

### ***Moteurs diesel à combustion interne***

Les émissions d'échappement des voitures particulières modernes à moteur diesel (normes Euro 3, sans catalyseur de destruction des NO<sub>x</sub> et sans filtres à particules) peuvent être attribuées principalement aux sources suivantes : démarrage à froid, effet des températures ambiantes, usages hors cycles officiels et émissions à chaud.

La volonté de réduire la consommation de carburant a incité les constructeurs à adopter, dans une large mesure, la technologie de l'injection directe pour les plus récents véhicules à moteur diesel. Bien qu'elle réduise la consommation de carburant, cette évolution peut avoir des conséquences négatives sur d'autres émissions, en particulier celles de NO<sub>x</sub> et de particules (PM). Afin de respecter les limites d'émissions fixées par les dispositions réglementaires actuellement en vigueur en Europe, la plupart des moteurs diesel sont déjà équipés de convertisseurs catalytiques d'oxydation (pour réduire les émissions de COV et de PM) et de dispositifs de recyclage des gaz d'échappement (pour réduire les émissions de NO<sub>x</sub>). Plus récemment, plusieurs méthodes ont permis de nouvelles réductions des émissions : optimisation de la forme des chambres de combustion, augmentation des pressions d'injection, variation de la fréquence et de la quantité injectée.

Les constructeurs devront adopter d'autres mesures pour se conformer à la réglementation future en matière d'émissions. Il est peu probable, à cet égard, qu'une meilleure réactivité des convertisseurs catalytiques d'oxydation et que des dispositifs de recyclage des gaz d'échappement à refroidissement et contrôle électronique puissent suffire. Pour ramener les émissions des véhicules diesel - spécialement les émissions de NO<sub>x</sub> et de PM - au niveau de celles des automobiles à essence, les technologies qui seront sans doute largement adoptées seront celles des dispositifs de destruction des NO<sub>x</sub> et des filtres à particules, qui ont déjà fait la preuve de leur efficacité. Il semble également possible de réduire de 75%, par rapport aux normes Euro 3, les émissions de CO, de COV et de NO<sub>x</sub> en équipant les futurs véhicules diesel de systèmes évolués de post-traitement des gaz d'échappement et en améliorant progressivement les moteurs.

Pour ce qui concerne les émissions de particules des moteurs diesel, les nouveaux filtres à particules permettent aujourd'hui de réduire de façon radicale le niveau des émissions pour toute la gamme des particules. Les essais menés sur des véhicules équipés de filtres ont démontré qu'ils conservaient un niveau élevé de performance et d'efficacité même après 100 000 km (voir les études de cas à l'annexe C). La généralisation de la technologie des filtres à particules sur les véhicules diesel, largement entamée avec succès en Europe avec plus de 500 000 filtres déjà installés sur les véhicules neufs par un constructeur européen, constitue un moyen efficace de réduire les émissions de particules, pour autant que l'on dispose d'un gazole de bonne qualité à faible teneur en soufre.

## **Volume futur des émissions de polluants réglementés imputables au transport routier**

### *Véhicules neufs*

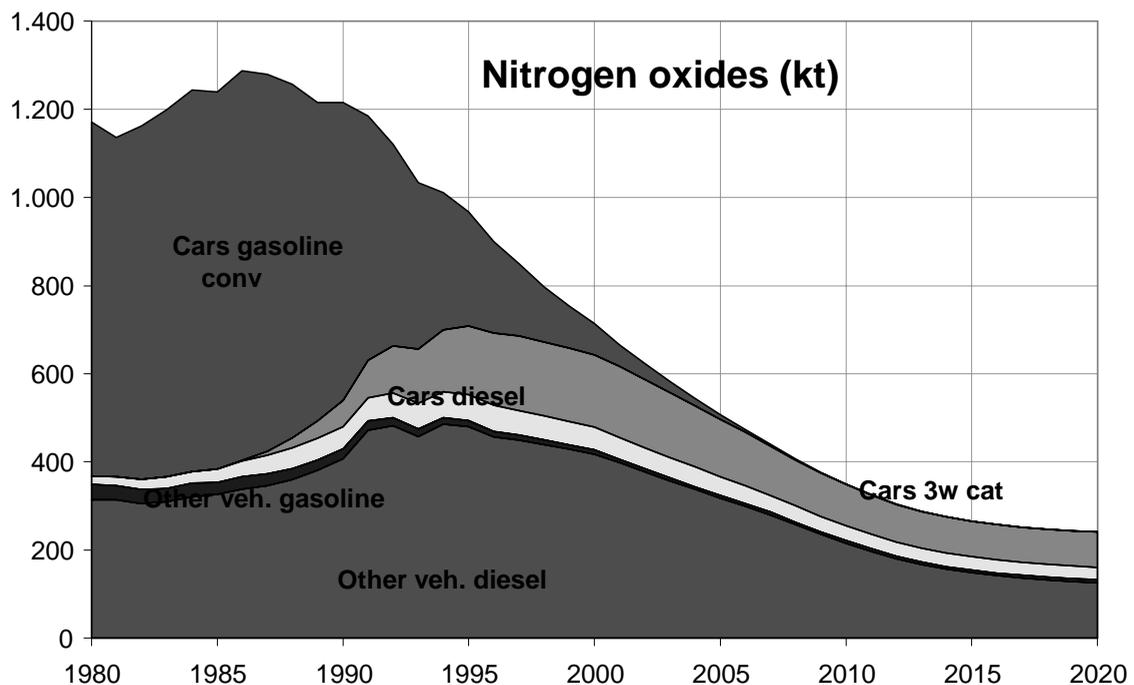
Grâce à l'adoption des normes obligatoires, les émissions de polluants classiques sont largement maîtrisées, du moins pour les nouvelles automobiles à essence. Les réductions actuelles des émissions de polluants locaux par chaque véhicule suffiront à garantir, à mesure que des véhicules neufs répondant aux normes remplaceront des véhicules plus anciens, que les niveaux totaux des polluants continueront de décroître. Dans la plupart des pays, cette baisse interviendra malgré l'augmentation prévue du taux de motorisation et des distances totales parcourues.

Le tableau 2.3 et la figure 2.12 donnent une illustration des réductions considérables réalisées en matière d'émissions de polluants et des perspectives à moyen terme:

- En France, la variation du total des émissions entre 1990 et 1998 et les projections pour les années 2010 et 2020 sont présentées dans le tableau 2.3. Il est particulièrement intéressant de noter que les volumes maximums de polluants réglementés ont été généralement observés, en France, au milieu des années 90 ou avant.
- En Allemagne, on prévoit que les améliorations des normes concernant les véhicules conduiront à des réductions sensibles des émissions des véhicules routiers au cours de la période 2000-2020. La figure 2.12 présente la diminution prévue des émissions de  $\text{NO}_x$ . A court terme, ce sont les émissions des automobiles à essence qui diminueront rapidement, suivies à moyen terme par celles des automobiles à moteur diesel.

Tableau 2.3. France : Comparaison des émissions, évolution de 1990 à 1998 et prévisions pour 2010 et 2020

Polluant	Maximum observé (année)	Réduction entre 1990 et 1998 (%)	Écart entre 1998 et le maximum observé (%)	Projection pour 2010	Projection pour 2020
SO <sub>2</sub>	154 kt (1993)	-66%	-69%	5 kt	5 kt
NO <sub>x</sub>	1,058 kt (1992)	-23%	-24%	369 kt	356 kt
CO	8,900 kt (1976)	-43%	-57%	1,042 kt	873 kt
VOC	1,287 kt (1981)	-37%	-41%	188 kt	164 kt
PM	71 kt (1995)	+ 15%	-10%	24 kt	16 kt

Figure 2.12. Évolution et projections des émissions de NO<sub>x</sub> imputables aux véhicules routiers en Allemagne (1980-2020)

Légende : Automobiles classiques à essence, automobiles diesel, autres véhicules à essence, autres véhicules diesel, automobiles à catalyseur à 3 voies.

Source: German Federal Environmental Agency.

### Véhicules existants

Du point de vue des émissions de polluants, la présence au sein du parc de véhicules de technologie « ancienne » demeurera, au cours des 15 à 20 prochaines années, le principal problème, étant donné leurs niveaux très élevés d'émissions de polluants par rapport aux véhicules de technologie nouvelle qui les remplaceront. Aux Pays-Bas, par exemple, on estime que 99% des polluants classiques émis par le parc actuel proviennent de véhicules anciens non équipés de catalyseurs (Euro 0). L'importance de cette contribution illustre également le fait que les émissions de polluants locaux des automobiles en service augmentent avec le temps et le kilométrage parcouru. Les autorités

sont ainsi confrontées à la lourde tâche qui consiste à vérifier périodiquement les émissions des véhicules en circulation.

## Conclusion

L'adoption, dans les pays de l'OCDE, de réglementations avancées sur les émissions a contribué à réduire sensiblement, pour tous les polluants locaux, les émissions totales imputables aux véhicules automobiles, et cette évolution à la baisse devrait se poursuivre. Dans beaucoup de pays, les volumes maximums, pour toutes les émissions réglementées, ont été observés il y a quelques années déjà, en général dans la première moitié des années 90. On prévoit que les émissions totales des véhicules de tourisme seront tombées, en 2020, à un niveau peu élevé et stable. La raison en est double : d'une part, les automobiles neuves ont des émissions minimales, et elles sont par conséquent très propres en termes de polluants locaux, et d'autre part, les automobiles plus anciennes non équipées d'un convertisseur catalytique, dont les émissions de polluants atmosphériques sont beaucoup plus élevées, auront en grande partie disparu des parcs de véhicules.

Il existe encore, pour les véhicules diesel légers, une marge d'amélioration des performances en matière d'émissions pour les porter au niveau de celles des véhicules à essence en ce qui concerne le NO<sub>x</sub> et les particules. Un certain nombre de véhicules actuels, bénéficiant des technologies de pointe, sont maintenant équipés de dispositifs de post-traitement (destruction des NO<sub>x</sub> et filtres à particules) ayant fait la preuve de leur efficacité pour la réduction des NO<sub>x</sub> et des particules, et de leur capacité d'atteindre des niveaux d'émission semblables à ceux observés pour les véhicules à essence.

## Références

- de Hollander, A.E., J.M. Melse, E. Leuret and P.G. Kramers (1999). "An Aggregate Public Health Indicator to Represent the Impact of Multiple Environmental Exposures", *Epidemiology*, 10(5), pp. 606-617.
- Delsey, J (2002), "Quels sont les facteurs influençant les émissions de véhicules ?" *La Documentation Française*, ISBN 2-11-005066-7, Paris.
- Gense, N.L.J. (2000), "Driving Style, Fuel Consumption and Tail Pipe Emissions, *TNO Automotive*, March, Delft.

## Chapitre 3

# ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

**Résumé.** Ce chapitre décrit la relation entre consommation énergétique et émission de gaz à effet de serre ainsi que les tendances relatives à la consommation en carburant et aux émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) des véhicules. Il examine les approches réglementaires et autres mises en œuvre pour réduire la consommation en carburant et limiter les émissions de CO<sub>2</sub> et analyse le potentiel des technologies classiques et innovantes pour contrer l'augmentation prévue des émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport routier.

### Introduction

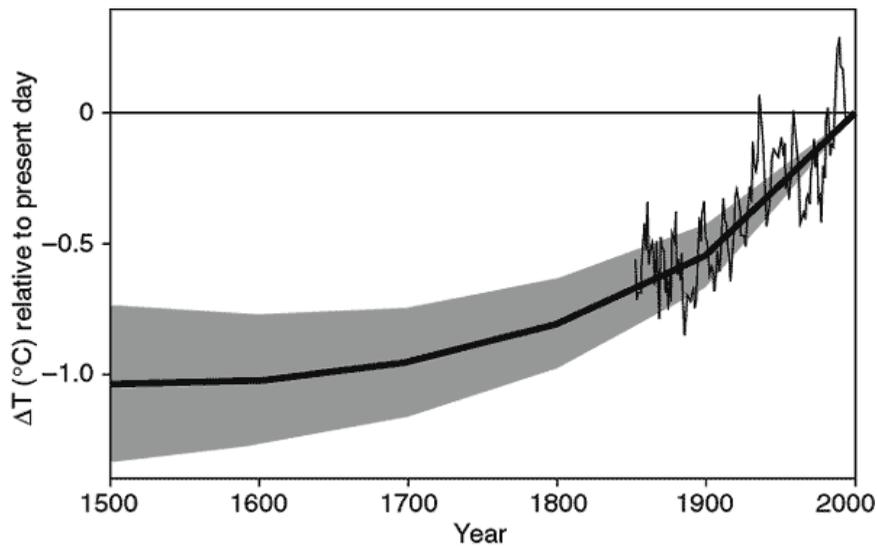
#### *Les réserves de pétrole et l'effet de serre*

Deux raisons essentielles justifient que l'on s'intéresse à la consommation de carburant des véhicules automobiles : la première se rapporte à la nécessité d'économiser les carburants non renouvelables, et la seconde tient à l'effet de serre. Le CO<sub>2</sub>, qui est l'un des principaux gaz à effet de serre, est le produit inévitable du processus de combustion d'un combustible fossile. Les émissions de CO<sub>2</sub> d'un véhicule automobile utilisant un carburant issu du pétrole sont en rapport direct avec sa consommation de carburant. Par conséquent, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules automobiles - qu'ils utilisent des combustibles fossiles classiques ou de remplacement - ne pourra résulter que d'une réduction de leur consommation.

Les publications de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2001) contiennent des informations sur les réserves mondiales d'hydrocarbures. Dans sa publication « World Energy Outlook 2002 » (Perspectives mondiales de l'énergie 2002), l'AIE conclut, dans le contexte de projections jusqu'en 2030, que les ressources énergétiques mondiales sont suffisantes pour faire face à l'augmentation prévue de la demande énergétique. L'AIE conclut également que les ressources pétrolières sont amplement suffisantes, mais qu'il conviendra de recenser davantage de réserves pour répondre à l'augmentation de la demande de pétrole jusqu'en 2030 (AIE, 2002b).

Dans le cadre de ses travaux sur les gaz à effet de serre (GES) et le réchauffement planétaire, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a publié un certain nombre de rapports sur cette question (GIEC, 2001). La figure 3.1 présente une estimation de la température mondiale au sol, reconstruite à partir de données de forage au cours des cinq derniers siècles par rapport aux valeurs actuelles. Les zones ombrées représentent  $\pm$  deux écarts-types par rapport à l'évolution historique de la moyenne. En surimpression, un graphique lissé (moyenne quinquennale mobile) concerne les relevés instrumentaux de la température mondiale de l'air en surface depuis 1860.

Figure 3.1. Reconstruction de la température mondiale au sol au cours des cinq derniers siècles



Légende : Delta T (°C) par rapport à la situation actuelle, année.

Source: IPCC (2001).

### Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) est une convention internationale traitant des questions en rapport avec l'émission de GES. L'objectif ultime de la CCNUCC est de stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêcherait des interférences dangereuses entre les effets des activités humaines et le système climatique. La CCNUCC a été adoptée en mai 1992 ; en décembre 2002, 186 parties l'avaient ratifiée. Neuf Conférences des Parties se sont déjà tenues, dont la plus récente à Milan (Italie) en décembre 2003.

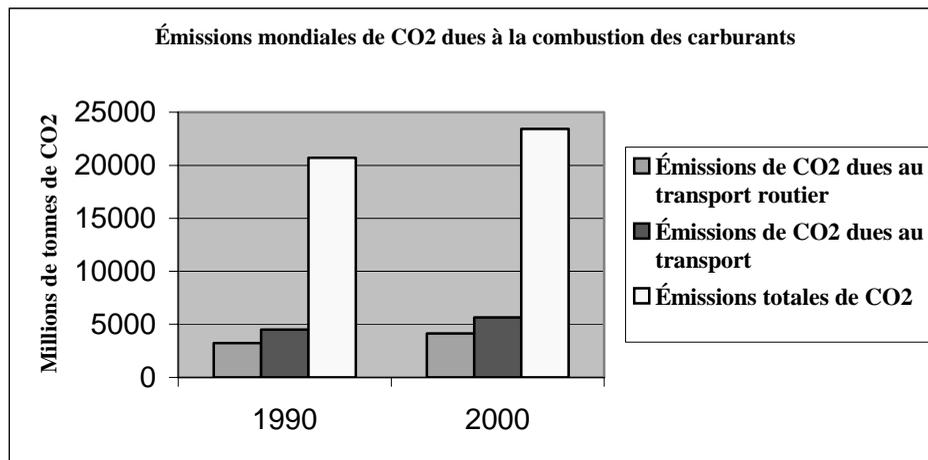
La troisième Conférence des Parties, tenue à Kyoto en décembre 1997, a adopté le Protocole dit de Kyoto (voir ci-dessous), que les pays désireux de mettre en œuvre peuvent ratifier. Plusieurs pays ont exprimé des réserves à propos de ce Protocole. Certaines questions sont encore en discussion, en particulier celle du cadre général à mettre en place pour atteindre des buts tels que la réduction des émissions de GES dans les pays en développement, et celle des moyens à mettre en œuvre pour concevoir et faciliter des « mécanismes de développement propre ». Les pays ayant ratifié la CCNUCC se sont engagés à :

- Etablir des inventaires nationaux des émissions de tous les GES.
- Formuler, mettre en œuvre, publier et actualiser les programmes nationaux comprenant des mesures destinées à atténuer les effets du changement climatique.
- Promouvoir, par le biais de la coopération, le développement, l'application et la diffusion de technologies, de pratiques et de procédés qui limitent, réduisent ou préviennent les émissions de GES imputables aux activités humaines dans tous les secteurs pertinents.

## Émissions de CO<sub>2</sub>

La figure 3.2 présente les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> dues à la combustion des ressources fossiles (AIE, 2002). Le transport dépend, pour 96%, des carburants issus du pétrole. Le pourcentage des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> imputables au transport est passé de 19,3% en 1971 à 24% en 2000, et il continue d'augmenter. En 2000, le *transport routier* était à l'origine de 18% des émissions totales de CO<sub>2</sub> dans le monde, et de 23% dans les pays de l'OCDE. Au niveau mondial, l'utilisation des carburants de remplacement - comme le GPL, le CNG ou les biocarburants - dans le secteur du transport n'est pas significative

Figure 3.2. Émissions mondiales de CO<sub>2</sub>.  
(millions de tonnes de CO<sub>2</sub>)



Source: AIE (2002).

## Analyse de la consommation d'énergie d'un véhicule

Le tableau 3.1 donne, à titre d'exemple, la ventilation de la consommation d'énergie d'une automobile familiale classique de taille moyenne (début des années 90) équipée d'un moteur à essence.

Tableau 3.1. Ventilation de l'énergie consommée par une automobile familiale classique de taille moyenne

Type de trajet		Urbain	Autoroute
Énergie continue dans le carburant	Consommation d'énergie	100%	100%
Pertes dans la motorisation	Pertes thermodynamiques	60	60
	Pertes du moteur	12	3
	Pertes de la transmission	4	5
	<b>Total</b>	<b>76%</b>	<b>68%</b>
Consommation des composants	Auxiliaires	2	1
	Accessories	1	1
	Climatisation (si utilisée)	10	10
	<b>Total</b>	<b>13%</b>	<b>12%</b>
Utilisation pour la propulsion	Résistance à l'air	2	11
	Résistance au roulement	4	7
	Pertes cinétiques/freinage Aucune inclinaison	5	2
	<b>Total</b>	<b>11%</b>	<b>20%</b>

### *La motorisation*

Les moteurs transforment le contenu énergétique chimique d'un carburant en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est employée pour surmonter l'inertie du véhicule et sa résistance aérodynamique et au roulement, et pour produire l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des composants électriques comme l'éclairage. Toute l'énergie, cependant, n'est pas utilisée pour la propulsion et le fonctionnement des composants auxiliaires. La plus grande partie de la valeur énergétique est consommée pendant les processus chimiques ou thermodynamiques et pour surmonter le frottement. Il ressort clairement du tableau 3.1 que la plus grande partie de la valeur énergétique d'origine du carburant est transformée en chaleur.

### *Poids, traînée aérodynamique et résistance au roulement*

Un véhicule en mouvement doit surmonter plusieurs forces opposant une résistance à ce mouvement. Ces forces, résultant de l'interaction entre le véhicule, l'air et la route sont :

- La traînée aérodynamique, qui dépend de la forme du véhicule et de sa surface frontale, et qui est proportionnelle au carré de la vitesse ;
- La résistance au roulement, qui dépend des pneumatiques, de la pression des pneumatiques et de la qualité du revêtement routier, et qui est proportionnelle au poids du véhicule ;
- Les forces de résistance en rapport avec le poids du véhicule :
  - L'inertie au cours de l'accélération, qui dépend du poids du véhicule, mais aussi de toutes les pièces tournantes (roues, composants du moteur et de la boîte de vitesses).
  - La gravité dans les côtes.

Ces forces, qui sont fonction de l'utilisation du véhicule, peuvent varier de façon considérable. A vitesse élevée, c'est la résistance aérodynamique qui est prépondérante (plus de 75% du total), tandis qu'en utilisation urbaine, c'est l'inertie qui représente plus de 95% du total. De même, les valeurs absolues des forces présentent des différences significatives d'un modèle à un autre. Le tableau 3.2 donne une indication de la puissance nécessaire à une voiture particulière classique pour surmonter ces forces (Delsey, 1997). Le tableau concerne une voiture particulière pesant 1 100 kg et ayant une surface frontale de 1,75m<sup>2</sup> et un coefficient de résistance à l'air de 0.45. Les chiffres montrent qu'en utilisation urbaine, le poids du véhicule est un déterminant très important de la puissance nécessaire (et de la consommation de carburant) pour les voitures particulières. Il en est de même pour les camionnettes de livraison et les autobus.

**Tableau 3.2. Puissance (kW) requise pour surmonter diverses formes de résistance à la progression du véhicule**

Utilisation du véhicule	Roulement	Aérodynamique	Inertie	Gravité	Total
Utilisation urbaine, 20 km/h (vitesse moyenne)	0.7 (4.2%)	0.09 (0.5%)	15.9 (95.2%)	0	16.7
Vitesse constante, 60 km/h horizontale	2.5 (51%)	2.4 (49%)	0	0	4.9
Vitesse constante, 140 km/h horizontale	9.4 (24%)	30.1 (76%)	0	0	39.5
Vitesse constante, 80 km/h pente à 5%	3.7 (17.4%)	5.6 (26.3%)	0	12.0 (56.3%)	21.3

Source: Delsey (1997).

Même à vitesse constante, la puissance nécessaire pour faire avancer un véhicule dépend du poids de ce véhicule et de sa traînée aérodynamique, comme le montre le tableau 3.3. Les paramètres se rapportent à deux voitures particulières : le Modèle A est un petit véhicule européen et le Modèle B un véhicule européen assez grand, dans la catégorie de taille moyenne.

Tableau 3.3. Puissance requise à vitesses constantes pour deux modèles

Caractéristiques du modèle de véhicule				
Paramètres	Surface frontal A (m <sup>2</sup> )	Coefficient de traînée C <sub>D</sub>	A.C <sub>D</sub>	Masse (kg)
Modèle A	1.73	0.32	0.554	640
Modèle B	2.04	0.33	0.673	1 290

Puissance requise				
Vitesse constante	120 km/h	140 km/h	160 km/h	180 km/h
Modèle A	17 kW	26 kW	38 kW	53 kW
Modèle B	24 kW	36 kW	52 kW	72 kW

Cette comparaison met en évidence l'augmentation significative de puissance nécessaire pour faire avancer un véhicule plus grand et plus lourd aux mêmes vitesses qu'un véhicule plus petit et plus léger. Elle montre aussi que la puissance dont ont besoin les deux modèles de véhicules est sensiblement différente. La traînée aérodynamique des deux véhicules est à peu près la même, mais c'est la surface frontale qui explique la différence de puissance nécessaire pour propulser les deux véhicules à la même vitesse. Partout dans le monde, la surface frontale des nouvelles voitures particulières est en augmentation. De ce fait, même avec de fortes améliorations du rendement des moteurs, le gain potentiel sur le plan de la consommation de carburant est en partie perdu.

### Style de conduite

Le style de conduite adopté par le conducteur est l'un des facteurs qui exercent une forte influence sur la consommation de carburant des véhicules automobiles. L'incidence des différents styles de conduite se trouve démontrée au tableau 3.4 (Gense, 2000). Le style de référence, auquel les autres sont comparés, est qualifié de « style de conduite défensif ». On a utilisé, pour cette comparaison, deux styles visant à économiser le carburant, le premier reposant sur une accélération très lente (conduite en douceur ou « egg style ») et le second consistant en la toute dernière version néerlandaise du style suisse « ECO-DRIVE », qualifié de « nouveau style de conduite ». Ce « nouveau style » combine la conduite défensive avec une manière spéciale d'accélérer et de passer les vitesses. Du point de vue environnemental, l'opposé de ces styles est représenté par un style de conduite agressif, où le moteur tourne à haut régime et utilise une puissance élevée. Dans ce style agressif, la dynamique de conduite (accélération) augmente de 80% et le régime moyen du moteur de 20%.

La comparaison des résultats montre que la conduite « agressive » augmente de 30% les émissions de CO<sub>2</sub>. Le « nouveau style de conduite » permet des économies de carburant de 5% par rapport au style « défensif », lui-même déjà soucieux de l'environnement. (Les promoteurs de certains programmes prônant un style de conduite plus souple affirment parvenir en pratique à des réductions de 10 à 15% de la consommation). Les recherches ont montré que les conducteurs peuvent influencer sur la consommation de carburant de leurs véhicules en vérifiant périodiquement la pression de leurs pneumatiques ; la consommation peut être réduite d'au moins 1% lorsque les pneumatiques sont maintenus à la pression adéquate.

**Tableau 3.4. Effet du style de conduite sur la consommation de carburant et sur les émissions.**  
Référence pour la comparaison : Style de conduite défensif

Style de conduite	“Aggressif” (variation en %)	“Nouveau style” (variation en %)	Conduite en douceur (“egg”) (variation en %)
Vitesse moyenne	+3	+2	-10
Dynamique de conduite	+80	-8	-15
Régime moyen du moteur	+20	-7	+1
Consommation de carburant	+34	-5	<1
CO <sub>2</sub>	+30	-6	+1
CO	+750	+78	+4
HC	+280	+31	+22
NO <sub>x</sub>	+91	+7	-18
Particules	+69	-32	-25

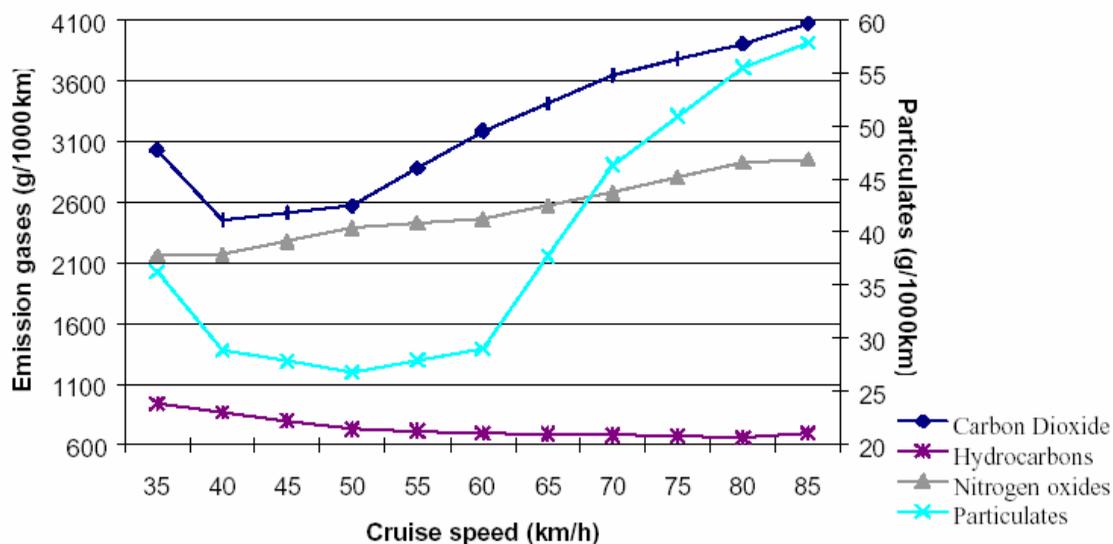
Source : Gense (2000).

### ***Incidence des conditions de circulation sur la consommation de carburant et sur les émissions***

La consommation de carburant et les émissions de CO<sub>2</sub> et d’autres polluants sont fortement affectées par les conditions de circulation (voir figure 3.3). Les embouteillages et la succession d’arrêts et de démarrages caractéristiques de la conduite dans les grandes villes ont pour effet d’accroître sensiblement les niveaux de la consommation et des émissions par véhicule-kilomètre parcouru (en général, une multiplication par trois lorsque les vitesses moyennes des véhicules sont de l’ordre de 10 à 15 kilomètres/heure). La consommation et les émissions de CO<sub>2</sub> sont en règle générale réduites lorsque le trafic s’écoule à des vitesses constantes de l’ordre de 40 à 50 km/h. Comme le montre également la figure 3.3, les émissions de particules calculées par véhicule-kilomètre sont fortement réduites lorsque la vitesse de croisière du véhicule se situe entre 40 et 60 kilomètres/heure.

Ces résultats donnent à penser que des gains de consommation et des réductions des émissions de CO<sub>2</sub> calculées par véhicule-kilomètre pourraient être obtenues par la gestion des flux de circulation et par des mesures visant à réduire la succession d’arrêts et de démarrages associée aux niveaux élevés de congestion.

Figure 3.3. Émissions de polluants atmosphériques en fonction de la vitesse de déplacement



Légende :

Émissions de gaz (g/1000 km), particules (g/1000 km), vitesse de croisière (km/h)  
Dioxyde de carbone, hydrocarbures, oxydes d'azote, particules

Source : Ward (1998).

## Évolution de la consommation de carburant des différents véhicules

### Moteurs à essence

La plupart des mesures qui, au cours des 20 dernières années, ont amélioré le rendement énergétique des véhicules automobiles ont résulté d'améliorations dans la conception fondamentale du moteur ; on peut citer, dans ce contexte, l'utilisation de matériaux à faible coefficient de frottement, l'optimisation de la configuration de la chambre de combustion et des orifices d'admission et d'échappement. Pour ce qui concerne les véhicules à essence, le remplacement du carburateur par un dispositif d'injection du carburant à contrôle électronique a permis une commande beaucoup plus précise du mélange. L'introduction sur une grande échelle de la technologie multi-soupapes a également contribué à une amélioration sensible du rendement de base du moteur. En revanche, l'introduction des convertisseurs catalytiques a eu pour effet d'accroître légèrement la consommation de carburant.

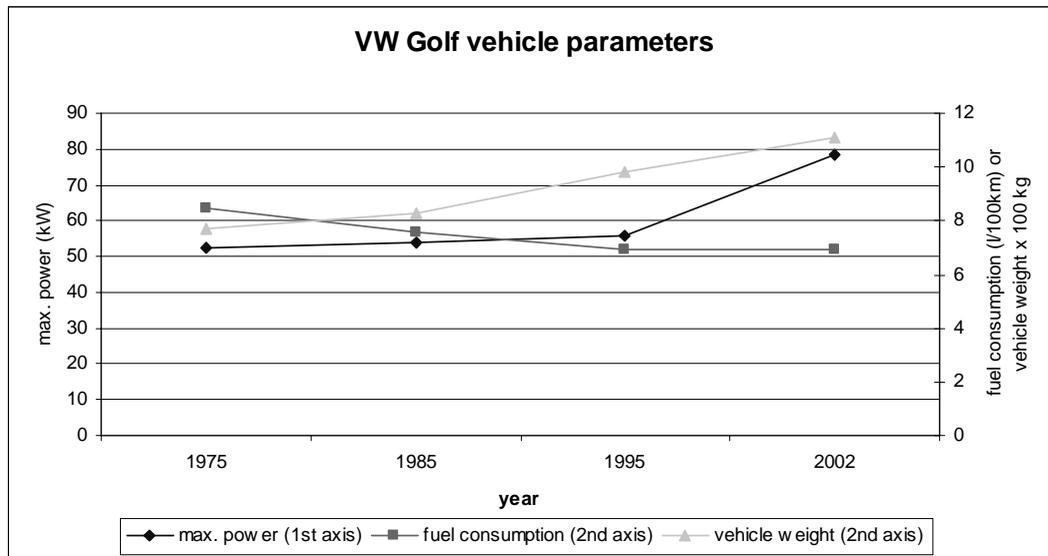
Comme on l'a indiqué ci-dessus, les améliorations du rendement du moteur ont contribué à réduire la consommation des véhicules pris individuellement. Ainsi, la consommation de la VW Golf de 2002 est de 20% inférieure à celle du modèle de 1975 (voir figure 3.4). On notera que la consommation a pu être réduite malgré une puissance accrue et une augmentation de 50% du poids.

### Moteurs diesel

De nouvelles améliorations ont été apportées aux véhicules légers à moteur diesel, qui sont déjà plus économes en carburant et émettent moins de CO<sub>2</sub> que leurs équivalents à essence. Ces progrès sont le résultat de la généralisation, au cours des dix dernières

années, de la technologie de l'injection directe, jusqu'alors seulement disponible pour les véhicules lourds. La tendance la plus récente, dans le domaine de la technologie diesel, concerne l'introduction des systèmes d'injection à contrôle électronique, tels que le système d'injection directe à rampe haute pression et les blocs injecteurs, qui permettent de varier la fréquence et la quantité injectée et rendent également possibles des pressions beaucoup plus élevées.

**Figure 3.4. Poids du véhicule et consommation de carburant, VW Golf**  
*VW Golf - Paramètres du véhicule*

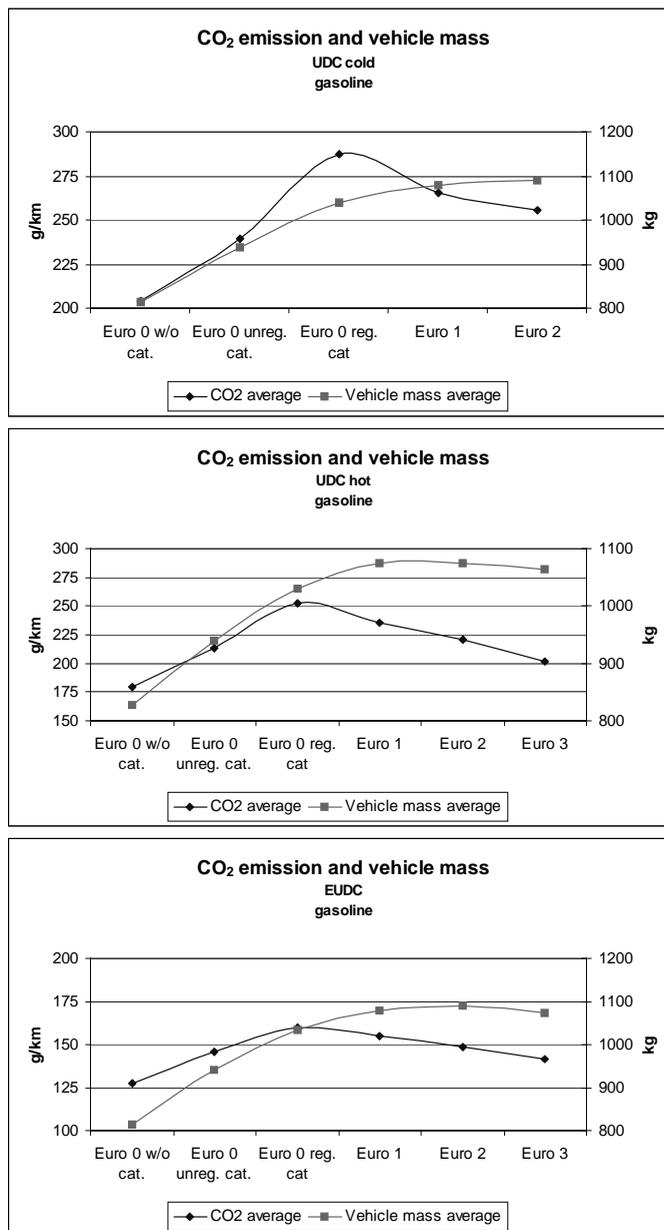


Légende : Puissance maximale (kW), consommation de carburant (l/1000 km) ou poids du véhicule x 100 kg.  
Puissance maximale (axe 1), consommation de carburant (axe 2), poids du véhicule (axe 2).

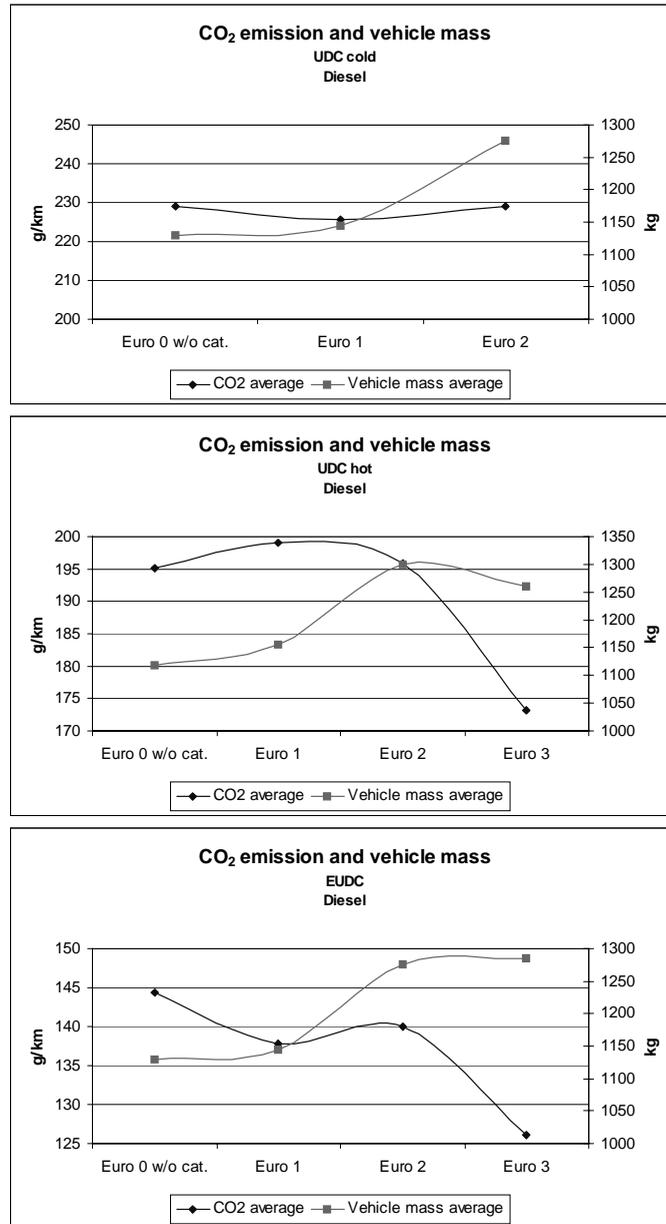
### ***Influence du poids des véhicules***

Les figures 3.5 et 3.6 illustrent la réduction obtenue dans les émissions de CO<sub>2</sub> des voitures particulières dans le cadre de divers cycles d'essai, ainsi que l'augmentation de leur poids. Les diagrammes ci-après sont dérivés du programme « In Use Compliance » (IUC), opérationnel aux Pays-Bas depuis les années 80.

Figure 3.5. Rapport entre l'émission de CO<sub>2</sub> et la masse du véhicule (essence)



Légende : moyenne CO<sub>2</sub>, masse moyenne véhicule.

Figure 3.6. Rapport entre l'émission de CO<sub>2</sub> et la masse du véhicule (diesel)

Légende : moyenne CO<sub>2</sub>, masse moyenne véhicule.

On voit nettement qu'il existait, avant l'introduction des convertisseurs catalytiques et aux premiers temps de leur introduction, une relation étroite entre la masse du véhicule et les émissions de CO<sub>2</sub>. Le développement des catalyseurs et les progrès de leur intégration dans les systèmes de gestion du moteur au cours de la période « Euro 1 », associés à l'amélioration du rendement du moteur, ont permis de « découpler » la masse des émissions de CO<sub>2</sub>. Pour les automobiles à moteur diesel, l'augmentation du poids au fil des années est également perceptible ; néanmoins, les émissions de CO<sub>2</sub> ont dans l'ensemble diminué grâce à une meilleure conception du moteur et à son optimisation.

### *Évolution du poids des véhicules*

On note, depuis le début des années 80, une tendance à l'augmentation du poids des voitures particulières. Cette tendance, observée dans de nombreux pays de l'OCDE, s'est encore accentuée depuis le début des années 90.

Ainsi, le poids de la populaire Volkswagen Golf est passé de 800 kg lorsqu'elle est apparue sur le marché, dans les années 70 (modèle Golf I), à plus de 1 100 kg en 2000 (modèle Golf IV). De même, la Renault 21 a été remplacée au milieu des années 90 par la Renault Laguna I, qui pesait 260 kg de plus, et plus récemment par la Laguna II, elle-même plus lourde de 60 kg. La même tendance se retrouve au Japon. Aux États-Unis, conséquence du développement rapide du marché des SUV, environ 50% des voitures neuves vendues aujourd'hui pèsent de l'ordre de 2 000 kg.

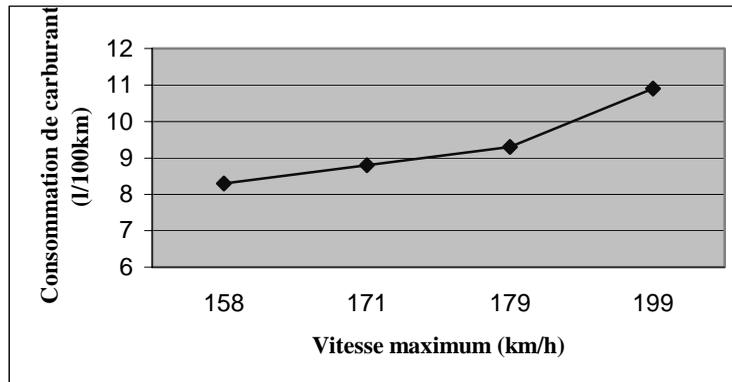
Un certain nombre de facteurs sont intervenus dans cette tendance à l'augmentation du poids et de la puissance des véhicules, parmi lesquels :

- L'amélioration de la sécurité passive des modèles les plus récents, ce qui augmente leur poids.
- L'amélioration du niveau de confort, notamment l'emploi de plus en plus répandu de systèmes de climatisation (spécialement en Europe et au Japon) et la réduction des niveaux de bruit à l'intérieur du véhicule (obtenue principalement par l'addition de matériau d'insonorisation supplémentaire, en particulier pour réduire le bruit aux basses fréquences).
- L'utilisation de moteurs plus puissants.
- L'amélioration constante du niveau général de vie, qui permet aux consommateurs d'acheter et d'entretenir des véhicules plus puissants malgré le niveau plus élevé des dépenses liées à leur utilisation.

### *Influence de la puissance du moteur sur la consommation de carburant*

Les constructeurs automobiles proposent souvent, pour un même modèle, une gamme de motorisations, offrant différentes caractéristiques de puissance, d'accélération et de vitesse de pointe. L'augmentation de la puissance du moteur se traduit habituellement par une consommation accrue de carburant. La figure 3.7 illustre, pour la Peugeot 206, le rapport entre puissance et vitesse maximums du véhicule et sa consommation de carburant.

Figure 3.7. Consommation de carburant, en conditions urbaines, du même modèle (Peugeot 206) en fonction de la vitesse maximum du véhicule (modèles de 60, 75, 88 et 135 chevaux)



## Historique des normes<sup>1</sup>

### *Normes obligatoires*

Les seules normes obligatoires au monde, en matière de consommation de carburant, sont la norme américaine CAFE (Corporate Average Fuel Economy - indice de consommation moyenne des modèles produits par un constructeur), la réglementation californienne concernant les GES, et le Programme japonais Top Runner.

### *États-Unis*

Aux États-Unis, la loi « Energy Policy and Conservation Act », adoptée en décembre 1975 et amendée par une autre loi, la « Motor Vehicle Information and Cost Saving Act », exige de chaque constructeur automobile qu'il détermine les chiffres de la consommation moyenne de carburant pondérés par les ventes pour toutes les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers qu'il produit. Les voitures électriques ou les véhicules hybrides peuvent être inclus dans les calculs portant sur la moyenne du parc, et un crédit est accordé pour les véhicules multicarburant.

Les normes, connues sous le nom d'indice CAFE, sont fondées sur les chiffres combinés ville/autoroute de consommation de carburant. Pour les modèles de l'année 2003, les limites étaient de 27,5 milles au gallon US (mpg), correspondant à 8,6 litres aux 100 km pour les voitures particulières (norme qui n'a pas été modifiée depuis 1990) et de 20,7 mpg (11,4 litres aux 100 km) pour les véhicules utilitaires légers. L'amende en cas de non-respect de la norme a été portée de USD 5,00 à USD 5,50 par mpg pour chaque véhicule dépassant les limites indiquées ci-dessus.

Le Ministère américain du Transport a arrêté en avril 2003 le texte définitif d'une réglementation prévoyant une réduction de la consommation moyenne de carburant des véhicules utilitaires légers, avec un progrès de 1,5 mpg sur trois ans (2005 : 21,0 mpg, 2006 : 21,6 mpg, et 2007 : 22,2 mpg)<sup>2</sup>. La consommation de carburant des voitures particulières, qui doivent respecter la moyenne de 27,5 mpg pour l'ensemble du parc, n'est pas concernée par la nouvelle réglementation.

<sup>1</sup> Des informations plus détaillées sur le développement des normes sont présentées dans l'annexe A.

<sup>2</sup> <http://www.nhtsa.dot.gov/cars/rules/rulings/CAFE/alternativecarburants/background.htm>

Il convient de noter que les véhicules loisir-travail (SUV), qui représentent environ 50% du marché des véhicules légers aux Etats-Unis, sont considérés par la réglementation CAFE comme des camions légers, et qu'ils ne sont donc pas soumis à la limite inférieure fixée pour les voitures particulières mais plutôt à celle fixée pour les véhicules utilitaires légers.

Malgré l'introduction de la réglementation CAFE, la consommation moyenne de carburant des nouveaux véhicules légers a continué d'augmenter. Après avoir atteint son meilleur niveau en 1987 et 1988 avec 22,1 mpg, la consommation moyenne est passée en 2001 à 20,4 mpg (11,5 litres au 100 km) pour les véhicules légers, chiffre le plus mauvais enregistré depuis 1980. Cet état de choses tient en tout premier lieu à la part croissante, sur le marché, de véhicules utilitaires légers moins efficaces, plus lourds et aux performances supérieures.

La Californie a adopté une loi imposant aux constructeurs automobiles de réduire les émissions de gaz à effet de serre des véhicules non commerciaux à partir des modèles de l'année 2009. Cette nouvelle loi ne définit pas de limites ou de cibles spécifiques, mais charge au contraire le California Air Resources Board (CARB) d'élaborer et d'adopter une réglementation avant le 1<sup>er</sup> janvier 2005. Cette réglementation entrera en vigueur un an après, ce qui laissera aux autorités législatives de l'Etat le temps de l'étudier et d'y apporter, le cas échéant, des amendements. L'industrie a déjà, cependant, contesté cette réglementation devant les tribunaux.

### *Japon*

Au Japon, les normes de consommation moyenne de carburant ont été fixées dans le cadre du programme « Top Runner ». En 2010, la consommation moyenne des véhicules légers à moteur à essence devra être inférieure de 21% à son niveau de 1995 (tableau 3.5). Pour les voitures à moteur diesel, la consommation moyenne devra avoir diminué de 13% entre 1995 et 2005

**Tableau 3.5. Économies de carburant visées au Japon**

Véhicules à moteur à essence	Données effectives 1995	Objectif 2010	Amélioration requise
Voiture particulière	12.3 km/l	15.1 km/l	22.8%
Utilitaire (PTC ≤2.5t)	14.4 km/l	16.3 km/l	13.2%
Total	12.6 km/l	15.3 km/l	21.4%
Véhicules à moteur diesel	Données effectives 1995	Objectif 2005	Amélioration requise
Voiture particulière	10.1km/l	11.6km/l	14.9%
Utilitaire (PTC ≤2.5t)	13.8km/l	14.7km/l	6.5%
Total	10.7km/l	12.1km/l	13.1%

Note : Au Japon, le véhicule diesel moyen vendu consomme davantage de carburant que le véhicule à essence moyen, parce que les véhicules diesel sont essentiellement présents dans les catégories de poids supérieures.

### *Accords volontaires*

L'ACEA<sup>3</sup> s'est engagée en 1998, au titre d'un accord volontaire avec la Commission européenne, à réduire les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> des voitures neuves mises sur le marché à 140 g/km d'ici 2008<sup>4</sup>. Des accords du même ordre ont été signés par les constructeurs japonais et coréens (JAMA<sup>5</sup> et KAMA<sup>6</sup>).

Dans le cadre de cet accord, l'Association des constructeurs européens d'automobiles (ACEA) avait adopté, à l'échelle de l'ensemble de l'UE, des objectifs volontaires intermédiaires : il s'agissait de ramener les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> du parc de voitures neuves à 174 g/km en 1999 et à 169 g/km en 2000 (moyenne pour les parcs de véhicules diesel et à essence), alors qu'elles étaient de 185 g/km en 1995.

Ces objectifs intermédiaires ont été quasi atteints. En termes de niveaux absolus, les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> des voitures neuves à moteur à essence (représentant 64% des ventes) sont tombées à 172 g/km en 2001 (contre 177 g/km en 2000), tandis que pour les voitures à moteur diesel (36% des ventes), les émissions ont été ramenées à 153 g/km (au lieu de 157 g/km en 2000)<sup>7</sup>. Depuis 1998, année de l'engagement de l'ACEA sur le CO<sub>2</sub>, les constructeurs européens ont, en moyenne, réduit les émissions de CO<sub>2</sub> de 2,5% par an (2,5% de réduction en 2001). Sur la période 1995-2001, l'ACEA a réduit de 11,4% les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> des voitures neuves, la tendance étant à une accentuation du mouvement de baisse (figure 3.8). Entre 1995 et 2001, les émissions de CO<sub>2</sub> des voitures à essence ont diminué de 8,5% et celles des voitures diesel de 13,1% (ACEA, 2002).

## **Consommation réelle de carburant des différents véhicules**

### *Rôle de la méthode d'essai*

La méthode de mesure appliquée pour obtenir les chiffres officiels de consommation de carburant constitue un point de désaccord. La plupart des chiffres de consommation publiés sont dérivés de l'essai standard de certification du véhicule. Au cours de cet essai, la consommation d'un nouveau véhicule est mesurée dans des conditions normalisées, au moyen d'un dynamomètre. Tous les équipements auxiliaires sont éteints au cours de l'épreuve (par exemple aux États-Unis et au Japon). Les résultats officiels ainsi obtenus permettent des comparaisons entre différents véhicules automobiles et, pour un même véhicule, ils permettent aussi des comparaisons entre les résultats obtenus dans les conditions de l'essai pour des cycles de conduite urbain et extra-urbain.

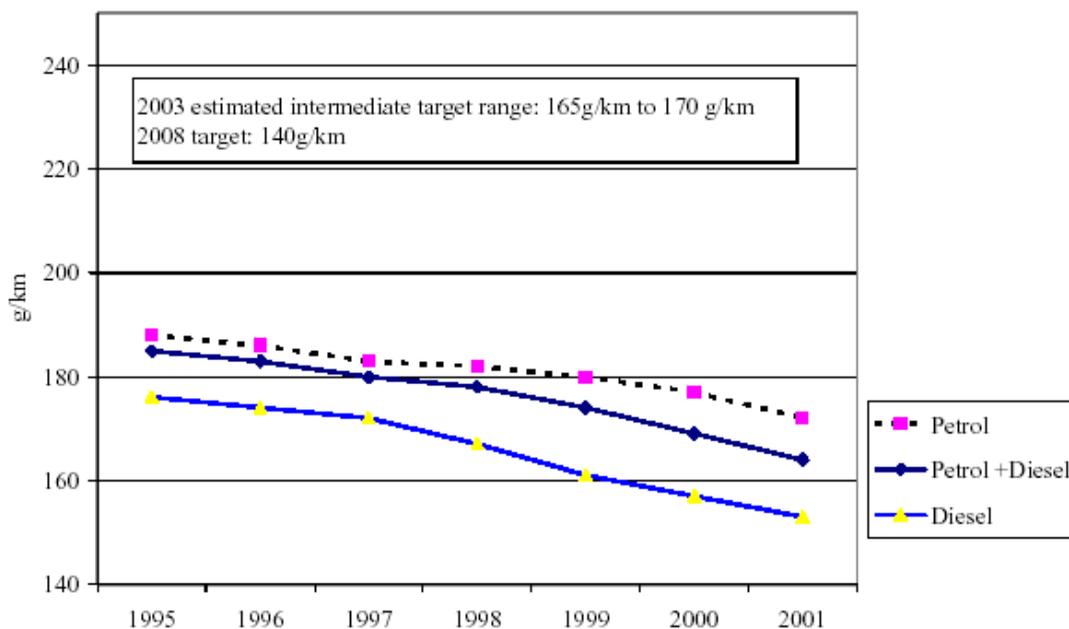
<sup>3</sup> ACEA: Association des Constructeurs Européens d'Automobiles. Les constructeurs membres de l'ACEA sont les suivants : BMW AG, DAF Trucks NV, DaimlerChrysler AG, Fiat Auto Spa, Ford of Europe Inc., General Motors Europe AG, Man Nutzfahrzeuge AG, Porsche AG, PSA Peugeot Citroën, Renault SA, Scania AB, Volkswagen AG, AB Volvo.

<sup>4</sup> Doc. COM/98/0495

<sup>5</sup> Les constructeurs membres de la JAMA (Japan Automobile Manufacturers Association) sont les suivants : Daihatsu, Fuji Heavy Industries Ltd, Fuso, General Motors Japon, Hino, Honda, Isuzu, Kawasaki, Mazda, Mitsubishi Motors, Nissan, Suzuki, Toyota, UD Trucks, Yamaha.

<sup>6</sup> Les constructeurs membres de la KAMA (Korean Automobile Manufacturers Association) sont les suivants : Hyundai, Kia Motors, GM Daewoo, Ssangyong, Renault Samsung.

<sup>7</sup> En 2000, les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> des voitures neuves (diesel et essence) étaient les suivantes : 177 g/km \* 0,64 + 157 g/km \* 0,36 = 169,8 g ; à comparer aux 169 g / km (qui est l'objectif intermédiaire).

Figure 3.8. Émissions spécifiques moyennes de CO<sub>2</sub> : Évolution du parc de l'ACEA dans l'UE

Légende : Estimation, pour 2003, de la fourchette des résultats par rapport à l'objectif intermédiaire : 165 à 170g/km.  
Objectif pour 2008 : 140g/km.

Toutefois, lorsque l'équipement auxiliaire et les accessoires sont utilisés, la consommation de carburant augmente de manière très considérable (pouvant aller de 20 à 100% pour les petits véhicules). De même, la consommation change très sensiblement en fonction des conditions de circulation rencontrées dans la réalité. Un autre motif de préoccupation tient au fait que les essais officiels ne sont pas neutres à l'égard de la technologie. Ainsi, il n'est pas tenu compte de l'intégralité des possibilités du freinage par récupération pour les véhicules électriques ou hybrides, même lorsqu'il est disponible. L'utilisation de la méthode d'essai officielle a pour résultat que les conditions de l'essai sont nettement différentes de celles de la vie réelle. L'une des conséquences supplémentaires est que les résultats officiels ne sont pas non plus neutres à l'égard de la taille du véhicule ; les comparaisons des résultats sont défavorables aux petites voitures à très faible consommation de carburant.

Dans une étude récente, la CEMT (CEMT, 2003) a passé en revue les recherches entreprises à propos du décalage entre les essais officiels et la conduite en conditions réelles au cours des 20 dernières années. Le rapport de la CEMT montre qu'il existe souvent un écart de plus de 20% entre les émissions mesurées au cours des cycles officiels et les émissions sur la route. La recherche a confirmé que cet écart a pour causes principales le caractère imparfait des cycles officiels (qui ne sont pas représentatifs des cycles réels de conduite), l'absence de maintenance des véhicules et les styles de conduite des différents conducteurs (qui peuvent être très éloignés des styles de conduite implicites dans les essais officiels).

Des essais ont été réalisés en France sur la consommation de carburant en conditions d'utilisation réelle d'une petite voiture produite par l'un des grands constructeurs, et connue pour avoir une très faible consommation. Ces essais ont mis en lumière quelques résultats intéressants. Alors que la consommation officielle de carburant, selon les résultats des essais officiels pour cette petite voiture, était de 3 l/100 km, la consom-

mation observée en conditions réelles se situait entre 4.9 et 6 litres aux 100 km (soit entre 1.6 et 2 fois le chiffre « officiel »). Le niveau effectif dépendait de l'accélération nécessaire pour « suivre » le flux des autres véhicules. Cela s'explique principalement par le fait qu'en conditions de conduite réelles, le véhicule d'essai - équipé d'un petit moteur (46kW) par rapport à son poids (830 kg) - devait utiliser une fraction plus élevée de sa puissance pour égaler l'accélération des autres véhicules et se maintenir dans le flux de la circulation, manœuvre fortement consommatrice de carburant. Lorsque la puissance supplémentaire nécessaire pour le fonctionnement des accessoires (éclairage, essuie-glace) était prise en compte, le bilan énergétique de ce véhicule en conditions de conduite réelles n'était pas meilleur que celui d'une voiture plus puissante.

### *Systemes de climatisation des véhicules*

Bien que la consommation énergétique supplémentaire associée à l'utilisation d'un climatiseur et des autres accessoires ne soit pas mesurée dans le cadre de la procédure d'un essai d'homologation, cette consommation d'énergie peut être très importante. Des essais ont été effectués pour déterminer la consommation d'énergie et les émissions de voitures lorsque le climatiseur était en marche. Les résultats détaillés sont présentés au tableau 3.6. L'utilisation d'un climatiseur à plein rendement provoque une augmentation moyenne de 27% de la consommation de carburant. Les émissions de CO et de HC, et celles de particules augmentent de façon encore plus spectaculaire.

**Tableau 3.6. Émissions relatives supplémentaires à plein rendement  
(% supplémentaire par rapport à une mesure sans climatisation)**

Type d'émission	Variation en pourcentage des émissions et de la consommation de carburant due à l'utilisation de la climatisation, par type de route			
	Urbaine	Rurale	Autoroute	Trajet moyen
Consommation de carburant	+29	+30	+24	+27
CO <sub>2</sub>	+28	+25	+21	+25
CO	+796	+616	+478	+605
HC	+260	+271	+114	+207
NO <sub>x</sub>	+76	+17	+17	+31
Particules	+139	+64	+262	+159

Source : Gense (2000).

Ces résultats sont intéressants pour deux raisons, également importantes. Premièrement, les données d'homologation (qui ne tiennent pas compte de l'utilisation de la climatisation et d'autres accessoires) servent de base officielle à l'information du consommateur. Il est certes important que les données de consommation aient pour base des essais normalisés, mais la publicité des performances d'un véhicule présentant sa consommation de carburant sur la base des données officielles (qui ne reflètent pas les conditions de conduite réelles) risque d'induire en erreur. De nombreux consommateurs ne sont pas conscients des limites des essais officiels et du fait que les données officielles ne sont pas représentatives des conditions de conduite réelles. Une évaluation plus honnête des performances du point de vue du consommateur devrait indiquer les résultats à attendre en pratique lorsque les accessoires et la climatisation sont en service, et les conditions de conduite celles qu'il rencontrera effectivement.

Deuxièmement, le fonctionnement des systèmes auxiliaires n'étant pas pris en compte dans les essais normalisés, les signaux que les essais officiels font parvenir aux constructeurs ne sont pas satisfaisants. Ces essais encouragent en effet les constructeurs à mettre au point des véhicules ayant de bonnes performances dans le cadre des cycles d'essai officiels, plutôt que de chercher à mettre sur le marché des voitures dont les performances seront les meilleures possibles dans les conditions de conduite réelles que rencontreront les consommateurs. Si les essais reflétaient les conditions réelles, les constructeurs seraient incités à mettre au point une stratégie optimale d'étalonnage du moteur pour les faibles émissions prenant en compte les charges supplémentaires dues aux systèmes auxiliaires. L'UE envisage actuellement de modifier l'essai officiel afin d'y inclure le fonctionnement du système de climatisation. Aux Etats-Unis, il existe un cycle spécifique visant à évaluer les résultats en cas d'utilisation du climatiseur.

Ces raisons ne sont certes pas nouvelles, mais elles deviennent de plus en plus importantes dans le contexte des économies de carburant et des véhicules à faibles émissions. Leur importance augmente aussi pour les consommateurs, compte tenu des prévisions d'utilisation croissante, à l'avenir, de la climatisation et des accessoires, qui se traduiront par un écart encore plus grand entre les résultats du cycle officiel et ceux des conditions réelles de conduite.

## Potentiel des technologies classiques et des nouvelles technologies

### *Moteurs à essence*

Du CO<sub>2</sub> est inévitablement produit par le processus de combustion des carburants contenant du carbone. Par conséquent, une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> passe impérativement par une réduction de la consommation de carburant.

Les moteurs à essence offrent plusieurs possibilités. L'une de celles-ci consiste à trouver une solution à la perte de rendement à charge partielle, caractéristique des moteurs à essence et provoquée par les pertes par pompage. Étant donné que dans les voitures particulières, ces moteurs fonctionnent la plupart du temps en conditions de charge partielle, il est possible de réduire sensiblement la consommation de carburant en améliorant leur rendement dans ces conditions. Plusieurs solutions<sup>8</sup> peuvent être envisagées à cet égard :

- Soupapes à levée variable et contrôlée : les réductions de consommation de carburant peuvent atteindre 15%.
- Taux de compression variable.
- Injection directe dans les moteurs à mélange stœchiométrique ou pauvre.
- Réduction de la taille des moteurs : en utilisant un moteur de moindre cylindrée, on augmente la charge moyenne sur le moteur, ainsi que son rendement. L'emploi de compresseurs ou de turbocompresseurs augmente la puissance pour la porter à des niveaux acceptables pour les consommateurs. Du point de vue de la commercialisation, toutefois, cette solution n'est pas toujours très appréciée.
- Désactivation de cylindres.
- Alternateur-démarrateur intégré.

<sup>8</sup> Ces diverses possibilités sont analysées de manière plus détaillée à l'annexe 2.

Il est difficile de donner une estimation des réductions que permettraient les différentes solutions. Il est encore impossible de dire avec précision dans quelle mesure certaines de ces solutions (ou des combinaisons de solutions) trouveront des applications pratiques. Par ailleurs, la réduction globale que l'on pourrait obtenir en combinant certaines solutions n'est pas égale à la somme des divers éléments. Il semble néanmoins raisonnable de prévoir, en cas d'adoption de ces solutions, qu'elles se traduiraient par une réduction de la consommation de carburant d'environ 25% au cours de la prochaine décennie. D'autres réductions pourraient être obtenues en diminuant le poids des véhicules et la résistance au roulement.

### ***Moteurs diesel***

Les moteurs diesel modernes à injection directe ont une consommation spécifique de carburant inférieure d'environ 25% à celle des moteurs modernes à essence comparables. Du fait de la différence de densité d'énergie entre les deux carburants - essence et diesel - les moteurs diesel ont un avantage, en MJ/km, d'environ 15%. Par rapport aux moteurs à essence, les émissions correspondantes de CO<sub>2</sub> sont inférieures d'environ 14%. Les moteurs diesel ne sont pas affectés par les pertes par pompage, mais ceux équipés d'un turbocompresseur (ce qui est le cas pour à peu près tous les moteurs diesel modernes) présentent l'inconvénient d'un moins bon remplissage des cylindres aux faibles régimes, parce que la réaction du turbocompresseur est plus lente. D'importantes améliorations sont encore possibles si l'on régule la pression du turbo. On peut toutefois s'attendre à une certaine compensation des pertes de rendement par le recours à des dispositifs de post-traitement des gaz d'échappement, comme les filtres à particules et les catalyseurs de destruction des NO<sub>x</sub>.

La réduction de la taille et les dispositifs marche-arrêt constituent également des solutions envisageables pour les moteurs diesel. Cependant, ces derniers se comportent différemment en conditions de charge partielle et les gains réalisables sont, par conséquent, inférieurs à ceux que l'on obtiendrait avec les moteurs à essence.

### ***Véhicules hybrides***

Un véhicule hybride est un véhicule équipé d'au moins deux sources d'énergie. Les types les plus courants d'hybrides combinent un moteur classique à combustion interne et une source d'énergie supplémentaire. Ces sources supplémentaires peuvent prendre différentes formes : moteurs électriques, moteurs hydrauliques ou volant d'inertie. La plupart des véhicules hybrides mis au point au cours des dernières années sont des véhicules hybrides électriques (HEV), c'est-à-dire qu'ils sont équipés d'un moteur électrique, offrant un rendement plus élevé et une meilleure pilotabilité. Lorsque la puissance du véhicule provient principalement d'un moteur classique, et que s'y ajoute un moteur électrique et une petite quantité d'énergie stockée, on le qualifie d'hybride « léger ».

Les HEV peuvent présenter trois avantages importants par rapport aux véhicules classiques : récupération d'énergie en phase de freinage, arrêt automatique du moteur lorsque le véhicule s'arrête, et optimisation des conditions de fonctionnement du moteur pour permettre l'utilisation du moteur électrique à chaque fois que cela est possible. Par voie de conséquence, la consommation moyenne de carburant des HEV est sensiblement inférieure à celle des véhicules à essence ou diesel équivalents, et ils parviennent aussi plus facilement à respecter les plus rigoureuses des normes d'émissions d'échappement actuellement en vigueur.

L'un des inconvénients des HEV est qu'ils sont plus lourds que les modèles classiques et que leur conception technique est plus complexe, essentiellement parce qu'ils doivent intégrer, outre le moteur classique, un bloc-batterie de taille relativement importante, un moteur électrique et un convertisseur. Les coûts de production en sont donc accrus. Un autre inconvénient tient au fait que, bien que conçus pour produire une puissance d'entraînement maximum équivalente à celle des véhicules classiques, les HEV ne peuvent pas produire cette puissance maximum pendant une longue période, étant donné que les batteries se déchargent. Sur des pentes constamment raides, l'avantage des HEV en termes de consommation moyenne de carburant par rapport aux véhicules classiques est réduit par une chute de la récupération d'énergie en phase de freinage. Les performances des HEV peuvent également être inférieures pour les longs trajets sur autoroute, au cours desquels leur moteur électrique ne peut plus être utilisé. On est cependant parvenu, pour les HEV actuellement disponibles sur le marché, de résoudre ces problèmes par le biais d'une augmentation de la densité énergétique de sortie des systèmes de stockage de l'énergie, d'une amélioration de la production spécifique de puissance du moteur, d'une optimisation de la puissance nette (avec augmentation de la masse) en fonction des applications des véhicules et d'une amélioration de leur conception technique.

### *Véhicules électriques*

Une gamme de modèles de véhicules électriques mis au point au cours des dix dernières années est aujourd'hui disponible sur le marché. Les principaux problèmes sont la faible autonomie, due au poids des batteries, et l'absence d'infrastructures pour leur recharge. Il ne semble pas qu'on puisse prévoir, à court et à moyen termes, l'apparition d'une nouvelle génération de batteries à faible coût et à forte densité d'énergie et de puissance. Compte tenu de leurs performances et de leur coût relativement élevé, une production à grande échelle de véhicules électriques faisant appel à la technologie actuelle semble peu probable.

### *Véhicules à pile à combustible*

#### *Configuration*

Une pile à combustible est un dispositif capable de transformer l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique. Le concept d'une pile à combustible comporte normalement deux modules principaux : un stack de cellules et un système de reformage et de conditionnement du combustible. Le stack est composé d'un ensemble de cellules élémentaires. Le type de système de reformage et de conditionnement dépend du combustible utilisé ; aucun système de reformage et de conditionnement n'est nécessaire lorsque le combustible est l'hydrogène.

Le procédé de la pile à combustible se caractérise par un rendement de conversion élevé et par l'absence à peu près totale d'émissions polluantes. C'est pourquoi les véhicules à pile à combustible sont normalement classés dans la catégorie des véhicules « zéro émission ». Dans les applications automobiles, on préfère souvent les systèmes utilisant de l'hydrogène parce qu'ils ne génèrent aucune émission de CO<sub>2</sub>. L'utilisation de l'hydrogène suppose néanmoins que l'hydrogène soit stocké à bord du véhicule ou produit à partir d'autres combustibles comme l'essence, le gaz naturel ou le méthanol, au moyen d'un reformeur.

Trois configurations de base sont possibles lorsque l'on utilise un système de pile à combustible dans un véhicule automobile (Mourad *et al*, 2001) :

- Le système de pile à combustible est la seule source d'énergie. Dans ce cas, il fournit la totalité de la puissance requise, et fonctionne pour l'essentiel en conditions de charge partielle. Le rendement énergétique de cette approche est supérieur à celui d'un moteur à essence ou diesel. Si toutefois un autre combustible que l'hydrogène est utilisé, le temps de réponse relativement long du reformeur pourrait poser des problèmes lors des changements de charge du moteur.
- Le système de pile à combustible est installé sur un véhicule hybride à configuration en série. Dans ce cas, la pile à combustible produit de l'énergie électrique et fonctionne dans une plage étroite où son rendement est très élevé. Lorsqu'une plus grande puissance est nécessaire, la batterie peut aider la pile à combustible à produire la puissance de sortie nécessaire. Cette configuration permet aussi le freinage par récupération - qui réduit la consommation de carburant - et améliore le temps de réponse, en particulier lorsqu'un reformeur est utilisé ;
- La pile à combustible joue le rôle de « groupe auxiliaire de puissance », fournissant à un véhicule équipé d'une motorisation thermique classique une puissance électrique supplémentaire. Cette approche peut permettre des économies substantielles de carburant dans les véhicules nécessitant beaucoup d'énergie électrique pour les auxiliaires.

### *Choix du combustible*

Constructeurs et pouvoirs publics sont confrontés à un dilemme dans le choix du combustible pour les véhicules à pile à combustible.

En théorie, c'est l'hydrogène qui est préférable. Avec l'hydrogène comme combustible, la conception du système est simple et les émissions et le rendement énergétique sont optimisés, mais les solutions actuelles de stockage de l'hydrogène à bord sont soit coûteuses, soit fortement pénalisantes en termes de poids et de volume (voir ci-dessous). En outre, la mise en place d'un réseau adéquat de distribution du combustible dans de nombreux pays serait très coûteuse. Enfin, l'utilisation généralisée et à grande échelle de l'hydrogène pour le transport exigera une grande prudence et l'adoption de mesures de précaution adéquates pour limiter les pertes et les fuites au cours du processus de production de l'hydrogène (que ce soit dans des usines ou à bord des véhicules) ou pendant le remplissage des réservoirs des véhicules.

Si l'on choisit l'essence plutôt que l'hydrogène, le système de reformage et de conditionnement devient assez compliqué. Un stack de cellules a besoin d'hydrogène pur et, pour que le reformeur puisse produire un hydrogène d'une pureté suffisante, il faut que l'essence ait une teneur en soufre virtuellement nulle. Le rendement d'ensemble de la pile à combustible n'est pas optimal lorsque l'on utilise l'essence, mais la disponibilité de ce carburant constitue un avantage.

Dans le cas du méthanol, les performances sont meilleures qu'avec l'essence, mais l'équipement de conversion reste complexe. Le stockage à bord du véhicule est, en revanche, relativement simple. Le méthanol étant un liquide toxique, il existe un double risque, celui de l'exposition des consommateurs au moment du ravitaillement, et celui de la pollution des eaux souterraines en cas de déversement accidentel. Les problèmes ne

sont pas, en principe, plus compliqués que ceux posés par l'essence mais ils ont conduit, en pratique, à renoncer à utiliser le méthanol dans les applications des piles à combustible pour les véhicules.

Le choix final du combustible le plus approprié pour les véhicules à pile à combustible exige par conséquent l'examen d'une série de questions, parmi lesquelles les perspectives du marché, la sûreté, le coût et la fiabilité des technologies. Il est encore trop tôt, au stade actuel, pour formuler une prévision quant à la technologie susceptible de remporter une part substantielle du marché, ou même pour savoir si plusieurs combustibles pourraient coexister sur le marché.

Du point de vue des performances d'ensemble, le gain que l'on pourrait retirer, en termes de rendement énergétique, de l'utilisation d'une pile à combustible comme source de force motrice pour un véhicule est potentiellement très élevé, spécialement si l'on utilise de l'hydrogène pur. Toutefois, lorsque de l'essence ou du méthanol sont embarqués dans le véhicule et réformés pour produire de l'hydrogène, le rendement énergétique est sensiblement réduit, et correspond à celui d'un moteur diesel moderne, à cause des pertes au cours du reformage du combustible à bord du véhicule.

### *Stockage du combustible*

Lorsque la pile à combustible est alimentée par de l'hydrogène, il faut trouver des solutions pour son stockage à bord du véhicule. Plusieurs systèmes de stockage de l'hydrogène sont disponibles, mais ils sont tous lourds et volumineux. Les principaux d'entre eux sont les suivants :

- Stockage à température ambiante, sous forme comprimée à une pression allant de 200 à 300 bars. On utilise généralement des cylindres d'acier à haute pression, mais des réservoirs en matériaux composites légers renforcés par de l'acier - pouvant résister à de plus fortes pressions, de 600 à 700 bars - sont en cours de mise au point pour les applications automobiles.
- Stockage sous forme liquide. Il permet des volumes de stockage réduits et un poids inférieur, pour une même autonomie du véhicule. Cependant, un quart environ de la teneur en énergie du combustible est perdu dans le processus de liquéfaction de l'hydrogène, et un certain pourcentage d'énergie est perdu par évaporation.
- Stockage de l'hydrogène dans des hydrures métalliques. Cette méthode présente des inconvénients : augmentations sensibles de poids ou, en cas d'utilisation de matériaux légers comme le magnésium, des températures de fonctionnement élevées (environ 300° C) pour la libération de l'hydrogène.
- Stockage dans du graphite. Cette technologie prometteuse est aux premiers stades de son développement. A court terme, du graphite actif en combinaison avec un stockage sous pression pourrait être viable. A long terme, le stockage dans des nanofibres d'un graphite adéquat semblerait prometteur.

### *Type de reformeur*

Deux types de procédés chimiques, le reformage à la vapeur et l'oxydation partielle, sont actuellement en cours d'évaluation. Les deux procédés visent à convertir les combustibles courants à base de carbone en combustibles à base d'hydrogène pouvant être utilisés dans les piles à combustible. La conversion pourrait être entreprise dans des

installations fixes (usine chimique, station service) ou à bord de véhicules utilisant des reformeurs.

Les reformeurs qui équipent actuellement les véhicules prototypes sont à peu près identiques à ceux utilisés dans les installations chimiques, mais leur rendement est nettement inférieur. Le rendement du reformage est meilleur aux températures élevées (300 à 1000°C, selon le type de combustible), mais il faut pour cela un reformeur spécialement conçu. A l'heure actuelle, le « reformage à la vapeur » est souvent utilisé en combinaison avec une « conversion ». La recherche s'intéresse tout particulièrement à une combinaison de reformage à la vapeur et d'oxydation partielle. L'oxydation partielle est un procédé exothermique dans lequel le carbone du combustible réagit avec l'oxygène pour former du monoxyde de carbone.

L'un des inconvénients majeurs des reformeurs (par rapport au stockage de l'hydrogène dans un réservoir) tient à la relative lenteur de leur réponse aux changements de charge (transitoires). Les temps de réponse atteignent parfois plusieurs minutes. L'une des solutions possibles serait d'intégrer une capacité de stockage d'hydrogène à la sortie du reformeur, mais cela augmenterait la complexité et le coût du système. La température élevée nécessaire constitue également un problème. Ces points faibles font que les temps de réponse observés lors du démarrage d'un véhicule équipé d'une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène sont relativement importants par rapport à ceux d'un moteur à essence ou diesel. D'autre part, si on utilise des combustibles à base de carbone, on perd les gains potentiels en termes de rendement énergétique et d'émissions de polluants.

Six types de piles à combustible font actuellement l'objet de travaux de recherche et de développement en vue d'utilisations automobiles. Chacun d'entre eux a ses caractéristiques propres en termes de matériaux d'électrode, d'électrolytes, de membranes et de température de fonctionnement. Pour les automobiles et les véhicules utilitaires, la technologie généralement choisie est celle de la membrane électrolyte en polymère (PEM).

### *Production de véhicules à pile à combustible*

La technologie de la voiture à pile à combustible est encore, aujourd'hui, à un stade expérimental. Plusieurs constructeurs (parmi lesquels Honda, Toyota et DaimlerChrysler) ont produit en 2002 et 2003 un nombre restreint de véhicules de ce type. Bien qu'il ne s'agisse, dans chaque cas, que de quelques unités, les véhicules produits aideront à évaluer les coûts réels associés à une production de masse, de même que les éventuelles contraintes pesant sur la production et les limites d'utilisation. En décembre 2002, les constructeurs automobiles japonais ont mis un petit nombre de véhicules à pile à combustible à la disposition d'agences gouvernementales clés au Japon et aux Etats-Unis. En février 2003, l'agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA) annonçait que la Honda FCX était la première voiture à être certifiée « véhicule américain à pile à combustible à hydrogène zéro émission ».

### *Réduction de la taille et autres questions*

La réduction de la taille et de la puissance des véhicules peut se traduire par une baisse significative de la consommation de carburant. Pour ce qui concerne la réduction de la taille, le premier facteur à prendre en compte est celui du poids. L'utilisation de véhicules lourds augmente la consommation de carburant, particulièrement dans les zones urbaines où les changements très fréquents de vitesse et les accélérations relativement

rapides provoquent de fortes augmentations de la consommation des véhicules les plus lourds.

Le poids de la plupart des automobiles européennes, japonaises et nord-américaines peut être réduit d'au moins 200 à 300 kg par le recours à des technologies classiques et connues sans coût excessif et sans perte de confort ou de sécurité. Lorsqu'un véhicule est plus léger, on peut aussi réduire la puissance de son moteur et donc sa consommation de carburant de plusieurs litres aux 100 km. Cet effet ressort nettement de la figure 3.7, qui fait apparaître l'augmentation de la consommation de carburant d'un même modèle de véhicule équipé de moteurs plus puissants.

Pour un poids donné, d'autres économies de carburant sont possibles par le biais de la réduction de la puissance du moteur, c'est-à-dire en réduisant le rapport puissance/poids. La puissance des moteurs de la plupart des véhicules est largement supérieure à celle dont ils ont besoin pour fonctionner de manière efficace et évoluer normalement dans la circulation.

Il est vrai que des moteurs plus puissants permettent une accélération plus rapide - en particulier avec de lourdes charges - et des vitesses supérieures. Cependant, aux vitesses de circulation normales, les véhicules équipés de moteurs plus puissants consomment beaucoup plus que les mêmes véhicules dotés de moteurs moins puissants. Aux vitesses peu élevées caractéristiques de la circulation urbaine, l'augmentation de la consommation peut être importante. La modification du rapport puissance/poids constitue donc un moyen direct d'influer sur la consommation de carburant d'un véhicule automobile.

La réduction du rapport puissance/poids des véhicules automobiles constituerait l'un des moyens les plus efficaces de réduire leur consommation de carburant, quelle que soit la technologie du moteur. Elle aurait des avantages immédiats en termes de réduction des émissions de polluants, au niveau local comme au niveau global, à mesure que de nouvelles voitures plus économes en carburant remplaceraient les véhicules anciens, consommant davantage. De même, un rapport puissance/poids réduit contribuerait à réduire les émissions sur la durée de vie du véhicule — par rapport aux véhicules à rapport puissance/poids plus élevé qui auraient autrement été achetés. Les avantages possibles connaissent néanmoins des limites.

Les réductions du rapport puissance/poids pourraient résulter d'une démarche volontaire, qui s'appuierait sur l'information du public et l'accord des constructeurs automobiles. Toutefois, le succès de ces approches volontaires dépendrait alors de l'acquisition, par les consommateurs, d'un nombre suffisant de véhicules à faible rapport puissance/poids pour atteindre les résultats recherchés. A l'heure actuelle, et bien que les constructeurs produisent des modèles ayant un faible rapport puissance/poids, les consommateurs continuent d'acheter des véhicules de plus en plus puissants, de plus en plus lourds, et avec des rapports puissance/poids plus élevés.

Si, par ailleurs, on optait pour des mesures plus résolues, la réduction du rapport puissance/poids des véhicules mis sur le marché pourrait être recherchée par le biais de moyens réglementaires, par exemple par la spécification d'une valeur maximum du rapport puissance/poids qui s'appliquerait à différents types et poids de véhicules.

Ces mesures n'exigeraient certes aucun progrès technique, mais elles auraient besoin d'un très fort soutien politique, étant donné que limiter la puissance des véhicules automobiles proposés irait à l'encontre des préférences actuelles du marché, et que ce choix ne ferait à l'évidence pas l'unanimité. A titre transitoire, les pouvoirs publics pourraient envisager une pratique adoptée dans certains pays : limiter le rapport puis-

sance/poids des véhicules que certaines catégories de conducteurs, par exemple ceux de moins de 25 ans, sont autorisées à conduire. Une telle mesure devrait avoir des effets bénéfiques sur le plan de la sécurité comme sur celui de l'environnement.

## Analyses des émissions sur l'ensemble du cycle de vie

### *Carburants de remplacement*

Les carburants de remplacement capables de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> sont ceux contenant moins de carbone et davantage d'hydrogène que l'essence ou le gazole. L'hydrogène, le méthanol, le gaz naturel et le biodiesel, ainsi que l'électricité, sont parmi les carburants offrant un potentiel de réduction sensible des émissions d'échappement de CO<sub>2</sub> des véhicules légers. On pourrait réduire nettement les émissions de CO<sub>2</sub> liées au fonctionnement des véhicules en remplaçant une part substantielle de l'essence consommée par l'un ou l'autre de ces carburants ou par l'électricité. Certains carburants de remplacement émettent également de moindres volumes d'autres gaz à effet de serre comme le méthane (CH<sub>4</sub>) ou l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O).

Utilisé comme carburant, le GPL peut réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du fait de sa moindre teneur en carbone, mais en réalité les avantages potentiels sont en partie compensés par la consommation relativement supérieure de carburant des moteurs au GPL. Les émissions de CO<sub>2</sub> des moteurs au GNC sont inférieures de 15 à 20% à celle des moteurs à essence, mais équivalentes ou supérieures à celles des moteurs diesel. Le GNC étant largement disponible dans certaines régions du monde, il constitue pour certains pays une bonne solution pour la diversification des ressources énergétiques. Pour ce qui concerne les émissions de polluants atmosphériques réglementés, on s'attend à ce que les véhicules au GNC et au GPL aient des niveaux d'émission très semblables à ceux des nouveaux véhicules à essence à très faibles émissions. Dans le secteur des polluants non réglementés, comme les hydrocarbures aromatiques, les carburants gazeux ont un avantage considérable par rapport à l'essence.

Les carburants renouvelables, et en particulier les biocarburants, constituent également des solutions possibles. Sur l'ensemble du cycle de vie, les biocarburants peuvent réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 30 à 60% par rapport aux carburants classiques. Les économies totales de CO<sub>2</sub> dépendent dans une très large mesure de la source de la biomasse et de l'énergie consommée pour les cultures (y compris les pesticides et les engrais) et pour la transformation et la distribution du carburant. La Commission européenne prévoit que 20% du carburant proviendra de la biomasse d'ici 2020.

### *Analyse du puits à la roue*

La production de certains carburants de remplacement est à l'origine d'importantes émissions de gaz à effet de serre, qui contrebalancent au moins partiellement la réduction des émissions d'échappement qu'ils peuvent offrir. Pour mesurer de manière plus précise l'impact sur le volume total des émissions, on procède à une estimation de la variation des émissions mesurée sur le « cycle complet du carburant », y compris les émissions qui se produisent au cours de sa production et de sa distribution, de même que pendant le fonctionnement du véhicule.

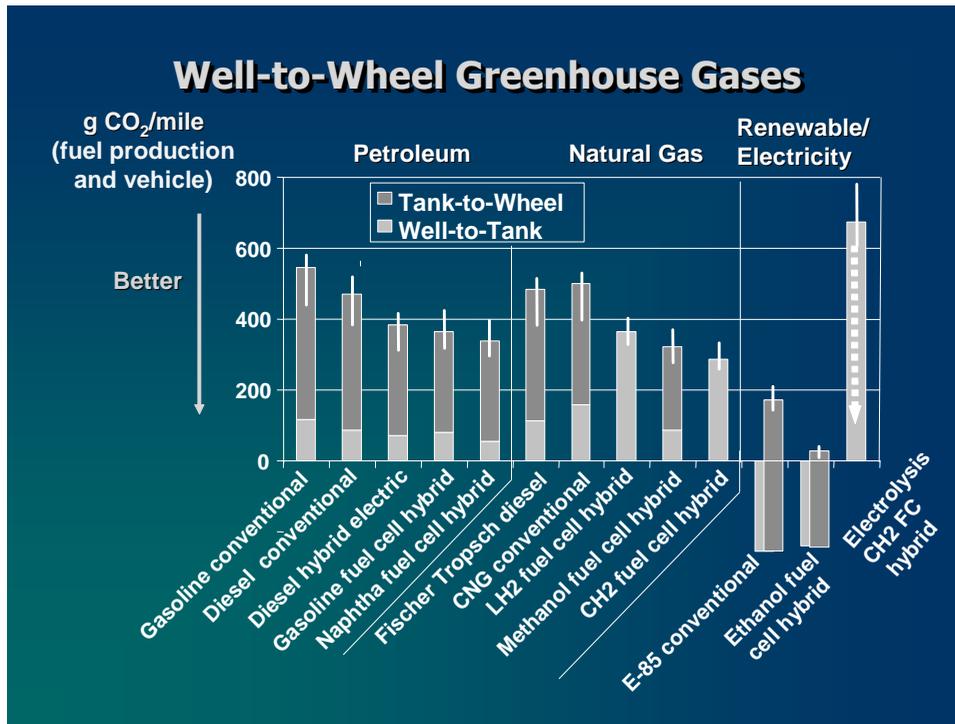
Aux Etats-Unis, une analyse récente (Argonne National Laboratories, 2000) fondée sur le modèle GREET (Greenhouse Gas and Regulated Emissions from Transportation - Gaz à effet de serre et émissions réglementées du secteur du transport) donne à penser que certains carburants alternatifs utilisés à la place de l'essence offrent un potentiel de

réduction significative des émissions directes de GES liées au fonctionnement des véhicules légers. Il s'agit notamment de l'éthanol, du gaz naturel, des carburants issus du pétrole, du biodiesel et de l'électricité. Toutefois, la production de certains de ces carburants est à l'origine d'importantes émissions de GES, qui contrebalanceraient au moins partiellement la réduction attendue des émissions d'échappement. Pour mesurer pleinement l'impact sur les émissions de GES, il est par conséquent nécessaire de mesurer les émissions sur le cycle complet du carburant incluant la production, la distribution et le fonctionnement du véhicule.

Selon les estimations des modèles GREET relatives aux émissions moyennes par mile parcouru sur la durée de vie des polluants retenus comme critères pour les véhicules légers, la plupart des solutions de remplacement à l'essence réduiraient les émissions de polluants des véhicules légers, et parfois de façon très sensible. Comparés à l'essence, la plupart des carburants de remplacement qui seront probablement disponibles sur le marché - à l'exception de l'éthanol et du méthanol - réduiraient de manière significative les émissions de COV. Par contre, seul le biodiesel semble susceptible de réduire sensiblement les émissions de NOx.

Une étude récente, entreprise à la demande de General Motors (GM, 2001) et menée en coopération avec le Argonne Laboratory, a comparé la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre « du puits à la roue » de 13 carburants de remplacement. Les résultats de cette analyse sont résumés à la figure 3.9 pour ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre. La conclusion de cette étude est que les véhicules à pile à combustible fonctionnant à l'essence peu polluante permettent, par rapport aux motorisations et aux carburants classiques utilisés aujourd'hui, des réductions considérables des émissions de GES. Le moteur diesel hybride est très compétitif, et se classe nettement au premier rang parmi les systèmes de moteur/carburant n'utilisant pas de pile à combustible. Pour les véhicules à moteur à combustion interne, le GNC n'offre pas d'avantage significatif par rapport aux carburants classiques pour ces véhicules. Les véhicules à pile à combustible alimentée par du méthanol n'offrent pas d'avantage significatif par rapport aux véhicules à pile à combustible alimentée par de l'essence. Les carburants issus de sources renouvelables et de l'énergie nucléaire sont ceux qui émettent le moins de gaz à effet de serre.

Figure 3.9. Gaz à effet de serre émis, du puits à la roue, par les carburants de remplacement



Légende : Gaz à effet de serre du puits à la roue.

Grammes de CO<sub>2</sub> par mille (production du carburant et véhicule), essence, gaz naturel, sources renouvelables/électricité, du réservoir à la roue, du puits au réservoir.

Amélioration

Essence classique, diesel classique, diesel hybride électrique, hybride essence/pile à combustible, hybride naphte/pile à combustible, diesel Fisher-Tropsch, GNC classique, hybride LH2/pile à combustible, hybride méthanol/pile à combustible, hybride CH2/pile à combustible, E-85 classique, hybride éthanol/pile à combustible, hybride à électrolyse CH2/pile à combustible.

Source: General Motors Corporation (2001).

En Europe, l'Institut Français du Pétrole a entrepris en 2001 une étude similaire visant à comparer les émissions de CO<sub>2</sub> d'une voiture particulière de taille moyenne alimentée par une série de carburants de remplacement, et dont les résultats sont présentés au tableau 3.7. Les chiffres contenus dans ce tableau doivent seulement être considérés comme indicatifs des émissions du puits à la roue, compte tenu des conditions spécifiques pouvant s'appliquer aux procédés de production des carburants.

Tableau 3.7. Émissions de CO<sub>2</sub> du puits à la roue

Énergie	Origine	Moteur	CO <sub>2</sub> (g/km) du puits au réservoir	CO <sub>2</sub> (g/km) du réservoir à la roue	CO <sub>2</sub> (g/km) du puits à la roue
Hydrogène (comprimé)	Eau (France)	À pile à combustible	60	0	60
Éthanol	Mais	À allumage commandé	111	0-239	111-350
CNG	Gaz naturel	À allumage commandé	15	133	148
Hydrogène (comprimé)	Gaz naturel (Europe)	À pile à combustible	155	0	155
Diesel	Pétrole	À allumage par compression	24	142	166
DME	Gaz naturel	À allumage par compression	45	127	172
GPL	Pétrole et gaz naturel	À allumage commandé	28	154	182
Essence	Pétrole	À allumage commandé	42	174	216
Hydrogène (liquéfié)	Gaz naturel (Europe)	À pile à combustible	251	0	251

Source : Institut français du Pétrole (IFP), 7 novembre 2001 - Congrès Euroforum – Paris.

On considère généralement les véhicules électriques comme des véhicules zéro émission, étant donné qu'ils ne produisent pas d'émissions d'échappement. Toutefois, sur une base « du puits à la roue », seuls ceux utilisant une électricité produite par des méthodes à zéro émission, comme l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne ou l'énergie nucléaire, peuvent effectivement entrer dans la catégorie des véhicules zéro émission. Lorsque l'électricité est produite à partir de charbon, de gaz ou de pétrole, qui sont les sources les plus courantes d'énergie électrique dans les pays de l'OCDE, le bilan du CO<sub>2</sub> n'est pas meilleur, et il est même souvent pire que celui des véhicules à essence ou diesel.

### *Émissions associées à la production et à l'élimination des véhicules*

La consommation totale d'énergie d'un véhicule, depuis sa construction jusqu'à sa mise à la casse, en passant par sa vie utile, se répartit entre le contenu énergétique utilisé pour la propulsion, qui atteint 85%, et les 15% restants, utilisés pour la construction, la maintenance et la mise à la casse du véhicule.

Le processus de fabrication consomme de l'énergie et provoque des émissions de polluants. En Europe, on estime à environ une tonne équivalent pétrole par tonne de véhicule le contenu énergétique moyen nécessaire pour la construction d'un véhicule. Cette valeur intègre toutes les opérations de construction et tous les matériaux utilisés. C'est ainsi que des données publiées par Peugeot (PSA, Rapport 2001) indiquent qu'en 2000, l'énergie utilisée pour la construction de quelque 2,9 millions de véhicules s'élevait à 6 260 GWh. Les émissions correspondantes ont été estimées à 774 000 tonnes de CO<sub>2</sub>, 1 500 tonnes de SO<sub>2</sub>, 900 tonnes de NO<sub>x</sub> et 18 560 tonnes de COV.

Pour ce qui concerne les véhicules à carrosserie en aluminium, le bilan net du CO<sub>2</sub> n'est pas facile à établir. Selon certains, les performances de l'aluminium seraient supérieures à celles de l'acier du fait des possibilités de recyclage, mais cela dépend du degré de recyclage et de la qualité finale de l'aluminium recyclé.

Dans les véhicules hybrides ou électriques, l'utilisation de grands blocs-batterie signifie que l'énergie consommée pour produire la batterie devient une composante encore plus importante de l'énergie totale consommée pour la construction du véhicule, en particulier dans le cas des batteries à base de nickel-métal-hydrure ou des batteries au lithium, dont la production exige encore plus de traitements chimiques et physiques. On ne dispose pas de données suffisantes pour déterminer si la production de véhicules hybrides se traduit par une réduction nette du CO<sub>2</sub> par rapport à celle des véhicules automobiles classiques. La mesure du bilan est rendue plus compliquée par l'impact de l'architecture hybride du véhicule sur la taille du moteur à combustion interne, habituellement beaucoup plus petit que dans un véhicule classique équivalent. Par conséquent, s'il faut davantage d'énergie dans le cas de la technologie des batteries, il faut peut-être moins d'acier ou d'aluminium pour construire le moteur.

Pour ce qui concerne les véhicules à pile à combustible, la fabrication du stack de cellules exige des opérations précises et complexes. Il est trop tôt pour déterminer avec exactitude la quantité d'énergie consommée pour la production commerciale de véhicules à pile à combustible.

Étant donné les types de technologies susceptibles d'être utilisées dans les véhicules à essence et diesel à faibles émissions, les différences dans les émissions sur le cycle de vie pourraient, selon toute vraisemblance, être associées aux différences dans l'utilisation de métaux précieux pour les catalyseurs d'échappement. En règle générale, ces catalyseurs utilisent des combinaisons de palladium (Pd), de platine (Pt) et de rhodium (Rh) pour oxyder certains polluants (CO, hydrocarbures imbrûlés) et en réduire d'autres (NO<sub>x</sub>). De façon générale, on peut s'attendre à ce que l'évolution vers les LEV induise une augmentation sensible de la consommation de certains de ces métaux, voire de tous. Ainsi, en augmentant par exemple de 10 grammes par véhicule l'utilisation de palladium sur le marché des véhicules légers, la construction de dix millions de véhicules par an ainsi équipés augmenterait la consommation globale de palladium, du moins à court terme, de 100 000 kilos par an. Ce chiffre correspond à peu près à la production annuelle mondiale de palladium en 1995. Cela pourrait limiter la production de véhicules à pile à combustible.

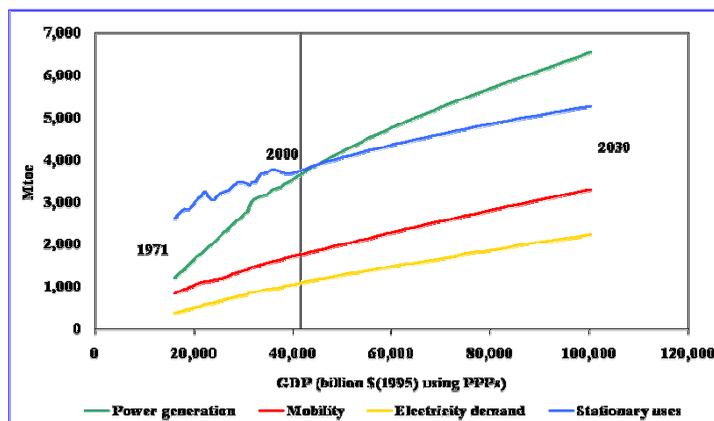
Pour d'autres types de LEV — en particulier ceux conçus pour offrir un rendement énergétique élevé — on observera sans doute des différences similaires dans les émissions sur la durée du cycle de vie en rapport avec les composants et les matériaux spécifiques. L'éventail des possibilités, en ce qui concerne la conception du véhicule, ses composants et ses matériaux, est suffisamment large pour exclure, au stade actuel, tout ensemble complet de comparaisons.

## Perspectives pour 2010-2020

Selon les projections de l'AIE, la demande mondiale d'énergie primaire augmentera de 1.7% par an entre 2000 et 2030. L'augmentation prévue de la demande d'énergie sera satisfaite, à concurrence de plus de 90%, par les combustibles fossiles. Le pétrole conservera son premier rang parmi les sources d'énergie primaire. La demande de pétrole devrait augmenter de 1.6% par an, pour atteindre 120 millions de barils par jour en 2030. Le secteur du transport sera à l'origine de près des trois quarts de l'augmentation de la demande. La conclusion de l'AIE est que le pétrole demeurera le carburant préféré pour le transport routier, maritime et aérien.

La figure 3.10 présente la tendance en matière de consommation d'énergie pour la mobilité (transport) comparée à la production d'énergie, à la demande d'électricité et aux utilisations fixes. Elle montre que l'augmentation de la consommation mondiale d'énergie, tant pour la mobilité que pour les services électriques, sera parallèle à la croissance prévue de la population et du PIB.

Figure 3.10. Tendence en matière de consommation d'énergie pour la mobilité (transport) comparée à la production d'énergie, à la demande d'électricité et aux utilisations fixes



Légende : PIB en milliards d'USD (1995) sur la base de la PPA.  
Production d'électricité, mobilité, demande d'électricité, utilisations fixes.  
Source : AIE.

Depuis un certain nombre d'années, les perspectives mondiales concernant les émissions de CO<sub>2</sub> suscitent des préoccupations croissantes. Les perspectives des futures émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules automobiles dépendent d'une large gamme de facteurs, parmi lesquels :

- La croissance démographique.
- Le développement économique des pays et régions.
- Le prix des différentes formes d'énergie (pétrole brut, hydrogène, GNC, etc.).
- La politique de transport des pouvoirs publics, les politiques mondiales concernant les émissions, l'énergie et les échanges, et les approches adoptées pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub> (objectifs, ou normes et réglementations).
- Le nombre d'automobiles vendues et mises à la casse.

- Les préférences du marché et l'orientation des éventuels changements (par exemple, poursuite de l'augmentation de la puissance et du poids des véhicules vendus, augmentation du nombre de véhicules polyvalents, de 4x4).
- Le type et le nombre d'automobiles en circulation, les distances parcourues par véhicule, et le taux d'occupation des véhicules.
- Les évolutions technologiques (technologies de l'information et de la communication, innovations dans le domaine du transport) susceptibles de modifier la structure de la demande et les modes d'utilisation des véhicules.

Afin de formuler des prévisions relatives aux modes futurs d'utilisation des véhicules, à la consommation d'énergie et aux émissions, on peut élaborer des modèles grâce auxquels on calculera les effets des hypothèses ou des prévisions concernant divers paramètres. On trouvera des exemples de ces calculs et projections dans le rapport de l'AIE « The Road from Kyoto » (AIE, 2000), qui propose également un aperçu général des approches adoptées pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

Malgré les progrès réalisés et l'amélioration du rendement énergétique des véhicules neufs, les émissions totales de CO<sub>2</sub> dues au transport routier sont en augmentation. Les raisons principales en sont le nombre croissant de véhicules, l'augmentation du nombre de véhicules-kilomètres parcourus, l'augmentation du poids et de la puissance du moteur et l'utilisation croissante de systèmes auxiliaires et d'accessoires. Les modèles 2001 de véhicules légers ont à peu près la même consommation moyenne de carburant que les modèles construits 20 ans auparavant (modèles 1981), alors que, leur poids et leurs performances se situant dans la même moyenne qu'en 1981, la consommation moyenne devrait s'être améliorée de plus de 25% (Hellman et Heavenrich, 2001). L'augmentation de la taille et du poids est le résultat d'une évolution du marché : acquisition de voitures particulières plus grandes et plus puissantes, et notamment d'un nombre accru de SUV et de véhicules polyvalents.

On comptait, en 2000, environ 500 millions de voitures particulières dans le monde. Le nombre d'automobiles augmente de plus de 40 millions d'unités chaque année. On prévoit qu'en l'an 2020 près d'un milliard de véhicules seront en circulation dans le monde. Le nombre de véhicules-kilomètres parcourus devrait, d'ici 2020, augmenter de 40% dans les régions de l'OCDE pour l'ensemble de la circulation, et de 32% pour les voitures de tourisme (OCDE, 2001).

En termes absolus, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur du transport ont augmenté, au cours de la période 1990-2000, de 8% en Suède, de 18% en Belgique et d'environ 20% en Australie (BTRE, 2002b). Pour ce qui concerne l'Australie, on prévoit que les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur du transport seront, en 2010, supérieures de 47% à celles de 1990 (AGO, 2003). Le tableau 3.8 présente les prévisions concernant les Pays-Bas.

**Tableau 3.8. Prédiction des émissions de CO<sub>2</sub> pour les Pays-Bas**  
*Million de tonnes*

	1990	1995	2010		2020		2030	
			Scénario de croissance faible	Scénario de croissance forte	Scénario de croissance faible	Scénario de croissance forte	Scénario de croissance faible	Scénario de croissance forte
Voitures particulières	15.2	17.2	18.0	18.6	18.4	20.4	19.2	22.1
Minibus	2.1	2.8	3.8	4.1	4.6	5.5	5.6	6.9
Camions	5.5	5.7	8.8	9.7	12.1	14.7	16.3	20.9
Autobus	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5
Autres	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Total	23.8	26.6	31.5	33.2	36.0	41.4	41.9	50.7

Source : RIVM, 2000. Les calculs prennent en compte les développements économiques internes, l'accord de l'ACEA, et les mesures de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> prises par les pouvoirs publics.

Les plus récentes projections de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2002) prévoient une augmentation constante des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur du transport dans les régions OCDE et non OCDE, le transport routier continuant de représenter 80% ou plus des émissions totales du secteur du transport (voir tableau 3.9).

**Tableau 3.9. Augmentation prévue des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur du transport - Valeurs absolues (millions de tonnes de CO<sub>2</sub>) et augmentations en pourcentage par rapport aux niveaux de 2000<sup>9</sup>**

	2000 Mt	2010 Mt %	2020 Mt %	2030 Mt %
Monde	4814	6010 +25%	7449 +55%	9024 +87%
Région OCDE	3326	3901 +17%	4467 +34%	4980 +50%
Région non OCDE	1488	2109 +42%	2982 +100%	4044 +172%

Source : AIE.

L'objectif de l'action des pouvoirs publics étant de maîtriser l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> et, par la suite, d'en réduire le niveau, il est évident que les projections relatives à l'augmentation de ces émissions constituent une source de vive préoccupation. Ces projections l'indiquent clairement : bien que la technologie soit potentiellement en mesure de réduire de façon significative les émissions de CO<sub>2</sub> par véhicule, les réductions de l'ordre de celles décrites ne suffiront ni à maîtriser suffisamment les augmentations

<sup>9</sup> La projection de l'AIE prend en compte les politiques et les mesures qui avaient été adoptées par les pouvoirs publics à la mi-2002 dans le contexte du changement climatique et de la sécurité énergétique ; elle n'inclut pas les initiatives en cours de discussion avancée mais pas encore mises en vigueur.

prévues ni à garantir la nécessaire réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les progrès technologiques doivent donc être envisagés dans le contexte d'une stratégie générale du transport incluant la gestion de la demande de déplacements.

## Conclusion

La circulation routière constitue une source croissante d'émissions de gaz à effet de serre. Des efforts ont été consacrés à la réduction de la consommation de carburant des véhicules neufs, en particulier par l'amélioration du rendement du moteur et des composants. Les essais standard ont montré que la consommation moyenne de carburant des automobiles suit effectivement une courbe descendante. En chiffres absolus, toutefois, la production de GES due au transport routier ne manifeste pas la même tendance. Les résultats obtenus par l'utilisation de moteurs plus économes en carburant ont été en grande partie masqués par les tendances du marché, qui vont dans le sens de l'acquisition de véhicules plus lourds, plus puissants, et équipés d'accessoires supplémentaires, notamment des climatiseurs. A tout cela viennent s'ajouter les prévisions faisant état d'une augmentation spectaculaire, dans de nombreux pays, du nombre total de véhicules et du nombre de véhicules-kilomètres.

A court terme, les innovations technologiques peuvent réduire encore la consommation moyenne de carburant des voitures prises individuellement et des parcs de véhicules. Les accords volontaires ont démontré qu'ils pouvaient efficacement mettre sur la route une technologie de pointe pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub>. Il est toutefois peu probable que l'on puisse voir se ralentir la croissance globale des émissions de GES du secteur du transport tant que l'on utilisera des carburants à base de carbone. La biomasse et d'autres carburants renouvelables présentent de multiples difficultés qui les empêcheront sans doute d'acquiescer une part substantielle du marché. Il reste à voir si l'utilisation de l'hydrogène réussira à inverser la tendance à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre du secteur du transport.

## References

- ACEA (2002), "Monitoring of ACEA's Commitment on CO<sub>2</sub> Emission Reduction from Passenger Cars – 2001, Final Report", 12 July.
- Agence internationale de l'énergie (AIE) (2000), *The Road from Kyoto: Current CO<sub>2</sub> and Transport Policies in the IEA*, AIE-OCDE, Paris.
- Agence internationale de l'énergie (AIE) (2001), *Saving Oil and Reducing CO<sub>2</sub> Emissions in Transport: Options and Strategies*, AIE-OCDE, Paris.
- Agence internationale de l'énergie (AIE) (2002a), *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion 1971-2000 (2002 Edition)*, AIE-OCDE, Paris.
- Agence internationale de l'énergie (AIE) (2002b), *World Energy Outlook (2002 Edition)*, AIE-OCDE, Paris.

- AGO (2002), “Australia’s Third National Communication on Climate Change”, Australia Greenhouse Office, Canberra.  
<http://www.greenhouse.gov.au/international/third-comm/index.html>
- Argonne National Laboratories, “Greenhouse Gases and Regulated Emissions from Transportation (GREET) 1.5a – Transportation Fuel-Cycle Model, January 2000”.  
<http://www.transportation.anl.gov/ttrdc/greet/index.html>.
- BTRE (2002), “Greenhouse Policy Options for Transport Report 105”, Bureau of Transport and Regional Economics, Department of Transport and Regional Services, Canberra, May.
- Delsey, J. (1997), “Véhicules routiers : les évolutions actuelles sont-elles irréversibles ?” INRETS –Synthesis n° 59, pp.25-36.
- ECMT (2003), “On-road CO<sub>2</sub> Emissions, Gap between Tested Fuel Economy and In-use Fuel Economy”.
- General Motors (2001), “Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – North American Analysis”  
<http://www.transportation.anl.gov>
- Gense, N.L.J. (2000), “Driving Style, Fuel Consumption and Tail Pipe Emissions”, TNO Automotive, March, Delft.
- Hellman, K.H. and R.M. Heavenrich (2001), “Light Duty Automotive Technology and Fuel Economy Trends, 1975-2001”, U.S. Environmental Protection Agency, Report no. EPA420-R-01-008, September.
- Intergovernmental Panel for Climate Change IPCC (2002). *Climate Change 2001: Synthesis Report*. IPCC, Geneva, <http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm>.
- Mourad, S. *et al.* (2001), “Quickscan elektrische, hybride en brandstofcel voertuigen”, TNO Report 01.OR.VM.077.1/SAM, Delft.
- OCDE (2001), *Les Perspectives de l’environnement de l’OCDE*, OECD, Paris.
- RIVM (2000), *Traffic and Transportation in the National Environmental Outlook 5*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid & Milieu (RIVM), Bilthoven, The Netherlands.
- Ward, H., S. Robertson and R. Allsop (1998), “Managing Speeds of Traffic on European Roads: Non-accident External and Internal Effects of Vehicle Use and How These Depend on Speed”. Paper presented at Workshop II on Speed Management, Proceedings, 9<sup>th</sup> International Conference on Road Safety in Europe, Cologne, Germany.

## Chapitre 4

# FACTEURS INFLUANT SUR LA GÉNÉRALISATION DE L'UTILISATION DES VÉHICULES À FAIBLES ÉMISSIONS

**Résumé.** Ce chapitre examine les facteurs clés et les actions de soutien nécessaires liés à une utilisation à grande échelle des véhicules à faibles émissions, en particulier: les exigences en matière d'infrastructure de production et d'alimentation en carburant, les coûts d'exploitation et les attentes du consommateur.

### Infrastructures nécessaires à l'alimentation en carburant et questions de sécurité

#### *Infrastructure de production de carburant*

Une généralisation de la production et de l'utilisation des véhicules à faibles émissions (LEV) alimentés par de l'essence ou du diesel n'exigerait que des investissements minimes à consacrer à de nouvelles infrastructures de production et de distribution du carburant. Il s'agirait, pour l'essentiel, d'investissements destinés à développer les capacités ou les installations de raffinage nécessaires pour produire des carburants (essence ou diesel) à teneur en soufre extrêmement faible, conformément aux exigences.

Il existe une tendance internationale, observable dans de nombreux pays avancés, à l'adoption de carburant à teneur « zéro » (10ppm) en soufre vers la fin de la décennie en cours. La plus grande partie des investissements supplémentaires requis pour la production de ces carburants est affectée à de nouvelles capacités de raffinage. Le procédé est connu, et déjà appliqué dans quelques raffineries. Ainsi, l'énergie supplémentaire nécessaire pour produire du gazole contenant 10 ppm de soufre représente de 2 à 5% de l'énergie requise pour la production du gazole actuel contenant 350 ppm de soufre. La Commission européenne a toutefois conclu que l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> des raffineries résultant de la production de carburants à teneur en soufre de 10ppm était contrebalancée de façon significative par la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> rendue possible par l'adoption de technologies des véhicules réduisant la consommation de carburant (Commission européenne, 2001).

Le gazole représente à l'heure actuelle près de 50% du total des carburants consommés en Europe. Augmenter la production de gazole exigerait que l'on change les procédés de raffinage, et la modification de la structure des molécules d'hydrocarbures exige aussi davantage d'énergie. Une augmentation de 10% de la proportion de gazole se traduirait par une augmentation de 8,5 à 9,5% de la proportion de brut pour les besoins en énergie de la raffinerie (d'après Shell International Petroleum Company - ImechE - 1992). Certains autres modèles indiquent des valeurs différentes selon le procédé, la

qualité du pétrole brut, etc., mais les coûts demeurent régulièrement plus élevés lorsque la proportion de gazole dépasse les 50%.

Pour ce qui concerne les *carburants de remplacement*, l'ampleur et le coût des investissements requis pour la construction ou l'extension d'infrastructures de production, de stockage et de distribution seront probablement variables. La facilité d'adaptation de l'infrastructure de distribution de l'essence, que l'on pourrait utiliser pour le gazole ou les carburants à base d'alcool, minimiserait le montant des investissements requis dans l'infrastructure de distribution pour soutenir un remplacement généralisé de l'essence par ces carburants. Certaines modifications sont nécessaires pour la manipulation des carburants à base d'alcool (en particulier le méthanol).

En outre, le soutien d'une utilisation généralisée des carburants à base d'alcool suppose un important développement des installations de production, alors que la capacité de raffinage existante serait facile à adapter en vue d'une augmentation de la production de gazole.

Les infrastructures destinées aux *véhicules électriques* comprendraient celles nécessaires au développement des capacités de production et de transmission, ainsi que l'installation de dispositifs de recharge auprès des consommateurs et dans un grand nombre de sites de travail, d'installations publiques ou de points de vente au détail.

Une utilisation accrue du *gaz naturel* comme carburant impliquerait un important développement des installations de production et des gazoducs, ainsi que des investissements considérables pour modifier les stations-service afin qu'elles puissent distribuer du gaz naturel. La mise sous pression des systèmes de stockage et de distribution que suppose une large utilisation du gaz naturel comprimé ou du gaz de pétrole liquéfié augmenterait encore les dépenses d'équipement nécessaires pour ces carburants. Le transport à longue distance du gaz naturel est plus coûteux que celui du pétrole. Il existe en effet un risque de fuites dans les gazoducs acheminant le gaz naturel, et il faut recomprimer le gaz le long des gazoducs. Le transport par voie maritime sous forme de gaz naturel liquéfié (GNL) entraîne un coût énergétique supplémentaire, puisqu'il faut liquéfier le gaz.

Les *biocarburants* offrent d'intéressantes possibilités, étant donné qu'ils peuvent être mélangés à de l'essence ou du gazole et que l'on peut également les utiliser directement dans des véhicules classiques. Il est toutefois important de prendre en considération les superficies nécessaires pour obtenir de grandes quantités de biocarburants. Selon l'origine de la biomasse, la production de trois tonnes d'éthanol (équivalent à 1,8 tonne d'essence) ou de trois tonnes de diester (équivalent à 3 tonnes de gazole) exige 10 000 m<sup>2</sup> de terres. Pour satisfaire tous les besoins en carburant de la France, par exemple, il faudrait 25% de la superficie totale du pays, et un déplacement des activités agricoles normales, si 100% du carburant devait provenir de la biomasse. D'autres méthodes de production de l'éthanol ou du méthanol sont possibles, à partir de la cellulose par exemple, mais elles semblent relativement coûteuses.

Il est également possible de produire de l'essence ou du gazole à partir du gaz naturel. Ce procédé, connu sous le nom de procédé Fisher-Tropsch, exige de très importantes dépenses d'équipement, et a une très forte intensité énergétique, puisqu'il consomme environ 30% de la teneur énergétique initiale du gaz.

L'*hydrogène* peut être obtenu principalement par la transformation du gaz naturel, du charbon ou du pétrole, ou par électrolyse de l'eau. Une fois produit, l'hydrogène doit être

transporté jusqu'aux stations-service sous forme d'hydrogène comprimé ou liquéfié. La liquéfaction exige une énergie supplémentaire considérable.

### ***Besoins en infrastructure de distribution***

Pour qu'une fraction significative de la consommation d'essence puisse être remplacée par celle d'un carburant alternatif quelconque, il faudrait une infrastructure omniprésente de vente au détail ou d'une autre forme de distribution, comparable à celle qu'offrent aujourd'hui les réseaux établis de stations de vente au détail d'essence et de gazole (elles sont plus de 100 000 rien qu'aux Etats-Unis). La commodité du ravitaillement devrait, dans le cas d'un combustible de remplacement, être proche de celle qu'offrent aujourd'hui les stations de vente au détail d'essence, avec un vaste choix d'emplacements, la sécurité, la rapidité et la facilité du ravitaillement, des horaires d'ouverture commodes, la disponibilité de services annexes comme les réparations du véhicule, et des possibilités de libre-service (éventuellement associé à un apprentissage par le conducteur des procédures assurant la sécurité du ravitaillement). Atteindre ce niveau de commodité supposerait que des installations de ravitaillement soient disponibles en de multiples endroits, y compris dans les zones urbaines fortement développées et les sites récréatifs éloignés, ainsi qu'en des points répartis le long des autoroutes dans les régions à faible densité de population.

Dans nombre de pays, la mise en place de l'actuelle infrastructure de distribution de carburant s'est étalée sur près d'un siècle, et beaucoup d'installations ont été construites à une époque où les terrains étaient aisément disponibles, et où on se préoccupait moins des éventuels effets sur l'environnement. Les investissements qu'il faudrait consacrer à de nouvelles infrastructures ou à des infrastructures de remplacement auraient à faire face à des limitations bien plus fortes en termes de terrains disponibles dans les zones développées ou à proximité, ainsi qu'à des réglementations précises concernant leur conception et leur fonctionnement, dont le but est de garantir la sécurité et la santé des utilisateurs et de protéger l'environnement. Le choix du lieu d'implantation des installations de production, de stockage et de vente au détail des carburants fera probablement l'objet de procédures publiques plus longues que par le passé, tandis que les réglementations applicables, les permissions et les autorisations pourraient relever de la responsabilité de diverses agences, aux niveaux fédéral, de l'Etat ou local. Les préoccupations concernant la sécurité, la santé et l'environnement, et la perception qu'a le public de la manière dont la conception des installations et leurs procédures opérationnelles répondent à ces préoccupations, peuvent avoir une très forte incidence sur l'acceptabilité de nouvelles installations, leur implantation et leurs coûts finaux.

Ces obstacles potentiels à la mise en place d'une infrastructure d'alimentation en carburant totalement nouvelle étant admis, le scénario le plus probable concernant la création d'un réseau étendu de distribution pour certains carburants de remplacement consisterait peut-être à installer, pour ces carburants, des capacités de stockage et des équipements de livraison distincts dans les stations-service existantes fournissant de l'essence et du gazole. Pour les carburants tels que l'éthanol et le diester, à l'état liquide à température ambiante, des modifications adéquates permettraient peut-être de convertir certaines installations existantes (réservoirs et pompes à essence) en vue de leur utilisation. Par contre, les caractéristiques physiques d'autres carburants de remplacement, comme le gaz naturel ou l'hydrogène, rendent nécessaires des capacités spécialisées, telles que des réservoirs sous pression et des systèmes de transfert à couplage direct vers les réservoirs de carburant des véhicules, et pourraient exiger la

construction de nouvelles installations spécialisées d'alimentation pour fournir ces capacités.

### ***Demandes de production de carburant et de matières premières***

Outre les investissements nécessaires pour les nouvelles infrastructures et les coûts plus élevés de production de certains carburants de remplacement, il existe d'autres obstacles potentiels à l'utilisation de ces carburants et à une généralisation de leur emploi à la place de l'essence et du gazole. Il s'agit notamment des difficultés auxquelles pourraient se heurter l'augmentation de la production de carburants de remplacement qui ne sont actuellement disponibles que sur une petite échelle, l'extension des réseaux de distribution et de vente au détail pour parvenir à une disponibilité généralisée égale à celle de l'essence (ou au moins s'en approchant), et l'extraction ou l'importation de quantités accrues des matières premières nécessaires à la production de certains de ces carburants.

L'ampleur de la production totale d'essence est telle que la production de carburant de remplacement destiné à remplacer même un modeste pourcentage de l'essence consommée exigerait que l'on consacre des investissements considérables au financement du développement des capacités de raffinage ou de production, nécessaires pour la plupart des carburants, ainsi que celui des infrastructures de stockage et de distribution, et d'alimentation en carburant au détail ou auprès des consommateurs.

### ***Dangers liés à la production et à la distribution de carburant***

Les carburants classiques, comme les carburants de remplacement, présentent des dangers pour la sécurité, pour la santé et pour l'environnement. Il s'agit notamment des risques d'incendie ou d'explosion lors de la transformation et de la distribution du carburant, ainsi que des dangers potentiels que représente, pour la santé humaine, le contact répété ou prolongé avec les carburants ou leurs vapeurs. Pour ce qui concerne l'environnement, les dommages potentiels découlant de la production, du stockage ou de la distribution et associés au fonctionnement et au ravitaillement normaux des véhicules, ou de déversements accidentels pouvant se produire en n'importe quel point du cycle de production, de distribution et d'utilisation du carburant, constituent aussi un important motif de préoccupation.

Même si ces risques peuvent être maîtrisés, et si l'on peut démontrer qu'aucun de ces carburants susceptibles de remplacer l'essence et le gazole n'est intrinsèquement plus dangereux que les carburants classiques auxquels il se substituerait, il faut :

- Prendre en compte les paramètres physiques, chimiques et de toxicité spécifiques du carburant alternative.
- Évaluer les risques pour les travailleurs des secteurs de la production et de la distribution.
- Évaluer les dangers pour les propriétaires des véhicules utilisant ces carburants.

Il conviendrait par conséquent d'élaborer des normes spécifiques de sécurité, parallèlement à la mise au point des nouvelles technologies, afin d'apporter une réponse aux questions ci-dessus et de créer un cadre opérationnel dans lequel les risques peuvent être réduits et ramenés au moins au même niveau que ceux que présentent les véhicules et carburants classiques.

## Coûts des infrastructures, de production et d'utilisation

### *Principaux éléments des coûts des carburants de remplacement*

La substitution des carburants de remplacement à l'essence et au gazole entraîne des coûts supplémentaires, que l'on peut répartir en trois catégories :

- Premièrement, développer l'utilisation de la plupart des carburants de remplacement exige que l'on augmente les dépenses d'équipement pour les installations destinées à la production ou à l'extraction des matières premières, à leur raffinage et à leur distribution.
- Deuxièmement, le coût de production des carburants de remplacement eux-mêmes peut être supérieur à celui de l'essence ou du gazole, et induire une hausse des coûts de fonctionnement d'un véhicule mesuré sur la base du véhicule-kilomètre.
- Troisièmement, la production de véhicules pouvant être alimentés par des carburants de remplacement peut être plus coûteuse que celle des véhicules classiques à moteur à essence ou diesel ; on peut citer, à cet égard, la nécessité de réservoirs à haute pression pour le GNC, le GPL ou l'hydrogène.

### *Coûts des infrastructures d'alimentation en carburant*

Les dépenses d'équipement supplémentaires destinées aux infrastructures d'alimentation varieront sans doute considérablement selon les différents carburants de remplacement. A l'un des extrêmes, l'infrastructure actuelle peut être très facilement adaptée pour l'utilisation des carburants à base d'alcool (éthanol ou méthanol), ce qui n'entraînerait que de très faibles coûts supplémentaires. Bien que les modifications nécessaires pour la manutention des carburants à base d'alcool (en particulier le méthanol) exigent des investissements d'infrastructure d'alimentation supérieurs à ceux requis pour le gazole, ces investissements demeurent relativement modestes si on les compare à ceux qu'exigent la plupart des autres carburants. Pour les véhicules électriques, il existe déjà un réseau de distribution, et les seuls coûts sont ceux des installations de recharge à mettre en place auprès des consommateurs et dans des installations publiques ou des points de vente au détail. L'expérience acquise en Europe montre que les coûts sont modestes si l'on utilise une méthode de recharge lente (EUR 100-200 par installation de recharge - durée de chargement : six heures par voiture). Si l'on utilise, au contraire, une méthode de recharge rapide, les coûts sont sensiblement plus élevés (EUR 10 000 par installation - durée de chargement : 30 minutes par voiture).

A l'extrême opposé, pour le GNC, le GPL ou l'hydrogène, il faudrait mettre en place, à grande échelle, des systèmes de stockage sous pression et de distribution du carburant qui exigeraient de nouveaux investissements considérables. Les coûts dépendent de la nature (privée ou publique) des installations et de la méthode de recharge. Pour une installation publique capable de ravitailler cent véhicules par jour, les estimations suivantes donnent une indication des coûts : EUR 45 000 pour une installation de GPL, EUR 300 000 pour une installation de GNC et EUR 450 000 pour les carburants cryogéniques (GNL ou hydrogène).

### *Coûts de production du carburant*

L'administration américaine responsable de l'information sur l'énergie a fait état, dans sa publication « Annual Energy Outlook 2000 » (tableau 4.1.), de quelques coûts de production du carburant. Les résultats montrent que, comparés à l'essence sur la base du contenu énergétique, le GNC et le gazole issu du pétrole devraient rester les moins coûteux à produire. En revanche, selon les projections, les coûts de production des carburants à base d'alcool (méthanol et éthanol), du GPL et du biodiesel dépasseraient sensiblement ceux de l'essence. Les projections relatives aux futurs coûts de production et de transport de l'électricité indiquent que l'électricité serait de loin la plus chère des solutions de remplacement à l'essence comme source d'énergie pour les véhicules légers.

En Europe, les résultats sont assez semblables, mais ils dépendent du niveau technique des installations de raffinage, de la disponibilité de carburants sur le marché, et de la teneur limite en soufre du gazole. Les coûts de production de l'essence et du gazole (à très faible teneur en soufre) ne sont pas très différents en Europe parce que le marché des voitures particulières à moteur diesel y est important, et vient s'ajouter à celui des véhicules diesel commerciaux. Comme on l'a déjà indiqué, le gazole représente près de 50% du total des carburants consommés en Europe par le secteur du transport. Une augmentation de la production de gazole, pour répondre à une demande potentiellement plus élevée de moteurs diesel, exigerait une modification du processus de raffinage, et les coûts sont systématiquement plus élevés lorsque la proportion de gazole dépasse les 50% de la production finale de carburant.

**Tableau 4.1. U.S. Energy Information Administration, prévisions des prix des carburants pour 2010**

Carburant	Matière première	Coût du carburant par gallon (2000, USD, taxes non comprises)	Coût du carburant par million de Btu (2000, USD, taxes non comprises)
Gazole issu du pétrole	Pétrole	0.77	5.95
GNC	Gaz naturel	--	6.52
Biodiesel (B20)	Pétrole/colza	0.93	7.40
Essence	Pétrole	0.88	7.64
Méthanol (M85)	Gaz naturel	0.61	9.22
GNL	Gaz naturel	0.69	9.46
GPL	Pétrole/gaz naturel	0.92	10.94
Electricité	Mélange prévu aux US	--	13.47
Éthanol (E85)	Mais	1.26	15.37

### *Coûts de construction et de maintenance des véhicules*

Les véhicules utilisant des carburants liquides à température ambiante non issus du pétrole à (éthanol, biodiesel) et équipés de moteurs à combustion interne et de transmissions mécaniques classiques ont un coût de construction semblable à celui des véhicules à moteurs à essence ou diesel. Par contre, le coût de production des véhicules utilisant des carburants gazeux ou l'électricité et/ou équipés de transmissions non classiques, comme la transmission hybride électrique, est supérieur à celui de véhicules équivalents utilisant des moteurs classiques à essence ou diesel.

Le surcoût est d'environ 10% pour les véhicules au GPL et de 15 à 20% pour les véhicules au GNC, par rapport à un véhicule similaire à moteur à essence ou diesel. Les coûts supplémentaires sont principalement imputables aux réservoirs sous pression et aux dispositifs de commande de sécurité (soupapes de sécurité, capteurs, dispositifs électroniques, etc.) et il est peu probable qu'ils diminuent (la production des réservoirs est déjà aujourd'hui tout à fait importante, et on ne doit pas compter sur une réduction significative du coût qui proviendrait de la croissance du marché). Les coûts des véhicules à moteur classique utilisant de l'hydrogène comprimé comme carburant pourraient être proches de ceux d'un véhicule au GNC, mais on ne dispose d'aucune donnée en la matière.

Pour ce qui concerne les véhicules hybrides, c'est le type d'architecture hybride qui déterminera le coût supplémentaire. Il pourrait être inférieur à 5% avec un système hybride léger (qui atteindra peut-être le stade de la production de masse en 2004-2005), mais supérieur à 30% dans le cas d'un hybride complet (comme la Toyota Prius).

La technologie des véhicules à pile à combustible étant encore au stade expérimental, il est plus difficile d'en évaluer le surcoût, mais les constructeurs automobiles prévoient qu'au stade de la production de masse, il ne devrait pas dépasser plus de 10 à 20% le prix actuel des véhicules à essence ou diesel. Les véhicules à pile à combustible sont toutefois loin d'une production de masse, et le coût estimatif de production des véhicules actuels (environ EUR 150 000 à EUR 300 000 minimum) constitue un obstacle significatif à un essor rapide de cette technologie.

Les constructeurs automobiles cherchent à faire en sorte que le coût de maintenance des véhicules utilisant des carburants de remplacement ou des technologies nouvelles (nouveaux carburants, nouvelles transmissions) se maintienne à un niveau semblable à

celui des véhicules classiques, faute de quoi leur acceptabilité sur le marché sera fortement compromise. C'est ainsi, par exemple, que l'échec commercial des véhicules électriques est dans une certaine mesure la conséquence du coût élevé de maintenance des batteries (résultant de leur durée de vie réduite).

### *Coûts d'exploitation*

Les études de l'AIE ont montré que le coût d'une amélioration graduelle de l'économie de carburant, par unité de pétrole économisée (ou de CO<sub>2</sub> réduite), est en général largement inférieur, pour les véhicules classiques comparé à celui associé aux technologies de pointe ou aux combustibles de remplacement.

Pour les usagers de la route, les différences des coûts d'utilisation dépendraient principalement des taxes imposées par les pouvoirs publics sur les carburants de remplacement.

Les recherches ont fait apparaître, en termes d'incidence globale des changements dans les coûts, que les sommes consacrées par les ménages aux déplacements en automobile demeurent à peu près constantes. On peut par conséquent s'attendre à ce qu'une augmentation des coûts induise une réduction des distances parcourues, tandis qu'une réduction des coûts d'utilisation se traduira généralement par une augmentation des distances parcourues. De telles augmentations pourraient absorber les gains potentiels sur les plans de la consommation de carburant et des émissions.

### **Attentes du consommateur**

L'accueil réservé par les consommateurs aux différents types de LEV pourrait être très variable, en fonction d'une série de facteurs dont beaucoup sont difficiles à caractériser de manière précise. À en juger par les tendances du marché, les consommateurs semblent accorder de la valeur à un large éventail de caractéristiques, parmi lesquelles les plus importantes constituent une longue liste : sécurité, qualité/fiabilité, économie, faible consommation, caractéristiques de conduite/tenue de route, respect de l'environnement, bon rapport qualité-prix, technologie de pointe, confort/luxe, espace intérieur, dimensions extérieures compactes/maniabilité/manœuvrabilité, plaisir de la conduite, caractère complet de l'équipement, polyvalence, grand volume du coffre, stylisme de l'intérieur, forme/stylisme externe, hautes performances, voiture ayant une « personnalité », etc.

À l'heure actuelle, les véhicules classiques atteignent une autonomie de plus de 500 km (600 à 800 km en Europe avec de nombreux modèles diesel), peuvent gravir de longues côtes sans perte de vitesse, accélérer rapidement et porter ou remorquer des charges considérables. Ils peuvent offrir un niveau élevé de protection aux passagers et, dans la plupart des cas, être conçus en vue d'une bonne tenue de route même par conditions défavorables (vent, neige, etc.). Ils sont capables d'assurer des niveaux élevés de confort (chauffage et refroidissement de l'habitacle).

Il faudrait par conséquent que les véhicules utilisant des carburants de remplacement et des technologies nouvelles puissent offrir des niveaux de confort, de commodité et de performance semblables à ceux des véhicules classiques pour espérer conquérir une part de marché significative. Même si l'on fait abstraction des coûts supplémentaires, de nombreuses solutions de remplacement aux véhicules classiques seront probablement désavantagées à cause de l'un de plusieurs de ces facteurs d'acceptation par les consommateurs. Les véhicules électriques, par exemple, peuvent avoir des accélérations com-

parables à celles des véhicules classiques, mais l'utilisation de cette capacité d'accélération doit être tout à fait limitée pour ne pas réduire l'autonomie du véhicule. Les performances des véhicules électriques sont également limitées par temps froid, et il est peu probable, compte tenu de l'énergie nécessaire à cet effet, que l'on puisse en chauffer ou refroidir l'habitacle. Les consommateurs accordent également une valeur importante au temps nécessaire au ravitaillement, ainsi qu'à la disponibilité de carburant et à l'autonomie du véhicule.

Il semble donc que les véhicules hybrides proposent la plus prometteuse des solutions de remplacement aux véhicules classiques. La combinaison, dans un véhicule hybride, d'un petit moteur classique et de batteries pour la fourniture d'énergie électrique constitue un moyen efficace de réduire sensiblement les émissions de CO<sub>2</sub>, tout en ramenant à un très faible niveau les émissions nocives et en offrant la plupart des avantages d'un véhicule classique équivalent. Il convient toutefois d'apporter une grande attention à la conception du moteur afin de veiller à répondre aux demandes normales de climatisation, d'ascension de côtes raides et de transport de charges.

**Tableau 4.2. Combinaisons potentielles de technologies des carburants et des véhicules**

<b>Construction de la carrosserie/du châssis</b>		
Monocoque classique en acier		
Châssis en treillis en acier avec panneaux en composite à base de polymères		
Monocoque en aluminium		
Châssis en treillis en aluminium avec panneaux en composite à base de polymères		
Monocoque en composite à base de polymères		
<b>Matières premières des carburants</b>	<b>Carburants</b>	
Charbon	Essence	
Pétrole	Gazole	
Gaz naturel	Éthanol	
Biomasse	Méthanol	
Énergie nucléaire/Eau	Gaz de pétrole liquéfié	
Hydroélectricité/Eau	Diméthyl-éther	
Énergie éolienne/Eau	Naphta	
Énergie solaire/Eau	Gaz naturel comprimé	
	Gaz naturel liquéfié	
	Hydrogène	
<b>Conversion d'énergie</b>	<b>Transmission</b>	<b>Stockage de l'énergie de pointe</b>
Moteur à combustion interne (MCI) à allumage commandé	Boîte mécanique robotisée	Accumulateur au plomb
MCI à allumage par compression	Transmission à changement de vitesses continu	Nickel-métal-hydrure
Cycle Atkinson/Miller	Hybride à configuration parallèle assisté	Ion-lithium
MCI à deux temps	Hybride à configuration parallèle double mode	Lithium-polymère
Cycle Stirling	Hybride à configuration parallèle à autonomie accrue	Ultra-condensateur
Turbine	Hybride à configuration en série	Volant d'inertie évolué
Dispositif de transformation du carburant		
Pile à combustible à membrane à échange de protons		

## Transitions et perspectives des carburants et technologies - limites

L'analyse de toutes les possibilités montre qu'il existe d'innombrables solutions technologiques, concernant les carburants et les véhicules, qui pourraient être combinées pour constituer des systèmes d'ensemble véhicule/carburant et parvenir à des véhicules à très faibles émissions et très faible consommation. Le tableau 4.2 présente un éventail d'options indépendantes possibles. Certaines combinaisons de ces options ne seront, naturellement, ni réalisables ni réalistes.

D'autres paramètres peuvent aussi jouer un rôle important, notamment la réduction du poids du véhicule, la réduction de la taille du moteur et une limitation de la vitesse maximum autorisée. Avec la réduction du poids et de la vitesse maximum, on pourrait réduire les émissions de polluants et de CO<sub>2</sub> à moindre coût par l'utilisation de systèmes classiques, sans qu'il soit nécessaire d'adopter des techniques plus complexes, mais de telles mesures vont à l'opposé des tendances observées dans les préférences des consommateurs, qui privilégient des véhicules plus grands et plus puissants.

## Conclusions

Le potentiel de réduction des émissions des véhicules routiers dépend des technologies des véhicules disponibles, des choix de carburants et d'aspects annexes, comme celui de l'infrastructure d'alimentation en carburant.

A court/moyen termes, l'amélioration des performances des véhicules classiques offre un meilleur potentiel que l'utilisation de nouvelles technologies et de nouveaux carburants. Il est possible de parvenir à un très faible niveau d'émission de polluants locaux et de réduire très sensiblement les émissions de CO<sub>2</sub>, et cela serait plus rentable dans le cas de véhicules classiques améliorés que dans celui de systèmes faisant appel à des technologie de remplacement, plus avancées et plus complexes.

Continuer à se concentrer, du moins pour le court et le moyen termes, sur les véhicules à faibles émissions, qu'ils fonctionnent à l'essence ou au gazole, présente donc un intérêt considérable. Les installations de construction de ces véhicules sont déjà bien établies, de même que les installations et les pratiques de maintenance. Les composants tels que les systèmes de diagnostic de bord, les catalyseurs et les systèmes améliorés d'utilisation du carburant ont fait leurs preuves et ne provoquent pas de très forte augmentation du prix des voitures neuves. L'amélioration de l'essence et du gazole exige quelques investissements qui augmentent le prix de ces carburants, mais pas au point de faire perdre au pétrole son avantage compétitif par rapport à d'autres carburants et matières premières. Par contre, une utilisation accrue des carburants alternatifs au lieu de l'essence ou du gazole, comme carburants pour véhicules à faibles émissions exigerait que l'on consacre d'importantes dépenses d'équipement aux installations de production et de distribution.

## Références

Commission européenne (2001), "The Costs and Benefits of Lowering the Sulphur Content of Petrol and Diesel to Less than 10ppm", Directorate-General Environment, European Commission, 9 septembre.  
<http://europa.eu.int/comm/environment/sulphur/cbloweringsulphurcontent.pdf>

## Chapitre 5

# STRATÉGIES DE PROMOTION DES VÉHICULES À FAIBLES ÉMISSIONS<sup>1</sup>

**Résumé.** Ce chapitre examine les stratégies mises en oeuvre dans les pays de l'OCDE pour promouvoir l'utilisation des véhicules à faibles émissions. Il analyse le rôle des mesures d'incitation et autres et leur impact sur le choix des consommateurs. Il souligne le besoin de mieux informer le public sur la consommation en carburant et les performances en matière d'émissions des véhicules en conditions réelles d'utilisation, par le biais d'étiquettes, de guides et d'autres supports.

### Rôle des pouvoirs publics

Les capacités techniques requises pour améliorer considérablement, en termes d'émissions et de consommation de carburant, les performances des véhicules automobiles produits de nos jours existent dans nombre de pays de l'OCDE, mais faute de signaux adéquats du marché, les consommateurs tendent à choisir des véhicules plus grands, plus lourds et plus puissants. Ces évolutions tendent à contrebalancer les progrès réalisés sur le plan du rendement des moteurs, et la consommation moyenne de carburant s'est donc peu améliorée, dans la plupart des régions, au cours de la décennie écoulée (voir, par exemple, BTRE, 2002a). Seule exception notable, des améliorations ont été observées dans un certain nombre de pays européens à la fin des années 90 (AIE, 2001).

Il est utile, à l'occasion d'une réflexion sur le rôle que peuvent jouer les pouvoirs publics dans la mise en oeuvre d'une vaste stratégie destinée à promouvoir l'utilisation des véhicules à faibles émissions (LEV), de prendre en compte les objectifs d'ensemble de réduction des émissions de polluants et de consommation de carburant dans le contexte des autres approches possibles. L'élaboration d'une politique efficace visant à réduire la pollution atmosphérique urbaine et/ou les émissions de gaz à effet de serre du secteur du transport est une démarche complexe, qui peut exiger des interventions à plusieurs niveaux. La difficulté réside dans la détermination des niveaux auxquels l'action des pouvoirs publics sera la plus efficace.

Les réductions des émissions pourraient être obtenues par le biais d'un éventail de politiques couvrant des domaines divers :

<sup>1</sup> Le lecteur trouvera des informations complémentaires à l'Annexe D.

- Aménagement du territoire.
- Infrastructure de transport.
- Choix modal et transfert modal (par exemple vers les transports en commun, le covoiturage, etc.).
- Technologies des véhicules et des systèmes de transport.
- Tarification des carburants, des véhicules et de l'utilisation de l'infrastructure de transport (tarification routière, taxes de stationnement, etc.).
- Normes applicables aux véhicules.
- Objectifs de réduction des émissions.

Les décideurs se sont, jusqu'ici, essentiellement concentrés sur les mesures axées sur le véhicule et le carburant, car elles sont souvent plus simples et moins délicates, du point de vue politique, que les mesures ayant une incidence directe sur l'utilisation du véhicule, comme la tarification routière - même si les observations donnent à penser que la tarification de l'utilisation du véhicule peut être très efficace. Par ailleurs, les mesures qui impliqueraient d'importantes modifications de l'infrastructure urbaine existante, et notamment l'emplacement des écoles, bureaux, usines, logements, etc., sont souvent difficiles à mettre en oeuvre.

Bien que les LEV ne puissent apporter de solution complète au problème des émissions de polluants locaux et de gaz à effet de serre, une généralisation de leur adoption - en particulier de véhicules à très faibles émissions utilisant des carburants libérant une moindre quantité de carbone sur l'ensemble du cycle de vie - permettrait de réduire sensiblement les émissions du secteur du transport, même dans un contexte d'augmentation de l'activité de ce secteur. Un véhicule « non polluant » est plus facile à réaliser que des approches telles qu'une réorganisation de l'utilisation des sols de manière à rapprocher les logements des lieux de travail, ou qu'une augmentation de la densité de l'aménagement urbain. D'autres mesures visent à réduire l'utilisation des véhicules, et certaines d'entre elles renforceront à l'évidence les avantages des LEV. Les LEV ont été privilégiés parce que les améliorations qu'ils peuvent apporter sont largement indépendantes d'autres mesures.

Par ailleurs, les mesures axées sur la conception du véhicule ont moins d'incidences sur la vie quotidienne, contrairement, par exemple, aux limitations à l'utilisation du véhicule. D'un point de vue politique, par conséquent, la promotion des véhicules peu polluants et à faibles émissions constitue un bon point de départ. Promouvoir activement les véhicules offrant de bonnes performances sur le plan environnemental peut aussi contribuer à sensibiliser davantage la collectivité à l'impact des véhicules sur la qualité de l'air urbain et sur l'effet de serre.

Les pouvoirs publics peuvent intervenir de diverses manières pour permettre une pénétration accrue des LEV sur le marché (Van Zuylen et Weber, 2001), notamment :

- En adoptant une approche neutre « non interventionniste », dans laquelle l'orientation du changement est laissée au marché.
- En jouant un rôle de surveillance, dans lequel les pouvoirs publics observent les variations des paramètres clés de la qualité de l'air et évaluent les performances environnementales du parc automobile.

- En tant qu'agents de R&D, les pouvoirs publics entreprenant eux-mêmes des recherches sur les questions pertinentes ou apportant un soutien financier à des organismes extérieurs pour qu'ils conduisent de telles recherches.
- En tant qu'agents d'innovation, en fournissant des incitations afin d'encourager l'innovation et le développement de nouvelles technologies.
- En tant que réalisateurs, les organismes gouvernementaux mettant en œuvre des mesures dans leurs domaines propres.
- En tant que promoteurs, en orientant les évolutions des technologies.
- En tant qu'instances de réglementation, en définissant des normes minimums conçues pour améliorer les performances environnementales des véhicules neufs.
- En tant que pilotes, en encourageant le déploiement de la nouvelle technologie, par le biais de politiques de choix de leur parc privilégiant les véhicules offrant de meilleures performances environnementales.

En outre, les pouvoirs publics peuvent jouer un rôle déterminant en éduquant et informant le consommateur quant aux performances environnementales des véhicules.

Choisir une approche réglementaire ou non réglementaire constitue souvent une décision capitale pour un gouvernement. Il peut jouer un rôle pilote en précisant les attentes qui sont les siennes en matière environnementale par rapport au parc automobile, et en fixant des objectifs clairs de performances (Energy Foundation, 2002).

L'examen de nouvelles mesures devra de préférence être entrepris par les administrations responsables du transport, de l'énergie et de l'environnement, en étroite coopération avec les principales parties concernées au sein d'autres agences publiques, avec les secteurs industriels clés, avec les groupes d'utilisateurs des véhicules et avec la collectivité dans son ensemble. Les pouvoirs publics peuvent jouer un rôle efficace dans ce processus en facilitant les contacts et les échanges entre les divers groupes d'intérêt. On fait parfois référence, à propos de ce processus, d'*évaluation constructive de la technologie*, une forme de coopération dans laquelle les caractéristiques et l'intérêt d'une technologie apparaissent au cours d'un processus interactif. Le programme européen Auto-Oil constitue un exemple de ce processus (CE, 2000).

Une approche, qui suscite actuellement un mouvement favorable, consiste pour les pouvoirs publics à mettre en place les conditions permettant au marché de choisir la meilleure technologie (Ministère britannique des transports, 2001 ; Besseling et Schlösser, 2001). Le rôle des pouvoirs publics, dans cette approche, consiste à :

- Procéder à l'évaluation de la technologie et fixer les règles.
- Créer les conditions donnant une chance aux nouvelles technologies, en supprimant les obstacles réglementaires qui ne se justifient pas à la lumière de la nouvelle technologie.
- Disposer, pour l'approbation des types, d'un système capable de prendre en compte les nouvelles technologies.
- Faire élaborer une méthode d'essai pour la mise à l'épreuve des avantages et/ou des inconvénients sur le plan environnemental.
- Soutenir des évaluations indépendantes de diverses technologies. Les essais doivent impérativement être menés en conditions réelles afin d'obtenir des

informations fiables que les consommateurs peuvent utiliser pour tirer le meilleur parti de la nouvelle technologie.

- Élaborer des normes appropriées pour traiter la question des éventuels effets négatifs des nouvelles technologies sur l'environnement, y compris les risques potentiels de nouvelles technologies des carburants et des véhicules.
- Élaborer des règlements appropriés en matière de sécurité avant que les nouvelles technologies ne se retrouvent sur la route (si des accidents surviennent par suite d'un manque de sécurité, la nouvelle technologie pourrait subir un recul de plusieurs années).
- Fournir des incitations, financières ou autres, pour faciliter l'innovation technologique et soutenir les véhicules dont les progrès du point de vue des performances environnementales sont démontrés.

## Favoriser les LEV par le biais d'incitations

### *Le rôle des incitations*

On reconnaît largement la nécessité d'un cadre général plus adéquat concernant les taxes et redevances sur les transports, qui favoriserait une efficacité, une équité et une durabilité accrues dans le secteur du transport et dans l'ensemble de l'économie. Dans les pays de l'OCDE, de nombreux gouvernements ont pris, au cours des dernières années, des mesures visant à rendre plus efficaces les taxes et redevances sur les transports, en prévoyant par exemple une différenciation des redevances en fonction des émissions de polluants atmosphériques locaux et de CO<sub>2</sub>. Les taxes et redevances sur les transports atteindraient leur plus grande efficacité si elles étaient appliquées aussi près que possible des points de prise de décision des consommateurs sur des questions comme l'acquisition et l'utilisation d'un véhicule.

En l'absence d'une imposition directe de taxes et de redevances fondées sur l'utilisation effective et sur les émissions réelles des véhicules, les pouvoirs publics ont en général adopté une autre approche reposant sur une série d'incitations et de taxes pouvant être appliquées de manière relativement facile des points de vue politique et administratif. A ce jour, les incitations en faveur des LEV ont été d'ordre principalement économique, ciblées sur les carburants alternatifs (comme le GPL ou le GNC) et les technologies de remplacement (comme celle des véhicules électriques), et conçues de manière à adresser aux consommateurs un signal environnemental lié au prix. La logique qui sous-tend cette approche est que la concurrence sur les prix de vente des véhicules et des carburants est très intense sur de nombreux marchés, et que, par conséquent, toute mesure ayant un impact sur le prix global à payer par le consommateur peut influencer son choix.

La série de mesures qui ont été prises ne vise pas directement le véhicule en tant que tel, mais elles encouragent la mise à disposition de technologies des véhicules à faibles émissions. Il s'agit notamment d'incitations en faveur de carburants propres (habituellement l'essence et le gazole à faible teneur en soufre) et d'un soutien à la production de carburants de remplacement et aux infrastructures nécessaires à leur utilisation.

Outre les instruments économiques, certaines mesures visant à établir un lien entre l'utilisation/l'accès des véhicules et les performances environnementales sont également en préparation.

Les incitations (directes ou indirectes) en faveur des LEV ont deux objectifs clés :

- Un impact immédiat et direct sur la demande de LEV de la part des consommateurs.
- Une introduction plus rapide des LEV dans les parcs de véhicules neufs.

Des incitations bien orientées en faveur des LEV peuvent encourager les constructeurs à mettre sur le marché une gamme plus appropriée de véhicules de ce type. Dans les pays qui ont adopté des normes d'émission avancées, ces incitations cibleront probablement les véhicules répondant déjà aux futures normes, plus rigoureuses, et les nouvelles technologies, comme les hybrides. Dans les pays où les normes obligatoires minimums sont moins strictes, les incitations chercheront sans doute à encourager les constructeurs automobiles à mettre sur le marché des véhicules de technologie classique plus avancés. La plupart des constructeurs font maintenant partie d'entreprises à l'échelle mondiale et dont la gamme de produits inclut des LEV.

### *Incitations fiscales relatives aux LEV*

La plus courante des incitations utilisées à ce jour par les pays pour favoriser les LEV - quelle que soit la définition qui en est donnée - consiste à fixer des taux différenciés pour les taxes à l'achat des véhicules ou les taxes/redevances annuelles, sur la base de la conformité avec différents niveaux de performance en termes d'émissions ou de type de carburant/technologie.

On ne dispose pas d'informations suffisantes pour évaluer l'impact des mesures fiscales sur l'acceptation des LEV. Dans certains cas (au Royaume-Uni, par exemple), cela s'explique par la relative nouveauté de ces programmes, et il est encore trop tôt pour en évaluer l'impact sur le comportement du consommateur en matière d'achat. Les données en provenance d'un certain nombre de pays européens donnent toutefois à penser que les programmes offrant une réduction de la fiscalité des véhicules lorsqu'ils respectent les futures normes d'émission avant la date fixée ont été très efficaces. Ainsi, un rapport de la CEMT (2000) indique que :

- En Allemagne, dans le cadre du programme annuel d'incitations fiscales sur les véhicules, lancé à la mi-1997, le pourcentage de voitures particulières à faibles émissions (Euro 3) au sein du parc est passé, en l'espace d'un an, de moins de 1% à 70% des ventes de véhicules neufs, alors même que le respect de la norme Euro 3 n'était pas obligatoire avant 2000.
- En Suisse, une expérience antérieure comportant des incitations fiscales pour les véhicules équipés de convertisseurs catalytiques s'était traduite, dans les cantons appliquant ces incitations, par une augmentation du pourcentage de ces véhicules par rapport à la moyenne nationale.
- Aux Pays-Bas, grâce à une politique d'incitations liée à la taxe à l'achat, environ 70% des véhicules lourds - la plus forte proportion en Europe à l'époque - répondaient aux normes Euro 2 avant la date limite.

L'agence suédoise pour la protection de l'environnement (SEPA, 1997) a aussi indiqué qu'après l'introduction, en 1993, d'une taxe réduite sur les véhicules basée sur les normes d'émission, 75% des véhicules neufs vendus en Suède en 1996 avaient des performances supérieures aux normes minimums.

En général, bien que le domaine de l'analyse quantitative des redevances sur les véhicules basées sur l'environnement soit limité, une évaluation qualitative donne à penser que ces incitations peuvent efficacement accélérer l'acceptation des LEV (CEMT 2000) si :

- Les véhicules sont facilement disponibles. Cet aspect est particulièrement important dans les petits pays ou dans les pays ne possédant pas un important secteur de construction automobile car les économies d'échelle rendent inévitable le fait que les constructeurs ne réagiront sans doute pas, dans ces types de marchés, à des programmes ambitieux d'incitations basées sur des technologies de pointe.
- L'existence de l'incitation est annoncée et soutenue par des programmes d'information (au point que les concessionnaires de voitures neuves font la publicité de leurs véhicules sur la base de leur avantage fiscal et de leur performance environnementale).
- Les prix des carburants ne baissent pas au point que la réduction des coûts d'utilisation du véhicule encourage une augmentation de cette utilisation.

A l'inverse, l'impact sera probablement réduit si :

- Les consommateurs expriment des inquiétudes (perçues ou réelles) concernant des technologies ou des carburants en particulier.
- L'infrastructure d'alimentation en carburant n'est pas suffisamment développée pour assurer le fonctionnement du véhicule.
- Les incitations fiscales sont trop faibles pour modifier le comportement d'achat.

On peut citer deux exemples dans lesquels les incitations n'ont pas produit les avantages escomptés :

- Malgré les incitations fiscales et les subventions considérables accordées dans de nombreux pays, l'adoption des véhicules électriques a été très limitée. Il semblerait que les incitations financières aient été dans une grande mesure insuffisantes pour compenser les limites technologiques et fonctionnelles des véhicules électriques.
- En Autriche, une politique antérieure visant à imposer une surtaxe sur les véhicules non équipés de convertisseurs catalytiques, et dont l'objectif était d'augmenter le nombre de véhicules ainsi équipés au sein du parc, s'est traduite par une réaction positive de la part de 5 à 10% seulement des consommateurs. L'échec de cette politique serait en grande partie dû, selon les conclusions, aux incertitudes qui régnaient à l'époque quant à la durabilité des véhicules équipés de catalyseurs, à la disponibilité réduite d'essence sans plomb, et au caractère modeste de l'incitation monétaire (CEMT, 2000).

Les modifications concernant la fiscalité fixe pesant sur les véhicules, que ce soit au moment de leur acquisition ou sous la forme d'une taxe annuelle, auraient un coût de mise en œuvre relativement faible et peu d'effets secondaires négatifs, et seraient probablement très efficaces, en particulier si elles étaient soutenues par des mesures d'information (CEMT, 2000). Les pouvoirs publics devront, lorsqu'il s'agira de fixer le niveau de la fiscalité, décider si l'objectif doit être de compenser, totalement ou en partie, les coûts supplémentaires de production des LEV (ce qui pourrait simplement avoir pour

effet de maintenir le prix relatif d'un véhicule de technologie récente au niveau de celui de véhicules comparables répondant aux normes minimums), ou s'il convient d'introduire des incitations plus élevées afin de donner à ces véhicules un avantage compétitif.

Comparant la fiscalité sur l'acquisition et la fiscalité annuelle sur les véhicules, le rapport de la CEMT (CEMT 2000) énonce la conclusion selon laquelle les taxes à l'achat, en particulier lorsqu'elles représentent un pourcentage significatif du prix du véhicule, auront probablement un impact plus sensible sur le choix du véhicule que les taxes annuelles. À l'inverse, un rapport japonais (Kashima, 1999) conclut que la modification de la fiscalité sur la « possession » des véhicules (c'est-à-dire des taxes annuelles) est plus efficace, du point de vue de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, que la modification de la fiscalité sur l'acquisition. La meilleure approche pourrait dépendre de la culture et des conditions existantes dans le pays concerné.

Les deux types d'incitations fiscales, à l'achat comme annuelles, peuvent être appliquées d'une manière qui n'ait pas d'incidence sur les recettes (en compensant les pertes de revenu sur les LEV par des augmentations des taxes sur les véhicules à haut niveau d'émission). Il faut, pour maintenir la neutralité fiscale, adapter les critères utilisés pour fixer les taux différenciés à mesure qu'augmente le nombre de véhicules du parc remplissant les conditions nécessaires pour bénéficier d'un taux réduit. Le Japon, par exemple, a adopté, en matière de fiscalité applicable aux véhicules « verts », une approche sans incidence sur les recettes, dans laquelle les pertes de revenu dues au fait que des véhicules vont au-delà des normes fixées en termes de consommation de carburant et d'émissions, sont compensées par des augmentations de la fiscalité sur les véhicules dépassant un âge spécifié (13 ans pour les véhicules à essence, et 11 ans pour les véhicules diesel). La CEMT (2000) note dans son rapport que les approches sans incidence sur les recettes sont « bien acceptées » dans le contexte européen, mais qu'il n'est pas certain que cela sera le cas dans tous les pays.

### *Incitations à l'utilisation de LEV*

De nombreuses analyses économiques donnent à penser que des stratégies plus générales, ciblant l'utilisation des véhicules, pourraient sans doute constituer des mesures de marché efficaces pour réduire, à plus long terme, les émissions totales du parc de véhicules, et en particulier les émissions de gaz à effet de serre. De telles mesures, parmi lesquelles la fiscalité des carburants, les taxes sur le carbone et la tarification routière, sont en cours de mise en œuvre ou envisagées dans un certain nombre de pays. Toutefois, étant donné que le présent rapport met l'accent sur les LEV, seules les mesures précisément destinées à soutenir l'utilisation de ces véhicules font l'objet d'un examen approfondi dans le document.

### *Zones à faibles émissions*

Des zones à faibles émissions (LEZ) sont actuellement créées dans quelques pays pour tenter d'éviter les encombrements de la circulation et de réduire la pollution dans des zones de concentration de la population (comme les centres-villes). Les LEV ont accès à ces zones sans aucune restriction, tandis que les autres véhicules voient leur accès soit interdit, soit restreint. Ces zones contribuent donc à encourager de manière indirecte l'acquisition de LEV remplissant les conditions requises. À ce jour, les LEZ ont principalement limité l'accès des véhicules commerciaux, sans aucune restriction à l'utilisation des voitures particulières.

### *Accès à des voies réservées aux véhicules à fort taux d'occupation*

Aux États-Unis, dans un certain nombre d'États, les véhicules répondant, en matière d'émissions, à une combinaison de normes strictes californiennes et nationales, ont accès à des voies réservées aux véhicules à fort taux d'occupation, même si le véhicule ne transporte pas de passagers (normalement, le véhicule doit avoir au moins deux occupants pour être admis sur ces voies). A l'heure actuelle, les seuls véhicules autorisés sont les véhicules zéro émission (électriques), certains véhicules fonctionnant au GNC et au GPL, les véhicules faisant partie de parcs et répondant à des normes d'échappement certifiées correspondant à la catégorie fédérale ILEV (véhicules produisant de très faibles émissions). Les normes d'échappement applicables aux ILEV sont équivalentes à celles des ULEV et des SULEV<sup>2</sup>, mais s'y ajoute le recyclage des vapeurs de carburant (ARB, 2001). Quelques critiques ont été formulées à l'égard de ces critères très stricts, considérés comme inutilement contraignants et n'encourageant pas d'autres LEV, y compris les hybrides essence/électrique (Brauer, 2001). Dans les zones à forts encombrements de la circulation, la possibilité d'avoir accès à ces voies pourrait certainement être utilisée comme incitation à l'achat de LEV.

### *Accès les jours de pics de pollution*

Dans certaines villes, l'accès des véhicules classiques aux quartiers centraux est restreint lorsque la pollution atmosphérique atteint des niveaux élevés. En Italie, par exemple, lorsque la pollution atteint à Rome et dans d'autres grandes villes un niveau déterminé, l'accès au centre est limité, les voitures portant des plaques d'immatriculation paires ou impaires circulant de manière alternée, et si le niveau de la pollution atmosphérique augmente encore, seuls les véhicules de transport en commun sont autorisés. Dans de telles conditions, les véhicules entrant dans la catégorie à « impact environnemental minimal » peuvent continuer à circuler sans aucune restriction dans les zones à accès limité.

### *Facilités de stationnement*

Dans un certain nombre d'États des États-Unis, et dans quelques villes européennes et japonaises, les véhicules à émission faible ou nulle ont accès gratuitement ou à prix réduit à des zones où les véhicules classiques doivent payer des droits de stationnement. A ce jour, tous les véhicules zéro émission sont des véhicules électriques, ce qui explique que des installations de recharge gratuite soient également souvent disponibles dans certains de ces espaces de stationnement.

### *Incitations à l'utilisation de carburants propres*

Bien qu'elles ne soient pas directement conçues pour les LEV, les incitations à l'utilisation de carburants moins polluants peuvent faciliter l'adoption des LEV en supprimant les obstacles aux technologies des véhicules qui pourraient subir les effets négatifs de paramètres de carburants particuliers. Dans les carburants classiques, le paramètre clé est dans ce contexte le soufre, qui peut fortement restreindre le recours à une série de technologies de lutte contre les émissions, nécessaires au respect des normes d'émission avancées, et qui pourraient aider à réduire la consommation de carburant. On peut notamment citer, parmi ces technologies, les catalyseurs, les filtres à particules, les systèmes à injection directe et les systèmes de diagnostic de bord.

<sup>2</sup> ULEV et SULEV sont des normes californiennes. U = Ultra et SU = Super Ultra.

De nombreux pays ont mis en place des incitations en faveur de carburants classiques moins polluants et d'un certain nombre de carburants de remplacement. La toute première expérience en la matière, en Europe, a été celle de l'introduction d'incitations à la fourniture d'essence sans plomb, qui a conduit à l'adoption rapide de ce carburant dans beaucoup de pays. A une époque plus récente, l'accent a été surtout mis sur les incitations financières à la production de gazole à faible teneur en soufre (50 ppm) et « sans soufre » (<10 ppm). Une recherche récemment menée par la Commission européenne (CE, 2001) a conclu qu'un passage à des carburants (essence et gazole) ayant une teneur en soufre de 10 ppm serait rentable, et il a été décidé de rendre ces carburants obligatoires à partir de 2009. Il est probable que certains pays membres de l'UE offriront des incitations pour que les carburants contenant 10 ppm de soufre soient mis rapidement sur le marché, avant la date obligatoire.

Des données en provenance du Royaume-Uni, de l'Allemagne et de la Suède montrent que la réduction des niveaux de la fiscalité sur les gazoles propres peut conduire à une évolution très rapide de la production, les carburants à faible teneur en soufre remplaçant ceux à teneur élevée. C'est ainsi qu'au Royaume-Uni l'application d'un taux réduit de droits d'accise au gazole à très faible teneur en soufre (ULSD) (introduit par le biais d'une augmentation des droits d'accise sur le gazole contenant >50 ppm soufre) a eu pour résultat une augmentation de la part de marché de l'ULSD qui, de moins de 20% en novembre 1998, est passée à 100% en août 1999 (HM Treasury, 2000).

Compte tenu de la possibilité de voir les carburants propres adoptés rapidement grâce à un traitement fiscal plus favorable, les pouvoirs publics doivent étudier très attentivement la manière de structurer ce soutien, afin de prendre en compte les pertes de recettes potentielles résultant d'une augmentation de la part de marché des carburants propres. Le Royaume-Uni et l'Allemagne ont retenu la solution d'une augmentation des droits d'accise sur les carburants à teneur élevée en soufre, plutôt que de réduire ces droits sur les carburants à faible teneur en soufre.

Un rapport récent (CEMT 2001) montre qu'il est facile de justifier les incitations en faveur de l'ULSD, et les incitations introduites dans un certain nombre de pays ont rapidement accru, de manière très efficace, la part de marché de l'ULSD. Les éléments disponibles indiquent que les incitations parviennent le plus efficacement à accélérer le taux d'utilisation des carburants à faible teneur en soufre lorsque la réduction des droits d'accise se traduit par une baisse des prix à la pompe. L'importance et le calendrier de l'incitation sont également des facteurs critiques qui doivent être déterminés en fonction des conditions propres à chaque pays. Le rapport note que la rentabilité des incitations en faveur des carburants sans soufre reste à établir, mais que les pouvoirs publics devraient néanmoins envisager d'encourager ces carburants car ils aideraient les véhicules à moteur à essence à maximiser le rendement énergétique, tout en respectant encore les normes d'émission Euro 4, et les véhicules à moteur diesel à respecter les limites d'émission de particules fixées par les normes Euro 4 et les limites d'émission de NO<sub>x</sub> des normes Euro 5.

### *Incitations relatives aux infrastructures*

Un certain nombre de pays estiment que les avantages résultant de la réduction des émissions, notamment de particules, justifient un soutien aux véhicules alimentés par des carburants de remplacement comme le GPL et le gaz naturel. Il arrive souvent que l'insuffisance des infrastructures d'alimentation en carburant constitue un frein à une plus large adoption des véhicules utilisant des carburants alternatifs, en particulier les car-

burants gazeux, de sorte que de nombreux gouvernements soutiennent le développement de ces infrastructures par des subventions et d'autres mesures.

Du point de vue des véhicules de technologie actuelle, les principales limitations, en termes d'infrastructure, concernent le gaz naturel. Dans nombre de pays, le GPL est largement disponible, et les intérêts commerciaux ont financé dans une grande mesure les installations de distribution. L'infrastructure d'alimentation en gaz naturel tend à être très coûteuse et, dans certains pays, le réseau d'approvisionnement en gaz de ces stations-service est également limité - n'étant parfois disponible que dans les grandes villes. C'est pourquoi l'infrastructure d'alimentation en gaz naturel est limitée, dans de nombreux pays encore, à de grands dépôts où les transports en commun ou les parcs de véhicules commerciaux peuvent se ravitailler. De nombreux pays (Allemagne, Argentine, Australie, Corée, Etats-Unis, Iran, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pays-Bas, Pakistan, Royaume-Uni, Suisse et Venezuela) encouragent une utilisation accrue du gaz naturel comme carburant, en accordant des subventions et d'autres incitations financières aux infrastructures d'alimentation en gaz naturel.

L'infrastructure d'alimentation en carburant jouera également un rôle important dans les technologies naissantes, comme celle des piles à combustible, si elles consomment de l'hydrogène. Le coût et la faisabilité de nouvelles infrastructures d'alimentation en hydrogène pèseront lourd dans le choix, lors de la conception des véhicules, entre le stockage de l'hydrogène à bord (ce qui suppose l'installation d'une infrastructure d'alimentation) et l'utilisation d'une technologie de production à bord du véhicule, par le reformage de carburants liquides.

### *Conclusions sur le rôle des incitations*

L'intervention sur le marché, sous la forme d'incitations en faveur des LEV, se justifie entre autres par le fait que, dans la plupart des pays, le fonctionnement du marché n'est pas parfait. Dans la plupart des pays, également, il n'existe pas de redevances explicites sur l'utilisation effective des véhicules, et donc sur la pollution réelle au moment de leur utilisation. A défaut d'incitations des pouvoirs publics, les décisions d'achat des véhicules continueront d'être prises sans qu'il soit pleinement tenu compte des effets sociaux et environnementaux à long terme.

De même, en l'absence de toute intervention des pouvoirs publics dans le domaine des politiques, les éléments disponibles portent à juger peu probable que les avantages potentiels, du point de vue de l'environnement, des nouvelles technologies des véhicules - sous des formes tant classiques que nouvelles - puissent entièrement se concrétiser. Pour ce qui concerne en particulier les émissions de gaz à effet de serre, la tendance, observée dans de nombreux pays, à l'augmentation de la puissance et de la taille des véhicules est en passe de neutraliser les avantages résultant de l'augmentation du rendement des moteurs. La réglementation des émissions de polluants locaux, par le biais de normes fixant de manière obligatoire le niveau maximum des émissions, a constitué un instrument efficace pour la réduction des émissions de polluants atmosphériques par les automobiles et donc pour l'amélioration de la qualité de l'air. L'impact des normes peut être accru en rapprochant, par des mesures fondées sur le jeu du marché, la date de leur entrée en vigueur.

Un ensemble effectif d'incitations, s'appuyant sur des consommateurs bien informés, offre d'excellentes possibilités d'accélérer l'entrée de LEV dans le parc de véhicules neufs. S'il est vrai que les incitations spécifiques doivent être adaptées aux conditions propres à chaque pays, les données disponibles permettent de penser qu'une dif-

férenciation de la fiscalité sur les véhicules et les carburants, fondée sur les performances environnementales, peut contribuer de manière rentable à augmenter la proportion des LEV sur le marché. Les pouvoirs publics peuvent aussi jouer un rôle pilote en adoptant une politique d'achat favorisant les LEV.

## Promouvoir les LEV : le rôle de l'information publique

### *Introduction*

On a exploré, dans la section précédente, une série d'incitations en cours d'adoption dans diverses régions du monde en vue d'encourager et d'accélérer l'entrée des LEV sur le marché automobile, que leur conception soit classique, ou qu'elle repose sur l'emploi de carburants de remplacement ou de technologies nouvelles. Comme on l'a mis en évidence plus haut, l'efficacité de toute incitation visant à promouvoir les LEV dépend, en partie, de la sensibilisation du public à l'incitation en question et, de manière plus générale, à la justification écologique de cette incitation.

Deux moyens sont principalement utilisés, de nos jours, pour mettre à la disposition des consommateurs les informations sur les performances des automobiles en termes d'émissions et de consommation de carburant :

- Étiquetage des véhicules.
- Guides d'information.

Étiquettes et guides ont pour objectif d'ensemble d'améliorer les choix du consommateur et, en définitive, d'améliorer les performances environnementales du parc automobile. Les programmes d'information se proposent d'atteindre cet objectif par les moyens suivants :

- *Sensibiliser davantage les consommateurs* à l'impact des véhicules sur l'environnement, dans l'espoir d'influencer leurs décisions d'achat afin qu'ils choisissent un modèle offrant de meilleures performances environnementales. Lorsqu'ils achètent un véhicule neuf, les consommateurs - particuliers, pouvoirs publics ou entreprises - prennent en considération un certain nombre de facteurs parmi lesquels le prix, les performances, la sûreté, la fiabilité et la valeur à la revente. La priorité accordée aujourd'hui aux émissions et à la consommation de carburant varie d'un pays à l'autre, mais elle se situe en général plus bas sur la liste que les autres facteurs cités ci-dessus.
- *Accroître la demande sur le marché* de modèles à faibles émissions et à faible consommation de carburant, encourageant ainsi les constructeurs à privilégier, dans la conception de leurs véhicules, les performances environnementales. La publication d'informations spécifiques à chaque modèle sur les aspects environnementaux offre un moyen de différenciation des produits propice à la concurrence entre constructeurs. En l'absence de ces informations, l'industrie automobile retient rarement les performances environnementales comme argument concurrentiel.
- *Apporter un soutien* aux politiques en rapport avec les LEV. Les programmes d'information peuvent constituer un important moyen de soutenir d'autres mesures que les pouvoirs publics pourraient envisager d'adopter pour promouvoir les LEV, comme des incitations économiques/fiscales et des politiques d'achat concernant les parcs automobiles. Si des mesures doivent être prises pour

encourager les constructeurs à proposer des véhicules offrant de meilleures performances environnementales avant l'entrée en vigueur des normes obligatoires, il sera essentiel, pour le succès de ces mesures, de désigner ces véhicules à l'attention des consommateurs (particuliers, pouvoirs publics ou entreprises).

### *Étiquettes*

Un certain nombre de rapports (BTE, 1996 ; Raimund, 1999 ; Boardman *et al* 2000) permettent de penser que l'étiquetage peut effectivement influencer les consommateurs en faveur de l'achat de véhicules à meilleur rendement énergétique. Les recherches effectuées tendent à montrer que les étiquettes sont particulièrement efficace lorsque :

- Elles ne sont pas surchargées d'informations.
- L'information contenue sur l'étiquette est présentée sous une forme simple et facile à comprendre par le consommateur.
- Leur présentation est semblable à celle utilisée dans les programmes d'étiquetage énergétique appliqués à d'autres produits (le cas échéant).
- Elles fournissent des informations spécifiques à un modèle par rapport aux performances d'autres modèles d'une catégorie similaire, plutôt que pour l'ensemble du parc automobile.
- Elles ne sont pas utilisées de manière isolée, c'est-à-dire qu'elles s'inscrivent dans une stratégie générale d'information et d'incitations.

Un rapport récemment publié en Australie (BTRE, 2002b) note qu'il existe très peu de données permettant d'évaluer l'impact de l'étiquetage sur le comportement des consommateurs, et au bout du compte, sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Ce rapport relève toutefois que, s'il n'est pas certain que l'étiquetage soit à l'origine de réductions significatives des émissions, cette mesure a un coût très faible. Selon les conclusions d'une recherche menée au Royaume-Uni (Boardman *et al*, 2000), l'étiquetage concernant la consommation de carburant pourrait se traduire par une réduction d'environ 2,7% des émissions de CO<sub>2</sub> du parc automobile, tandis que Raimund (1999) estime à 4-5% la réduction due à la seule étiquette.

La fiabilité des chiffres concernant le CO<sub>2</sub> indiqués sur les étiquettes ne fait pas l'unanimité, étant donné que les résultats dérivés des essais standard de certification des véhicules ne reflètent pas nécessairement la conduite en conditions réelles. Certains modèles d'étiquettes, comme celui utilisé aux Etats-Unis, cherchent à apporter une réponse à cette question en présentant à la fois la valeur résultant de l'essai standard et une valeur corrigée. L'objectif principal de l'étiquetage est néanmoins de fournir une évaluation comparative sur la base d'un essai standard ; par conséquent, même si la valeur indiquée sous-estime la consommation de carburant d'un conducteur « moyen », elle n'en est pas moins intéressante en ce qu'elle donne aux consommateurs une information quant à la performance relative des différents modèles. La plupart des étiquettes comportent également un « déni de responsabilité », prévenant les consommateurs que la consommation réelle de carburant dépendra, entre autres, de la manière dont le véhicule est conduit, de la charge qu'il transporte, de l'état de la route et des conditions de circulation.

## *Guides*

S'il est vrai que les étiquettes sont importantes pour informer les consommateurs des performances environnementales des automobiles, il est peu probable qu'elles soient, à elles seules, suffisantes. On peut penser que de nombreux consommateurs choisissent le modèle particulier qu'ils ont l'intention d'acheter avant même de se rendre dans le hall d'exposition d'un constructeur, et s'ils ne disposent pas d'informations préalables, une simple étiquette ne suffira sans doute pas à modifier leur décision.

C'est pourquoi on cherche aujourd'hui à communiquer aux consommateurs davantage d'informations sur les performances environnementales des véhicules à un stade antérieur de leur processus de décision.

Les guides sur les performances environnementales des automobiles constituent un moyen de plus en plus utilisé pour communiquer cette information. La plupart des guides précisent au moins la consommation de carburant et les émissions toxiques, tandis que d'autres couvrent également les émissions de CO<sub>2</sub>, le bruit du véhicule, l'analyse du cycle de vie et les coûts d'utilisation. Ces guides sont pour l'essentiel diffusés sur l'Internet, mais on peut aussi trouver dans certains pays des exemplaires imprimés. Les guides sont publiés par diverses organisations, tant publiques que non gouvernementales.

### *Portée d'un guide*

Les guides peuvent contenir une gamme d'informations beaucoup plus large qu'une étiquette, mais, tout comme une étiquette, un guide efficace ne doit pas submerger le consommateur d'informations et doit les présenter sous une forme simple et facile à comprendre par un lecteur peu familier des questions techniques. En outre, si le guide est diffusé sur l'Internet, il doit être conçu de telle sorte que l'information puisse être obtenue rapidement, en un minimum d'étapes (clics de souris).

L'évaluation des performances environnementales des véhicules doit prendre en compte un certain nombre de variables, parmi lesquelles :

- Les émissions de particules et de gaz polluants réglementés (émissions toxiques).
- Les émissions de CO<sub>2</sub>.
- Les émissions d'autres gaz à effet de serre.
- La consommation de carburant.
- Les émissions produites au cours de la production et du recyclage des véhicules et du carburant.
- Le bruit.

Les effets des automobiles sur l'environnement sont principalement liés à leurs contributions à la pollution atmosphérique urbaine et aux émissions de gaz à effet de serre ; tout guide devrait donc, au minimum, présenter les mesures de ces effets.

Les avantages de l'inclusion d'autres mesures des performances environnementales, comme le bruit du véhicule et l'analyse du cycle de vie, sont moins évidents, et la méthode d'évaluation de cette dernière fait l'objet d'un débat considérable. Le guide publié par l'ACEEE (American Council for an Energy Efficient Economy<sup>3</sup>) est l'un des rares à tenter d'évaluer les effets sur le cycle de vie et, faute de données plus précises,

<sup>3</sup> Voir <http://www.greencars.com/indexplus.html>

utilise la masse du véhicule comme critère de substitution pour les impacts de la production.

On trouve aussi, dans un certain nombre de guides, des informations sur les dépenses annuelles liées à l'utilisation d'un modèle particulier de véhicule. Dans la plupart des cas, il s'agit simplement d'un calcul fondé sur la consommation annuelle moyenne de carburant et sur une hypothèse de prix du carburant. Le guide de l'ACEEE comprend aussi un coût annuel assigné fondé sur une estimation des impacts sur la santé humaine.

### *Classement des véhicules en fonction de leurs performances environnementales*

Le classement des automobiles en fonction de leurs performances environnementales est utile pour les consommateurs et constitue un important préalable pour encourager une évolution des habitudes d'achat. Toute politique de promotion des LEV suppose que l'on puisse les désigner à l'attention des consommateurs. Le classement des performances environnementales d'un véhicule peut se faire de deux manières principales :

- *Classement d'ensemble* : comparaison entre un véhicule et tous les autres, indépendamment de la taille ou du type.
- *Classement à l'intérieur d'une catégorie* : comparaison entre les véhicules entrant dans une catégorie donnée.

Un classement d'ensemble du parc automobile offre l'avantage de fournir une « vraie » mesure des performances d'un véhicule par rapport à l'ensemble du parc. Il ne tient toutefois pas compte du fait que les consommateurs tendent à faire leur choix à l'intérieur d'une catégorie donnée. Les conclusions d'une recherche menée au Royaume-Uni (Boardman *et al*, 2000) ont montré que lorsque les consommateurs commencent à définir ce qu'ils attendent de leur nouveau véhicule, ils abordent une période de recherche qui semble divisée en deux phases distinctes :

- Choix d'une ou de plusieurs catégories de véhicules.
- Sélection à l'intérieur de la catégorie.

La plus grande difficulté à surmonter, pour les systèmes de notation environnementale, tient à l'hypothèse très généralement admise selon laquelle les automobiles de taille semblable ont aussi un impact environnemental semblable (Boardman *et al*, 2000). L'AIE, par exemple, observe que les consommateurs ignorent souvent l'importante variabilité, d'un véhicule à l'autre dans une même catégorie, des performances en matière de consommation de carburant (voir tableau 5.1). Les comparaisons portant sur l'ensemble du parc ne permettent que dans une faible mesure de mettre en évidence les différences entre véhicules d'une même catégorie.

**Tableau 5.1. Différence de consommation de carburant entre le meilleur et le moins bon modèle en Europe, par catégorie de marché (Modèle année 2000)**

Catégorie de véhicule	Différence en pourcentage entre le meilleur et le moins bon de la catégorie	
	Moins bon véhicule diesel par rapport au meilleur	Moins bon véhicule à essence par rapport au meilleur
Compact	122%	59%
Moyen	133%	63%
Grand	106%	54%

Source : AIE (2001).

### *Le support de diffusion*

Les guides peuvent être « livrés » au consommateur sous forme imprimée ou par l'Internet. Le point important est que le consommateur doit avoir accès au guide avant d'arriver au magasin d'exposition ; il sera autrement peu probable que l'information parvienne à influencer la décision d'achat. Cet objectif tend à favoriser l'utilisation de l'Internet, car il est à la fois difficile et plus coûteux d'identifier les consommateurs potentiels et de leur distribuer des guides imprimés avant qu'ils ne se présentent au magasin d'exposition. L'Internet offre également d'autres avantages : facilité d'actualisation et coûts de maintenance inférieurs. Indépendamment du mécanisme de diffusion, des actualisations permanentes et régulières de l'information sont essentielles pour garantir la pertinence du guide et son intérêt pour le consommateur.

Argument supplémentaire en faveur de l'Internet, les analyses des statistiques Internet (NUA, 2001) indiquent que les consommateurs effectuent de plus en plus souvent une recherche « en ligne » pour choisir leur prochaine automobile et que les connexions aux sites européens consacrés à l'automobile ont plus que doublé entre avril 2000 et mars 2001. Aux États-Unis, 45% des consommateurs ayant l'intention d'acquérir une automobile font leur recherche sur l'Internet. Parmi les catégories d'achat en ligne les plus en vogue, celle de l'industrie automobile se place maintenant au quatrième rang, et un quart des visiteurs de ses sites Web sont actuellement intéressés par l'achat d'une voiture neuve. Au Royaume-Uni, on estime que près de 500 000 décisions d'achat d'une automobile, c'est-à-dire 20 % du marché national des automobiles neuves, seront prises en ligne en 2004.

### *Conclusions relatives aux stratégies d'information*

Divers rapports ont mis en évidence l'importance de l'information dans le soutien aux stratégies visant à encourager les consommateurs à acquérir des LEV, et donc à en accroître la proportion dans les parcs automobiles. Il existe souvent une importante variabilité des performances en matière d'émission et de consommation de carburant, même dans la catégorie de véhicules classiques et même entre véhicules de même type, mais si les consommateurs ignorent ces différences, ils ne peuvent pas intégrer le facteur performance environnementale dans leurs décisions d'acquisition d'un véhicule.

Les guides diffusés sur l'Internet, avec pour complément un étiquetage des véhicules, semblent constituer le moyen le plus rentable de transmettre cette information aux consommateurs. Pour être efficaces, guides et étiquettes doivent présenter l'information de manière exacte, mais aussi sous une forme que les consommateurs peuvent facilement comprendre.

## **Nécessité d'une approche globale et intégrée**

On a décrit, dans le présent chapitre, les grandes lignes d'une série de stratégies possibles et de problèmes de mise en œuvre qu'il convient d'aborder en vue de promouvoir les LEV, que leur conception soit classique, ou qu'elle repose sur l'emploi de carburants de remplacement ou de technologies nouvelles.

L'une des principales conclusions ressortant du rapport est que les pouvoirs publics et l'industrie ont fortement compté sur les progrès des moteurs et l'évolution technologique des automobiles classiques pour réduire les émissions de polluants locaux des voitures neuves. Des progrès sensibles ont été réalisés par les constructeurs automobiles, et les véhicules pris individuellement sont plus près du respect des normes et des objectifs

fixés. A l'heure actuelle, les véhicules classiques équipés des moteurs et des dispositifs de post-traitement les plus modernes sont « presque propres » du point de vue des polluants locaux réglementés.

Cependant, l'un des points les plus importants soulevés dans le rapport est que l'évolution technologique pourrait ne pas suffire, à elle seule, pour résoudre le problème de l'augmentation rapide des émissions de gaz à effet de serre prévue au cours des dix à vingt prochaines années. Bien que les constructeurs proposent des véhicules plus légers et moins puissants, les tendances du marché, telles qu'elles ressortent des achats des consommateurs, vont nettement dans le sens de véhicules plus grands et plus puissants. Il semble probable que, faute de signaux adéquats en matière de prix et d'une fiscalité explicite sur les émissions de gaz à effet de serre, ces tendances se maintiendront.

C'est pourquoi il faut envisager des approches globales prenant en compte toutes les parties concernées, y compris les consommateurs, et une série de mesures à prendre par les pouvoirs publics. Il faudra mettre en œuvre des approches intégrées pour parvenir à un impact significatif sur les tendances et habitudes, actuelles et prévues, en matière d'achat et d'utilisation des automobiles. Outre les politiques visant à réduire la consommation spécifique de carburant des véhicules classiques, les politiques et d'autres mesures devraient favoriser d'autres changements susceptibles d'avoir un effet sensible. Les mesures prises par les pouvoirs publics devraient notamment mettre l'accent sur l'imposition de taxes et redevances appropriées ; elles pourraient aussi inclure des mesures destinées à limiter les encombrements et à améliorer les conditions de la circulation afin de minimiser les émissions des véhicules, et éventuellement de modifier les comportements en faveur d'approches plus durables sur les plans environnemental et social. Il faudrait encourager les consommateurs à concrétiser, dans leurs décisions d'achat et d'utilisation des automobiles, leur sensibilisation accrue aux questions environnementales.

Dans ses perspectives mondiales de l'énergie pour 2002, l'AIE a analysé l'impact probable d'une combinaison de politiques visant plusieurs objectifs : réduction de la consommation spécifique de carburant ; utilisation accrue de carburants et de véhicules de remplacement ; réduction de la croissance de la demande de déplacements et évolution vers des modes à moindre intensité énergétique. Selon les conclusions de l'AIE, la demande totale de pétrole des pays de l'OCDE serait, en 2010, inférieure d'un demi million de barils/jour par rapport à son « Scénario de référence ». Cette économie pourrait atteindre les 3,6 millions de barils/jours d'ici 2030, correspondant à 6,2% de la demande primaire totale de pétrole dans les trois régions du Scénario de référence pour 2030.

Ce serait certes là un changement significatif, mais la réduction possible doit être envisagée dans le contexte des augmentations prévues par le Scénario de référence. Comme on l'a vu au Chapitre 3, sans les changements d'orientations mis à l'épreuve, l'AIE prévoit que la consommation de pétrole du secteur du transport dans les pays de l'OCDE passera de 1185 Mtep<sup>4</sup> en 2000 à 1773 Mtep en 2030 - une augmentation de près de 50%. Pour la même période, l'AIE prévoit que la consommation mondiale de pétrole du secteur du transport passera de 1696 à 3195 Mtep - une augmentation de 88%.

L'analyse de l'AIE montre bien à quel point il est difficile d'atteindre les objectifs retenus pour l'action des pouvoirs publics, à savoir maîtriser les augmentations actuellement prévues en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre et, à terme,

<sup>4</sup> Mtep: million de tonnes d'équivalent pétrole.

réduire les niveaux de ces émissions. Elle confirme qu'il est nécessaire d'envisager toutes les mesures susceptibles d'être rentables et de recueillir le soutien du public. Elle accentue aussi la nécessité d'une approche globale et intégrée du transport, couvrant les différents modes de transport et les différents secteurs de l'économie.

Néanmoins, les mesures axées sur le véhicule — dont le but est de parvenir à des réductions significatives des émissions mesurées par véhicule — demeurent l'une des approches les plus fiables et peuvent encore apporter une contribution importante à la réalisation des objectifs d'ensemble de l'action des pouvoirs publics.

## Références

Agence internationale de l'énergie (AIE) (2001), *Saving Oil and Reducing CO<sub>2</sub> Emissions in Transport: Options and Strategies*, Agence internationale de l'énergie, Paris

ARB (2001), Zero Emissions Vehicle Program, California Air Resources Board.  
<http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevprog.htm>.

Besseling and Schlösser (2001), "Hybrid Vehicles: Hope or Hype", paper presented to the ATT Congress, Barcelona. Traffic Research Centre, Rotterdam.

Boardman, B., G. Banks and H. Kirby (2000), "Choosing Cleaner Cars: The Role of Labels and Guides", Final Report on Vehicle Environmental Rating Schemes, Transport Research Institute, Napier University, October.

Brauer, K. (2001), "Why the Clean Air Policy Needs Some Insight"  
<http://www.edmunds.com/news/column/carmudgeon/46990/article.html>

BTE (1996) *Transport and Greenhouse*, Bureau of Transport Economics, Canberra.

Bureau of Transport and Regional Economics (BTRE) (2002a), "Fuel Consumption by New Passenger Vehicles in Australia", Information Sheet No. 18, BTRE, Department of Transport and Regional Services, Canberra, <http://www.btre.gov.au>

Bureau of Transport and Regional Economics (2002b), *Greenhouse Policy Options for Transport* Report 105, BTRE, Department of Transport and Regional Services, Canberra, May.

Commission européenne (2000), Auto Oil II Programme  
<http://www.europa.eu.int/comm/environment/autooil/index.htm>

European Council of Ministers of Transport (ECMT) (2000) "Variabilisation and Differentiation Strategies in Road Taxation – Theoretical and Empirical Analysis – Final Report", prepared by INFRAS Consulting for the European Council of Ministers of Transport, Group on Transport and Environment, June.  
<http://www.oecd.org/cem/pub/pubpdf/RdTax.pdf>

ECMT (2001), *Vehicle Emissions Reduction*, OECD, Paris.

- Energy Foundation (2002), “Bellagio Memorandum on Motor Vehicle Policy Consensus Document”, 19-21 June 2001, Bellagio, Italy, [www.ef.org/bellagio](http://www.ef.org/bellagio)
- Kashima, S. *et al.* (1999), “Report on Auto-Related Environmental Taxes, Report for Japanese Ministry of the Environment by Panel of Experts”, July.  
[www.env.go.jp/en/org/aret/index.html](http://www.env.go.jp/en/org/aret/index.html)
- NUA (2001), Internet statistics, [www.nua.com](http://www.nua.com)
- Raimund, W. (1999), “Energy Efficiency in Passenger Cars: Labelling and Its Impacts on Fuel Efficiency and CO<sub>2</sub> Reduction”, study by the Austrian Energy Agency (EVA) for the Directorate-General for Energy (DGXVII) of the Commission of the European Communities, final report, March.
- SEPA (1997), “Environmental Taxes in Sweden: Economic Instruments of Environmental Policy”, Report 4745, Swedish Environmental Protection Agency.
- UK Department of Transport, Local Government and the Regions; Department of Trade and Industry; Department of the Environment, Food and Rural Affairs, HM Treasury (2001), “Powering Future Vehicles”, London.
- Van Zuylen and Weber (2001), “Strategies for European Innovation Policy in the Transport Field”, paper submitted for the July 2001 WCTR Conference in Seoul, Korea, Traffic Research Centre, Rotterdam.

## ANNEXES TECHNIQUES

## Annexe A

# SITUATION DE LA RÉGLEMENTATION INTERNATIONALE RELATIVE AUX ÉMISSIONS DES VÉHICULES, À L'EFFET DE SERRE ET AUX VÉHICULES ISSUS DE TECHNOLOGIES AVANCÉES

## Législation relative aux émissions des véhicules

### A.1.1 CEE/ONU

#### *Informations générales*

Le 20 mars 1958, plusieurs pays européens ont signé un accord sous le patronage de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (CEE/ONU). Cet accord (appelé Accord de 1958) a mis en place les réceptions du type et la reconnaissance réciproque des réceptions des équipements et pièces des véhicules à moteur pour les pays appliquant les réglementations en annexe à l'accord. Aujourd'hui, quelque 47 pays, ainsi que l'Union européenne elle-même, sont parties contractantes de cet accord. L'adhésion à l'accord est ouverte à tous les États membres des Nations Unies.

L'ensemble du travail technique visant à développer les réglementations CEE est effectué par le Forum mondial de l'harmonisation des règlements concernant les véhicules (appelé Groupe de travail WP29) et son groupe d'experts. Le développement de ces règlements répond au besoin continu d'améliorer la sécurité routière et de réduire les dommages subis par l'environnement, à une époque où le trafic routier est en constante augmentation. A ce jour, environ 133 réglementations ont été adoptées et par la suite amendées ou complétées, en réponse aux inquiétudes de la société et aux modifications des technologies.

La liste des réglementations existantes, dont celles concernant les émissions des véhicules, peut être consultée à <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html>.

#### *Situation actuelle*

Le rôle de la CEE/ONU en matière de réglementation des prescriptions se rapportant aux véhicules est de produire des modèles de normes pouvant être adoptées par les pays Membres. La commission ne dispose d'aucun pouvoir pour les faire appliquer. Néanmoins, des engagements ont été pris afin d'harmoniser les règlements CEE avec les normes automobiles mises en place par l'Union européenne (UE) et entre les parties contractantes de l'Accord de 1958 CEE/ONU. Au sein de l'UE, cette initiative donne lieu à des directives obligatoires pour les États membres de l'UE. Au sein de la CEE/ONU, les règlements sont disponibles pour les parties contractantes souhaitant les mettre en place si elles le souhaitent. D'autres pays comme les États-Unis, le Japon, le Canada, l'Australie,

la Chine et l’Afrique du Sud participent également aux activités du WP29 CEE/ONU et, dans une certaine mesure, les règlements CEE/ONU sont adoptés dans ces pays et dans d’autres marchés.

Le groupe de travail transmet, pour étude et préparation, différentes propositions de règlements et d’amendements des règlements existants à son groupe d’experts. Le groupe d’experts en charge de la réglementation relative aux émissions et des mesures se rapportant à l’effet de serre est le *Groupe de travail sur la pollution et l’énergie (SCI/WP29/GRPE)*.

Concernant les rejets de polluants atmosphériques, la réglementation CEE/ONU définit des limites d’émissions pour tous les véhicules routiers, dont les voitures, les poids lourds, les bus et les motocycles. La réglementation couvre les véhicules alimentés à tous les types de carburants principaux (essence, carburant diesel, GPL et GN). Bien qu’elle ne précise pas de limite pour les rejets de gaz à effet de serre, elle fournit un groupe normalisé de procédures d’essai permettant de déterminer la consommation de carburant et les rejets de CO<sub>2</sub> des véhicules.

Plusieurs initiatives sont en cours au GRPE afin d’améliorer les performances des véhicules en matière de diminution des rejets, dont les suivantes :

- Baisse des limites d’émissions dans le cadre des règlements CEE existants, y compris :
  - Baisse des valeurs limites mentionnées dans le Règlement CEE n° 83 relatif aux véhicules légers.
  - Établissement de nouveaux cycles de conduite et de nouvelles valeurs limites d’émissions, en particulier pour les véhicules de transport de marchandises, les bus et les motocycles (Règlements CEE n° 49 et n° 40).
- Amélioration des méthodologies de mesure des particules fines à l’échappement des véhicules, y compris :
  - Méthode de détermination des particules fines.
  - Évaluation et test des équipements.
  - Évaluation des techniques de dénombrement en remplacement des mesures massiques.
  - Valeurs limites de rejets de particules à l’échappement.
- Détermination des prescriptions pour les essais de réception du type des véhicules à faibles émissions issus des technologies nouvelles, spécifiquement :
  - Véhicules hybrides.
  - Véhicules équipés de la pile à combustible à hydrogène.

## *Union européenne*

### *Informations générales*

La réglementation européenne relative aux émissions a été mise en place dans les années 70 et au début des années 80, initialement dans le cadre du processus CEE/ONU décrit ci-avant. Au début de son existence, l'Union européenne adoptait généralement des règlements identiques techniquement à leurs équivalents CEE. Cette position a évolué au cours du temps, et la Communauté européenne, devenue aujourd'hui l'Union européenne, joue un rôle de plus en plus important dans la formulation des normes relatives aux émissions automobiles. Il est rare, désormais, que la CEE/ONU adopte une proposition ne faisant pas l'objet d'un accord avec l'UE.

Les règlements de l'Union européenne, publiés sous la forme de directives, font office de loi au sein des États membres selon les clauses du Traité de Rome. Les pays de l'UE ne peuvent pas interdire la vente de véhicules conformes aux prescriptions des directives, mais ils peuvent interdire la vente de véhicules non conformes. Avec l'introduction de la directive de juin 1991 concernant le rapprochement des législations relatives aux émissions, la mise en place est devenue obligatoire pour tous les pays membres de l'UE et n'a plus été laissée à la discrétion des gouvernements nationaux individuels.

Parmi les membres de l'UE, l'Autriche, le Danemark, la Finlande et la Suède ont signé en juillet 1985 « l'Accord de Stockholm » dans lequel ils acceptaient, aux côtés du Canada, de la Norvège et de la Suisse, de se conformer aux normes américaines de 1983. Ces pays ont également adopté des limites pour les poids lourds basées sur les règlements CEE/ONU. Ayant rejoint l'UE en 1994, l'Autriche, la Finlande et la Suède se sont vu octroyer une période de transition de quatre ans, s'achevant au 1<sup>er</sup> janvier 1999, pour harmoniser leur législation. L'Autriche et la Finlande, ainsi que la Norvège et la Suisse, ont adopté la plupart des directives de l'UE. La Suède a conservé certaines limites américaines basées sur des procédures d'essai fédérales. La République Tchèque, la Hongrie et la Pologne ont adopté les réglementations environnementales européennes. D'autres pays procèdent actuellement à l'adoption de ces prescriptions.

- Les publications et règlements CEE peuvent être consultés à l'adresse :  
*<http://www.unog.ch>*
- Les publications et règlements CE peuvent être consultés à l'adresse :  
*<http://www.europa.eu.int>*

### *Situation actuelle*

La directive de base réglementant les émissions des véhicules légers est la Directive 70/220/CEE. Elle est amendée par la Directive 98/69/CE (techniquement équivalente à la norme R83/05 CEE) qui fixe de nouvelles limites aux émissions pour 2000 et 2005 (ces limites sont connues sous le nom de normes Euro 3 et Euro 4). Les valeurs limites des émissions sont présentées dans le tableau A.1.

**Tableau A.1. Valeurs limites obligatoires des émissions d'échappement dans l'Union européenne**

Catégorie		Classe	Masse de référence (MR) (kg)	Limit values								
				Masse de monoxyde de carbone (CO)		Masse d'hydrocarbures (HC)		Masse d'oxydes d'azote (NOx)		Masse combinée d'hydrocarbures et d'oxydes d'azote (NOx)		Masse de particules <sup>(1)</sup> (PM)
				L1 (g/km)		L2 (g/km)		L3 (g/km)		L2+L3 (g/km)		L4 (g/km)
			Essence	Diesel	Pétrol	Diesel	Pétrol	Diesel	Pétrol	Diesel	Diesel	
<b>A (2000)</b> <b>Euro 3</b>	M <sup>(2)</sup>		Toutes	2.3	0.64	0.20	-	0.15	0.50	-	0.56	0.05
	N <sub>1</sub> <sup>(3)</sup>	I	RW ≤ 1305	2.3	0.64	0.20	-	0.15	0.50	-	0.56	0.05
		II	1305 < RW ≤ 1760	4.17	0.80	0.25	-	0.18	0.65	-	0.72	0.07
		III	1760 < RW	5.22	0.95	0.29	-	0.21	0.78	-	0.86	0.10
<b>B (2005)</b> <b>Euro 4</b>	M <sup>(2)</sup>		All	1.0	0.50	0.10	-	0.08	0.25	-	0.30	0.025
	N <sub>1</sub> <sup>(3)</sup>	I	RW ≤ 1305	1.0	0.50	0.10	-	0.08	0.25	-	0.30	0.025
		II	1305 < RW ≤ 1760	1.81	0.63	0.13	-	0.10	0.33	-	0.39	0.04
		III	1760 < RW	2.27	0.74	0.16	-	0.11	0.39	-	0.46	0.06

(1) Pour les moteurs à allumage par compression. (2) Excepté les véhicules dont la masse maximale dépasse 2 500 kg.

(3) Ainsi que les véhicules de catégorie M spécifiés dans la note 2.

La Directive 98/69/CE a également introduit une série d'autres modifications, s'ajoutant aux révisions des limites d'émissions, qui ont efficacement renforcé la sévérité des normes. Ces modifications sont présentées dans le tableau A.2.

**Tableau A.2. Prescriptions techniques complémentaires de la Directive 98/69/CE**

<b>Cycle d'essai pour les émissions d'échappement</b>	Émissions mesurées au cours d'un cycle d'essai modifié, i.e. cycle d'essai sur banc à rouleaux précédent (Euro 2) moins les 40 premières secondes du moteur au ralenti pendant lesquelles il n'y avait pas de prise d'échantillons d'émissions.
<b>Classes de masse modifiées pour les véhicules utilitaires légers</b>	Classe I $MR \leq 1\,305$ kg Classe II $1\,305 < MR \leq 1\,760$ kg Classe III $1\,760$ kg < MR
<b>Essai de démarrage à froid</b>	Nouvel essai à basse température (-7 °C) avec limites de 15 g/km pour le CO et 1.8 g/km pour les HC. Mesuré pendant la partie urbaine du cycle d'essai uniquement. Essai à froid introduit pour les nouvelles réceptions du type à partir du 1 <sup>er</sup> janvier 2002.
<b>Émissions par évaporation</b>	Nouvelle procédure avec variations de température plus fortes et plus longues afin de mieux représenter le cycle de réchauffement du véhicule pendant une période diurne. La limite d'évaporation est maintenue à 2 g/essai.
<b>Durabilité</b>	Est maintenue à 80 000 km ou 5 ans (suivant le premier de ces deux événements qui se produit) pour l'étape 2000 ( <i>Euro 3</i> ) mais passe à 100 000 km ou 5 ans (suivant le premier de ces deux événements qui se produit) pour l'étape 2005 ( <i>Euro 4</i> ).
<b>Diagnostic embarqué (OBD)<sup>1</sup></b>	La commission doit présenter un rapport concernant les dates d'application des prescriptions OBD, ainsi que des propositions adéquates pour l'étendue du champ d'application du OBD à d'autres systèmes de véhicules (couvrant la sécurité active et passive) et pour le marché des pièces de rechange et de rééquipement.
<b>Conformité en cours d'utilisation</b>	L'essai modifié insiste désormais sur l'inspection périodique par le constructeur des véhicules en service. L'autorité peut vérifier l'audit et exiger un essai de confirmation si nécessaire.  Le champ d'application de l'audit, le contrôle de l'audit et la procédure statistique d'essai des véhicules ont été examinés et la commission travaille à l'élaboration d'une proposition via une adaptation technique.
<b>Extension des réceptions aux véhicules de catégories M<sub>2</sub> et N<sub>2</sub></b>	la commission doit étudier des propositions qui seront émises au plus tard en 2004 et appliquées au plus tard en 2005.
<b>Carburants de référence</b>	La commission doit émettre une proposition définissant les spécifications pour la teneur en soufre, en aromatiques et en oxygène de l'essence, ainsi que pour la teneur en soufre du carburant diesel, de sorte qu'elles représentent les spécifications moyennes disponibles sur le marché – cette mesure sera applicable aux essais de véhicules effectués dans le cadre des limites d'émissions de 2005 ( <i>Euro 4</i> ).

Plus récemment, d'autres directives ont été adoptées, parmi lesquelles :

- Directive 1999/102/CE – Dates d'application et adaptation technique concernant les prescriptions OBD.
- Directive 2001/1/CE – Dates d'application du système OBD aux véhicules alimentés par des carburants gazeux (GPL ou GN).
- Directive 2001/000/CE – Limites d'émissions de démarrage à froid pour les véhicules de catégorie N1.
- Directive 2002/80/CE – Remplacement des convertisseurs catalytiques.

<sup>1</sup> Le diagnostic embarqué est un système de contrôle par ordinateur permettant le diagnostic automatique des polluants émis par le véhicule. Les premières prescriptions OBD ont été présentées en 2000, elles sont maintenant progressivement mises en places sur tous les nouveaux véhicules.

### *Normes UE relatives à la qualité des carburants*

Les limites des paramètres clés pour l'essence et le carburant diesel commerciaux en Europe sont mentionnées ci-après :

Qualité d'essence obligatoire au 1 <sup>er</sup> janvier 2000	150 parties par million (ppm) de soufre max., 1 % benzène, 42 % aromatiques
Qualité de gazole obligatoire au 1 <sup>er</sup> janvier 2000	350 ppm de soufre max.
Qualité d'essence obligatoire au 1 <sup>er</sup> janvier 2005	50 ppm de soufre max., 35 % aromatiques
Qualité de gazole obligatoire au 1 <sup>er</sup> janvier 2005	Teneur en soufre de 50 ppm max.
Qualité d'essence obligatoire au 1 <sup>er</sup> janvier 2009	Teneur en soufre de 10 ppm max.
Qualité de gazole obligatoire au 1 <sup>er</sup> janvier 2009	Teneur en soufre de 10 ppm max.

### *Législation relative aux émissions des véhicules aux Etats-Unis<sup>2</sup>*

#### *Historique des réductions des émissions d'échappement*

##### *1970-1975 : premières normes*

En 1970, le Congrès adopte le Clean Air Act regroupant les premières normes de contrôle des émissions d'échappement. Les polluants contrôlés sont le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV) et les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>). Les nouvelles normes entrent en vigueur en 1975, avec un niveau de NO<sub>x</sub> de 3.1 grammes par mile (gpm) pour les voitures et les véhicules utilitaires légers.

##### *1977-1988 : premiers renforcements des normes*

En 1977, le Congrès amende le Clean Air Act et renforce les normes d'émissions en deux étapes. Dans un premier temps, entre 1977 et 1979, le niveau de NO<sub>x</sub> passe à 2.0 gpm pour les voitures. Dans un second temps, en 1981, le niveau de NO<sub>x</sub> des voitures passe à 1.0 gpm. A partir de 1979, et suite aux prescriptions du Clean Air Act, l'Agence de protection de l'environnement (EPA) renforce les normes concernant les véhicules utilitaires légers et la limite devient 2.3 gpm. Enfin, en 1988, les premières normes de l'EPA concernant les émissions d'échappement des poids lourds entrent en vigueur. La limite est fixée à 1.7 gpm tandis que celle des utilitaires plus légers passe à 1.2 gpm.

##### *1990-1994 : Tier 1*

En 1990, le Congrès amende à nouveau le Clean Air Act, réduisant ainsi encore les niveaux limites des émissions. La valeur maximale des rejets de NO<sub>x</sub>, applicable à partir de 1994, est fixée à 0.6 gpm pour les voitures. La nouvelle norme, appelée « niveau 1 » (Tier 1 en anglais), représente une réduction de 40 % par rapport aux niveaux des normes de 1981. Pour les utilitaires, la nouvelle limite se situe entre 0.6 et 1.53 gpm, selon le poids du véhicule.

Les amendements de 1990 du Clean Air Act prévoient également que l'EPA évalue la qualité de l'air nécessaire, ainsi que la rentabilité et la faisabilité du renforcement des normes d'émissions pour l'année automobile 2004 et suivantes.

<sup>2</sup> Les unités utilisées sont celles de la législation américaine.

*1998 : accord volontaire pour des voitures plus propres*

En 1998, l'administration fédérale, l'industrie automobile et les États du Nord-Est mettent en place un accord volontaire, afin de commercialiser des voitures plus propres avant d'y être obligés par le Clean Air Act. Ces nouvelles voitures sont appelées véhicules nationaux à faibles émissions (NLEV). Les voitures NLEV rejettent un niveau de NO<sub>x</sub> de 0.3 gpm, soit 50 % de moins que les normes Tier 1. L'accord NLEV propose également une limite de 0.5 gpm de NO<sub>x</sub> pour les utilitaires légers seulement, soit 17 % de moins que les normes Tier 1 pour ce types de véhicules. En 1998, conformément aux dispositions des amendements de 1990 du Clean Air Act, l'EPA présente le rapport de niveau 2 (Tier 2 en anglais) au Congrès. Ce rapport prouve la nécessité, la rentabilité et la faisabilité de nouvelles réductions d'émissions d'échappement pour les années 2004 et suivantes. En 1998, l'EPA établit également que des réductions de la teneur en soufre de l'essence sont requises pour assurer la performance optimale des dispositifs de contrôle des faibles taux d'émissions.

*1999 : développement du niveau 2 (normes Tier 2) en vue d'une mise en oeuvre en 2004*

En 1999, l'EPA propose des taux d'émissions d'échappement de niveau 2 (Tier 2) applicables à partir de 2004, soit la première fois que les voitures et les véhicules utilitaires légers seront soumis au même système de contrôle national de la pollution. La nouvelle limite est fixée à 0.07 gpm de NO<sub>x</sub>, soit des réductions de 77 à 86 % pour les voitures et de 92 à 95 % pour les utilitaires par rapport à l'accord NLEV. L'EPA propose également une baisse des teneurs en soufre moyennes à 30 parties par million (ppm) (80 ppm maximum), afin d'assurer la performance optimale des technologies de contrôle des taux d'émissions des véhicules.

Au sein de ces nouvelles normes, l'EPA a inclus plusieurs mesures visant à garantir une flexibilité et une rentabilité maximales, parmi lesquelles :

- Possibilité de recourir à des moyennes afin de respecter à la fois les taux d'émissions des voitures et les teneurs en soufre dans l'essence.
- Allongement du délai octroyé aux véhicules les plus lourds pesant entre 6 000 et 8 500 livres et aux raffineurs les plus petits pour s'aligner sur leurs normes respectives.
- Autorisation d'un système commercial de vente et d'obtention de crédits pour les deux types d'industries, destiné à récompenser les acteurs les plus avancés dans le domaine de la dépollution.

Les normes NO<sub>x</sub> américaines sont résumées dans le tableau A.4.

**Tableau A.4. Normes américaines relatives aux émissions de NO<sub>x</sub>**

Voitures						
Année	1975	1977	1981	1994	1999	2004-09
Norme NO <sub>x</sub> (gpm)	3.1	2.0	1.0	0.6	0.3	0.07
Réduction de NO <sub>x</sub> (depuis norme précédente)		35%	50%	40%	50%	77%
Véhicules utilitaires légers, fourgonnettes et camions légers (moins de 6 000 livres)						
Année	1975	1979	1988	1994	1999	2004-09
Norme NO <sub>x</sub> (gpm)	3.1	2.3	1.2	0.6	0.5	0.07
Réduction de NO <sub>x</sub> (depuis norme précédente)		26%	48%	50%	17%	86%
Véhicules utilitaires lourds, fourgons et camions lourds (entre 6 000 et 8 500 livres)						
Année	1988	1994	2004-07	2008-09		
Norme NO <sub>x</sub> (gpm)	1.7	1.53	0.2	0.07		
Réduction de NO <sub>x</sub> (depuis norme précédente)		10%	87%	65 % ou 95 % depuis la norme de 1994		

- Pour plus d'informations relatives aux taux d'émissions des voitures et véhicules utilitaires légers, vous pouvez consulter le serveur Internet de l'EPA à l'adresse : <http://www.epa.gov/otaq/ld-hwy.htm>
- Pour plus d'informations relatives aux normes du niveau 2, vous pouvez consulter la page d'accueil Tier 2 à l'adresse : <http://www.epa.gov/otaq/tr2home.htm>

#### 2000 : adoption des normes de 2007 relatives aux poids lourds

En 2000, les États-Unis adoptent des normes d'émissions pour les nouveaux moteurs diesel poids lourds de l'année automobile 2007 et la règle concernant la teneur en soufre du carburant. Les niveaux d'émissions définis sont de 0.01 g/bhp-hr<sup>3</sup> pour les particules (PM), 0.20 g/bhp-hr pour les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et 0.14 g/bhp-hr pour les hydrocarbures non méthaniques (HCNM). La norme relative aux PM entrera en vigueur en 2007, tandis que la mise en application des normes NO<sub>x</sub> et HCNM pour les moteurs diesel s'étalera de 2007 à 2010. La nouvelle réglementation représente une réduction de 95 % du niveau de NO<sub>x</sub> par rapport au niveau présent (il est actuellement de 4 g/bhp-hr ; une limite intermédiaire de 2.4 g/bhp-hr du mélange NO<sub>x</sub>+HCNM entrera en vigueur en 2004/10.2002) et une réduction de 80 à 90 % du niveau d'émissions de PM (il est actuellement de 0.1 g/bhp-hr pour les poids lourds et de 0.05 g/bhp-hr pour les bus urbains).

- Pour plus d'informations, vous pouvez consulter : <http://www.epa.gov/otaq/hd-hwy.htm>

<sup>3</sup> g/bhp-hr : gramme par cheval de puissance au frein et par heure. 1bhp-hr = 0.75 kW-hr.

### *Conseil californien des ressources atmosphériques (California Air Resources Board)*

L'État de Californie a toujours été le pionnier mondial en matière de législation de contrôle des émissions et adopte généralement des limites plus strictes que les limites fédérales (Clean Air Act) s'appliquant au reste des États-Unis. La Californie a ainsi mis en oeuvre des normes plus sévères pour les véhicules utilitaires légers et les poids lourds, avec l'apparition progressive des véhicules à émissions faibles, ultra faibles puis nulles, même si le lancement de ces derniers a été retardé. Il existe également des propositions de véhicules électriques hybrides à émissions suffisamment faibles pour qu'ils soient classés dans la catégorie des véhicules à émissions proches de zéro (EZEV). Le Conseil californien des ressources atmosphériques (CARB) a développé une extension de son programme LEV pour l'appliquer aux véhicules poids lourds.

- Pour plus d'informations relatives aux normes et à la législation californiennes concernant les émissions de polluants, vous pouvez consulter :  
<http://www.arb.ca.gov/>

### *Législation relative aux émissions des véhicules au Japon*

Le Japon a annoncé une modification des niveaux d'émissions en 1989, et ces niveaux sont progressivement entrés en vigueur entre 1991 et 1998. Les autorités ont également imposé des limites d'ancienneté sur les véhicules immatriculés dans les zones métropolitaines. Il est prévu d'appliquer de nouvelles limites plus strictes aux véhicules diesel de moins de 12 tonnes, ainsi qu'un nouvel essai de durabilité. Concernant les nouveaux contrôles d'émissions, le Conseil de l'environnement central a publié le 16 avril 2002 un rapport intitulé : « Politique future pour la réduction des émissions d'échappement des véhicules motorisés (cinquième rapport) ».

Le cycle de conduite 10-15 japonais est utilisé pour ces véhicules afin de déterminer l'économie de carburant et les émissions d'échappement lors des démarrages à chaud. La procédure d'essai japonaise de mode 11 est utilisée pour évaluer les rejets gazeux lors des démarrages à froid.

Pour les véhicules utilitaires, une réglementation à long terme est déjà appliquée et les nouvelles réglementations à court terme et à long terme ont été préparées. Les émissions de polluants de ces véhicules sont mesurées au moyen de la procédure d'essai japonaise de mode 13, constituée de modes permanents.

Vous pouvez consulter la réglementation japonaise relative aux émissions de polluants des véhicules diesel, essence et GPL à l'adresse : <http://www.env.go.jp/> et à l'adresse : <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/img/215/tb2.1.2.10.gif> (en japonais uniquement). Un aperçu est proposé dans le tableau A.5. De nouvelles normes ont été instaurées en 2003 pour les poids lourds, les bus et les véhicules diesel particuliers mais elles ne sont pas mentionnées dans ce tableau.

Tableau A.5. Normes japonaises relatives aux émissions d'échappement des véhicules à moteur

Catégorie			Mode d'essai	Composés	Réglementation actuelle	
					Année d'application	Norme
Véhicules à moteur essence/GPL	Voitures particulières	4 temps et 2 temps	10-15M (g/km)	CO	2000	1,27 (0,67)
				HC	2000	0,17 (0,08)
				NOx	2000	0,17 (0,08)
			11M (g/essai)	CO	2000	31,1 (19,0)
				HC	2000	4,42 (2,20)
				NOx	2000	2,50 (1,40)
	Poids lourds et bus	Véhicules de petite taille à moteur 4 temps	10-15M (g/km)	CO	2002	5,11 (3,30)
				HC	2002	0,25 (0,13)
				NOx	2002	0,25 (0,13)
			11M (g/essai)	CO	2002	58,9 (38,0)
				HC	2002	6,40 (3,50)
				NOx	2002	3,63 (2,20)
		Véhicules de petite taille à moteur 2 temps	10-15M (g/km)	CO	1975	17,0 (13,0)
				HC	1975	15,0 (12,0)
				NOx	1975	0,50 (0,30)
			11M (g/essai)	CO	1975	130 (100)
				HC	1975	70,0 (50,0)
				NOx	1975	4,00 (2,50)
		Véhicules utilitaires légers (PTC ≤ 1.7t)	10-15M (g/km)	CO	2000	1,27 (0,67)
				HC	2000	0,17 (0,08)
				NOx	2000	0,17 (0,08)
			11M (g/test)	CO	2000	31,1 (19,0)
				HC	2000	4,42 (2,20)
				NOx	2000	2,50 (1,40)
Véhicules utilitaires moyens (1.7t < PTC ≤ 2.5t)	10-15M (g/km)	CO	2001	3,36 (2,10)		
		HC	2001	0,17 (0,08)		
		NOx	2001	0,25 (0,13)		
	11M (g/test)	CO	2001	38,5 (24,0)		
		HC	2001	4,42 (2,20)		
		NOx	2001	2,78 (1,60)		
Véhicules utilitaires lourds (2.5t < PTC)	G13M (g/kWh)	CO	2001	26,0 (16,0)		
		HC	2001	0,99 (0,58)		
		NOx	2001	2,03 (1,40)		

**Tableau A.5. Normes japonaises relatives aux émissions d'échappement des véhicules à moteur**  
(suite)

Catégorie		Mode d'essai	Composés	Réglementation actuelle			
				Année d'application	Norme		
Véhicules à moteur diesel	Voitures utilitaires	10-15M (g/km)	CO	2002	0,98 (0,63)		
			HC	2002	0,24 (0,12)		
			NOx	Petit	2002	0,43 (0,28)	
				Moyen	2002	0,45 (0,30)	
	PM		Petit	2002	0,11 (0,052)		
			Moyen	2002	0,11 (0,056)		
	Camions et bus		Véhicules utilitaires légers (PTC ≤ 1.7t)	10-15M (g/km)	CO	2002	0,98 (0,63)
					HC	2002	0,24 (0,12)
NOx		2002			0,43 (0,28)		
PM		2002			0,11 (0,052)		
Véhicules utilitaires moyens (1.7t < PTC ≤ 2.5t)		10-15M (g/km)	CO	1993	2,70 (2,10)		
			HC	1993	0,62 (0,40)		
			NOx	1997-1998	0,97 (0,70)		
			PM	1997-1998	0,18 (0,09)		
Véhicules utilitaires lourds (2.5t < GPTC)		D13M (g/kWh)	CO	1994	9,20 (7,40)		
			HC	1994	3,80 (2,90)		
			NOx	DI	1997-1999	5,80 (4,50)	
				IDI			
PM	1997-1999	0,49 (0,25)					

Notes :

1. Monoxyde de carbone (CO), hydrocarbures (HC), oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), particules (PM).
2. La valeur 2.70 (2.10) signifie que la valeur maximale autorisée pour le véhicule est de 2.70 et que la valeur moyenne pour le type de véhicule est de 2.10.
3. Le mode 10-15 (10-15M) correspond à un modèle de conduite typique en zone urbaine. Le mode 11 (11 M) est le modèle de conduite typique d'un véhicule démarrant à froid et se déplaçant d'une banlieue vers un centre urbain.
4. Concernant les véhicules à moteur diesel, les « véhicules de petite taille » ont une masse d'inertie équivalente (EIW) de 1.25 t (poids du véhicule de 1 265 t) ou moins et les « véhicules de taille moyenne » ont une EIW de plus de 1.25 t (poids du véhicule de 1 265 t).
5. « MTM » et « ATM » signifient « transmission manuelle » et « transmission automatique » respectivement.

## Cycles d'essai

### Cycles d'essai européens

Mise en place dans les années 70, la première réglementation européenne CEE 15 définit un cycle d'essai urbain à utiliser pour mesurer les émissions de polluants. Ce cycle est représentatif d'une conduite en centre-ville et sa vitesse maximale est de 50 km/h seulement. La première procédure complète CEE 15 est composée de trois essais du type I, du type II et du type III, comme suit :

#### Cycle d'essai du type I

Le cycle de conduite CEE 15 était répété quatre fois sans interruption, ce qui donnait un temps de cycle d'essai total de 780 s pour une distance de 4.052 km (2.516 miles) et une vitesse moyenne de 19 km/h (11.8 miles/h). Dans le Règlement CEE n° 83 (qui remplace le Règlement n° 15 précédent), un cycle de conduite extra-urbain (EUDC) d'une vitesse maximale de 120 km/h est ajouté.

Caractéristiques		Cycle CEE 15	Cycle EUDC
Distance	Km	4 x 1.013 = 4.052	6.955
Temps	S	4 x 195 = 780	400
Vitesse moyenne	km/h	19	62.6
Vitesse maximale	km/h	50	120
Accélération	% temps	21.6	-
Accélération	m/s <sup>2</sup> max.	-	0.833
Décélération	% temps	13.6	-
Décélération	m/s <sup>2</sup> max.	-	1.389
Ralenti	% temps	35.4	-
Vitesse constante	% temps	29.3	-

## Essai du type II

Contrôle des émissions de CO au régime de ralenti à chaud, mené immédiatement après le quatrième cycle de l'essai du type I ; sonde d'échantillonnage à l'échappement.

## Essai du type III

Procédure d'essai sur banc à rouleaux pour les émissions de gaz de carter (modes ralenti et vitesse constante de 50 km/h). Le système est certifié si le carter fonctionne sous vide partiel (comme dans les dispositifs de recyclage des gaz de carter) ou si les émissions du carter respectent les normes spécifiées.

### *Cycles d'essai américains*

Depuis 1972, la procédure d'essai américaine de contrôle des émissions d'échappement s'appuie sur un cycle transitoire représentatif des modes de conduite à Los Angeles (cycle LA-4). La procédure d'essai d'origine de 1972 (US-72) était composée de deux phases couvrant 7.5 miles en presque 23 minutes. A partir de 1975, la procédure a été modifiée de sorte que la phase I est répétée après 10 minutes d'imprégnation à chaud, ce qui constitue une troisième phase. La distance totale de l'essai est passée à 11.09 miles et la durée à 31 minutes, plus 10 minutes pour l'imprégnation à chaud. Les rejets sont mesurés au moyen d'un système d'échantillonnage à volume constant (CVS) et prélevés dans trois sacs, un pour chaque phase de l'essai.

Le cycle d'essai sur route relatif à l'économie de carburant (HWFET pour Highway Fuel Economy Test) est utilisé pour mesurer l'économie de carburant pour les normes CAFE, mais également pour mesurer les émissions de NO<sub>x</sub>.

## Consommation de carburant et réglementations CO<sub>2</sub>

### *Union européenne*

Au sein de l'Union européenne, il n'existe pas actuellement de limite légale à la consommation de carburant et aux émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules à moteur. Cependant, le Conseil des ministres européen a proposé à plusieurs reprises des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre issues des transports. De tels appels ont été considérés avec d'autant plus d'attention depuis la signature du Protocole de Kyoto en décembre 1997.

Les propositions de législation précédentes relatives à l'économie de carburant ont toujours connu des difficultés, en particulier car elles représentent un désavantage pour les voitures les plus grosses. De plus, une telle législation nécessiterait des incitations fiscales et des politiques de taxation complexes s'opposant au principe de subsidiarité.

Cependant, le 2 juillet 1996, les Commissaires européens pour l'environnement et l'industrie ont appelé publiquement l'industrie automobile à entamer des discussions « dans le but de conclure un accord au niveau européen concernant l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules ». Ces discussions ont abouti à un accord volontaire (29 juillet 1998) dans lequel les constructeurs automobiles s'engagent à réduire la consommation de carburant de leurs produits de 25 % par rapport au niveau de 1995 et à atteindre d'ici 2008 l'objectif de 140 g/km d'émissions de CO<sub>2</sub> en moyenne pour le parc des voitures neuves vendues dans l'UE.

### *Union européenne et Protocole de Kyoto*

Le Protocole de Kyoto engage les pays industrialisés à fixer légalement les réductions d'émissions de gaz à effet de serre d'ici 2008 à 2012. L'UE travaille actuellement au développement d'une stratégie d'application des engagements du protocole. Les communications de la Commission européenne relatives au changement climatique (COM(98) 353 du 3 juin 1998) ont été présentées comme « le premier pas vers une telle stratégie » et posent une série de questions au Conseil des ministres. L'un des points clés est que les États membres sont principalement responsables du respect des objectifs de réductions de Kyoto. L'UE, en tant que signataire et future partie du protocole, doit s'assurer que les actions des États membres sont cohérentes avec le traité et que leurs obligations sont remplies. Elle joue également un rôle important de complément et de soutien des États membres au moyen de mesures et de règlements communs et coordonnés. Les résultats obtenus ont été étudiés à la conférence sur l'environnement qui s'est tenue à la Haye, au Pays-Bas, à la fin de l'année 2000.

### *Voitures particulières*

La consommation moyenne de carburant des voitures particulières s'est améliorée au cours des années 70 et au début des années 80, en partie grâce à l'augmentation des prix du carburant. Cependant, plus récemment, cette tendance s'est inversée du fait de la popularité croissante des voitures plus lourdes et plus puissantes. L'augmentation de poids est due en partie à l'amélioration des prescriptions relatives à la sécurité des véhicules. La Commission européenne considère que les réductions de la consommation moyenne de carburant du parc automobile peuvent être atteintes par la mise en oeuvre de deux mesures principales : améliorations techniques des véhicules et préférence accrue des consommateurs pour l'achat de véhicules de meilleure efficacité énergétique.

La stratégie de réduction des rejets de CO<sub>2</sub> émis par les voitures particulières reposant sur l'amélioration de l'économie de carburant a été présentée dans la communication COM(95) finale du 20 décembre 1995 et dans la conclusion subséquente du Conseil du 25 juin 1996. L'objectif était d'atteindre une valeur moyenne des émissions de CO<sub>2</sub> du parc automobile de 120 g/km d'ici 2005 (ou 2010 au plus tard) pour toutes les voitures neuves. Pour cela, une série de mesures complémentaires devaient être prises :

- Accord environnemental avec l'industrie automobile dans lequel l'industrie s'engage à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des voitures neuves vendues.
- Mesures fiscales (taxation des véhicules).
- Programme d'information des consommateurs « afin d'influencer le marché ».

La Commission européenne a également proposé une législation pour un système de surveillance de la moyenne des émissions de CO<sub>2</sub> des voitures. Cette législation a été

publiée sous la forme de la décision du Parlement européen et du Conseil n° 1753/2000/CE du 22 juin 2000. L'élément (1) a fait l'objet de discussions entre la Commission européenne, l'Association des constructeurs européens d'automobiles (ACEA) et les importateurs. Ces discussions ont donné lieu à une série d'engagements :

- D'ici 2000 au plus tard, certains constructeurs doivent lancer des modèles d'automobiles rejetant 120 g de CO<sub>2</sub>/km ou moins. (Cela a été réalisé avec la mise sur le marché de plus de 10 modèles émettant 120 g ou moins, la plupart en motorisation diesel).
- L'objectif à atteindre d'ici 2008 est une moyenne de 140 g de CO<sub>2</sub>/km pour le parc des voitures neuves vendues ; selon l'ACEA, ce chiffre correspond à une réduction de 25 % par rapport au niveau de 1995.
- En 2003, l'ACEA doit étudier les possibilités d'atteindre l'objectif de la Communauté fixé à 120 g CO<sub>2</sub>/km d'ici 2012.
- Pour 2003, l'ACEA considère qu'un intervalle cible estimé de 165 à 170 g CO<sub>2</sub>/km est « approprié ».

Les détails de l'accord final entre la Commission européenne et l'ACEA ont été publiés dans la « mise en oeuvre d'une stratégie communautaire pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des voitures : accord environnemental avec l'industrie automobile européenne ». Un système de surveillance sera mis en place pour suivre le développement de la moyenne des émissions de CO<sub>2</sub> des voitures neuves particulières et permettra de répondre à tout problème éventuel lié au respect des objectifs CO<sub>2</sub> de l'accord.

## *États-Unis*

### *Normes CAFE*

L'Energy Policy and Conservation Act, passé en 1975 et amendé par le Motor Vehicle Information and Cost Saving Act, exige de chaque constructeur automobile qu'il détermine les valeurs moyennes de consommation de carburant pondérées selon les ventes pour l'ensemble des voitures particulières et des utilitaires légers qu'il produit. Les voitures électriques et les véhicules hybrides peuvent être inclus dans les calculs des moyennes du parc automobile et un crédit est accordé pour les véhicules pouvant être alimentés par plusieurs carburants. Les normes s'appuient sur la consommation de carburant combinée urbaine/route et sont appelées normes CAFE (Corporate Average Fuel Economy).

La première année d'application des normes aux voitures particulières a été l'année automobile 1978. Le niveau était de 18.0 miles par gallon (mpg). La limite est passée à 19.0 mpg pour l'année automobile 1979 puis 20.0 mpg pour 1980. L'Act a exhorté la NHTSA à établir et promulguer administrativement des normes pour les années automobiles 1981, 1982, 1983 et 1984, et à spécifier des prescriptions d'économie de carburant de 27.5 mpg pour les années automobiles 1985 et suivantes. Les normes d'économie de carburant des utilitaires légers ont été établies pour l'année automobile 1979 à 17.2 mpg pour les modèles 2 roues motrices et 15.6 mpg pour les modèles 4 roues motrices. La caractérisation de la composition du parc des utilitaires légers a été modifiée plusieurs fois au fil des années. Ces changements ont inclus des calculs obligatoires et facultatifs de configurations combinées 2 et 4 roues motrices associées aux véhicules produits sur le marché local et aux importations « captives », c'est-à-dire les

véhicules produits en dehors des États-Unis mais commercialisés sous le nom d'un fabricant national ; les parcs locaux et d'importation calculés facultativement ; et enfin les calculs relatifs aux parcs uniques. Les calculs relatifs aux voitures particulières ont également été modifiés au cours du temps, les calculs actuels sont effectués pour les parcs d'importation des fabricants et le parc produit dans le pays. Le tableau A.6 résume l'historique des normes d'économie de carburant pour les voitures particulières et les utilitaires légers, depuis la mise en oeuvre du programme jusqu'à l'année automobile 2002, dernière année pour laquelle des objectifs ont été définis.

Les limites pour 2002 sont de 27.5 mpg pour les voitures particulières. Pour les utilitaires légers, le niveau CAFE a été fixé à 20.7 mpg pour l'année automobile 2004. En avril 2003, le Département des transports américain a finalisé une réglementation visant à augmenter l'économie de carburant des utilitaires légers de 1.5 mpg en trois ans (2005 : 21.0 mpg, 2006 : 21.6 mpg, 2007 : 22.2 mpg). L'économie de carburant des voitures particulières, qui doivent respecter une moyenne de parc de 27.5 mpg, n'est pas affectée par la nouvelle réglementation. La pénalité de non conformité est passée de 5.0 USD à 5.5 USD par mile et par gallon américain pour chaque véhicule dépassant les limites ci-dessus.

- Pour plus d'informations, vous pouvez consulter le dernier rapport de l'EPA « Light-Duty Automotive Technology and Fuel Economy Trends » (Tendances de l'économie de carburant et technologies automobiles des utilitaires légers) (1975-2003) à l'adresse Internet suivante : <http://www.epa.gov/otaq/fetrends.htm> et/ou sur le site Internet de la National Highway Traffic Safety Administration du Département des transports à l'adresse : <http://www.nhtsa.dot.gov/cars/rules/rulings>

### *Réglementation californienne de contrôle des émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules à moteur*

En juillet 2002, le Gouverneur de Californie a entériné un projet de loi exigeant des constructeurs automobiles qu'ils réduisent les émissions de gaz à effet de serre des véhicules non utilitaires à compter de l'année automobile 2009. Cette nouvelle loi ne spécifie ni limites, ni objectifs spécifiques, mais demande à la place au CARB de développer et d'adopter des réglementations d'ici le 1<sup>er</sup> janvier 2005. Ces réglementations entreraient en vigueur l'année suivante, donnant ainsi à l'État le temps de législature suffisant pour les évaluer et les amender si nécessaire.

La loi stipule que les réglementations du CARB doivent permettre d'obtenir « la réduction faisable et rentable la plus élevée » des rejets de gaz à effet de serre des véhicules à moteur. Les réglementations doivent également être flexibles, afin que les constructeurs automobiles puissent, tant que les réductions d'émissions obtenues sont égales ou inférieures à la limite fixée, utiliser des méthodes alternatives de mise en conformité. A partir de l'année automobile 2000, les réglementations délivrent des crédits de réduction d'émissions aux constructeurs automobiles qui font baisser les émissions de leurs véhicules avant 2009. Les constructeurs peuvent rendre compte des diminutions de rejets obtenues auprès du California Climate Action Registry.

**Tableau A.6. Normes d'économie de carburant pour les voitures particulières et les utilitaires légers**  
(en miles par gallon)

Année automobile	Voitures particulières	Utilitaires légers <sup>(1)</sup>		
		2 roues motrices	4 roues motrices	Combiné <sup>(2), (3)</sup>
1978	18.0 <sup>(4)</sup>	...	...	...
1979	19.0 <sup>(4)</sup>	17.2	15.8	...
1980	20.0 <sup>(4)</sup>	16.0	14.0	... <sup>(5)</sup>
1981	22.0	16.7 <sup>(6)</sup>	15.0	... <sup>(5)</sup>
1982	24.0	18.0	16.0	17.5
1983	26.0	19.5	17.5	19.0
1984	27.0	20.3	18.5	20.0
1985	27.5 <sup>(4)</sup>	19.7 <sup>(7)</sup>	18.9 <sup>(7)</sup>	19.5 <sup>(7)</sup>
1986	26.0 <sup>(8)</sup>	20.5	19.5	20.0
1987	26.0 <sup>(9)</sup>	21.0	19.5	20.5
1988	26.0 <sup>(9)</sup>	21.0	19.5	20.5
1989	26.5 <sup>(10)</sup>	21.5	19.0	20.5
1990	27.5 <sup>(4)</sup>	20.5	19.0	20.0
1991	27.5 <sup>(4)</sup>	20.7	19.1	20.2
1992	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.2
1993	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.4
1994	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.5
1995	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.6
1996	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.7
1997	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.7
1998	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.7
1999	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.7
2000	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.7
2001	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.7
2002	27.5 <sup>(4)</sup>	...	...	20.7
2003				20.7
2004				20.7
2005				21.0
2006				21.6
2007				22.2

1. Les niveaux de l'année automobile 1979 relatifs aux utilitaires légers ont été établis pour les véhicules de poids nominal brut (GVWR) de 6 000 livres ou moins. Les niveaux des années automobiles 1980 et suivantes sont établis pour des utilitaires légers de GVWR de 8 500 livres ou moins.

2. Pour l'année automobile 1979, les constructeurs d'utilitaires légers pouvaient se conformer séparément aux niveaux requis pour les véhicules utilitaires généraux 4 roues motrices et les autres utilitaires légers, ou bien combiner leurs véhicules en un seul parc et respecter la limite de 17.2 mpg.

3. Pour les années automobiles 1982 à 1991, les constructeurs pouvaient se conformer aux niveaux requis pour les modèles 2 roues motrices et 4 roues motrices ou combiner leurs véhicules en un seul parc et respecter la norme combinée.

4. Établi par le Congrès dans le titre V du Motor Vehicle Information and Cost Savings Act.

5. Un constructeur dont le parc d'utilitaires légers ne fonctionnait qu'avec des moteurs de base non utilisés par ailleurs dans les voitures particulières pouvait respecter les normes de 14 mpg et 14.5 mpg pour les années automobiles 1980 et 1981, respectivement.

6. Modifié en juin 1979 depuis 18.0 mpg.

7. Modifié en octobre 1984 depuis 21.6 mpg pour les 2 roues motrices, 19.0 mpg pour les 4 roues motrices et 21.0 mpg pour les combinés.

8. Modifié en octobre 1985 depuis 27.5 mpg.

9. Modifié en octobre 1986 depuis 27.5 mpg.

10. Modifié en septembre 1988 depuis 27.5 mpg.

La nouvelle loi interdit au CARB l'imposition de nouveaux droits ou taxes sur les véhicules à moteur, les carburants ou les miles parcourus. Le bureau ne peut pas non plus interdire la vente d'un type de véhicules, exiger la réduction du poids des véhicules ou modifier les limites de vitesse.

La Californie représentant environ 10 % du marché américain des voitures neuves, l'impact de ces nouvelles règles s'étendra probablement aux véhicules proposés dans l'ensemble du pays – en particulier si d'autres États adoptent des réglementations similaires. Plusieurs opposants à la loi ont toutefois mentionné leur intention de la contester auprès de la Cour fédérale.

- Pour plus d'informations, vous pouvez consulter la page : <http://www.arb.ca.gov/cc/cc.htm>

### *Norme japonaise relative à l'économie de carburant*

Au Japon, la norme relative à l'économie de carburant a été mise en place par la méthode du « produit vedette » (top runner). Le gouvernement a défini des objectifs d'amélioration de l'économie de carburant pour les véhicules légers roulant à l'essence de 21.4 % en 2010 par rapport au niveau de 1995. Pour les véhicules légers roulant au gazole, l'économie de carburant moyenne doit être augmentée de 13.1 % en 2005 par rapport au niveau de 1995. Pour déterminer l'économie de carburant, le cycle de conduite japonais 10-15 est utilisé. Les valeurs à atteindre sont données dans le tableau A.7.

**Tableau A.7. Économies de carburant visées au Japon**

Essence	Résultat actuel 1995	Objectif 2010	Amélioration requise
Voiture particulière	12.3 km/l	15.1 km/l	22.8 %
Utilitaire PTC ≤ 2.5 t	14.4 km/l	16.3 km/l	13.2 %
Total	12.6 km/l	15.3 km/l	21.4 %
Diesel	Résultat actuel 1995	Objectif 2005	Amélioration requise
Voiture particulière	10.1 km/l	11.6 km/l	14.9 %
Utilitaire PTC ≤ 2.5 t	13.8 km/l	14.7 km/l	6.5 %
Total	10.7 km/l	12.1 km/l	13.1 %

Note : Au Japon, le véhicule diesel moyen vendu consomme davantage de carburant que le véhicule à essence moyen parce que les véhicules diesel sont essentiellement présents dans les catégories de poids supérieures.

### *Autres pays*

La législation des autres pays, quand elle existe, tend à suivre (ou adapter) les normes et méthodes d'essai américaines, européennes et japonaises.

## **Nouvelles approches et réglementations pour les véhicules hybrides ou alimentés à l'hydrogène**

### *Réception du type des véhicules hybrides*

Dans le cadre du projet CEE/ONU, le GRPE travaille au développement de normes et de procédures adaptées à une réception du type efficace pour les véhicules hybrides. Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Assurer la continuité et la cohérence entre les réglementations pour un véhicule ne fonctionnant qu'au moyen d'un moteur à combustion interne et pour un véhicule équipé d'un moteur électrique.

- Vérifier que les réglementations concernant les véhicules hybrides prennent en compte leur potentiel de production d'émissions d'échappement très faibles de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre.

En mai 2001, le GRPE a constitué un groupe de travail sur les véhicules hybrides visant à :

- Développer un ensemble de définitions adapté régissant les véhicules hybrides.
- Identifier les catégories de véhicules hybrides (HEV).
- Identifier et classer par priorité les amendements des réglementations CEE existantes.
- Établir des principes de méthodes d'essai pour la mesure des émissions et de la consommation de carburant des véhicules hybrides.

Ces mesures sont en cours d'élaboration. Pour plus d'informations sur l'état actuel de la situation, vous pouvez consulter les rapports de réunion du GRPE et les documents connexes à l'adresse : <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grpe/grperrep.html>

### ***Véhicules alimentés à l'hydrogène***

Les États-Unis, le Japon et l'Europe ont identifié l'hydrogène comme un carburant de transport propre potentiel à plus long terme. Un petit nombre de véhicules alimentés à l'hydrogène et utilisant des technologies de la pile à combustible sont déjà en service dans ces pays.

En Europe, le Projet européen intégré sur l'hydrogène (EIHP) a été établi en 1998 afin d'améliorer la sécurité des véhicules à hydrogène et de faciliter leur réception.

Les directives CE actuelles relatives aux émissions, à la consommation de carburant et à la puissance du moteur ne peuvent pas être respectées par les véhicules à hydrogène du fait de l'absence d'un carburant de référence normalisé et d'une procédure de mesure de la puissance du moteur. De plus, les prescriptions relatives à la sécurité du système de stockage embarqué de l'hydrogène sont à ce jour indéterminées. Pendant la période de transition, chaque pays applique ses prescriptions nationales (souvent différentes) pour la sécurité du système de stockage embarqué de l'hydrogène.

#### ***EIHP phase 1 (1998 – 2000)***

Les objectifs de la phase 1 étaient les suivants :

- Créer une base de données européenne des réglementations et codes de pratiques existants.
- Contacter d'autres autorités pertinentes hors de l'Europe.
- Identifier les points faibles de la technologie actuelle.
- Définir les domaines nécessitant une réglementation.
- Créer la base d'une réglementation CEE pour les véhicules à hydrogène.

A la fin de la phase 1, les partenaires du EIHP ont développé deux projets de nouvelles réglementations CEE, l'une pour le système de stockage embarqué de l'hydrogène liquide, et l'autre pour le système de stockage embarqué de l'hydrogène gazeux.

### *Phase 2 (2001 – ...)*

Les projets de réglementation développés au cours de la phase 1 sont à présent en cours de soumission auprès des organismes de réglementation européens concernés. L'objectif est de rendre ces règles harmonisables au niveau global. En s'appliquant à la conception et à la réception des véhicules à piles à combustible équipés d'un système de stockage embarqué de l'hydrogène, ces réglementations provisoires prennent en compte non seulement les composants et systèmes des véhicules à hydrogène, mais également les exigences en matière de sécurité, les procédures d'alimentation en carburant et les inspections périodiques.

Pour les composants et systèmes des infrastructures d'alimentation en hydrogène concernés, pour lesquels les normes, codes de pratique et règlements existants ne sont que partiellement identifiés, les normes et réglementations nationales applicables seront identifiées et des prescriptions nécessaires aux nouveaux projets de normes et probablement aux projets de règlements pour la réception seront développées. Ces initiatives prendront en compte également les procédures d'alimentation en carburant, les procédures de sécurité, les inspections périodiques et la disposition des stations-service. L'interface entre le poste de ravitaillement et le véhicule (réservoir et pistolet) est une question importante. La possibilité d'une harmonisation couvrant toute l'UE sera évaluée. On recherchera également dans quelle mesure certains éléments des systèmes d'alimentation peuvent être harmonisés à une échelle réglementaire globale, par exemple les composants.

Des analyses comparées des risques et de la sécurité seront effectuées concernant le dégagement d'hydrogène dans des environnements confinés ou semi-confinés, comme les tunnels, les garages, les stations-service et les rues de centre-ville. Ces études fourniront des données suffisamment détaillées pour que le partenariat mis en oeuvre puisse définir les valeurs d'entrée requises pour les normes et réglementations relatives à l'hydrogène.

A ce jour, la phase 2 a conduit au développement des documents suivants :

- Projet de réglementation harmonisée des véhicules routiers alimentés à l'hydrogène.
- Projet de procédures relatives aux inspections périodiques des véhicules (sécurité du véhicule).
- Projets de normes et de procédures d'inspections périodiques des infrastructures, des sous-systèmes et des composants d'alimentation en carburant concernés.

L'adoption de ces projets de normes et réglementations permettrait aux industries des véhicules et des infrastructures de réduire au maximum les coûts de mise en service des véhicules à piles à combustible alimentés à l'hydrogène. Les réglementations peuvent fournir un cadre légal permettant d'homologuer le fonctionnement des véhicules à hydrogène sur les routes publiques et l'alimentation en carburant aux stations-service publiques. De plus, des normes harmonisées faciliteront le commerce des composants des véhicules et des infrastructures à moyen et à long terme.

### ***Réglementations européennes relatives aux systèmes de stockage embarqué de l'hydrogène liquide***

Un groupe informel du GRPE (Groupe informel véhicules à hydrogène/pile à combustible) travaille actuellement à la réglementation des systèmes de stockage embarqués de l'hydrogène liquide et des véhicules à pile à combustible. Vous pouvez consulter les documents et présentations concernant ce groupe informel sur le site Internet du EIHP à l'adresse : [www.eihp.org](http://www.eihp.org).

### ***Approche américaine future, programme PNGV et FreedomCAR***

Aux États-Unis, les transports représentent presque un tiers des émissions de CO<sub>2</sub>, les voitures et les utilitaires légers comptant pour la moitié de cette valeur. Le « Partenariat pour une nouvelle génération de véhicules » (PNGV) était un programme de développement et de recherche de dix ans conjoint entre l'EPA et General Motors, Ford et Chrysler. Il a été annoncé en septembre 1993 et ses objectifs étaient les suivants :

- Amélioration de la compétitivité des Etats-Unis en matière de construction automobile.
- Mise en oeuvre de technologies à faibles émissions et de bonne efficacité énergétique pour les véhicules conventionnels.
- Développement d'un véhicule capable d'atteindre un niveau d'efficacité énergétique trois fois supérieur à celui d'un véhicule comparable actuel.

Le Conseil de recherche national a recommandé la restructuration du programme PNGV en raison du développement et des avancées dans des domaines connexes :

- L'économie de carburant automobile décline à mesure que la part de marché des 4x4 de loisir (SUV) augmente.
- Des progrès significatifs ont été réalisés en R&D.
- Les partenaires industriels ont annoncé qu'ils introduiraient la technologie hybride dans les véhicules en production au cours des prochaines années.
- D'autres technologies PNGV (ex. matériaux légers) commencent à être utilisées pour les véhicules conventionnels.
- Des programmes substantiels similaires au PNGV sont mis en place partout dans le monde.
- Les technologies PNGV ne permettront pas d'atteindre des efficacités énergétiques substantielles tant que de nouvelles avancées technologiques ne les rendront pas plus rentables.
- Une réévaluation serait appropriée attendu que le PNGV approche de la fin de sa période de dix ans.

En 2002, FreedomCAR remplace et améliore le programme PNGV. Le département de l'énergie et les trois plus gros constructeurs automobiles (Ford, General Motors et DaimlerChrysler) annoncent un partenariat public-privé pour développer une nouvelle économie basée sur l'hydrogène. Dans le cadre de ce programme, appelé FreedomCAR (CAR pour Cooperative Automotive Research), le gouvernement et le secteur privé s'engagent à financer des recherches pour des technologies de pile à combustible avancées, efficaces et utilisant l'hydrogène pour alimenter les voitures sans créer de

pollution. FreedomCAR s'intéresse aux technologies permettant, d'une part, la production en série de véhicules à pile à combustible à hydrogène financièrement abordables, et, d'autre part, la production des infrastructures d'alimentation en hydrogène les supportant. Ce programme continuera également à soutenir les technologies dépendant du pétrole qui présentent un potentiel de réduction de la consommation de pétrole et de l'impact sur l'environnement.

Au vu de l'évaluation du programme PNGV précédent, le Département américain de l'énergie et les partenaires industriels automobiles s'accordent sur le fait que l'approche optimale pour la R&D est un partenariat public/privé, comme indiqué dans le plan d'énergie national du Président, mais l'effort de coopération doit être réorienté, de façon à :

- Viser des objectifs de plus grande portée et insister plus sur la contribution des véhicules sur route aux questions énergétiques et environnementales.
- S'orienter vers une R&D plus fondamentale au niveau des composants et des sous-systèmes.
- Couvrir toutes les plates-formes des véhicules légers.
- Poursuivre les efforts dans le domaine des technologies à plus court terme permettant rapidement d'économiser le pétrole.
- Renforcer les efforts dans le domaine des technologies applicables à la fois aux piles à combustible et aux véhicules hybrides, ex. batteries, systèmes électroniques et moteurs.

#### *Approche stratégique*

- Développer des technologies permettant la production en série de véhicules à pile à combustible à hydrogène d'un prix abordable, et s'assurer que les infrastructures de support sont disponibles.
- Poursuivre le soutien apporté aux autres technologies afin de réduire fortement la consommation de pétrole et l'impact sur l'environnement.
- Au lieu de choisir des objectifs orientés vers des véhicules uniques, développer des technologies applicables à une large gamme de voitures particulières.

#### *Objectifs 2010 axés vers la technologie<sup>1</sup>*

- Garantir des systèmes fiables pour les futurs groupes motopropulseurs à pile à combustible à des coûts comparables à ceux des systèmes de transmission conventionnels automatiques/à moteur à combustion interne.
- Obtenir des véhicules propres et efficaces sur le plan énergétique, alimentés par des carburants propres dérivés des hydrocarbures, et entraînés par des groupes motopropulseurs à combustion interne ou des piles à combustible.
- Développer des véhicules hybrides fiables qui soient durables et d'un prix abordable.

- Pour permettre la transition vers une économie de l'hydrogène, assurer la disponibilité générale des carburants dérivés de l'hydrogène et conserver les caractéristiques fonctionnelles des véhicules actuels.
- Améliorer la base de production.

***Déclaration ministérielle japonaise relative à une stratégie exhaustive pour des « véhicules respectueux de l'environnement »***

La conférence ministérielle des transports, qui s'est tenue à Tokyo en janvier 2002, a affirmé que les bénéfices que nous ont apportés les véhicules à moteur sont accompagnés d'effets secondaires négatifs. Selon cette déclaration, des améliorations supplémentaires dans le domaine des émissions, du bruit et de l'efficacité énergétique des automobiles doivent être apportées dans un souci de développement durable, et bien que les réglementations aient été mises en place avec succès. De nouvelles améliorations techniques sont également nécessaires pour réduire substantiellement les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques, ainsi que pour réduire les niveaux de bruit.

Les prochains thèmes abordés dans les réglementations à venir seront le concept de véhicule respectueux de l'environnement (EFV), le rôle du gouvernement dans le développement et la diffusion des EFV, la disponibilité des carburants adaptés, ainsi que la coopération internationale et l'harmonisation des normes dans le monde entier. Dans le contexte de ces réglementations, une conférence internationale sur les véhicules respectueux de l'environnement s'est tenue à Tokyo en janvier 2003, et les délégations ont soutenu l'initiative visant à harmoniser les normes EFV et les procédures d'essai au sein de l'accord global dans le cadre du Forum mondial pour l'harmonisation des réglementations automobiles de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies.

## Annexe B

# TECHNOLOGIES TRADITIONNELLES ET NOUVELLES

### Introduction

La présente annexe apporte un complément d'informations au rapport principal. Elle est un développement des chapitres 2 et 3 principalement. Elle décrit et évalue les technologies conventionnelles et nouvelles, et se centre sur leur impact dans les domaines suivants :

- Les rejets des polluants traditionnels, dangereux pour la santé publique et l'environnement. Parmi ces polluants figurent le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les particules (PM).
- Les émissions des gaz ayant une influence sur le climat, appelés gaz à effet de serre, dont font partie le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O).
- L'économie de carburant, les ressources naturelles de pétrole étant limitées.

### Réduction des polluants atmosphériques réglementés

Depuis le début des années 1970, des efforts importants ont été entrepris afin de réduire les émissions de polluants par un renforcement de la législation relative aux véhicules neufs. Cette section décrit l'évolution des moteurs traditionnels du fait de ces modifications légales, ainsi que les résultats qui ont été obtenus.

#### *Évolution des moteurs traditionnels*

La législation limitant les émissions de polluants des voitures particulières est tout d'abord apparue en Californie, où les problèmes liés à la qualité de l'air étaient jugés assez sévères. Les premières mesures prises pour les véhicules à essence ont été l'amélioration des réglages des carburateurs, ainsi que l'application de la recirculation des gaz d'échappement. Cependant, au cours des années 70, ces mesures se sont révélées insuffisantes pour respecter les normes de plus en plus strictes relatives aux émissions. On a donc vu apparaître les premiers convertisseurs catalytiques. Pour ne pas endommager ces convertisseurs, les carburants sans plomb ont été adoptés en parallèle, ce qui a permis d'éliminer également la pollution de l'environnement par le plomb issu des véhicules à moteur.

Les premiers catalyseurs étaient de type non régulé (oxydant). Le mélange introduit dans le moteur n'était pas optimisé pour leur fonctionnement. La réactivité des convertisseurs catalytiques étant maximale pour le CO, les COV et les NO<sub>x</sub> lorsque le mélange est d'une certaine composition (quand la masse d'air représente 14.7 fois la masse d'essence, *i.e.*  $\lambda = 1$ ), les voitures particulières à essence des années 80 ont été équipées d'un système en boucle fermée doté d'un détecteur d'oxygène, le plus souvent avec un système de contrôle du moteur et un système d'injection électronique du carburant. Le carburateur a alors disparu des voitures particulières. Le renforcement accru des restrictions relatives aux émissions a conduit à l'augmentation de l'efficacité des catalyseurs et à l'amélioration des dispositifs de contrôle des moteurs ; les émissions des démarrages à froid et par évaporation devenant par ailleurs proportionnellement plus importantes ont dû être sévèrement contrôlées. .

En Europe, la situation a évolué de la même façon qu'aux États-Unis, mais avec environ dix ans de retard. Les premiers convertisseurs catalytiques sont apparus à la fin des années 80, suite aux programmes d'incitation fiscale de plusieurs pays, et ce n'est qu'en 1992, à l'occasion de la législation « Euro 1 », que les catalyseurs à trois voies contrôlés en boucle fermée sont devenus la technologie standard.

Dans le cas des voitures particulières diesel, les principaux problèmes de pollution au niveau local concernent les réductions des NO<sub>x</sub> et des particules. Jusqu'à présent, les constructeurs automobiles ont réussi à respecter les réglementations européennes et américaines grâce à des ajustements des injecteurs et des pompes à gazole, l'utilisation de pressions plus élevées et/ou la recirculation des gaz d'échappement. Aujourd'hui, un petit nombre de constructeurs équipent leurs véhicules de filtres à particules. Bien que les émissions de CO et de COV des voitures diesel soient naturellement assez faibles, le renforcement de la législation européenne dans les années 90 a conduit à la généralisation de l'emploi des catalyseurs d'oxydation pour les véhicules diesel.

## Résultats

Afin d'illustrer les réductions d'émissions de polluants atmosphériques locaux issues des voitures particulières, cette section présente des graphiques des résultats obtenus grâce au programme néerlandais de conformité en cours d'utilisation (IUC), mené depuis les années 80. Des tendances identiques sont observées dans la plupart des pays de l'OCDE. Les résultats sont donnés pour les CO, COV, NO<sub>x</sub> et particules (PM<sub>10</sub> diesel uniquement). La hauteur des barres indique l'étendue des émissions mesurées. Le tableau B.1 décrit les classes de technologie incluses dans l'analyse IUC.

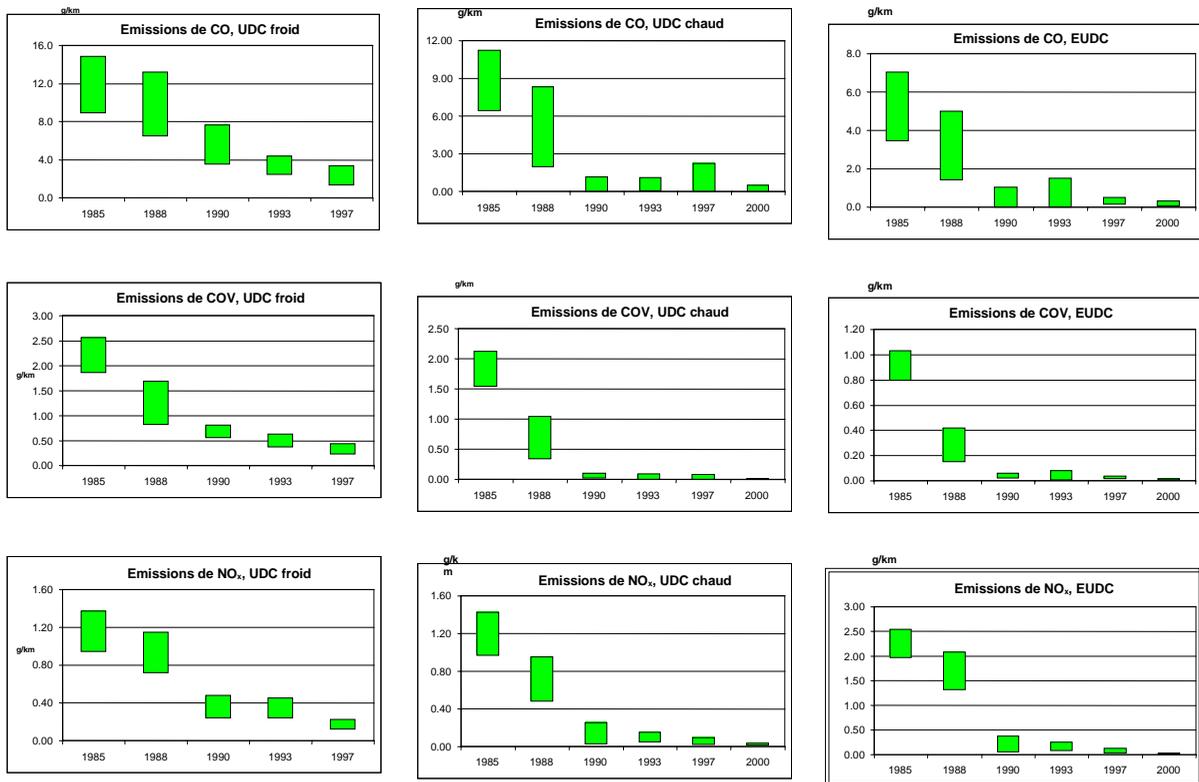
**Tableau B.1. Classes de technologie incluses dans l'analyse IUC**

Année automobile	Essence	Diesel
1985	Voitures pré-Euro 1 (« Euro 0 ») équipées d'un convertisseur catalytique	
1988	Voitures pré-Euro 1 (« Euro 0 ») équipées d'un convertisseur catalytique non régulé	Voitures pré-Euro 1 (« Euro 0 ») sans catalyseur d'oxydation
1990	Voitures pré-Euro 1 (« Euro 0 ») équipées d'un convertisseur catalytique régulé	
1993	Voitures Euro 1 équipées d'un convertisseur catalytique non régulé	Voitures Euro 1 sans catalyseur d'oxydation
1997	Voitures Euro 2 équipées d'un convertisseur catalytique régulé	Voitures Euro 2 avec ou sans catalyseur d'oxydation (selon le véhicule)
2000	Voitures Euro 3 équipées d'un convertisseur catalytique régulé	Voitures Euro 3 équipées d'un catalyseur d'oxydation

Dans le programme IUC néerlandais, les émissions sont mesurées pour plusieurs cycles de conduite :

- Cycle de conduite urbain (UDC) avec démarrage à froid (jusqu'à Euro 2).
- Cycle de conduite urbain (UDC) avec démarrage à chaud.
- Cycle de conduite extra-urbain (EUDC) avec démarrage à chaud.

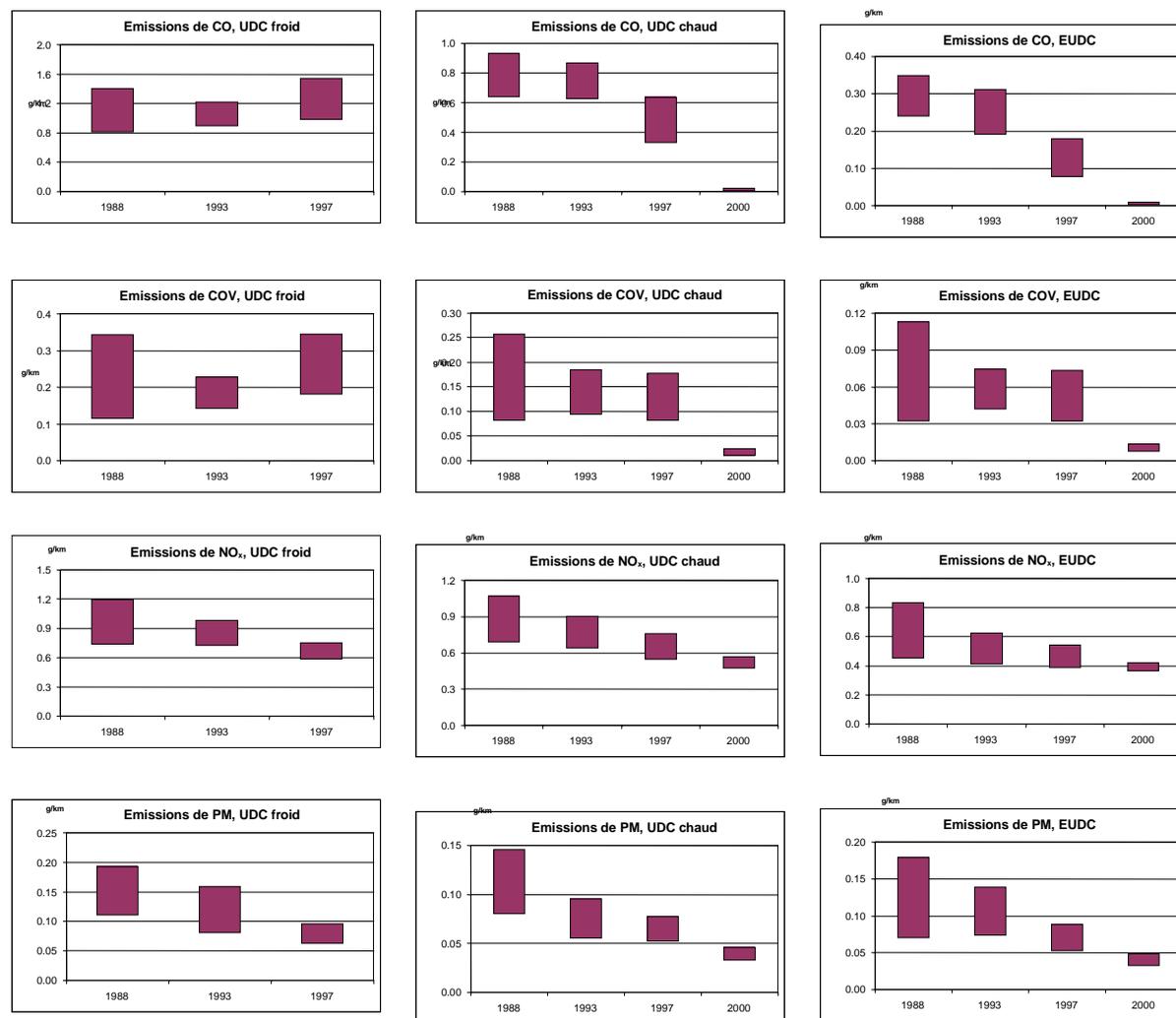
**Figure B.1. Réductions des émissions issues des voitures particulières (essence)**



Source : Programme IUC néerlandais, 1987-2002.

Les graphiques ci-dessus indiquent clairement que les émissions de NO<sub>x</sub>, CO et COV ont fortement diminué depuis l'introduction des catalyseurs à trois voies et la mise en oeuvre des normes Euro 3. Les émissions ont atteint des niveaux si faibles qu'il est devenu difficile de les mesurer avec précision. Ces graphiques montrent également que l'impact du démarrage à froid est de plus en plus important.

Figure B.2. Réductions des émissions issues des voitures particulières (diesel)



Source : Programme IUC néerlandais, 1987-2002.

Dans le cas des voitures particulières diesel (figure B.2), l'introduction des catalyseurs d'oxydation a fait diminuer considérablement les émissions de CO et de COV. La réduction des émissions de NO<sub>x</sub> et de particules est plus progressive. Elle peut encore faire l'objet d'améliorations complémentaires dans les années à venir avec la mise en place des normes Euro 4 en 2005.

## Réduction des émissions de gaz à effet de serre

### *Répartition de la consommation énergétique d'un véhicule traditionnel*

L'énergie chimique contenue dans le carburant est convertie par le moteur en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est utilisée pour compenser l'inertie et la résistance à l'air et au roulement du véhicule, et pour générer l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des composants électriques comme l'éclairage.

L'énergie n'est que partiellement destinée à la propulsion et aux composants auxiliaires. Une partie est consommée pendant les processus chimiques ou thermodynamiques et pour vaincre les forces de frottement. Le tableau B.2 donne un exemple de répartition de la consommation énergétique d'une voiture particulière européenne conventionnelle de taille moyenne, équipée d'un moteur à essence à combustion interne (ICE), produite en 2000. Cette répartition sera également présentée pour des véhicules plus avancés, plus loin dans la présente annexe.

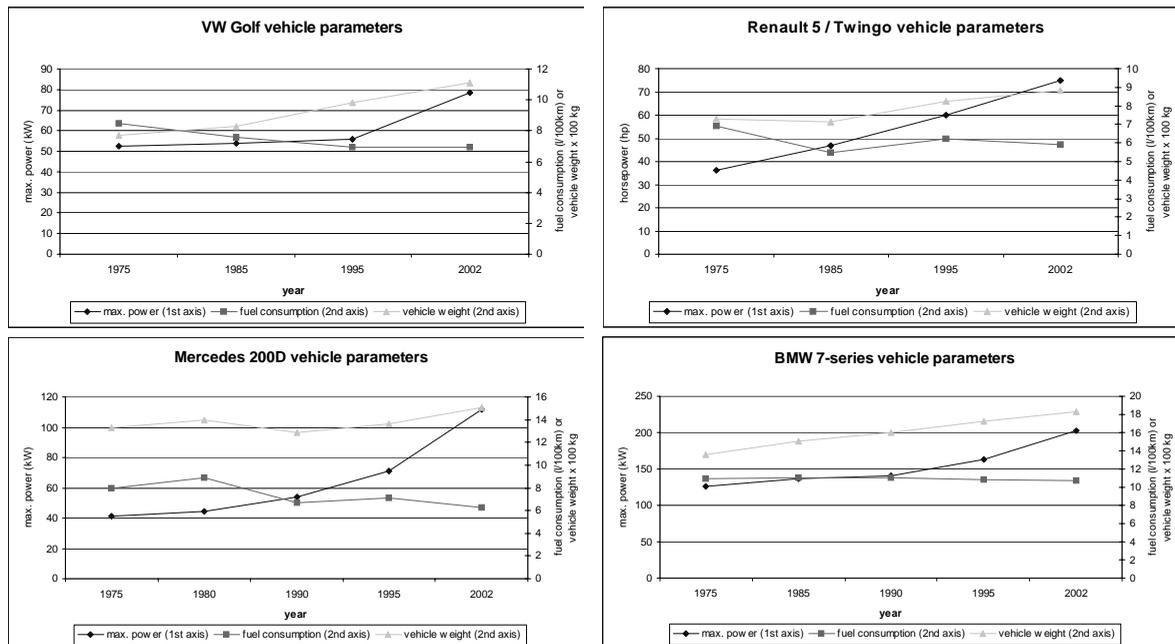
**Tableau B.2. Répartition de la consommation énergétique d'une voiture particulière standard traditionnelle de taille moyenne**

Type de trajet		Urbain	Autoroute
<b>Énergie contenue dans le carburant</b>		<b>100 %</b>	<b>100 %</b>
<b>Pertes de la chaîne cinématique</b>	Pertes thermodynamiques	60	60
	Pertes du moteur	12	3
	Pertes de la transmission	4	5
	<b>Total</b>	<b>76 %</b>	<b>68 %</b>
<b>Consommation des composants</b>	Auxiliaires	2	1
	Accessoires	1	1
	Climatisation (si utilisée)	10	10
	<b>Total</b>	<b>13 %</b>	<b>12 %</b>
<b>Utilisation pour la propulsion</b>	Résistance à l'air	2	11
	Résistance au roulement	4	7
	Pertes cinétiques/freinage (pente nulle)	5	2
	<b>Total</b>	<b>11 %</b>	<b>20 %</b>

Comme indiqué dans le tableau B.2, la majeure partie de l'énergie initialement contenue dans le carburant est transformée en chaleur. Au fil des années, de nombreux efforts ont été menés pour améliorer l'efficacité des moteurs. Celle-ci a augmenté grâce à l'utilisation de moteurs à combustion pauvre et de systèmes d'injection directe. La consommation de carburant des voitures particulières n'a pas diminué à la même vitesse, notamment du fait de l'augmentation du poids des véhicules.

Cependant, la consommation de carburant des automobiles a globalement baissé, en dépit de l'accroissement du poids et de la puissance maximale des véhicules (figure B.3). D'après les essais de réglementation CEE, le modèle 2002 de la Golf VW consommait 20 % de moins que son modèle prédécesseur de 1975 – malgré un poids supérieur de 44 %.

**Figure B.3. Comparaison entre le poids des véhicules et la consommation de carburant (d'après les spécifications des constructeurs)**



Légende :

Puissance max. (kW) / Consommation carburant (l/100km) ou poids véhicule x 100kg

Puissance max. (1<sup>er</sup> axe) / Consommation carburant (2<sup>ème</sup> axe) / Poids véhicule (2<sup>ème</sup> axe)

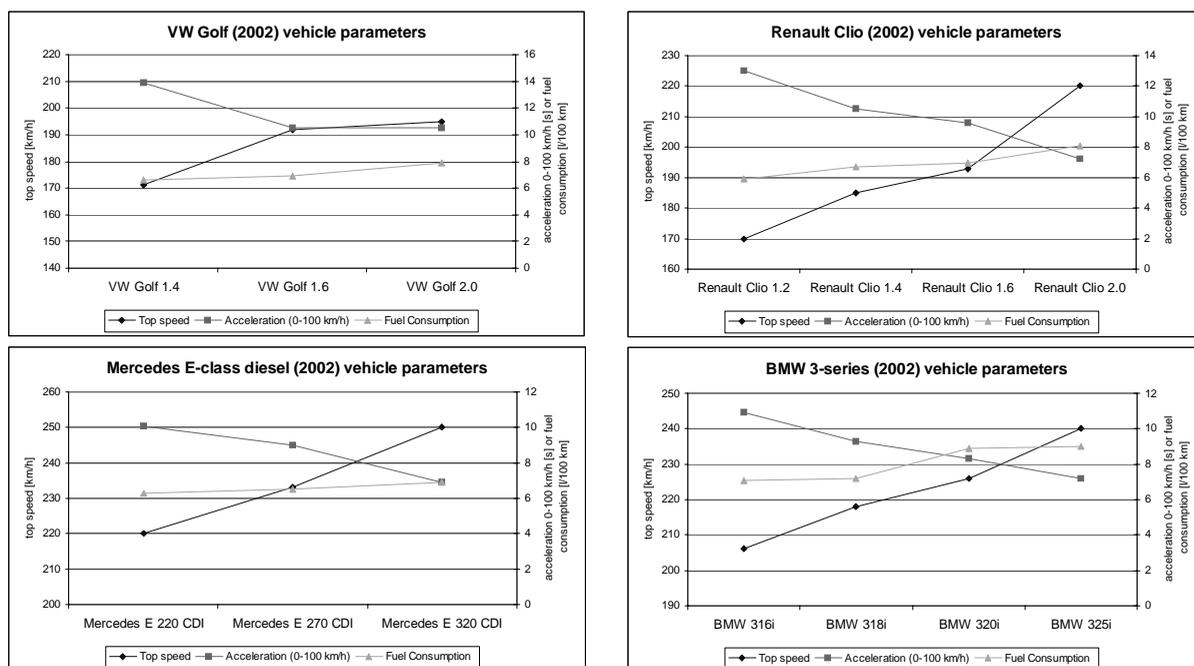
### **Paramètres techniques influant sur la consommation de carburant**

La consommation de carburant d'un véhicule dépend du rendement du moteur, de celui de la transmission, des équipements auxiliaires, de la récupération ou non de l'énergie de freinage, du poids et de l'aérodynamique du véhicule, de la traînée due aux fenêtres et aux porte-bagages, ainsi que des accessoires comme le climatiseur, l'éclairage, les appareils audio, le système de dégivrage, etc.

L'énergie produite par le moteur est bien sûr utilisée pour la propulsion et les systèmes auxiliaires. La présente section analyse l'énergie consommée par la propulsion et les auxiliaires, ainsi que les performances du véhicule. Cette analyse est consacrée à l'efficacité du réservoir à la roue (*i.e.* du véhicule uniquement). Elle ne peut donc pas être utilisée pour l'étude des émissions de CO<sub>2</sub>, l'efficacité du puits à la roue (de la production du carburant jusqu'à son utilisation finale) jouant dans ce cas un rôle important (voir section 3.8 du rapport principal).

L'un des facteurs majeurs influant sur la consommation de carburant est la performance du moteur, généralement proportionnelle à sa cylindrée (voir figure B.4).

**Figure B.4. Consommation de carburant et performances d'un véhicule pour différentes cylindrées du moteur (d'après les spécifications des constructeurs)**



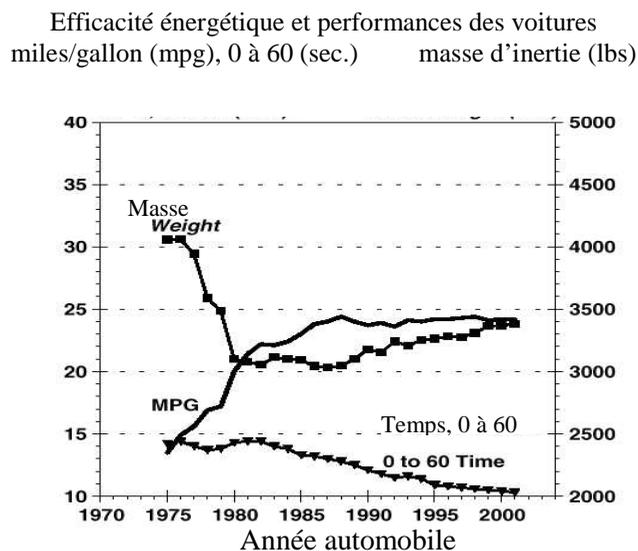
*Légende :*

*Vitesse maximale (km/h) / Accélération 0-100 km/h ou consommation carburant (l/100km)*

*Vitesse maximale (1<sup>er</sup> axe) / Accélération (0-100 km/h) / Consommation carburant*

D'après la figure B.4, les moteurs les plus petits, consommant le moins de carburant, fournissent des performances tout à fait satisfaisantes pour une utilisation dans les conditions de conduite actuelles.

La figure B.5 illustre les tendances en termes de performance, de poids et d'économie de carburant ajustée des voitures particulières américaines. On constate une augmentation du poids et de la performance au cours des 20 dernières années, pour une économie de carburant quasiment constante (Hellman et Heavenrich, 2001).

**Figure B.5. Efficacité énergétique et performances des voitures américaines par année automobile**

De nouvelles technologies plus efficaces continuent de faire leur apparition dans les parcs automobiles mais l'augmentation de la puissance et du nombre d'accessoires souhaités par les consommateurs conduit à des véhicules plus lourds et d'accélération plus rapide. C'est pourquoi l'économie de carburant des voitures actuelles ne progresse pas. Aux États-Unis, les véhicules légers de l'année automobile 2001 ont la même consommation moyenne que ceux de 1981, soit 20 ans plus tôt. A partir des relations techniques établies, on calcule que si le parc automobile léger de 2001 avait le même poids et les mêmes performances que celui de 1981, il permettrait une économie globale de carburant de 25 % (Hellman et Heavenrich, 2001).

### *Évolution des technologies des moteurs traditionnels*

Les efforts en matière d'économie de carburant pour les voitures particulières répondent à la diminution des réserves de pétrole dans le monde et aux inquiétudes à propos de la conservation et de l'approvisionnement largement soulevées pour la première fois pendant la crise pétrolière des années 70. Dans les années 90, cette volonté d'améliorer l'efficacité énergétique des véhicules a été renforcée par les appréhensions relatives au réchauffement de la planète du fait des émissions de CO<sub>2</sub>. Au cours des dix dernières années, les constructeurs automobiles ont ainsi fortement contribué à l'augmentation de cette efficacité en optimisant le rendement des moteurs. La plupart des modifications apportées concernent l'amélioration de la conception de base du moteur. Par exemple, des matériaux à faible coefficient de frottement sont utilisés et la géométrie de la chambre de combustion et des collecteurs d'admission et d'échappement est optimisée.

Dans les *voitures essence*, les carburateurs ont été remplacés par des dispositifs à commande électronique d'injection de carburant, ce qui a permis un ajustement plus précis du mélange. L'utilisation à grande échelle de la technologie multi-soupapes a également largement augmenté le rendement du moteur. Cependant, avec l'apparition des convertisseurs catalytiques, la consommation de carburant est plus importante. En effet, les réglages habituellement pauvres à  $\lambda = 1.1$  ont été remplacés par des réglages à  $\lambda = 1$

pour que la réactivité catalytique soit la meilleure. De plus, la contre-pression d'échappement est légèrement plus forte du fait du catalyseur.

Dans les *voitures diesel*, les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation de carburant sont déjà plus réduites que dans les voitures essence. Au cours des dix dernières années, les véhicules diesel ont bénéficié de l'apparition de l'injection directe, précédemment réservée aux applications poids lourds. La dernière innovation technologique dans le domaine du diesel concerne les systèmes d'injection à commande électronique, comme la rampe commune et l'injecteur pompe, qui permettent de moduler le temps d'injection et la quantité de carburant injectée, et également d'atteindre des pressions plus élevées. Certains moteurs diesel de pointe actuels, de rendement élevé, ne fournissent même plus suffisamment de chaleur pour l'habitacle lorsqu'il fait très froid. Des appareils de chauffage électriques complémentaires sont alors nécessaires pour les zones très froides.

De manière générale, l'utilisation de plus en plus répandue des transmissions automatiques sur les voitures particulières a eu un impact négatif sur la consommation de carburant.

### ***Traînée, résistance au roulement et poids***

La traînée, la résistance au roulement et le poids sont les principaux paramètres influant sur la consommation de carburant, comme il est expliqué dans le rapport principal.

### ***Consommation énergétique des auxiliaires et des composants***

#### *Systèmes de conditionnement d'air embarqués*

Jusqu'à présent, les accessoires ne représentaient qu'une petite partie de la consommation de carburant. En effet, ils n'incluaient ni l'air conditionné, ni le chauffage auxiliaire. En revanche, les voitures modernes sont de plus en plus souvent équipées d'un climatiseur. Les véhicules diesel les plus récents, dotés de moteurs hautement performants, requièrent un dispositif de chauffage complémentaire et utilisent par conséquent un appareil de chauffage auxiliaire.

#### **Systèmes de climatisation**

La puissance requise pour le fonctionnement d'un système de climatisation embarqué conventionnel peut être divisée en deux parties distinctes : d'une part, la puissance nécessaire à l'activation du compresseur de l'air conditionné, et d'autre part, la puissance électrique consommée par les ventilateurs entraînant l'air à travers le condenseur et l'évaporateur. La température ambiante, la température intérieure préréglée ou souhaitée, la quantité d'air recirculé, l'humidité ambiante et l'isolation du véhicule des rayonnements solaires ou thermiques sont d'importants facteurs influant sur la consommation de carburant et les émissions de CO<sub>2</sub>, ainsi que sur les émissions de polluants locaux.

Les climatiseurs sont aussi parfois utilisés pour désembuer les fenêtres du véhicule, en général juste après un démarrage à froid quand la température ambiante est basse et que l'humidité relative est élevée. La vapeur d'eau de l'air qui pénètre dans le climatiseur se condense à la surface froide du condenseur. L'air refroidi au niveau du condenseur doit être réchauffé jusqu'à une température acceptable avant d'entrer dans l'habitacle. Un chauffage complémentaire est évidemment nécessaire à ce niveau.

Une étude a été réalisée par TNO (Gense, 2000), afin de déterminer la consommation énergétique et les émissions des voitures quand leur climatiseur est en marche. Les mesures ont été effectuées pour un système de climatisation fonctionnant à plein régime, la température préréglée de 20 °C dans la voiture n'étant pas atteinte pendant l'essai, ce qui correspond à la situation du pire scénario. Dans la pratique, cette situation de climatisation à plein régime ne se produit que lorsque les températures extérieures sont très élevées ou pendant la période de refroidissement de l'habitacle, avant que la température d'équilibre ne soit atteinte et que la charge ne soit réduite à un niveau suffisant au maintien de la température intérieure à la valeur souhaitée.

L'utilisation du climatiseur à plein régime a provoqué une augmentation moyenne de 27 % de la consommation de carburant des cinq véhicules testés. Les émissions de CO, de HC et de particules augmentent encore plus considérablement.

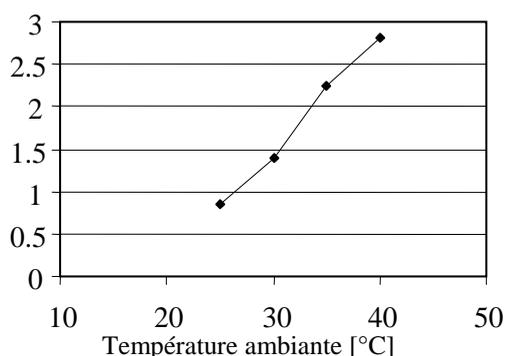
**Tableau B.3. Émissions supplémentaires dues au fonctionnement à plein régime du climatiseur, exprimées en valeurs relatives par rapport aux émissions d'un même véhicule sans air conditionné (%)**

Variable mesurée	Urbain	Rural	Autoroute	Trajet moyen
Consommation carburant	+29	+30	+24	+27
CO <sub>2</sub>	+28	+25	+21	+25
CO	+796	+616	+478	+605
HC	+260	+271	+114	+207
NO <sub>x</sub>	+76	+17	+17	+31
Particules	+139	+64	+262	+159

D'autres études ont montré que l'augmentation de la consommation de carburant et donc l'augmentation des rejets de CO<sub>2</sub> sont dans une certaine mesure proportionnelles à la température ambiante. La figure B.6 illustre les résultats des recherches effectuées par l'UTAC/INRETS (Barbusse, Clodic et Roumégoux, 1998).

**Figure B.6. Puissance de l'air conditionné en fonction de la température ambiante**

Puissance air conditionné [kW]



Les systèmes de conditionnement d'air embarqués ont pour autre conséquence de représenter un surplus de poids pour le véhicule. Du fait de cette masse supplémentaire, la consommation énergétique augmente. En effet, l'inertie du système nécessite plus d'énergie pendant les accélérations. La consommation énergétique supplémentaire liée au poids de tels appareils est comprise entre 0.03 et 0.06 litres/100 km.

Parallèlement à l'augmentation de la quantité de carburant consommée, on observe une hausse des émissions à l'échappement. Ce phénomène est dû à la relation existant entre la charge du moteur, d'une part, et la stratégie de contrôle et de gestion du moteur, d'autre part. La puissance additionnelle requise pour le climatiseur, particulièrement en cas de ralenti ou de conduite à vitesse lente, peut faire augmenter la charge de façon conséquente par rapport au niveau requis pour le déplacement du véhicule. Les stratégies de contrôle du moteur ne sont pas toujours optimisées pour cette situation.

De nouvelles technologies sont actuellement développées pour les systèmes de conditionnement d'air. Certains développements ont pour objectif d'augmenter l'efficacité du dispositif en termes de consommation énergétique. D'autres résultent du fait que les spécifications différentes des fluides frigorigènes alternatifs utilisés – de potentiel d'effet de serre (GWP) plus faible que celui des fluides frigorigènes classiques – nécessitent des configurations d'appareils spécifiques.

Les développements actuellement étudiés pour les systèmes de climatisation se centrent sur :

- La réduction du poids des composants.
- L'augmentation de l'efficacité du compresseur au moyen d'une cylindrée variable ou d'un système motorisation électrique indépendant du moteur thermique.
- Une meilleure précision de contrôle de la température au moyen d'une commande intelligente.
- Les pompes à chaleur.
- Les systèmes d'absorption.
- Le stockage thermique.
- L'utilisation de fluides frigorigènes de plus faible GWP, ce qui nécessite souvent une configuration d'appareil non conventionnelle.
- Des systèmes à circuit secondaire.

### Appareils de chauffage auxiliaires

Les appareils de chauffage auxiliaires sont également à l'origine de l'augmentation des émissions et de la consommation de carburant. Comme mentionné plus haut, les véhicules diesel modernes, dotés de moteurs très efficaces, ne disposent plus d'un surplus de chaleur suffisant pour prendre en charge le système de chauffage. Un appareil complémentaire est donc nécessaire pour un échauffement plus rapide du moteur et/ou pour le chauffage de l'habitacle. A cet effet, un dispositif de chauffage électrique peut être monté dans le circuit de refroidissement du moteur, ou bien un dispositif de chauffage fonctionnant au carburant est intégré au circuit de refroidissement au moyen d'un échangeur thermique. Ces deux systèmes permettent au moteur de chauffer plus rapidement, et donc, de réchauffer plus vite l'intérieur de la voiture. (Il est à noter que ce temps de chauffage plus rapide du moteur correspond à une légère baisse de la consommation de carburant au démarrage. Cependant, il est difficile de déterminer dans quelle mesure cette diminution compense la consommation de carburant supplémentaire engendrée par les appareils de chauffage.) Une autre méthode consiste à monter un appareil de chauffage électrique dans le flux d'air dirigé vers l'habitacle du véhicule.

Les deux systèmes, qu'ils fonctionnent au carburant ou à l'électricité, consomment un surplus d'énergie – soit directement sous la forme du carburant alimentant l'appareil, soit indirectement sous la forme d'énergie électrique issue de l'alternateur du véhicule (actionné par le moteur). D'autres systèmes sont également développés. L'un d'eux, bien connu, est un appareil de chauffage par frottement. Le frottement de l'huile entre une plaque en rotation et une plaque fixe provoque son échauffement. La chaleur est transmise au liquide refroidissant du moteur au moyen d'un échangeur thermique. Ce système, directement activé par le moteur, consomme également un surplus d'énergie.

### Autres équipements

Les nouveaux véhicules sont dotés d'une large gamme d'équipements électriques destinés à améliorer le confort et la sécurité. Dans une voiture moderne, la puissance requise pour de tels équipements est d'environ 1 000 W (1 kW). Dans un avenir proche, cette puissance pourrait augmenter jusqu'à 5 kW, selon le nombre et les fonctionnalités des dispositifs utilisés dans la voiture. Certaines sources suggèrent qu'elle pourrait même atteindre 12 kW en 2010. Des systèmes électriques de 42 V sont en cours de développement afin de répondre aux exigences prévues et de diminuer les pertes par dissipation.

Les prochains équipements embarqués pourraient nécessiter une puissance informatique accrue pour des fonctions de rapport d'état et de commande toujours plus nombreuses dans les voitures, ainsi que des dispositifs complémentaires tels que : suspension active assistée pilotée par ordinateur ; freins et transmission de la puissance à la roue actionnés électriquement ; pilotage électronique (« by-wire ») de la commande de direction ; rétroviseurs arrières vidéo, radar anti-collision ; portes électriques avec verrouillage de sécurité ; compresseurs de climatiseurs électriques pouvant être utilisés quand le moteur est à l'arrêt ; éclairage optimisé pour la vision de nuit ; bureau mobile complet disposant de fonctions comme Internet, fax, téléphone et GPS ; accès TV, vidéo et Internet à tous les sièges passagers ; climatisation à l'avance de l'habitacle avec chauffage/refroidissement quand le véhicule est garé ; réfrigérateurs et refroidisseurs ; chauffage par catalyse ; réduction active du bruit de l'échappement ; sièges/volant réchauffés/refroidis ; fenêtres/rétroviseurs photosensibles ; commande active à distance du véhicule ; suspension active ; temporisation des soupapes entièrement variable ; changement de vitesse manuel automatisé ; pompe électrique ; systèmes de compression variable ; sièges électriques réglables ; appuie-tête arrières rétractables ; rétroviseur rétractable ; et bien d'autres encore.

La plupart de ces fonctions sont soit en développement, soit déjà proposées dans les modèles haut de gamme des séries actuelles de véhicules. Elles requièrent un surplus d'énergie électrique. Afin de disposer de cette énergie, il est urgent de mettre au point des moteurs d'une efficacité supérieure et des systèmes intelligents de gestion du circuit électrique complet. Un alternateur plus efficace ou un groupe auxiliaire de puissance (APU) peuvent fournir cette énergie électrique. Il est également possible d'utiliser une pile à combustible comme APU et de réaliser ainsi des économies de carburant, en particulier dans les véhicules très consommateurs d'électricité.

## *Conclusions*

La consommation d'énergie requise pour les équipements auxiliaires et l'impact sur les émissions des véhicules ne sont pas pris en compte dans les cycles d'essai officiels et ne sont donc pas mesurés dans le cadre des procédures d'essais de réception du type. Cette situation est fâcheuse étant donné que les données de réception du type servent de base principale aux informations et aux comparaisons transmises aux consommateurs. Pour que les comparaisons des performances des véhicules soient équitables, les consommateurs devraient avoir accès aux informations relatives à la performance environnementale des véhicules en usage réel, avec l'air conditionné et les autres appareils en marche. Cette méthode encouragerait également les constructeurs automobiles à développer des systèmes plus efficaces pour l'utilisation en conditions réelles et pas seulement pour les besoins des cycles d'essai, ainsi que des stratégies de calibration des moteurs optimales prenant en compte la charge supplémentaire représentée par les équipements auxiliaires en fonctionnement réel. Grâce à ces stratégies, les émissions des véhicules seraient minimisées.

## **Améliorations apportées aux véhicules traditionnels<sup>1</sup>**

### *Améliorations des moteurs à essence*

#### *Réduction des émissions à l'échappement*

Les performances en matière d'émissions des moteurs à explosion s'appuient actuellement sur l'utilisation d'un mélange combustible en boucle fermée  $\lambda=1^2$  et d'un convertisseur catalytique à trois voies. Le contrôle du mélange est obtenu au moyen d'un détecteur d'oxygène placé à l'échappement et d'une unité de commande électronique. Il s'agit d'un système relativement lent. L'unité de commande électronique utilise donc des calculs proactifs optimisés, ajustés ensuite grâce au retour d'informations du détecteur d'oxygène. Le rapport air/carburant varie en fonction de ce signal autour de la valeur stoechiométrique, à laquelle le convertisseur catalytique à trois voies atteint son efficacité maximale (> 99 %). Cependant, la plupart des moteurs utilisent également un mélange enrichi dans certaines conditions de forte charge. Cette méthode, appelée enrichissement à pleine charge, provoque une augmentation substantielle des émissions de CO et de COV. De récentes analyses montrent que les émissions à l'échappement restantes proviennent des sources suivantes :

- Démarrage à froid.
- Variations de richesse.
- Effet des températures ambiantes réelles.
- Fonctionnement hors cycle.
- Efficacité de conversion à chaud du catalyseur.

<sup>1</sup> Les informations présentées dans cette section sont tirées d'une enquête menée par TNO Automotive, parue en 2003.

<sup>2</sup>  $\lambda = 1$ , quand la masse d'air est égale à 14.7 fois la masse d'essence.

## Variations de richesse

Lorsque l'unité de commande électronique ne peut pas compenser suffisamment vite les variations rapides de la charge, apparaissent ce qu'on appelle des « variations de richesse ». Pendant ces variations de richesse, l'efficacité du catalyseur diminue considérablement, ce qui provoque des pics d'émissions. Les variations de richesse surviennent également dans des situations non prises en compte lors des essais de réception du type, comme les styles de conduite agressifs et l'utilisation de l'air conditionné (voir sections précédentes).

Ces effets rapides peuvent être compensés grâce à l'ajustement des calculs proactifs. Il faut disposer pour cela d'un modèle très détaillé et fiable des processus spécifiques et apporter des développements aux circuits électroniques du moteur et au logiciel adapté. Une autre méthode, déjà utilisée dans certaines voitures, consiste à découpler la pédale d'accélération et le volet d'air d'admission en l'activant électroniquement. Le volet d'air d'admission ne peut alors pas être ouvert dans un laps de temps plus court que celui dont a besoin l'unité de commande électronique pour optimiser les émissions.

Parallèlement à l'accélération de la vitesse des calculs, des gains peuvent être obtenus en diminuant le nombre de situations où la stratégie de contrôle s'éloigne délibérément de la méthode  $\lambda = 1$  – ce que l'on appelle les situations d'émissions « hors cycle », quand les paramètres ne sont pas dans les limites requises par les procédures d'essai officielles (et les cycles d'essai officiels). Dans les situations hors cycle, le moteur n'est pas calibré pour générer des émissions faibles, mais pour optimiser la conduite. C'est le cas, par exemple, du scénario d'enrichissement à pleine charge, applicable en particulier aux moteurs les plus petits.

## Démarrage à froid

Un catalyseur à trois voies ne fonctionne à pleine efficacité que lorsqu'il est chaud. En conséquence, en cas de démarrage à froid, la réactivité du catalyseur reste limitée jusqu'à ce que la température ait atteint sa valeur optimale. Il est possible de réduire le temps nécessaire au catalyseur pour atteindre sa température de fonctionnement (amorçage du catalyseur) en utilisant un catalyseur monté à proximité immédiate de l'échappement du moteur. On peut également réduire les émissions au démarrage à froid en abaissant la température d'amorçage du catalyseur.

L'enrichissement du mélange est un autre facteur jouant un rôle lorsque les températures sont basses (inférieures à 20 °C). Il est nécessaire du fait du faible taux de vaporisation du carburant à ces températures. On ajoute plus de carburant au mélange combustible afin de disposer de suffisamment de vapeurs d'essence pour pouvoir initier le processus de combustion. Cependant, cette méthode empêche le catalyseur d'oxyder les émissions de CO et de COV, même lorsqu'il est chaud. Ce problème peut être résolu au moyen d'équipements destinés à vaporiser le combustible, comme des dispositifs de chauffage électriques placés au niveau du collecteur d'admission. On peut également injecter un flux d'air secondaire avant le catalyseur afin de réduire la concentration en CO et COV. Ce système est appliqué dans la Ford Focus, par exemple.

La réduction des émissions au démarrage à froid dépend avant tout de l'intérêt porté par les constructeurs à ce problème. A cet effet, il est nécessaire d'ajouter un essai de démarrage à froid à -7 °C à la procédure de réception du type, comme c'est maintenant le cas dans la réglementation Euro 3.

## Réductions d'émissions attendues

Des réductions supplémentaires substantielles des émissions de CO, COV et NO<sub>x</sub> sont techniquement réalisables pour les moteurs à essence. Grâce aux améliorations progressives apportées au système de contrôle du moteur et au système de post-traitement des gaz d'échappement, une baisse de 80 % ou plus (en fonction du type d'émissions) est possible par rapport aux niveaux de l'Euro 3, et ce pour une augmentation des coûts de production relativement limitée.

Dans le cas des moteurs avancés non stoechiométriques, il est difficile de quantifier les niveaux d'émissions accessibles du fait de la disponibilité limitée des données techniques. Les technologies de ces moteurs pourraient jouer un rôle important dans la baisse de la consommation de carburant et des émissions de CO<sub>2</sub>. Un compromis entre l'efficacité du moteur et les performances en matière de réduction d'émissions est indispensable et doit être évalué pour ces types de moteurs.

Les niveaux d'émissions réels de la prochaine génération de voitures particulières à essence dépendront de l'évolution de la législation relative aux émissions. La valeur des incitations à venir et la réglementation éventuelle sur les rejets de CO<sub>2</sub> influenceront fortement les technologies appliquées aux moteurs et, par conséquent, le potentiel de réduction des émissions d'autres gaz émis à l'échappement.

### *Consommation de carburant et émissions de CO<sub>2</sub>*

Le CO<sub>2</sub> est un produit de réaction inévitable du processus de combustion d'un combustible fossile. Il est donc impossible de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> autrement qu'en diminuant la consommation de carburant. Dans le cas des moteurs à explosion stoechiométrique, plusieurs possibilités existent. Elles sont décrites ci-dessous.

### Amélioration de l'efficacité à charge partielle

La faible efficacité à charge partielle est caractéristique des moteurs à explosion et provient des pertes par pompage (à l'admission). Les moteurs des voitures particulières fonctionnant le plus souvent dans des conditions de charge partielle, des gains significatifs en matière de consommation de carburant peuvent être obtenus si l'efficacité à charge partielle est améliorée. A cet effet, les options suivantes peuvent être considérées :

- *Actionnement variable des soupapes.* Sous sa forme la plus évoluée, cette technologie permet la création d'un cycle de Miller, éliminant ainsi les pertes par pompage. La réduction de CO<sub>2</sub> obtenue peut aller jusqu'à 15 %. Cette option est sur le point d'être lancée à large échelle. Elle est déjà appliquée par plusieurs constructeurs.
- *Rapport de compression variable.* Cette technique ne répond pas aux pertes par pompage mais à la perte d'efficacité due à la charge partielle. Elle est assez complexe. Son application à grande échelle n'est pas attendue à court terme.
- *L'injection directe* dans les moteurs stoechiométriques réduit les pertes thermiques et abaisse la température de combustion car le carburant est vaporisé dans la chambre de combustion avec la chaleur de l'air d'admission. De petites réductions de consommation de carburant sont déjà possibles, mais des gains plus élevés peuvent être obtenus dans des conditions de mélange pauvre ( $\lambda > 1$ ), comme décrit plus loin.

- *Réduction de la cylindrée avec suralimentation (« downsizing »)*. Si des moteurs de plus faible cylindrée sont utilisés, la charge moyenne augmente. L'application de la suralimentation (turbocompresseur ou compresseur entraîné) augmente la puissance à un niveau satisfaisant les usagers. Cependant, cette option n'est pas encore très répandue.
- *Déconnexion des pistons*. Cette option, convenant aux moteurs les plus puissants, permet d'augmenter la charge et l'efficacité des pistons qui restent connectés.
- *Alternateur-démarrage intégré (ISA)*. Le système ISA permet d'arrêter ou de démarrer rapidement le moteur, donc d'utiliser le mode « arrêt & démarrage » (stop & go). La consommation de carburant peut être fortement réduite, surtout en conduite urbaine. L'ISA permet également le réglage « hybride modéré » (présenté dans la section relative aux véhicules hybrides).

### Réductions de la consommation de carburant attendues

Il est difficile d'estimer la réduction pouvant être obtenue au moyen de chacune de ces options. De plus, les baisses de consommation constatées grâce à la combinaison de plusieurs options ne sont pas égales à la somme des diminutions individuelles. Il est également difficile de savoir dans quelle mesure certaines de ces options (ou combinaisons d'options) pourront être appliquées en pratique. Cependant, on peut raisonnablement attendre de la mise en oeuvre de quelques uns de ces procédés une réduction de la consommation de carburant de l'ordre de 25 % au cours des dix prochaines années. Pour obtenir des résultats plus importants, il faudra intégrer des améliorations comme l'allègement du véhicule ou de la diminution de la résistance à l'avancement.

### Carburants alternatifs

Les carburants alternatifs, à plus faible teneur en carbone et plus forte teneur en hydrogène, permettent d'envisager des réductions supplémentaires des rejets de CO<sub>2</sub>. Il s'agit principalement de l'hydrogène et du gaz naturel. Dans ce but, le constructeur allemand BMW a développé plusieurs prototypes dont le moteur ne consomme que de l'hydrogène.

Le GPL offre moins d'avantages liés au CO<sub>2</sub> car le gain dû à la plus faible teneur en carbone est annulé par l'augmentation de la consommation de carburant. Dans le cas des composés réglementés, les niveaux de rejets des véhicules au GNC ou au GPL seront très certainement peu différents des bas niveaux atteints par les véhicules à essence à très faibles émissions. Dans le cas des composés non réglementés comme les aromatiques, les combustibles gazeux représenteront un net avantage vis-à-vis de l'essence.

D'autres options existent, elles concernent les carburants dits durables – dont les biocarburants. Du fait du recyclage partiel du CO<sub>2</sub>, les émissions de CO<sub>2</sub> nettes qu'ils engendrent peuvent être bien plus faibles. Le bioéthanol, par exemple, permet d'atteindre des réductions moyennes de rejets de gaz à effet de serre de 50 à 65 % par rapport à l'essence conventionnelle. Les avancées en matière de technologies des biocarburants sont importantes et permettent d'envisager l'utilisation de combustibles à faible pouvoir calorifique à des taux de conversion bien plus élevés. Ces technologies peuvent être globalement caractérisées de la façon suivante :

- Technologies « lignocellulosiques » : hydrolyse au moyen d'enzymes d'une biomasse riche en cellulose (ex. paille, déchets forestiers).
- Gazéification des technologies de Fischer-Tropsch : transformation d'une biomasse en gaz synthétique par application de chaleur et de pression, puis liquéfaction du gaz obtenu pour donner de l'éthanol ou d'autres carburants automobiles.

### *Améliorations des moteurs diesel*

#### *Réduction des émissions à l'échappement*

Les émissions à l'échappement des voitures particulières diesel récentes (sans catalyseurs de-NO<sub>x</sub> ou filtres à particules) proviennent des fonctionnements suivants :

- Démarrage à froid.
- Impact des températures ambiantes réelles.
- Fonctionnement hors cycle.
- Émissions à chaud.

Afin de réduire la consommation de carburant, les moteurs diesel se sont déjà tournés vers l'injection directe. Cependant, l'injection directe peut avoir un effet négatif sur les émissions, en particulier celles de NO<sub>x</sub> et de particules (PM).

Conformément aux législations actuelles relatives aux émissions, les moteurs diesel sont équipés de catalyseurs d'oxydation (réduction des COV et des PM) et d'un dispositif de recirculation des gaz d'échappement (réduction de NO<sub>x</sub>). Des réductions d'émissions supplémentaires ont été récemment obtenues grâce à l'optimisation de la forme des chambres de combustion, l'augmentation des pressions d'injection, ainsi que par le contrôle précis des durées d'injection et de la quantité de carburant injectée.

Cependant, de nouvelles mesures devront être prises pour parvenir à des réductions supplémentaires, afin de respecter les prochaines législations relatives aux émissions de polluants. L'amélioration de la réactivité des catalyseurs d'oxydation et le refroidissement et le contrôle électronique de la recirculation des gaz d'échappement sont insuffisants pour atteindre les niveaux souhaités. Des techniques comme les systèmes de-NO<sub>x</sub> et les filtres à particules sont inévitables pour ramener les niveaux des rejets de NO<sub>x</sub> et de PM des véhicules diesel à ceux des véhicules essence. Ces options sont présentées brièvement.

#### CO et COV

Les rejets de CO et de COV des moteurs diesel sont naturellement très faibles et peuvent être abaissés pratiquement jusqu'à zéro au moyen d'un catalyseur d'oxydation. Cependant, les émissions de COV augmentent dans les conditions de démarrage à froid. Les catalyseurs d'oxydation détruisent également les fractions organiques solubles (SOF) des particules.

## NO<sub>x</sub>

Les moteurs diesel se caractérisent par des émissions de NO<sub>x</sub> relativement élevées. L'application de la recirculation des gaz d'échappement réduit les rejets de NO<sub>x</sub> mais pas aussi efficacement que les catalyseurs à trois voies des voitures roulant à l'essence. L'emploi d'un catalyseur à trois voies n'est pas possible en mélange pauvre, d'où la nécessité de recourir à des techniques spécifiques. Les options existantes sont les suivantes :

- *Catalyseur de-NO<sub>x</sub> passif*. Cette méthode utilise les COV générés par le moteur pour réduire les émissions de NO<sub>x</sub>. La concentration en COV peut être augmentée par exemple par post-injection avec le système de rampe commune. Cependant, l'efficacité de conversion est assez faible.
- *Catalyseur de-NO<sub>x</sub> actif*. Cette méthode utilise des COV ajoutés aux gaz d'échappement pour réduire les émissions de NO<sub>x</sub>. Elle requiert des composants supplémentaires, augmente légèrement la consommation de carburant et présente une efficacité assez variable. Elle est encore peu souvent utilisée.
- *Catalyseur à réduction catalytique sélective*. Ce système utilise un réducteur sélectif, comme l'urée, pour diminuer les émissions de NO<sub>x</sub>. L'urée est injectée séparément dans les gaz d'échappement. L'efficacité de conversion est assez élevée. Cependant, cette méthode consomme beaucoup de place à bord du véhicule, car elle nécessite un réservoir d'urée et un système de commande séparés. Elle est donc envisagée pour l'instant pour des applications poids lourd. Par ailleurs, elle est insensible à la présence de soufre dans le carburant.
- *Catalyseur avec stockage des NO<sub>x</sub>*. Cette méthode consiste à stocker temporairement les NO<sub>x</sub> lorsque les conditions de fonctionnement sont en mélanges pauvres puis à les déstocker pendant de courtes périodes en mélanges riches (régénération). La régénération a lieu par post-injection du carburant et requiert un système d'injection diesel avancé contrôlé électroniquement. Du fait des périodes riches, la consommation en carburant augmente légèrement. L'efficacité de conversion est assez élevée mais le système est très sensible au soufre et exige des carburants à basse teneur en soufre.

## Particules (PM)

La réduction des émissions de particules jusqu'aux niveaux atteints dans les moteurs essence n'est possible qu'au moyen d'un filtre à particules. Les filtres à particules ont déjà fait leurs preuves pour les applications poids lourds, mais dans le cas des applications plus légères, des problèmes supplémentaires apparaissent en raison des charges relativement faibles des moteurs, responsables du colmatage des filtres. Les options existantes sont les suivantes :

### *Filtre à particules actif*

Les filtres à particules doivent être régulièrement régénérés afin d'éviter les colmatages. Théoriquement, la régénération a lieu automatiquement lorsque les gaz d'échappement atteignent des températures élevées dépassant les 500 °C. En pratique, ces températures sont rarement atteintes, du fait des faibles charges des moteurs. Des mesures complémentaires doivent donc être mises en place afin d'activer la régénération. Elles peuvent consister à :

- Diriger de la chaleur supplémentaire vers les gaz d'échappement (« post-combustion », chauffage électrique ou post-injection de carburant).
- Abaisser la température de régénération en mélangeant un additif au carburant (catalyseur transporté par le carburant).
- Nettoyer le filtre après l'avoir démonté.

#### *Filtre passif / à régénération continue*

Les filtres passifs ou à régénération continue sont également appelés pièges à régénération continue (CRT). Ce type de filtre opère de la même façon qu'un filtre actif, mais la régénération a lieu en continu. La combustion des particules peut avoir lieu à des températures moins élevées en utilisant comme agent oxydant le NO<sub>2</sub> au lieu de l'oxygène. Pour augmenter la concentration de NO<sub>2</sub> dans les gaz d'échappement, un catalyseur d'oxydation supplémentaire est ajouté avant le filtre afin de convertir le NO en NO<sub>2</sub>. Ce procédé a lieu en continu. Ce type de filtre est très sensible à la teneur en soufre du carburant utilisé.

On considère que le potentiel de réduction des filtres actifs et passifs est de 90 %. Certains constructeurs automobiles proposent déjà des filtres ayant un rendement de filtration supérieur à 90% sur l'ensemble du spectre des tailles de particules. Fin 2003, Peugeot a déjà fourni plus de 600 000 véhicules équipés de tels filtres en première monte.

Contrairement à ce qu'on observe dans le cas des moteurs à essence, les variations de richesse ne jouent aucun rôle. Les analyses des causes des émissions et des améliorations techniques possibles des moteurs diesel révèlent un potentiel de réduction des émissions significatif, même si plus faible que celui des moteurs à essence. Les émissions au démarrage à froid peuvent être diminuées en optimisant le catalyseur, mais dans une moindre mesure que pour les moteurs à essence. Le niveau des émissions à chaud de NO<sub>x</sub> peut être abaissé au moyen d'un catalyseur de-NO<sub>x</sub> et d'une recirculation des gaz d'échappement améliorée. La réduction des émissions à chaud de particules nécessite un filtre particulier, tandis que la réduction des émissions hors cycle requiert un contrôle optimisé du moteur. Tous ces éléments considérés, une diminution des émissions de CO, de COV, de NO<sub>x</sub> et de PM de 75 % par rapport au niveau de l'Euro 3 est envisageable si des améliorations progressives des technologies existantes sont combinées à l'application de technologies complémentaires de post-traitement.

Le niveau effectif des émissions des futurs véhicules sera fortement influencé par l'évolution de la législation relative à ces rejets.

#### *Consommation de carburant et émissions de CO<sub>2</sub>*

Un moteur diesel moderne à injection directe consomme en moyenne 25 % de moins qu'un moteur à essence moderne. En raison de la différence de densité entre l'essence et le gazole, l'avantage exprimé en MJ/km est de 15 %. Les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes sont donc environ 14 % inférieures à celles des moteurs à essence.

Partant déjà d'un bon rendement, les possibilités d'améliorations supplémentaires du rendement des moteurs diesel sont limitées. Les moteurs diesel ne sont pas soumis à des pertes par pompage. Toutefois, le remplissage des moteurs suralimentés (presque tous les diesels modernes) est moins bon aux vitesses de rotation du moteur les plus faibles du fait de la réponse lente du turbocompresseur. Des améliorations majeures sont encore possibles au niveau de la régulation de la suralimentation. Par ailleurs, l'application de

systèmes de post-traitement des gaz d'échappement, comme les filtres à particules ou les catalyseurs de-NO<sub>x</sub>, risque de faire diminuer légèrement le rendement du moteur.

Les systèmes de type « arrêt & démarrage » (stop & go) ou la réduction de la cylindrée (« down-sizing ») sont des options également possibles pour les moteurs diesel, mais, du fait des différences de comportements des moteurs diesel sous charge partielle, les gains obtenus sont limités par rapport à ceux que l'on peut espérer avec des moteurs à cycle d'Otto.

### *Carburants alternatifs*

Les moteurs diesel sont également compatibles avec les carburants à faible teneur en carbone ou neutres comme les biocarburants végétaux ou les carburants synthétiques.

Le biodiesel peut être fabriqué à partir de toute huile végétale au moyen d'un procédé appelé l'estérification. Cette méthode consiste à ajouter du méthanol en présence d'un catalyseur afin d'obtenir du biodiesel ainsi qu'un sous-produit, le glycérol. Le biodiesel à base de graines de colza présente moins d'avantages en termes de CO<sub>2</sub> mais propose au secteur agricole un marché diversifié pour ses produits. Une étude britannique (Mortimer *et al.*, 2002) concernant le bilan carbone du biodiesel avance le chiffre de 55 % de réduction de CO<sub>2</sub> comme valeur représentative pour une production au Royaume-Uni, des chiffres plus élevés pouvant être atteints dans de meilleures conditions de culture. L'une des options prometteuses dans le cas de la production de biodiesel est l'application des procédés de Fisher-Tropsch<sup>3</sup> à la production du diesel. Ceux-ci pourraient permettre la production d'un carburant diesel renouvelable.

### ***Améliorations des moteurs à essence non stoechiométriques (combustion pauvre)***

Tout d'abord, il est important de rappeler que les moteurs à allumage commandé (Otto) non stoechiométriques (pauvres) ne sont pas systématiquement des moteurs à injection directe. Les possibilités de l'injection directe sont utilisées pour créer des conditions pauvres sur une partie de la cartographie du moteur. En fait, c'est cette possibilité de créer et contrôler le mélange pauvre qui a conduit dans un premier temps au développement du moteur à injection directe. Il est probable qu'à l'avenir, tous les moteurs à cycle d'Otto seront équipés de l'injection directe. Reste à savoir s'ils seront stoechiométriques ou non stoechiométriques. Cela dépendra fortement de l'orientation prise par la législation future et du choix entre les réductions de NO<sub>x</sub> et les réductions de CO<sub>2</sub>.

Il est bien connu que le moteur à cycle d'Otto n'atteint pas son rendement optimal pour un fonctionnement avec un mélange stoechiométrique ( $\lambda = 1$ ). Les mélanges pauvres permettent des rendements de 15 % plus élevés. Mais pour satisfaire aux accélérations et aux fortes demandes de puissance, le mélange doit être enrichi. Ce dernier élément limite les gains en matière de rendement aux zones de charge faible ou partielle. Dans le cas idéal, le volet d'air d'admission pourrait être totalement supprimé et la puissance délivrée serait alors régulée qualitativement.

Les mélanges pauvres s'enflamment généralement moins efficacement que les mélanges riches. L'une des solutions à ce problème consiste à stratifier la charge en créant une zone riche à proximité de la bougie d'allumage dans la chambre de

<sup>3</sup> Production de carburant diesel au moyen de gaz naturel.

combustion. Mais cette utilisation d'un mélange non homogène augmente considérablement les émissions de particules.

Jusqu'à présent, ce concept a généré plus de promesses que de résultats véritables car les considérations relatives à la puissance et aux émissions ne permettaient les conditions pauvres que sur une petite partie de la cartographie du moteur. De nombreux efforts sont menés afin de développer ce concept de façon plus approfondie et d'en augmenter les avantages. Les perspectives envisagées sont donc plutôt bonnes. La réduction de la consommation de carburant pourrait alors atteindre jusqu'à 20 %.

Pour minimiser les émissions, un catalyseur à trois voies est ajouté. Dans le cas d'un mélange pauvre, il fonctionne comme un catalyseur d'oxydation. Les rejets de  $\text{NO}_x$  ne sont cependant pas réduits dans de telles conditions, d'où l'augmentation importante des émissions à l'échappement. L'une des solutions considérées pour résoudre ce problème est l'utilisation de catalyseurs de stockage des  $\text{NO}_x$  (voir également les moteurs diesel), actuellement en développement, mais ils sont extrêmement sensibles à la teneur en soufre du carburant. L'efficacité de conversion d'un catalyseur de stockage des  $\text{NO}_x$  est inférieure à celle d'un catalyseur à trois voies. En conséquence, il est probable que les émissions de  $\text{NO}_x$  des voitures à combustion pauvre soient environ de 20 % supérieures à celles des moteurs stoechiométriques. En pratique, cela signifie que les constructeurs calibreront les rejets de  $\text{NO}_x$  à un niveau tout proche de la limite fixée par la loi, afin de réduire autant que possible la consommation de carburant.

### ***Améliorations dans le domaine de la résistance à l'air***

La force de la résistance à l'air d'un objet en mouvement dans l'air (traînée aérodynamique) est déterminée par la formule suivante :

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

où :

$C_D$  est le coefficient de traînée sans dimension de l'objet

A est la surface frontale projetée de l'objet

$\rho$  est la masse volumique de l'air

v est la vitesse de l'objet

La résistance aérodynamique d'un véhicule dépend ainsi de sa surface frontale et de sa forme, la qualité aérodynamique de celle-ci étant décrite par le coefficient de traînée  $C_D$ . En général, la taille du véhicule, et donc sa surface frontale, est fixée par les exigences de conception. Les efforts pour réduire la résistance aérodynamique se concentrent par conséquent sur la réduction du coefficient de traînée.

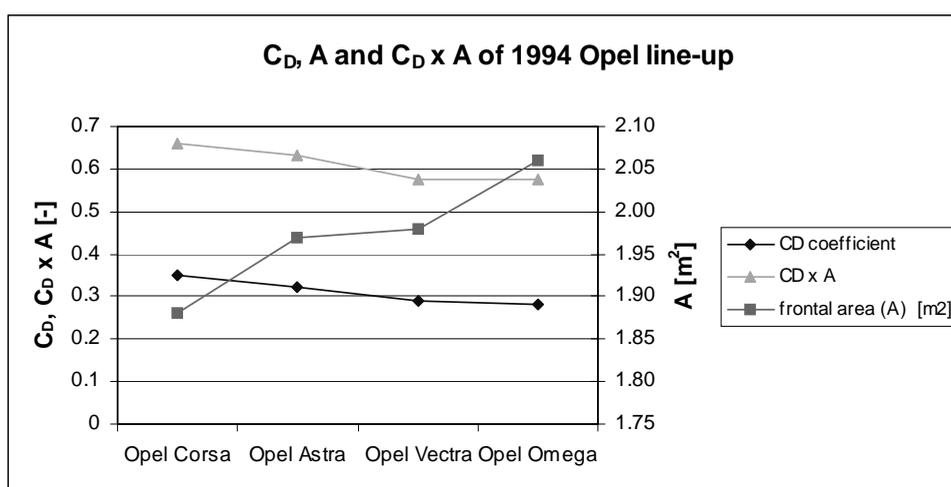
Des considérations pratiques, comme la capacité de transporter cinq personnes et un volume suffisant pour les bagages, conduisent habituellement à des coefficients  $C_D$  des voitures en production de 0.30 en moyenne. Les coefficients les plus faibles avoisinent les 0.25, comme dans le cas de la Honda Insight.

Il est possible d'atteindre un coefficient  $C_D$  moyen de 0.25 lorsque des systèmes innovants sont appliqués, comme des caméras pour la vision arrière au lieu des rétroviseurs ou des soubassements de carrosserie optimisés aérodynamiques. Par ailleurs, il est important de se souvenir que la résistance à l'air augmente avec le carré de la

vitesse. Les effets de l'aérodynamique sur la consommation de carburant sont donc plus importants à des vitesses élevées (au-dessus de 120 km/h), lesquelles sont de moins en moins fréquentes dans les conditions de circulation actuelles.

La surface frontale fait également l'objet de considérations de conception pratiques liées à la demande du client. A titre d'exemple, plusieurs paramètres aérodynamiques de la gamme Opel 1994 sont indiqués dans la figure B.7. Le graphique illustre le fait que, bien que les voitures de plus grande taille aient une surface frontale plus importante, le produit de la surface frontale par le coefficient de traînée diminue. Ce phénomène est dû à la meilleure efficacité aérodynamique des voitures les plus grandes qui compense la surface frontale plus importante.

**Figure B.7. Coefficient de traînée ( $C_D$ ) surface frontale ( $A$ ) et  $C_D \times A$  de la gamme de produits Opel de 1994**



Légende : Coefficient CD / CD x A / Surface frontale (A) (m<sup>2</sup>)

Source : Opel.

### ***Améliorations dans le domaine de la résistance au roulement des véhicules traditionnels***

La résistance au roulement provient des pertes d'énergie dues à la déformation de la bande de roulement d'un pneu lorsque le véhicule se déplace sur une certaine surface. La valeur de la résistance au roulement dépend des caractéristiques d'amortissement des matériaux utilisés. C'est ce phénomène qui transforme l'énergie mécanique en chaleur.

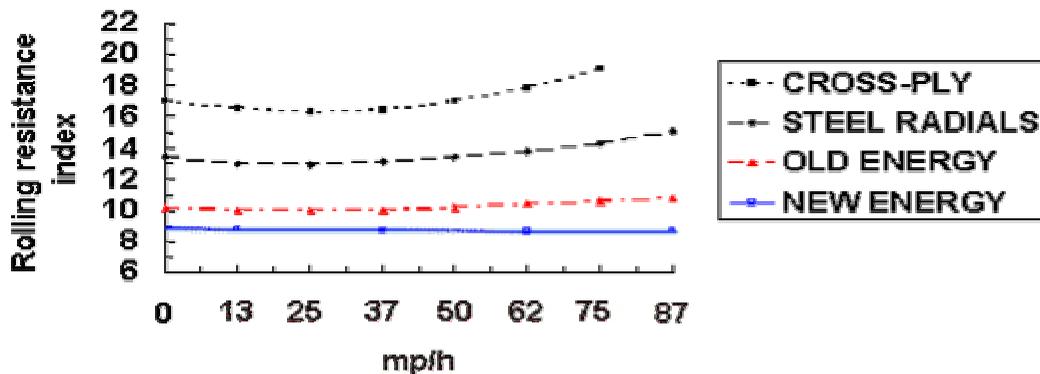
La réduction de la résistance au roulement entraîne la réduction de la résistance à l'avancement et donc de la consommation de carburant. Dans les pneus « traditionnels », la résistance au roulement était minimisée en abaissant le phénomène d'hystérésis (déformation) et donc les caractéristiques d'amortissement de la bande de roulement. Cependant, cette méthode réduit la force de freinage du pneu, en particulier sur les surfaces mouillées, et constitue un effet secondaire indésirable. Dans les pneus modernes, le problème est résolu par l'introduction d'autres composants dans le pneu.

La valeur de la résistance au roulement dépend des paramètres suivants :

- Surface de la route.
- Pneu.
  - Température du pneu.
  - Géométrie du pneu.
  - Rapport hauteur / largeur.
  - Caractéristiques des matériaux.
- Conditions de conduite.
  - Pression du pneu.
  - Géométrie de la roue.
  - Force de gravité (pente).
  - Vitesse.

La figure B.8. illustre la résistance au roulement en fonction de la vitesse pour quatre types de pneus.

Figure B.8. Résistance au roulement en fonction de la vitesse



Légende : Index de résistance au roulement.

Nappé croisée (cross-ply) / Radial acier / « Energy » ancien / « Energy » nouveau.

Source : Pirelli.

La résistance au roulement augmente pour les vitesses supérieures à 50 mph pour les pneus anciens à nappe croisée (cross-ply) ou radiaux ceinturés d'acier mais elle est constante pour les pneus modernes « Energy ».

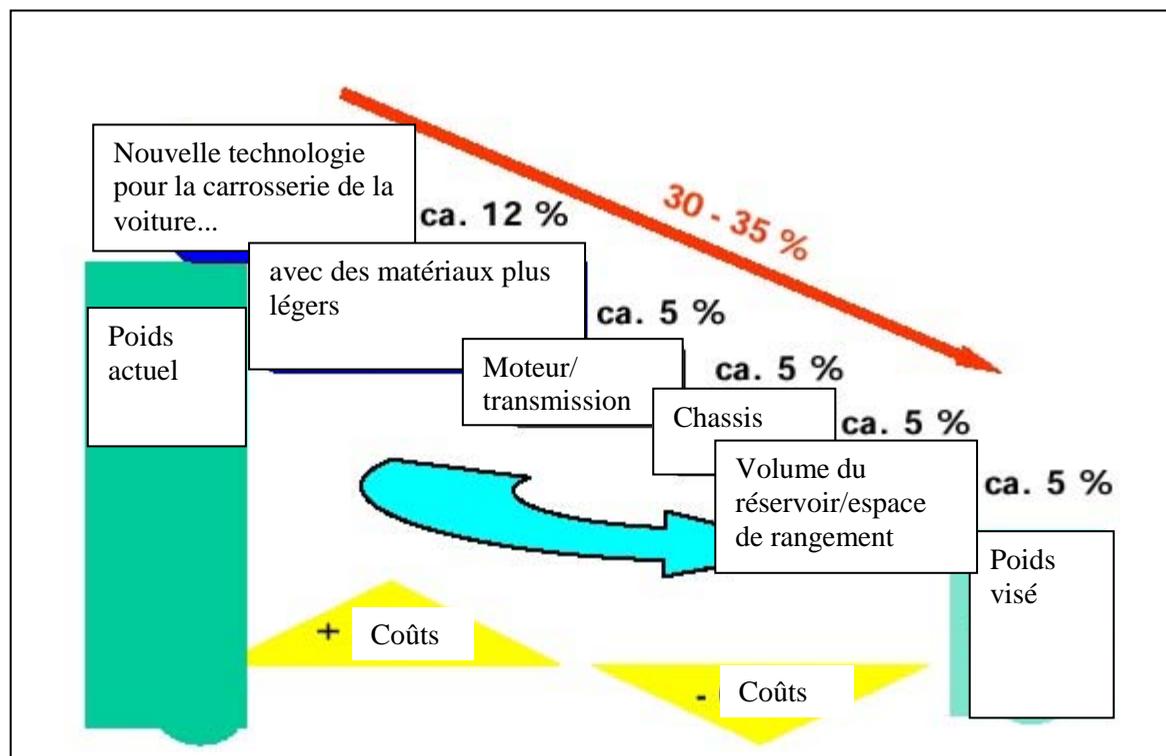
La pression des pneus est un paramètre important influant sur la résistance au roulement. Lorsque la pression est inférieure à la pression recommandée, la résistance au roulement augmente. Afin de résoudre ce problème, il est de plus en plus fréquent d'équiper les voitures d'un système de contrôle continu de la pression des pneus, qui avertit le conducteur lorsque celle-ci est trop faible.

Si la pression des pneus est supérieure à la valeur recommandée par le fabricant, la résistance au roulement diminue car les pertes d'énergie dues à la déformation du pneu sont réduites. Cependant, si la pression est trop élevée, l'impact sur la tenue de route et la

puissance de freinage du véhicule est négatif. Il est donc conseillé de ne pas augmenter la pression de plus de 10 % de la valeur recommandée.

Le poids du véhicule induit une force gravitationnelle au niveau des roues. S'il est réduit, la résistance au roulement et la consommation de carburant diminuent également. Certains allègements des véhicules peuvent encore être réalisés. Ces possibilités sont présentées dans la figure B.9. Elles peuvent être à l'origine d'économies de poids allant jusqu'à 35 %.

**Figure B.9. Paramètres techniques influant sur la consommation de carburant**



Source : Volkswagen.

Les deux premières actions allègent le véhicule d'environ 17 % mais augmentent les coûts car des matériaux plus chers doivent être utilisés. Les trois dernières actions réduisent non seulement le poids du véhicule, mais également les coûts, puisqu'elles nécessitent moins de matériaux.

## Concepts de motorisations avancées

La technologie existante présente des désavantages : rendement faible, émissions de gaz à effet de serre, risques pour la santé dus aux rejets de composés toxiques, consommation de carburants non renouvelables. La question est donc de savoir s'il existe une meilleure alternative. Pendant plusieurs années, des recherches ont été menées pour développer de nouvelles techniques. Celles qui sont actuellement considérées sont les suivantes : véhicules entièrement électriques, véhicules hybrides et véhicules à pile à combustible. La présente section décrit chacune de ces technologies.

## Véhicules hybrides

### Qu'est-ce qu'un véhicule hybride ?

Un véhicule hybride est équipé d'un moteur à combustion interne conventionnel et d'une source d'énergie complémentaire. Parmi ces sources figurent les moteurs électriques, les moteurs hydrauliques, les volants d'inertie mécaniques et les super-condensateurs. La plupart des véhicules hybrides développés au cours des dernières années sont équipés d'un moteur électrique pour une meilleure efficacité et un meilleur contrôle du véhicule. Les trois principaux avantages des véhicules hybrides électriques (HEV) sont les suivants :

- Récupération de l'énergie de décélération.
- Arrêt du moteur lors de l'arrêt du véhicule.
- Optimisation des conditions de fonctionnement du moteur.

### Répartition de la consommation énergétique d'un véhicule hybride

La répartition de la consommation énergétique d'un véhicule hybride usuel est donnée dans le tableau B.4. Dans un tel véhicule, un moteur électrique et une batterie sont utilisés pour minimiser les pertes au niveau de la chaîne cinématique.

**Tableau B.4. Répartition de la consommation énergétique d'un véhicule hybride usuel**

Type de trajet		Urbain	Autoroute
Énergie contenue dans le carburant		100 %	100 %
Pertes de la chaîne cinématique	Pertes thermodynamiques	51 %	56 %
	Pertes du moteur	11 %	3 %
	Pertes de la transmission	6 %	6 %
	<b>Total</b>	<b>68 %</b>	<b>65 %</b>
Consommation des composants	Auxiliaires	3 %	1 %
	Accessoires	1 %	1 %
	Climatisation (si utilisée)	15 %	11 %
	<b>Total (avec air conditionné)</b>	<b>19 %</b>	<b>11 %</b>
	<b>Total (sans air conditionné)</b>	<b>4 %</b>	<b>2 %</b>
Utilisation pour la propulsion	Résistance à l'air	2 %	12 %
	Résistance au roulement	5 %	8 %
	Pertes cinétiques/freinage	6 %	2 %
	Aucune inclinaison		
	<b>Total (avec air conditionné)</b>	<b>13 %</b>	<b>22 %</b>
<b>Total (sans air conditionné)</b>	<b>28 %</b>	<b>33 %</b>	

### Récupération de l'énergie de décélération

Dans les véhicules conventionnels, l'énergie de décélération est exclusivement dissipée sous forme de chaleur générée par les forces de freinage par friction et de freinage du moteur. Dans les HEV, l'énergie de décélération est utilisée pour activer un moteur d'entraînement servant de générateur. Elle est ainsi stockée dans une batterie ou tout autre système de stockage d'énergie jusqu'à sa réutilisation au cours des phases d'accélération.

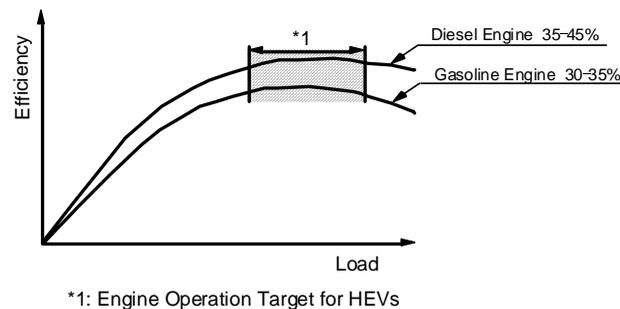
### Arrêt du moteur lors de l'arrêt du véhicule

Lorsque le véhicule HEV s'arrête, le moteur HEV s'arrête également. En effet, les HEV sont équipés d'un moteur électrique bien plus puissant que le démarreur d'un véhicule conventionnel. Ainsi, le HEV est capable de redémarrer instantanément à la demande du conducteur.

### Optimisation des conditions de fonctionnement du moteur

Comme illustré par la figure B.10, les moteurs thermiques sont caractérisés par des rendements faibles à charges faibles. Les HEV sont donc conçus pour tourner à rendement élevé aussi souvent que possible, ce en minimisant les périodes de conduite à charge faible. De plus, le moteur électrique est activé pour assister le moteur thermique lorsque celui-ci atteint son pic de charge de façon à réduire les émissions de NO<sub>x</sub> et de PM.

**Figure B.10. Caractéristiques rendement-charge des moteurs à combustion interne et zone de fonctionnement cible du moteur HEV**



Légende :

Rendement/Charge

Moteur diesel 35 à 45 % / Moteur essence 30 à 35 %.

\*1 : Zone de fonctionnement cible du moteur HEV.

Grâce à ces avantages, les HEV favorisent une plus grande économie de carburant (jusqu'à deux fois celle d'une voiture particulière lourde conventionnelle au cours d'un cycle urbain) et des émissions à l'échappement plus faibles. Lorsque les conducteurs contrôlent eux-mêmes les conditions de conduite, l'efficacité est en général plus faible que lorsque le système de gestion hybride automatique (calibré par le constructeur) est utilisé.

En revanche, les HEV présentent le désavantage de nécessiter une architecture lourde et complexe, en partie du fait de la batterie, du moteur électrique et du convertisseur embarqués conjointement au moteur conventionnel. De plus, bien qu'ils soient conçus

pour délivrer une puissance de sortie équivalente ou supérieure à celle des moteurs conventionnels, ils ne peuvent pas la fournir pendant une longue période. Sur les routes en montée, l'avantage des HEV en matière d'économie de carburant devient minime en raison de l'absence de la récupération de l'énergie de décélération.

Cependant, les HEV actuellement sur le marché proposent des solutions presque complètes à ces problèmes : augmentation du rapport puissance/énergie des systèmes de stockage de l'énergie, amélioration de la puissance de sortie spécifique du moteur, optimisation de la puissance nette (avec augmentation de la masse) en fonction des applications du véhicule et amélioration de l'architecture du système.

### *Types de HEV*

Les HEV sont divisés en plusieurs catégories, définies selon le mode de recharge en électricité et selon l'architecture du système.

- Classification en fonction du mode de recharge

Les HEV peuvent être divisés en deux catégories : avec recharge externe sur le secteur ou sans recharge sur le secteur.

Les véhicules HEV avec recharge sur le secteur sont essentiellement des véhicules électriques équipés d'un petit moteur thermique additionnel qui sert de générateur électrique auxiliaire afin de prolonger l'autonomie, l'essentiel de l'énergie provenant du stockage électrique des batteries. Développés principalement en Europe pour augmenter occasionnellement l'autonomie, ces véhicules sont souvent appelés véhicules électriques avec « prolongateurs d'autonomie ». Du fait des recharges fréquentes et des contraintes des batteries en termes de poids, ils n'ont pas encore réussi à susciter l'intérêt des consommateurs.

Les véhicules HEV sans recharge sur le secteur sont équipés en priorité d'une motorisation thermique conséquente qui servira à produire l'électricité pour la propulsion. Au cours de ces dernières années, ces véhicules ont été principalement développés et commercialisés au Japon. Aujourd'hui, les constructeurs automobiles européens et américains prévoient également de lancer de tels modèles. A l'avenir, les HEV sans recharge électrique sont appelés à devenir le principe de base.

- Classification en fonction de la configuration du système

Les HEV peuvent également être classés selon la configuration du système. Il existe habituellement trois catégories de montages : série, parallèle ou série/parallèle.

#### 1. HEV série

Comme illustré par la figure B.11(a), les HEV série convertissent la puissance du moteur thermique en électricité au moyen d'un générateur. Ils ont pour avantage de ne pas disposer d'un moteur thermique mécaniquement lié à l'essieu de la roue, ce qui permet d'optimiser la zone de fonctionnement du moteur. En revanche, la longue chaîne de transmission du moteur thermique, du générateur et de la batterie vers le moteur électrique est la source de lourdes pertes d'énergie. C'est là leur principal désavantage. L'économie de carburant des HEV série est supérieure à celle des véhicules conventionnels dans la zone à faible vitesse/faible charge, où l'efficacité du moteur thermique chute. Néanmoins, l'économie de carburant des HEV devient inférieure à celle des véhicules conventionnels dans la zone à forte charge en raison de l'augmentation des pertes dues à la transmission de l'énergie. En conséquence, les HEV série conviennent

aux modes de conduite à vitesse réduite de type « arrêt & démarrage » (« *stop & go* ») dans les villes. Mitsubishi Motors et Nissan Diesel ont lancé des bus urbains de ce type.

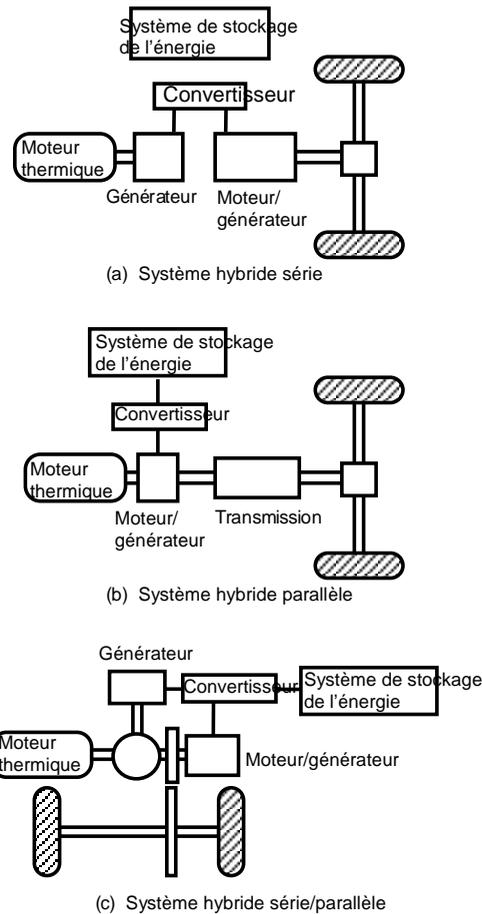
## 2. HEV parallèle

La configuration d'un HEV parallèle est présentée dans la figure B.11(b). Les HEV utilisent directement la puissance du moteur thermique pendant les conduites à charge élevée. Ils sont caractérisés par une économie de carburant supérieure à celle des véhicules conventionnels quelle que soit la vitesse du véhicule. Dans le cas de la Honda Insight, le volant d'inertie du moteur thermique est remplacé par un moteur électrique de relativement faible puissance de sorte que ce moteur sert simultanément de démarreur et d'alternateur, ce qui permet de simplifier fortement la structure. (La Honda Insight est cependant équipée d'un démarreur d'urgence.) Les HEV parallèle représentent un potentiel considérable en termes de réduction des coûts des véhicules car ils permettent l'utilisation d'un système conventionnel de transmission de la puissance à la roue et minimisent la masse de la batterie. En revanche, ils sont désavantagés par l'efficacité plus faible de la récupération de l'énergie de décélération. En effet, le moteur thermique est directement lié au moteur électrique, donc il existe des pertes par friction au niveau du premier pendant le fonctionnement du freinage en récupération.

Un modèle plus simple de HEV parallèle est actuellement en cours de développement, il utilise des batteries d'une tension nominale de 36 V et une alimentation de 42 V. Ce type de HEV – appelé « HEV modéré » – est équipé d'un groupe motopropulseur conventionnel et le démarreur et l'alternateur sont remplacés par une unité unique moteur électrique/générateur. Le moindre nombre de pièces spécifiques et la réduction de la masse de la batterie sont ses deux principaux avantages.

## 3. HEV série/parallèle

Comme illustré par la figure B.11(c), le HEV de type série/parallèle allie un montage série à un montage parallèle. Les HEV série/parallèle sont alimentés par un moteur électrique dans les zones à faible vitesse/faible charge et par un moteur thermique dans les zones à vitesse élevée/charge élevée. Ils offrent par conséquent une efficacité favorable quelles que soient les conditions de conduite (Iwai, 1999). En revanche, la plupart de ces véhicules nécessitent une transmission spécifique. Par exemple, la Toyota Prius utilise un train planétaire à transmission variable continue (CVT) et la Nissan Tino hybride une CVT à courroie. La conception et le contrôle de la transmission sont considérés comme les paramètres clés du fonctionnement optimal d'un HEV série/parallèle.

**Figure B.11. Configurations de trois systèmes hybrides**

### *Potentiel de réduction des polluants locaux grâce aux véhicules hybrides*

Dans les véhicules hybrides, il n'existe pas toujours de relation directe entre la vitesse et le couple du moteur thermique d'une part, et la vitesse et le couple de la roue d'autre part (Smokers *et al*, 2001). Dans le cas extrême de certains hybrides série, ces paramètres sont même totalement découplés. Dans cette configuration, le moteur à combustion interne – seule source d'émissions – fonctionne dans une zone de performance choisie pour minimiser la consommation de carburant et/ou les émissions. Les rejets de polluants sont donc indépendants des conditions de conduite réelles, ils sont toujours minimaux et connus.

Dans les véhicules « hybrides parallèles simples », il existe un lien mécanique entre le moteur à combustion interne (ICE) et la roue de sorte que les vitesses de ces deux éléments sont proportionnelles. Le moteur électrique peut être utilisé pour maintenir le couple du moteur thermique dans une zone de fonctionnement à faibles émissions. Cette zone peut varier en fonction de la vitesse. La réglementation de ce type de dispositif hybride peut être complexe. Le succès de cette technologie en termes de réduction des émissions est fonction de la qualité de conception du véhicule. Le système hybride n'est pas en soi la garantie de faibles niveaux d'émissions.

### La Honda Insight

La Honda Insight est un véhicule hybride parallèle. Elle est équipée d'un moteur à combustion pauvre, d'un catalyseur à trois voies rapproché du moteur et d'un convertisseur catalytique adsorbant le NO<sub>x</sub>. Le collecteur d'échappement est intégré à la tête du cylindre (ce qui permet au catalyseur trois voies d'être monté tout près du moteur thermique pour un amorçage rapide). La conception du moteur thermique permet un mouvement tourbillonnaire accru dans la chambre de combustion afin d'obtenir une combustion plus complète. La stratégie de contrôle de l'Insight comprend une fonctionnalité d'arrêt au ralenti qui permet de réduire la consommation de carburant et les émissions lorsque le véhicule tourne au ralenti. Afin d'éviter les démarrages à froid répétés, la fonction arrêt au ralenti ne se met en route que si le moteur a atteint une température suffisante. Honda cite également la précision du contrôle du carburant et de l'allumage, le nouveau catalyseur à nid d'abeille et le nouveau système secondaire d'injection d'air avec une pompe à air électrique.

La Honda Insight est conforme aux procédures d'essai FTP-75 et CO à froid. Le tableau B.5 résume les données d'homologation du véhicule en termes d'émissions. Ces données sont disponibles auprès de l'agence américaine EPA.

**Tableau B.5. Émissions de la Honda Insight**

	Vie utile (km)	Résultats de l'essai (g/km)		Normes d'émissions (g/km)	
		Essai 1	Essai 2	CA-ULEV	NLEV
Résultats de l'essai FTP-75					
CO	80.5K	0.249	0.329	1.056	2.113
	161K	0.398	0.478	1.305	2.610
NO <sub>x</sub>	80.5K	0.037	0.050	0.124	0.124
	161K	0.037	0.050	0.186	0.186
NMOG	80.5K	0.019	0.020	0.025	0.047
	161K	0.023	0.024	0.034	0.056
HCHO	80.5K	0.0002	0.0002	0.0050	0.0093
	161K	0.0002	0.0002	0.0068	0.0112
Total HC	80.5K	0.025			0.255
	161K				
Résultats de l'essai CO à froid					
CO	80.5K	1.72		10	10

Le dosage du carburant en boucle fermée combiné au convertisseur catalytique a fait chuter les niveaux d'émissions des véhicules conventionnels bien en deçà des valeurs requises pour l'homologation. Aucune raison technique ne s'oppose à ce que les émissions des véhicules conventionnels ne soient faibles pour toutes les zones de fonctionnement, mais tant qu'aucune obligation de restriction des émissions sur toute la cartographie du moteur n'existe pour les utilisations hors cycle, les performances et la maniabilité seront privilégiées à l'économie de carburant et aux réductions des émissions (comme vu précédemment).

L'absence d'émissions de polluants locaux est l'un des avantages majeurs des véhicules hybrides sur les véhicules essence ou diesel. Les HEV peuvent donc être conduits dans les zones urbaines réservées aux véhicules à « zéro émissions ». Ils sont également très performants dans les embouteillages où ils fonctionnent en mode électrique. Dans ces situations, les émissions des véhicules conventionnels sont supérieures à la moyenne du fait de la faible distance parcourue ou de la petite quantité d'énergie produite. Les émissions des HEV se situent en dessous de la moyenne même dans le cas de systèmes hybrides parallèles dotés d'une faible puissance de traction électrique.

### La Toyota Prius

La Toyota Prius est une voiture hybride série-parallèle. Sa conception unique permet de réguler le flux d'énergie au moyen d'un moteur à combustion interne, d'une batterie NiMh, d'un train planétaire et de deux moteurs électriques.

Le moteur thermique utilisé est composé d'un moteur à cycle d'Atkinson à forte expansion, de chambres de combustion optimisée et d'injecteurs multitrouis visant à augmenter l'atomisation du carburant. Toyota décrit un « substrat de catalyseur en céramique de haute densité doté de parois extra-fines atteignant plus rapidement la température de catalyse ». Tant que la température du catalyseur reste basse, le système de commande hybride donne la priorité au contrôle du moteur afin de maintenir les émissions à un niveau faible. Un absorbeur HC capture les HC puis les libère après l'amorçage du catalyseur. Les émissions par évaporation sont minimisées au moyen d'un réservoir à essence qui se dilate ou se contracte en fonction de son niveau de remplissage pour réduire le volume disponible. Le système de commande hybride compte également d'autres fonctions de dépollution : l'utilisation des moteurs thermique et électrique est équilibrée afin de ne faire tourner le moteur thermique que dans sa zone d'efficacité optimale ; le moteur thermique est coupé dans les phases de ralenti ou de décélération ; la voiture ne roule qu'à l'électricité dans des conditions de faible vitesse et faible charge. Enfin, la Prius commande les moteurs thermique et électrique de façon à lisser les phases de fonctionnement transitoire du premier.

La Toyota Prius est conforme aux procédures d'essai américaines FTP-75, CO à froid, US06 et SC03. Le tableau B.6 résume les données d'homologation du véhicule en terme d'émissions. Ces données sont disponibles auprès de l'agence américaine EPA.

**Tableau B.6. Émissions de la Toyota Prius (données américaines)**

Vie utile (km)		Résultats de l'essai (g/km)		Normes d'émissions (g/km)	
		Essai 1	Essai 2	ULEV	CA-SULEV
<b>Résultats de l'essai FTP-75</b>					
CO	80.5K	0.087		1.056	
	161K	0.130		1.305	
	193K	0.267			0.621
NO <sub>x</sub>	80.5K	0.006		0.124	
	161K	0.006		0.186	
	193K	0.006			0.012
NMOG	80.5K	0.001		0.025	
	161K	0.001		0.034	
	193K	0.002			0.006
HCHO	80.5K	0.000		0.005	
	161K	0.000		0.007	
	193K	0.000			0.002

**Tableau B.6. Émissions de la Toyota Prius (données américaines) (suite)**

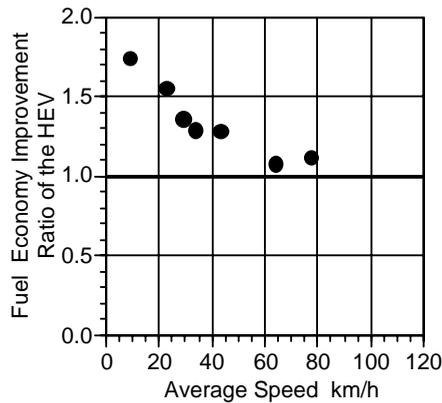
Vie utile (km)		Résultats de l'essai (g/km)		Normes d'émissions (g/km)	
		Essai 1	Essai 2	ULEV	CA-SULEV
<b>Résultats de l'essai CO à froid</b>					
CO	50K	1.056		6.214	
		1.118			6.214
<b>Résultats de l'essai US06</b>					
CO	-	0.056		4.971	4.971
NMHC+ NO <sub>x</sub>	-	0.007		0.087	0.087
<b>Résultats de l'essai SC03</b>					
CO	-	0.081	0.323	1.678	1.678
NMHC+ NO <sub>x</sub>		0.000	0.015	0.124	0.124

**Tableau B.7. Consommation de carburant et émissions des Toyota Prius japonaise et européenne**

Source	Cycle	Conso. carb. l/100	Emissions g/km			Remarques
			CO	HCl	NO <sub>x</sub>	
Limites Euro 4	NEDC		1.00	0.10	0.08	
<b>Prius japonaise</b>						
IFP	10-15	4.4	0.01	0.01	0.05	1360 kg
INRETS	10-15	4.3	0.09	0.02	0.05	1360 kg
Toyota	10-15	3.6	0.36	0.03	0.04	
TNO	10-15	4.57	0.05	0.01	0.03	
INRETS	MVEG	5.6	0.60	0.120	0.09	
IFP	MVEG	5.7	0.60	0.09	0.06	
TNO	FTP 4 bag		0.20	0.03	0.05	
EPA	FTP 4 bag	4.85	0.25	0.04	0.03	
<b>Prius européenne</b>						
Toyota	NEDC	5.1	0.63	0.05	0.05	

### *Potentiel de réduction de la consommation de carburant des véhicules hybrides*

La figure B.12 indique les économies de carburant comparées d'un HEV série/parallèle et d'un véhicule conventionnel de même modèle. Le taux d'amélioration de l'économie de carburant du HEV augmente à mesure que la vitesse moyenne diminue et diminue à mesure que la vitesse moyenne augmente. En effet, plus la vitesse moyenne augmente, plus les périodes de ralenti sont rares et plus les périodes à vitesse constante sont nombreuses. Le système d'arrêt du moteur thermique et de récupération de l'énergie de décélération a donc moins d'impact. Lorsque la vitesse moyenne augmente, la charge est également accrue et atteint une zone de fonctionnement d'efficacité identique à celle des véhicules conventionnels. Il est donc plus avantageux d'utiliser les HEV dans les centres urbains, c'est-à-dire là où la vitesse moyenne de la voiture est faible.

**Figure B.12. Taux d'amélioration de l'économie de carburant du HEV par rapport à un véhicule conventionnel de même modèle**

Légende : Taux d'amélioration de l'économie de carburant du HEV / Vitesse moyenne (km/h).

La consommation de carburant de la Honda Insight hybride correspond à une économie de carburant de 50 % par rapport à la consommation d'un véhicule conventionnel de même classe (voir tableau B.8).

**Tableau B.8. Comparaison des consommations de carburant de véhicules**

	Ville [l/100km]	Autoroute [l/100km]
Honda Insight	3.9	3.4
Chevy Metro	6.1	5.2
Suzuki Swift	6.6	5.7
Honda Civic HX	6.8	5.5
Toyota Echo	7.0	5.8

Source : American Council for an Energy-Efficient Economy, The Detroit News.

### Analyse du cycle de vie

La comparaison effectuée ci-dessus se rapporte à la consommation d'énergie pendant l'utilisation du véhicule HEV. Afin de pouvoir évaluer de façon complète la consommation d'énergie d'un HEV pendant les phases de production et d'utilisation, la consommation d'énergie pendant la production doit être également étudiée. Elle dépasse généralement celle d'un véhicule conventionnel du fait du plus grand nombre de pièces requis par un HEV. Par exemple, d'après une analyse et un tableau de correspondance inter-industries, la fabrication d'un poids lourd électrique hybride GNC de 2 tonnes met en jeu 1.2 à 1.8 fois la quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de son équivalent conventionnel (Tanaka et Nakamura, 2000). En prenant comme hypothèse une distance parcourue de 200 000 km au cours du cycle de vie du camion, les calculs suggèrent que l'économie d'énergie pendant l'utilisation du HEV est probablement plus que compensée par le surplus de consommation d'énergie pendant la phase de production. En d'autres termes, aucune économie d'énergie nette ne sera probablement constatée du point de vue du cycle de vie complet du produit.

### *Récupération de l'énergie de freinage*

La récupération de l'énergie de freinage conduit également à une économie de carburant. L'énergie doit être stockée dans un système adapté. Les technologies de stockage de l'énergie incluent les batteries haute puissance, les supercondensateurs et les volants d'inertie. Les batteries utilisées pour stocker l'énergie de freinage doivent posséder un rapport puissance/énergie très élevé. De plus, elles doivent pouvoir être chargées et rechargées de nombreuses fois pendant la durée de vie. Le développement des batteries s'oriente principalement vers les applications de chaînes cinématiques entièrement électriques. La puissance spécifique peut atteindre 3 000 W/kg. Les supercondensateurs sont soumis aux mêmes spécifications de puissance spécifique et d'efficacité énergétique de charge/décharge élevées. Grâce à leurs propriétés, ils sont adaptés aux applications des véhicules électriques hybrides. Leur puissance spécifique est d'environ 1 000 W/kg. Lorsqu'ils sont inutilisés, les supercondensateurs se déchargent très rapidement : environ 10 % par jour, contre (bien) moins de 1 % pour les batteries.

Les volants d'inertie ont une puissance spécifique ne dépassant pas les 500 W/kg et leurs spécifications les rendent adaptés aux véhicules électriques hybrides. Lorsqu'ils sont inutilisés, ils se déchargent à une vitesse du même ordre de grandeur que celle des supercondensateurs : 10 % par jour. Ils présentent le désavantage d'être très lourds. Les trois technologies considérées impliquent d'ailleurs un surplus de poids, d'encombrement et de coût. Un équipement compact et léger d'un prix abordable serait préférable.

### *Procédés techniques visant à minimiser les contraintes que présentent actuellement les HEV*

Les coûts élevés des HEV, principalement dus aux prix des batteries et des aimants permanents des moteurs, constituent l'obstacle majeur au développement de l'utilisation des HEV. Au Japon, les HEV – à l'exception des « HEV modérés » - se vendent aux alentours de 4 000 à 8 000 USD de plus que leurs équivalents conventionnels. L'écart de prix n'est pas compensé par des économies à l'achat du carburant pendant la durée de vie utile du véhicule. Afin de réduire cet écart, le gouvernement japonais a mis en oeuvre plusieurs offres promotionnelles, dont une réduction des taxes et une subvention, versée aux acheteurs de HEV, égale à la moitié de la différence de prix entre le HEV et la voiture conventionnelle équivalente.

Les constructeurs automobiles s'efforcent de réduire les coûts de production des HEV en valorisant les avantages de la production en série et en développant des systèmes hybrides plus simples. Dans le cas des HEV modérés, les constructeurs ont réussi à faire baisser l'écart de prix jusqu'à environ 1 250 USD. Bien que les économies de carburant des HEV modérés soient limitées – environ 15 % de moins – l'expérience montre que l'économie d'énergie est un facteur efficace de promotion des ventes. Le scénario de référence World Energy Outlook de l'AIE fait l'hypothèse d'un prix moyen d'importation du pétrole brut AIE (une variable de substitution aux prix internationaux du pétrole) stationnaire pour la période allant de 2002 à 2010, comme pour les années 1986 à 2001. Cependant, ce scénario de référence anticipe une augmentation régulière des prix du pétrole à moyen terme, de 2020 à 2030. Dans un tel cas, les HEV pourraient devenir bien plus intéressants pour le public (AIE, 2002).

### B.5.2. Véhicules entièrement électriques

#### Répartition de la consommation énergétique d'un véhicule entièrement électrique

Le tableau B.9 présente la consommation énergétique d'un véhicule entièrement électrique.

**Tableau B.9. Répartition de la consommation énergétique d'un véhicule entièrement électrique**

		Urbain	Autoroute
Énergie contenue dans la batterie		100 %	100 %
Pertes de la chaîne cinématique	Pertes de la batterie	18 %	13 %
	Pertes du moteur électrique	6 %	4 %
	Pertes de la transmission	27 %	23 %
	<b>Total</b>	<b>51 %</b>	<b>40 %</b>
Consommation des composants	Auxiliaires	4 %	2 %
	Accessoires	2 %	2 %
	Climatisation (si utilisée)	21 %	18 %
	<b>Total (avec air conditionné)</b>	<b>27 %</b>	<b>22 %</b>
Utilisation pour la propulsion	Résistance à l'air	4 %	21 %
	Résistance au roulement	8 %	13 %
	Pertes cinétiques/freinage aucune inclinaison	10 %	4 %
	<b>total</b>	<b>22 %</b>	<b>38 %</b>

Au cours de la dernière décennie, plusieurs véhicules entièrement électriques ont été développés et commercialisés. L'un des problèmes majeurs de ces véhicules est leur autonomie restreinte du fait de la faible densité d'énergie des batteries disponibles dans le commerce (65 Wh/kg pour les batteries Ni-MH par exemple). La capacité de batterie installée dans un véhicule est limitée par le poids de celle-ci, d'où l'autonomie réduite. Aucune avancée technologique n'est prévue pour les véhicules électriques à batterie (BEV). A court et moyen termes, il ne semble pas y avoir de perspective d'une nouvelle génération de batteries à haute densité et d'un prix abordable. Par ailleurs, les véhicules électriques à batteries sont également confrontés au manque d'infrastructures de recharge des batteries.

Les véhicules électriques modernes ont la capacité de récupérer l'énergie de freinage. Au cours du freinage, le moteur électrique agit comme un générateur et convertit l'énergie de freinage en énergie électrique pouvant être stockée dans la batterie embarquée. De cette façon, l'autonomie est légèrement augmentée.

Les véhicules électriques proposent les meilleurs avantages potentiels dans les zones fortement peuplées, car ils n'engendrent ni rejets de polluants locaux, ni émissions sonores. Dans ces zones, des applications de niche sont observables – comme des taxis ou des camionnettes de livraison roulant à proximité de leur « base ». Dans ces cas, l'autonomie limitée d'un BEV est moins contraignante et les infrastructures de recharge peuvent être développées plus facilement. La nouvelle forme de véhicule électrique la plus prometteuse est la voiture équipée d'un prolongateur d'autonomie, appelée véhicule « hybride ».

## Véhicules à pile à combustible

Cette section complète la description brève donnée dans la partie centrale du rapport. Le lecteur se reportera à cette partie pour une réflexion sur le choix et le stockage du carburant, ainsi que le type de reformeur.

### *Qu'est-ce qu'un véhicule à pile à combustible ?*

Dans un véhicule à pile à combustible, le groupe motopropulseur est composé de trois modules principaux : une pile à combustible, un reformeur et un système de conditionnement du carburant, ainsi qu'un moteur électrique. La pile est constituée d'une série de cellules. Le système de reformage et de conditionnement dépend du carburant utilisé. La pile à combustible est un dispositif électrochimique transformant directement du combustible (ex. hydrogène) en électricité.

Le taux de conversion très efficace de l'énergie chimique en énergie électrique dans une pile à combustible permet de minimiser les émissions de polluants. Dans les applications de véhicules à pile à combustible, la pile est souvent alimentée à l'hydrogène. Celui-ci doit donc être embarqué ou produit au moyen d'un reformeur à partir d'autres carburants comme l'essence, le gaz naturel ou le méthanol.

En dépit du rendement potentiel des véhicules à pile à combustible, la commercialisation à grande échelle de ces véhicules fait face à plusieurs difficultés. L'une d'entre elles concerne le choix du carburant : hydrogène, essence ou méthanol. Si l'hydrogène est choisi, un réseau de distribution entièrement nouveau doit être développé, ce qui est très coûteux. Si l'essence ou le méthanol sont privilégiés, le véhicule doit être équipé d'un reformeur, et dans ce cas, les avantages en matière d'émissions ou de consommation de carburant par rapport aux nouvelles générations de moteurs à combustion interne sont très limités, voire nuls.

### *Répartition de la consommation énergétique d'un véhicule à pile à combustible*

La répartition de la consommation énergétique d'un véhicule électrique à pile à combustible et reformeur est donnée dans le tableau B.10. Le carburant est transformé en hydrogène dans le reformeur. L'hydrogène est utilisé dans la pile pour générer de l'électricité convertie ensuite en énergie mécanique par un moteur électrique. Si le véhicule fonctionne à l'hydrogène pur, le reformeur n'est plus nécessaire à bord du véhicule et la répartition de la consommation énergétique diffère de celle du tableau.

### *Types de piles à combustible*

Dans une pile à combustible, l'énergie chimique du carburant est directement convertie en énergie électrique. Il est théoriquement possible d'atteindre des efficacités de conversion électrique de 80 %. L'une des principales différences avec un moteur électrique branché sur batterie tient au fait que dans une batterie, le « carburant » et l'oxydant sont stockés de façon interne sous la forme solide ou liquide. Ils peuvent être régénérés quand la batterie est rechargée. En revanche, le carburant et l'oxydant d'une pile à combustible sont stockés de façon externe et doivent être ajoutés régulièrement sous la forme fluide ou gazeuse. L'autonomie d'un véhicule utilisant un tel système est donc déterminée par la capacité du réservoir, comme dans le cas des voitures conventionnelles.

**Tableau B.10. Répartition de la consommation énergétique d'un véhicule à pile à combustible**

Type de trajet		Urbain	Autoroute
Énergie contenue dans le carburant		100 %	100 %
Pertes de la chaîne cinématique	Pertes du reformeur	31%	27 %
	Pertes de la pile à combustible	28 %	29 %
	Pertes de la transmission	12 %	11 %
	<b>Total</b>	<b>71 %</b>	<b>67 %</b>
Consommation des composants	Auxiliaires	3 %	1 %
	Accessoires	1 %	1 %
	Climatisation (si utilisée)	12 %	10 %
	<b>Total (avec air conditionné)</b>	<b>16 %</b>	<b>12 %</b>
Utilisation pour la propulsion	Résistance à l'air	3 %	11 %
	Résistance au roulement	5 %	8 %
	Pertes cinétiques/freinage	5 %	2 %
	Aucune inclinaison		
	<b>Total</b>	<b>13 %</b>	<b>21 %</b>

Six types de piles à combustibles applicables à des véhicules sont actuellement en développement. Chaque pile possède des matériaux d'électrode, des électrolytes, des membranes et des températures de fonctionnement spécifiques. Le tableau B.11 donne un aperçu des types de procédés existants. Le nom des piles à combustible est généralement dérivé du type d'électrolyte utilisé (Mourad *et al.*, 2001).

**Tableau B.11. Aperçu des types de piles à combustible**

Type	Electrolyte	Température °C	Puissance spécifique W/kg	Tolérance au CO <sub>2</sub>	Tolérance au CO	Reformeur nécessaire	Etape de développement
PAFC	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	150 – 200	50 – 100	Bonne	Moyenne	Oui	Commercialisation
AFC	KOH	50 – 80	50 – 100	Mauvaise	Mauvaise	Oui	Démonstration
PEFC	Membrane*	60 – 90	50 – 1000	Bonne	Mauvaise	Oui	Démonstration
SOFC	ZrO <sub>2</sub> /Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	800 – 1000	50 – 300	Bonne	Bonne	Oui*	Démonstration
MCFC	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	600 – 650	50 – 100	Bonne	Bonne	Oui*	Démonstration
DMFC	Membrane*	60 – 90	50 – 300	-	-	Non	Essais

\* Fluoropolymère sélectif au passage des protons.

\*\* Le reformeur du SOFC et du MCFC est assez simple et parfois superflu.

PAFC = pile à combustible à l'acide phosphorique.

AFC = pile à combustible alcaline.

PEFC = pile à combustible à électrolyte polymère.

SOFC = pile à combustible à oxyde solide.

MCFC = pile à combustible à carbonate fondu.

DMFC = pile à combustible à méthanol direct.

La tension caractéristique d'une pile à combustible est de 0.5 à 0.8 V pour une densité de courant de 0.1 à 1 A/cm<sup>2</sup> (densité de puissance de 0.05 à 0.8 W/cm<sup>2</sup>). Les performances de la pile s'expriment généralement au moyen de la puissance spécifique, habituellement comprise entre 50 et 1 000 W/kg. Plusieurs cellules sont positionnées pour former une pile, d'où l'emploi du terme pile pour désigner ces suites de cellules. Les tensions résultant de ces alignements en série vont de 10 à 100 V par pile. Dans le cas des piles à combustible à basse température, l'hydrogène est pour le moment le seul carburant

utilisable. Les autres carburants (ex. méthanol, méthane, GPL, diesel, essence) doivent être transformés en hydrogène au moyen d'un reformeur. Les gaz ainsi formés (ex. hydrogène, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone) doivent respecter les contraintes strictes liées à l'utilisation des piles à combustible. Les piles à combustible à température élevée n'ont pas nécessairement besoin d'un reformeur (ex. cas du gaz naturel) ou ne requièrent qu'un reformage partiel (du diesel au gaz naturel). Pour les voitures et les poids lourds, on choisit généralement une membrane à électrolyte polymère (PEM).

Les avantages et les désavantages des piles à combustible sont résumés ci-après :

- Avantages :
  - Efficacité potentielle élevée.
  - Faibles niveaux d'émissions.
  - Opportunité d'utiliser l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables.
  - Probablement moins de maintenance du fait de l'absence de pièces mobiles.
  - Dans le cas d'une utilisation combinée de piles à combustible et de reformeurs : possibilité d'utiliser les infrastructures d'approvisionnement en carburant existantes.
- Désavantages :
  - Hydrogène extrêmement inflammable et difficile à stocker.
  - Absence totale d'infrastructures d'alimentation en hydrogène des véhicules usuels.
  - L'utilisation d'un reformeur et d'autres carburants diminue le rendement énergétique, en particulier du puits à la roue.
  - Coûts élevés.
  - Réponse lente des reformeurs aux variations de charge.
  - L'encombrement du groupe motopropulseur peut être important.
  - Intégration du système.

#### *Potentiel de réduction des émissions de polluants des véhicules à pile à combustible*

Les véhicules à pile à combustible (FCEV) alimentés à l'hydrogène pur ne génèrent que de l'eau. En revanche, les véhicules équipés d'un reformeur produisent des émissions polluantes. Seuls les résultats de quelques essais sont actuellement disponibles pour les véhicules à pile à combustible et reformeur. Ces chiffres sont très variables. Cependant, même si les valeurs les plus élevées sont prises en compte, les rejets de polluants des voitures à pile à combustible et reformeur restent faibles. Calculées par kilomètre, les émissions de HC indirectes dues à l'alimentation en carburant et à l'évaporation issue du réservoir pourraient être plus importantes que les émissions directes. Certaines études prédisent une valeur de 15 mg/km pour les FCEV au méthanol ou à l'essence et 5 mg/km pour les autres.

### *Potentiel de réduction de la consommation énergétique des véhicules à pile à combustible*

Les émissions de CO<sub>2</sub> directes des véhicules à pile à combustible et reformeur sont, à moyen terme, légèrement inférieures à celles des véhicules diesel. Cependant, il est important de considérer les émissions de CO<sub>2</sub> du puits à la roue. Les rejets de CO<sub>2</sub> pour la production d'essence sont d'environ 14 g CO<sub>2</sub>/MJ. Ceux du diesel se situent autour de 11 g CO<sub>2</sub>/MJ. L'efficacité de la production de méthanol à partir de gaz naturel est d'environ 19 g CO<sub>2</sub>/MJ. Sur cette base, les émissions de CO<sub>2</sub> du puits à la roue des véhicules à pile à combustible consommant du méthanol (issu du gaz naturel) sont à peu près identiques ou au mieux légèrement inférieures à celles des véhicules diesel conventionnels avancés.

## *Références*

- Agence internationale de l'énergie (2002), *World Energy Outlook (2002 Edition)*. IEA-OECD, Paris.
- Barbusse, Clodic, Roumégoux (1998), *Climatisation automobile, énergie et environnement*, Recherche Transports Sécurité Nr. 60, July-September.
- Gense (2000), *Driving Style, Fuel Consumption and Tail Pipe Emissions*, Delft, TNO Automotive.
- Hellman, K.H. et R.M. Heavenrich (2001), "Light Duty Automotive Technology and Fuel Economy Trends, 1975-2001", US Environmental Protection Agency, Report no. EPA420-R-01-008, September.
- Iwai, N. (1999), "Analysis on Fuel Economy and Advanced Systems of Hybrid Vehicles", *JSAE Review*, 20, pp. 3-11.
- Mortimer *et al.* (2002), "Carbon and Energy Balances for a Range of Biofuel Options", Sheffield Hallam University, United Kingdom.  
<http://www.shu.ac.uk/rru/reports/scp21-3.pdf>
- Mourad, S. *et al.* (2001), "Quickscan elektrische, hybride en brandstofcel voertuigen", TNO Report 01.OR.VM.077.1/SAM, Delft.
- Smokers, R.T.M., A.J.J. Dijkhuizen *et al.* (2001), Overview Report 2000, IEA Implementing Agreement for Hybrid and Electric Vehicles and Programmes, Annex VII.
- Tanaka, H. and T. Nakamura (2000), Research of High-Efficiency Clean Energy Vehicles, *JARI Research Journal*, Vol. 22, No. 11, pp. 43-48

## Annexe C

# APERÇU DE L'UTILISATION DES VÉHICULES À FAIBLES ÉMISSIONS D'APRÈS LES RÉPONSES DES PAYS MEMBRES À UN QUESTIONNAIRE

### Introduction

Les expériences des pays membres relatives à un certain nombre de technologies ont été analysées au moyen des réponses de 18 pays à l'enquête du groupe de travail menée de juin à octobre 2001. Plusieurs études de cas ont été réunies. Elles font état de situations dans lesquelles des évaluations des niveaux d'émissions des véhicules ont été effectuées en situation réelle.

Les pays suivants ont répondu au questionnaire : Australie, Belgique, République Tchèque, Danemark, Finlande, France, Hongrie, Islande, Italie, Japon, Mexique, Pays-Bas, Nouvelle-Zélande, Pologne, Suède, Suisse, Royaume-Uni et États-Unis.

### Expériences relatives aux carburants conventionnels et alternatifs

#### *Essence et diesel*

De nombreux pays ont développé et appliqué des mesures concernant les véhicules essence et diesel conventionnels afin d'obtenir des voitures à faibles émissions :

- Développement de « carburants propres » comme l'essence oxygénée et/ou reformulée, le carburant diesel à très faible teneur en soufre (moins de 50 ppm ou même 10 ppm) ou le biocarburant (mélangé à du gazole ou 100 % biocarburant). L'avantage de cette approche est que ces carburants peuvent être utilisés facilement et rapidement là où c'est possible – soit dans des cas spécifiques, soit plus généralement pour des parcs de véhicules.
- Amélioration du carburant diesel.
- Installation de systèmes de post-traitement comme les filtres à particules ou les technologies de-NO<sub>x</sub> sur les véhicules diesel. Plusieurs nouveaux modèles de voitures sont aujourd'hui équipés de filtres à particules très efficaces. Des essais en laboratoire ont montré que, lorsque la technologie la plus récente est utilisée, les émissions de PM sont si faibles qu'elles sont à la limite inférieure des techniques officielles. C'est le cas, par exemple, des nouvelles voitures diesel de Peugeot dont plus de 98 % des particules sont filtrées, même lorsque le kilométrage atteint 80 000 km. La filtration est efficace pour toutes les tailles de particules (ADEME – France – juin 2002 – voir étude de cas ci-dessous).

## Études de cas relatives à l'amélioration des véhicules diesel et essence

### Évaluation des émissions d'une Peugeot 607 diesel équipée d'un filtre à particules

Source : ADEME, juin 2002

Type de véhicules : diesel équipé de filtre à particules.

Utilisation : taxis.

Parc : 5 véhicules.

#### Description de l'expérience

L'expérience a été menée par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) en partenariat avec une société de taxis à Paris.

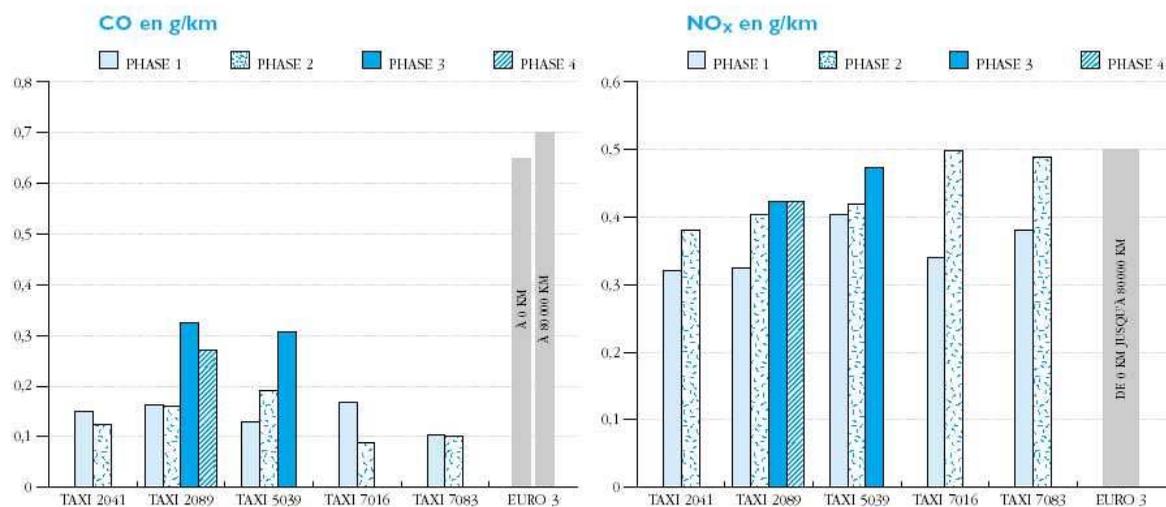
Une flotte de cinq taxis équipés de filtres a été suivie pendant 14 mois dans le but d'évaluer l'efficacité du nouveau système de filtre à particules développé par Peugeot. Les mesures avaient pour objectif de définir la taille et la quantité des particules émises. Elles ont été effectuées conformément au cycle officiel européen des émissions des véhicules motorisés (MVEG).

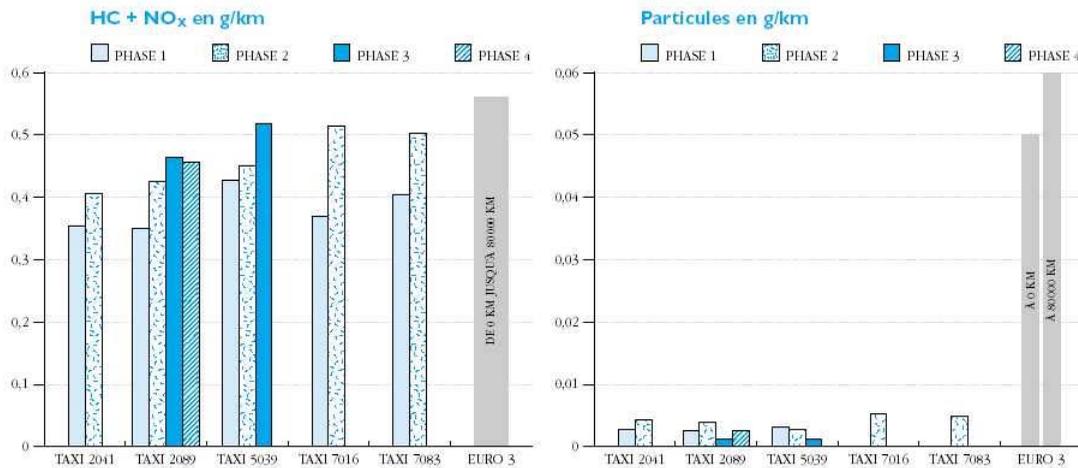
#### Évaluation en usage réel

D'après les chiffres enregistrés par la société de taxis, la consommation moyenne de carburant en usage réel a été d'environ 9 litres pour 100 kilomètres.

Les émissions de CO et de HC étaient très faibles – bien en dessous de la norme Euro 3. Elles ont été générées principalement pendant la première phase du cycle MVEG (*i.e.* pendant le démarrage à froid). La totalité des émissions de CO et 50 % des émissions de HC ont été produites pendant les trois premières minutes du cycle (la durée totale d'un cycle MVEG est de 20 min).

Les émissions de NO<sub>x</sub> étaient en dessous mais proches des niveaux requis par la norme Euro 3.





Les niveaux d'émissions de particules étaient très faibles, plus de dix fois inférieurs aux limites Euro 3. Ils étaient si faibles qu'ils ont nécessité des méthodes de mesure spécifiques afin de supprimer les émissions parasites.

Les émissions ont été mesurées pour trois classes de particules (20, 70 et 120 nanomètres). Les niveaux d'émissions des trois classes étaient presque négligeables – sauf à la fin des cycles MVEG où des pics ont été observés.

Les conclusions préliminaires de l'étude sont les suivantes :

- Aucun problème relatif au fonctionnement du filtre à particules n'a été observé, même après 80 000 km.
- Les niveaux de particules sont constants pendant l'essai, et bien inférieurs à la limite Euro 3 (0.05 g/km).
- Les niveaux de particules sont environ 10 000 fois plus faibles que ceux d'un moteur diesel sans filtre et de même ordre de grandeur que ceux d'un moteur à essence. Après passage à travers le filtre, l'échappement contenait entre 1 000 et 4 000 particules par cm<sup>3</sup> (les émissions d'un diesel conventionnel sans filtre atteignent 1 à 10 millions de particules par cm<sup>3</sup>).
- Étant donné la concentration de sulfate dans les émissions, la réduction de la teneur en soufre du carburant diesel devrait aboutir à des niveaux encore plus faibles d'émissions de particules.

## ***Évaluation de la technologie de l'émulsion diesel (Florence, Italie)***

*Type de véhicules à faibles émissions : utilisation de l'émulsion diesel GECAM pour des bus conventionnels de la compagnie de transports en commun (ATAF).*

*Utilisation : bus urbains.*

*Nombre de véhicules du parc : 96 bus conventionnels. (Il existe plus de 4 000 véhicules similaires dans le pays.)*

### ***Description de l'expérience***

Le GECAM est une émulsion pour les moteurs diesel développée afin de réduire les émissions polluantes des parcs de véhicules des services urbains et des transports en commun. Cette émulsion d'eau (10.3 %) dans du carburant diesel (88 %) en présence d'un additif spécifique (1.7 %) fait du GECAM un mélange homogène, immédiatement utilisable dans les véhicules diesel à la place du carburant habituel – sans qu'il y ait besoin de modifier le moteur.

### ***Évaluation du GECAM en usage réel***

L'émulsion est largement utilisée en Italie par plus de 4 000 véhicules (principalement des bus) ayant parcouru une distance de plus de 90 millions de kilomètres en 2001. Le coût supplémentaire s'élève à environ 0.12 USD/kg pour le carburant, mais les gains en termes de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> et de PM sont importants et l'additif ne génère la présence d'aucun nouveau composé toxique dans les rejets à l'échappement.

L'émulsion est stable. Aucun phénomène de séparation des composés n'a été observé, même lorsque les stations-service ont été fermées pour plusieurs jours pendant l'été. Cette émulsion a déjà été très souvent utilisée, mais en dépit de cette expérience, les effets de l'utilisation de ce carburant doivent être surveillés plus avant afin de détecter d'éventuels inconvénients dans des conditions de fonctionnement particulières.

Des essais spécifiques ont donné les résultats suivants :

Réductions des émissions par rapport aux niveaux d'un carburant 100 % diesel (g/km) :

- CO : -10 %
- NO<sub>x</sub> : -15 %
- PM : -30 %
- Fumées : -50%

Aucune réduction significative du niveau d'émissions de CO<sub>2</sub> n'a été observée. Cependant, l'augmentation de la consommation de carburant est inférieure à 10 %, en dépit des 10 % d'eau présents dans l'émulsion.

Aucune différence particulière de fonctionnement des véhicules n'a été observée par rapport aux bus diesel conventionnels.

Quelques problèmes secondaires peuvent apparaître si l'émulsion séjourne plus de trois mois dans un réservoir, du fait de phénomènes de sédimentation. Les réservoirs doivent donc être équipés d'un système de recirculation afin d'éviter ce genre de difficulté.

L'adoption du GECAM par un nombre croissant d'opérateurs reflète le succès de la technologie et de l'incitation économique mise en place par le gouvernement italien pour encourager l'usage de l'émulsion, sous la forme d'une baisse significative de l'accise sur le carburant. Le Conseil de l'Union européenne a autorisé l'Italie à poursuivre l'application de droits d'accise différenciés pour les émulsions d'eau et de carburant diesel jusqu'en 2005, mais le maintien de telles incitations au-delà de 2005 est incertain.

## Gaz de pétrole liquéfié (GPL)

Le GPL a été appliqué pour la première fois aux moteurs à allumage commandé dans de nombreux pays dans les années 50. A cette époque, les parcs utilisant le GPL étaient limités en nombre et en usage (utilisation locale). Puis, au cours des années 70 et 80, le GPL s'est généralisé du fait de son prix inférieur à celui de l'essence (surtout en Europe). A partir des années 90, le GPL a été considéré comme un carburant « propre » et des subventions ont été offertes dans certains pays pour encourager l'achat de voitures et bus GPL et la construction de stations-service. En 2001, plus de trois millions de véhicules GPL étaient en circulation dans le monde.

En 2001, parmi les pays ayant répondu à l'enquête, les parcs les plus importants étaient les suivants : Italie (1.3 million), Australie (550 000), Pologne (450 000, uniquement des véhicules rééquipés), Pays-Bas (330 000), États-Unis (269 000), Japon (289 000, principalement des taxis ; en mars 2003), République Tchèque (250 000, en grande partie rééquipés), France (150 000), Mexique (149 000), Belgique (68 000), Hongrie (80 000) et Royaume-Uni (50 000).

D'un point de vue technique, les considérations suivantes sont à noter :

- Une grande proportion des voitures particulières GPL sont bicarburants (essence et GPL) et le pourcentage d'utilisation du GPL par rapport à l'essence est inconnu.
- Le pourcentage de véhicules rééquipés varie d'un pays à l'autre. Il est parfois très élevé et parfois très faible (de 100 % en Pologne à 5 % en France).

Dans de nombreux pays, les ventes sont en déclin et le nombre de véhicules GPL est stabilisé ou en baisse. A titre d'exemple, le tableau C.1 illustre l'évolution du nombre de véhicules GPL en circulation aux États-Unis.

**Tableau C.1. Évolution du parc GPL en circulation aux États-Unis**

1993	269 000
1994	264 000
1995	259 000
1996	263 000
1997	263 000
1998	266 000
1999	267 000
2000	268 000
2001	269 000

Source : Pour 2001, estimation du *Green Car Journal*, vol. 10, n° 12, décembre 2001.

Aux Pays-Bas, les véhicules GPL représentaient 11.4 % du parc total en 1990. Ce chiffre est désormais en baisse (tableau C.2). Comme dans d'autres pays, le GPL des Pays-Bas provient de deux sources : (i) opérations de raffinage, (ii) champs de gaz naturel. Pendant très longtemps, les quantités de GPL disponibles ont été importantes grâce aux raffineries de Rotterdam et aux champs de gaz naturel de Groningue. Aujourd'hui, la production de gaz naturel chute rapidement et le GPL n'est plus produit à si large échelle. C'est pour cette raison que le prix du GPL a augmenté et que le prix relatif du carburant diesel par rapport au GPL a chuté.

**Tableau C.2. Évolution de la composition du parc automobile des Pays-Bas  
(en milliers et en pourcentage du parc total)**

	Total	Essence	Diesel	GPL
1977	3 518	3,335 (94.9%)	76 (2.1%)	106 (3.0%)
1980	4 123	3,664 (88.9%)	155 (3.7%)	304 (7.4%)
1985	4 551	3,708 (81.6%)	325 (7.0%)	518 (11.4%)
1990	5 118	3,965 (77.4%)	571 (11.2%)	582 (max.) (11.4%)
1995	5 581	4,596 (82.4%)	608 (10.9%)	376 (6.7%)
2000	6 343	5,215 (82.2%)	797 (12.6%)	331 (5.2%)

En France, les ventes de voitures particulières GPL sont en baisse. En 2001 (8 000), elles étaient trois fois inférieures à celles de 1998 (26 000). En 2002, tous les constructeurs automobiles proposaient des modèles GPL, mais les ventes sont restées limitées.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ces tendances :

- Le prix des véhicules GPL est plus élevé que celui des véhicules essence ou diesel (5 à 20 % de plus pour les voitures particulières et 15 % de plus pour les bus et les poids lourds), du fait, principalement, du coût des réservoirs à haute pression nécessaires.
- Le nombre de stations-service est limité.
- Les coûts de fonctionnement globaux sont plus faibles (le prix du GPL est inférieur à celui des carburants conventionnels), mais en général seulement au-delà d'un kilométrage de plus de 14 000 km par an (et plus aux États-Unis du fait du prix moins élevé de l'essence). Actuellement, l'avantage des GPL en termes de coût est nul par rapport aux nouveaux véhicules diesel équipés de l'injection directe, de meilleure efficacité énergétique et de consommation de carburant plus faible.
- Une partie de la puissance du moteur est perdue en raison de la moindre valeur calorifique du GPL.
- Le prix de revente d'un véhicule GPL est assez faible.
- L'espace de rangement est moins important à cause du réservoir GPL.
- Les coûts de maintenance des véhicules GPL sont plus élevés, en particulier pour les poids lourds, pour lesquels la maintenance requiert des mesures de sécurité supplémentaires, et les coûts de fonctionnement globaux sont plus importants que ceux d'un camion diesel.

Par ailleurs, il est de plus en plus difficile et coûteux de produire de nouveaux moteurs GPL garantissant les mêmes niveaux d'émissions de polluants locaux (CO, HC, NO<sub>x</sub>) que les moteurs essence ou diesel, tout en maintenant des niveaux faibles de CO<sub>2</sub> et

d'autres gaz à effet de serre. Par exemple, il serait trop cher de construire pour les bus des moteurs GPL qui soient conformes aux réglementations Euro 3. En conséquence, le constructeur de moteurs DAF a décidé de stopper sa production de bus GPL (le marché est trop limité pour obtenir un résultat financier positif). Les émissions de CO<sub>2</sub> des bus GPL sont plus élevées que celles de bus diesel similaires.

Dans certains pays, l'expérience des véhicules GPL est réussie. Un exemple très instructif nous vient de Vienne, en Autriche, où des bus GPL circulent depuis les années 60. Au début du programme, les autorités avaient décidé d'utiliser des bus GPL car le GPL était disponible à un prix très faible par rapport au prix du carburant diesel. Plus de 550 bus roulaient ainsi au GPL dans les années 70. Pendant les années 80, le GPL a été à nouveau mis à l'honneur du fait de ses faibles niveaux d'émissions de polluants locaux. Le constructeur MAN, fabricant des moteurs GPL de ces bus, a décidé d'équiper les bus d'un système catalytique à trois voies puis, dans les années 90, d'un système à combustion pauvre afin de réduire la consommation de carburant. Aujourd'hui, tous les bus de Vienne sont alimentés au GPL pour les raisons suivantes :

- Émissions de polluants (CO, HC, NO<sub>x</sub>) très faibles.
- Émissions sonores plus faibles que celles du diesel (moins 3 à 5 dB(A)).
- Prix du carburant très inférieur à celui du diesel (mais seulement dans la zone urbaine de Vienne).
- Décision des constructeurs de moteurs de produire des moteurs GPL spécifiques pour les bus de Vienne et d'atteindre les niveaux d'émissions Euro 3 et Euro 4 en réduisant la puissance des moteurs.

Aux États-Unis, il est possible de monter des réservoirs spécifiques pour alimenter au propane les moteurs des voitures, des camionnettes, des pick-up et des bus. De nombreuses voitures sont bicarburants et peuvent également être équipées de réservoirs à essence permettant au conducteur de basculer d'un carburant à l'autre en fonction de la disponibilité et des prix. En termes de niveaux d'émissions, et par rapport à l'essence, le GPL est meilleur pour le CO (-20 %), les COV (-60 %), les NO<sub>x</sub> (-9 %), les PM<sub>10</sub> (-30 %) et le CO<sub>2</sub> (-3 % pendant le fonctionnement du véhicule seulement et -11 % si l'on inclut l'extraction de la matière, le raffinage, le stockage et la distribution du carburant). Par rapport au carburant diesel, le GPL est meilleur pour le CO (-56 %), les NO<sub>x</sub> (-75 %) et les PM<sub>10</sub> (-92 %), mais moins bon pour les COV (+88 %) et pour le CO<sub>2</sub> (+5 % pendant le fonctionnement du véhicule seulement et +2 % si l'on considère toutes les étapes du puits à la roue) (Baer *et al.*, 1997 et Raj *et al.*, 1997).

### *Conclusion*

Aujourd'hui, le GPL est plus souvent utilisé comme un moyen de diversification des sources d'énergie que comme une solution pour des « véhicules à faibles émissions ». Les nouveaux « véhicules conventionnels » sont aussi performants que les véhicules GPL en termes de polluants locaux, tandis que les émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules GPL (année automobile 2002) sont environ 20 % supérieures à celles des véhicules diesel (année automobile 2002).

## Études de cas relatives aux véhicules GPL

### Évaluation des voitures particulières GPL en République Tchèque

*Type de véhicules à faibles émissions : conversion des voitures à essence au GPL.*

*Utilisation : voitures particulières et véhicules de livraison dans des conditions de trafic habituelles.*

#### Description de l'expérience

En République Tchèque, la conversion des véhicules à moteur à allumage commandé en véhicules GPL est légale depuis 1990. De nombreux utilisateurs profitent de cette opportunité pour bénéficier du prix plus faible du carburant GPL, comparé à celui de l'essence, pour des véhicules de kilométrage annuel élevé. Ils disposent alors d'un retour sur investissement rapide après la conversion du véhicule. Dans la plupart des cas, la voiture conserve la possibilité de rouler au carburant d'origine (essence) grâce à un système bicarburants.

La réception des véhicules rééquipés est soumise à la législation tchèque et s'effectue selon les étapes suivantes :

- Les composants du système GPL soumis à de fortes pressions du gaz doivent être certifiés (homologués) conformément au Règlement CEE n° 67.
- Les émissions limites s'appliquant au véhicule rééquipé doivent être respectées.
- Les conditions d'installation des équipements GPL à bord du véhicule doivent être respectées, en particulier du point de vue de la sécurité routière.

Environ 250 000 véhicules ont été convertis au GPL et sont maintenant en circulation en République Tchèque.

#### Évaluation en usage réel

##### Émissions polluantes

Le tableau C.3 compare les niveaux d'émissions de véhicules GPL et essence. Les mesures ont été effectuées sur quatre versions du modèle Skoda Forman suivant l'essai CEE 15 modifié simulant des conditions de conduite urbaines. Le cycle complet comprend quatre segments identiques, la distance parcourue est de 4.052 km, la vitesse moyenne est de 19 km/h et la vitesse maximale est de 50 km/h.

**Tableau C.3. Comparaison des émissions des Skoda Forman essence et GPL**

Émissions	Skoda Forman - essence		Skoda Forman - GPL	
	sans catalyseur [g/essai]	avec catalyseur [g/essai]	sans catalyseur [g/essai]	avec catalyseur [g/essai]
CO	25.9	1.8	19.9	2.0
HC	6.8	0.2	6.2	0.4
NO <sub>x</sub>	8.3	0.9	4.9	4.2

Source : Motor Vehicle Research Institute Ltd., Prague.

Il est à noter que les véhicules GPL sont obtenus après rééquipement de véhicules essence, d'où leurs performances assez mauvaises. En effet, le principe de rééquipement ne fournit pas de système optimisé.

*Consommation de carburant*

La consommation de carburant est d'environ 1.5 à 2.0 l/ 100 km supérieure à celle de la voiture particulière essence d'origine. Du point de vue du prix, cet effet est compensé par le moindre coût du carburant.

*Considérations relatives à la sécurité*

Certains problèmes de sécurité liés aux véhicules GPL ont été observés après les premiers rééquipements, puisque ceux-ci étaient effectués dans des conditions non professionnelles et sans réception adaptée. L'application des normes définies légalement a permis d'éliminer pratiquement tous ces problèmes de sécurité. Les véhicules GPL sont aujourd'hui soumis à certaines restrictions, parmi lesquelles :

- L'interdiction d'entrer dans des lieux de garage ou de réparation fermés.
- Des contrôles officiels plus fréquents des véhicules en circulation.

*Considérations relatives à l'alimentation en carburant*

Le résultat le plus défavorable à l'utilisateur après la conversion de la voiture particulière est le manque de place dans le coffre (où se situe généralement le réservoir GPL).

En République Tchèque, l'infrastructure d'alimentation en carburant est adéquate. Elle compte plus de 450 stations-service GPL.

*Exploitation et maintenance*

En termes d'exploitation, les véhicules GPL rééquipés ne diffèrent pas sensiblement du véhicule essence d'origine. Concernant la maintenance, les véhicules GPL nécessitent des contrôles plus fréquents (étanchéité du système GPL). De plus, les restrictions pour garer la voiture peuvent être un problème pour certains utilisateurs.

***Résumé de l'expérience***

Afin de garantir la fiabilité des véhicules en circulation, la conversion doit être effectuée dans un garage spécialisé. Les améliorations déclarées relatives aux émissions ne sont visibles qu'après un réglage adapté des équipements du gaz et une stabilité à long terme de ce réglage. Les mesures visant à empêcher toute modification des équipements d'utilisation du gaz se sont révélées utiles.

L'utilisation du GPL est plus économique par rapport à l'essence pour les véhicules à fort kilométrage annuel (25 000 à 30 000 km). Dans ce cas, le rééquipement est compensé économiquement.

A ce jour, un très petit nombre de véhicules sont lancés sur le marché directement équipés du système GPL.

## Évaluation de bus urbains GPL en France

Source : ADEME

Utilisation : bus urbains en fonctionnement.

Nombre de véhicules du parc : 20 véhicules utilisés sur 6 sites entre 1998 et 2001 (Bayonne, Laval, Tours, Saint-Germain-en-Laye, RATP).

### Description de l'expérience

Dans le cadre d'un programme d'évaluation majeur entrepris par l'ADEME entre 1998 et 2001, le « programme bus propres », les performances en termes d'émissions d'un parc de 20 bus urbains GPL ont été mesurées en situation réelle.

### Évaluation en usage réel

Le tableau C.4. présente les niveaux d'émissions (g/km) obtenus pour deux types de véhicules diesel et trois types de véhicules GPL.

**Tableau C.4. Comparaison des niveaux de polluants de bus urbains diesel et GPL (France)**

Polluant g/km	Véhicule Diesel Type A	Véhicule Diesel Type B	Véhicule GPL 1 Type A		Véhicule GPL 2 Type A		Véhicule GPL 3 Type B	
			Neuf	Vieilli	Neuf	Vieilli	Neuf	Vieilli
CO	3,85	1,77	2,03	58,16	1,50	3,32	11,02	7,56
HC	1,14	1,17	0,085	5,14	0,06	0,27	0,11	0,12
NOx	30,12	19,71	13,66	28,15	14,97	13,16	12,70	10,69
Particules	0,422	0,282	0,057	0,039	0,038	0,042	0,019	0,037
Consommation (litre / 100 km)	61	56	118,3	120,9	116,5	122,6	119,2	117,7
CO <sub>2</sub>	1620	1483	1902	1841	1873	1968	1903	1884
Puissance max	110 KW	136 KW	103 KW		100 KW		N.C.	

Les conclusions suivantes relatives aux véhicules GPL (comparés aux véhicules diesel) ont été tirées de l'évaluation :

- Les émissions de particules sont bien plus faibles, même pour les véhicules vieilliss.
- Les réglages du moteur n'étaient pas assez fiables (voir véhicule GPL 1) ; des progrès doivent être faits pour maintenir à plus long terme les émissions à des niveaux faibles, en particulier les rejets de CO.
- Dans les conditions de fonctionnement, l'augmentation de la consommation de carburant était très élevée par rapport à celle des bus diesel (1.8 à 2.1 fois supérieure), ce qui correspond à 20 % d'émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires.

Ces évaluations ont été effectuées dans le cadre de la réglementation Euro 2. Depuis octobre 2001, les règlements Euro 3 sont les nouvelles normes obligatoires s'appliquant aux véhicules neufs, mais il n'y a pas encore de moteurs GPL Euro 3 disponibles en France. Les constructeurs de moteurs (Irisbus et DAF) ont décidé de stopper la production de moteurs GPL pour les bus urbains. MAN fabrique des bus urbains GPL Euro 3, mais ceux-ci ne sont pas encore homologués en France. Les moteurs diesel conventionnels sont bien plus rentables sur ce marché.

## Gaz naturel comprimé

Comme dans le cas du GPL, les premières utilisations du GNC comme carburant automobile datent d'il y a 50 à 60 ans, mais ce n'est qu'à partir des années 90 que les ventes de GNC ont réellement décollé.

En 2001, le parc mondial total des véhicules alimentés au GNC pour des raisons liées aux émissions (*i.e.* véhicules considérés comme « propres ») s'élevait à 500 000 véhicules. En ajoutant les voitures roulant au GNC pour des raisons économiques (rééquipement), ce chiffre passe à plus d'un million.

Parmi les pays ayant répondu à l'enquête, les parcs les plus importants sont les suivants : Italie (290 000 véhicules, dont 289 000 voitures privées et 500 bus), États-Unis (110 000 véhicules, dont 5 200 bus, 15 000 poids lourds et 59 000 utilitaires légers), Nouvelle-Zélande (13 700 véhicules), Japon (16 500 véhicules dont 8 130 poids lourds et 770 bus), France (5 000 véhicules dont 1 500 bus), Australie (2 200 véhicules dont 600 bus) et Mexique (2 100 véhicules). Quelques pays possèdent un parc de moins de 1 000 véhicules GNC (ex. 300 en Suisse).

Dans certains pays comme l'Algérie, l'Argentine et l'Iran, de nombreux véhicules (principalement des voitures mais également des poids lourds) utilisent le GNC après rééquipement. Dans ces pays, l'objectif est moins de réduire la pollution que d'utiliser le gaz naturel produit nationalement et disponible à très faible coût. La taille de ces parcs est inconnue mais le nombre total de véhicules est assez important, probablement de l'ordre de plusieurs centaines de milliers (630 000 en Argentine seulement).

Une grande partie des véhicules GNC (voitures particulières, bus, poids lourds) sont utilisés dans des parcs spécifiques en raison des restrictions dues à l'alimentation en carburant (*i.e.* systèmes haute pression). Certaines voitures particulières au Canada et aux États-Unis sont ravitaillées à domicile au moyen de petits compresseurs.

Le Japon a pris des mesures visant à promouvoir l'utilisation du GNC pour les camions de petite ou moyenne taille (poids brut du véhicule < 8 tonnes), en particulier dans les villes, dont les objectifs sont de réduire les émissions de NO<sub>x</sub> et de PM.

Les véhicules équipés de systèmes GNC embarqués requièrent des réservoirs pressurisés et des dispositifs de sécurité spécifiques. Le coût supplémentaire est par conséquent substantiel et, même à grande échelle lorsque des économies peuvent être réalisées sur les coûts de production, le prix des véhicules GNC reste supérieur à celui des véhicules similaires essence ou diesel.

Dans les cas des voitures particulières, les coûts sont beaucoup plus élevés : de 15 % (en France, Italie et Australie) à 100 % de plus (au Japon). Aux États-Unis, une voiture roulant exclusivement au gaz naturel coûte entre 3 500 et 7 000 USD de plus qu'une voiture essence. D'après une étude effectuée par le DOE (Département de l'énergie) américain, la production en série proposerait des véhicules au gaz naturel 900 USD plus chers que leurs équivalents essence. Dans le cas des poids lourds, le surcoût s'élève à plus de 10 à 15 % et pour les bus, il approche les 20 %.

Aux États-Unis, les véhicules GNC sont l'alternative la plus développée actuellement produite par les constructeurs automobiles. Au cours de l'année automobile 2002, ceux-ci proposaient quatre modèles de véhicules roulant au GNC disponibles sous la forme bicarburants GNC/essence, ainsi que trois modèles exclusivement GNC. Sept types d'utilitaires légers GNC étaient également fabriqués, dont trois modèles bicarburants et

quatre modèles exclusivement GNC. En termes de rejets à l'atmosphère, de nombreux poids lourds alimentés au GNC respectent désormais les émissions limites de 2004 et certains utilitaires légers uniquement GNC remplissent actuellement les conditions définies par les normes californiennes de véhicules à émissions super-ultra-faibles (SULEV), équivalentes au groupe 2 des normes 2004 de niveau 2 de l'EPA relatives aux véhicules utilitaires légers. En dépit de ces avantages, les ventes restent limitées du fait du faible prix de l'essence.

Aujourd'hui, de nombreux pays bénéficient d'une expérience substantielle en matière de GNC. Il est donc possible d'identifier clairement les avantages et les désavantages des véhicules alimentés au GNC. Ces points sont résumés ci-dessous.

### *Avantages*

- En principe, le GNC est plus sûr que le GPL (le GPL est plus lourd que l'air).
- Les émissions de NO<sub>x</sub> et de particules sont inférieures à celles du diesel.
- Les moteurs GNC sont moyens bruyants que les moteurs diesel.
- Le prix du carburant est plus faible.

### *Désavantages*

- La puissance du moteur est moindre.
- Le véhicule est plus lourd du fait du réservoir sous pression et l'espace nécessaire est plus grand en raison de la forme du réservoir (cylindre).
- Concernant les émissions de CO<sub>2</sub>, les véhicules GNC sont plus performants en usage urbain que les voitures essence, mais du même ordre que pour les véhicules diesel, principalement du fait de la moindre efficacité du moteur à allumage commandé à faible charge par rapport au diesel. Ce désavantage touche fortement les bus et plus particulièrement les camionnettes de livraison et les bennes à ordures.
- L'alimentation en carburant est la source de nombreuses contraintes : réglementations de sécurité strictes (surtout en Europe), coût important du système, bruit engendré par les compresseurs et énergie requise pour comprimer le gaz de 3 à 250 bars.
- Le prix du GNC n'est pas clairement avantageux (dans la plupart des pays d'Europe au moins).
- Aucun marché n'existe pour les véhicules d'occasion.

De plus, les moteurs « conventionnels » sont en constante progression et la nouvelle génération de véhicules essence et diesel actuellement sur le marché est aussi « propre » que les véhicules GNC.

### *Conclusion*

Le GNC, comme le GPL, peut fournir un carburant alternatif pour les transports routiers. De nombreuses expériences en matière de GNC ont été menées dans beaucoup de pays, en particulier ceux disposant d'un vaste marché. Excepté en Italie (où les stations-service sont disponibles en grand nombre), l'usage du GNC est réservé le plus

souvent à des parcs spécifiques – du fait des contraintes liées à l'alimentation en carburant. L'utilisation du GNC pourrait être généralisée au moyen de larges systèmes de distribution publics. Quelques extensions sont actuellement en cours en Europe (ex. France et Suisse) et dans d'autres pays de l'OCDE (ex. Australie et États-Unis).

Afin de réduire les contraintes associées au ravitaillement en gaz comprimé, le gaz naturel utilisé pourrait être transformé chimiquement de gaz en liquide. Certaines expérimentations sont menées dans ce domaine par les constructeurs automobiles et les compagnies pétrolières.

## **Études de cas relatives aux véhicules GNC**

### **Évaluation d'un parc de taxis GNC à Kensington, aux États-Unis**

*Référence : Barwood CNG Cab Fleet Study : Final Results. Mai 1999, U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory. N° de rapport : NREL/TP-540-26035.*

*Type de véhicules à faibles émissions : Comparaison de Ford Crown Victoria berlines essence et GNC, moteur 4.6 L V8.*

*Utilisation : Voitures particulières (taxis). Ce parc a permis d'évaluer des véhicules à carburant alternatif dans le cadre d'une application à fort kilométrage.*

*Nombre de véhicules étudiés : 10 berlines exclusivement GNC et 10 berlines essence.*

#### **Description de l'expérience**

En 1996, la société de taxis Barwood, Inc., basée à Kensington dans le Maryland (États-Unis), s'est engagée à inclure dans son parc un petit nombre de véhicules exclusivement GNC sans coûts d'investissement supplémentaires. Des données relatives au fonctionnement, à l'entretien et aux frais ont été collectées pour les véhicules GNC et pour des véhicules essence pendant une période de fonctionnement des véhicules de 12 mois. De plus, des essais ont été effectués pour mesurer les émissions des véhicules de l'étude à des intervalles de kilométrage choisis. Enfin, les performances et les coûts de fonctionnement des voitures GNC et essence ont été évalués et comparés.

Les véhicules GNC ont été utilisés de la même façon que les véhicules essence. A la fin de l'étude, les voitures GNC avaient accumulé entre 80 000 et 155 000 miles, soit une moyenne de presque 108 000 miles par véhicule. Les voitures essence avaient effectué entre 112 000 et 143 000 miles, soit une moyenne de plus de 127 000 miles par véhicule. Les voitures essence ont été en service environ trois mois de plus en moyenne que les véhicules GNC. Les différences observées entre les kilométrages mensuels – de véhicule à véhicule – résultaient généralement des habitudes de travail individuelles des chauffeurs.

#### **Évaluation en usage réel**

##### *Coûts et économie de carburant*

Pendant trois mois, tous les enregistrements disponibles relatifs à l'alimentation en carburant ont été compilés afin d'évaluer les coûts et l'économie de carburant. Barwood a fourni les données concernant les véhicules GNC. Les données concernant les véhicules essence ont été réunies directement par les chauffeurs des voitures étudiées. L'économie de carburant des modèles de voiture essence et GNC s'est révélée quasiment la même – environ 17.3 miles par gallon (en équivalent de gallon d'essence pour le GNC) de carburant pour chaque type de véhicule. Les vraies différences entre les deux types de modèles apparaissent au niveau des coûts. Exprimés en cents par mile, les frais de carburant des véhicules GNC étaient presque 30 % inférieurs à ceux des véhicules

essence : 4.35 cents par mile contre 6.39 cents par mile. Pendant la période de l'étude consacrée à cette évaluation, le carburant coûtait environ 0.75 USD par équivalent de gallon d'essence pour le GNC et 1.10 USD par gallon pour l'essence. Cette différence peut être un net avantage au niveau de tout un parc.

#### *Comparaisons et coûts de la maintenance*

Toutes les données relatives à la maintenance, aux réparations, et aux frais générés pour les véhicules de l'étude ont été rassemblées, qu'elles concernent des opérations d'entretien planifiées ou imprévues. Ces données comprenaient la description et la date de l'opération d'entretien ou de réparation, le relevé du compteur kilométrique au moment du travail, ainsi que les coûts engendrés par l'opération. Le nombre de miles et de jours entre chaque entretien a été quasiment le même pour les deux types de véhicules. Chaque type de véhicule a enregistré entre 4 300 et 4 400 miles et un peu plus de 31 jours entre deux interventions. Exprimé par mile, le taux de réparations imprévues était légèrement supérieur pour les véhicules essence que pour les véhicules GNC. Aucune différence n'a été constatée au niveau du type ou de la fréquence des réparations effectuées sur le moteur ou le système d'alimentation en carburant. A kilométrage égal, les véhicules essence ont subi un nombre légèrement plus élevé de réparations au niveau des freins ou des pneus. Les raisons de cette différence sont incertaines, mais les chauffeurs des taxis GNC ont expliqué que leurs véhicules n'accéléraient pas aussi vite que les voitures essence : ils devaient ainsi adapter leur conduite aux véhicules GNC. En règle générale, les deux types de véhicules ont démontré les mêmes performances et la même fiabilité et les coûts de maintenance totaux ont été légèrement inférieurs pour les véhicules GNC, à 3.39 cents par mile contre 3.95 cents par mile pour les véhicules essence.

#### *Coûts de fonctionnement totaux*

Exprimé par mile, le fonctionnement des taxis GNC a coûté environ 25 % de moins que celui des taxis essence. D'après ces calculs, un parc peut espérer économiser environ USD 1 300 par an s'il comprend un véhicule GNC roulant sur la base de 50 000 miles ou plus par an. Dans le cas d'applications utilitaires plus courantes où les véhicules effectuent environ 15 000 miles par an, les économies pourraient être de quelque USD 390 avec un véhicule GNC.

#### *Résultats relatifs aux émissions*

Trois séries de mesures des émissions ont été effectuées sur sept véhicules GNC et sept véhicules essence. La méthode utilisée était la procédure d'essai fédérale de l'EPA (FTP-75) utilisant un cycle de conduite urbain sur banc à rouleaux pour les émissions à l'échappement et incluant deux essais d'émissions par évaporation d'une heure chacun. Les essais ont été menés à 60 000, 90 000 et 120 000 miles. Les deux types de voitures ont été testés avec des carburants spécialement préparés pour l'essai. Le GNC était conçu pour représenter une composition de carburant industrielle moyenne. L'essence consommée était de l'essence reformulée (RFG) Phase II de Californie, sélectionnée pour représenter le carburant essence du « meilleur scénario possible ».

Les émissions à l'échappement GNC étaient bien plus faibles que celles des véhicules essence, même lorsque le carburant de base utilisé était un RFG très propre. Les émissions polluantes réglementées moyennes des deux types de véhicules étaient conformes aux normes applicables de l'EPA. Les véhicules GNC présentaient des niveaux de rejets d'hydrocarbures non méthaniques (HCNM) et de monoxyde de carbone (CO) nettement plus faibles et des niveaux de rejets d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) comparables (voir tableaux ci-dessous). Les émissions de CO<sub>2</sub> n'ont pas été mesurées. Cette étude semble être la première à confirmer de façon indépendante le maintien de ces avantages en usage réel au cours de la vie utile (100 000 miles) du véhicule et même au-delà. Les

résultats suggèrent que les émissions des voitures GNC pourraient, en fait, se dégrader moins rapidement que celles de voitures essence similaires.

Kilométrage (miles)	GNC	Essence	Différence
<i>Hydrocarbures non méthaniques (émissions moyennes, grammes/mile)</i>			
60 000	0.049	0.125	-61.1%
90 000	0.055	0.172	-67.8%
120 000	0.045	0.177	-74.7%
<i>Monoxyde de carbone (émissions moyennes, grammes/mile)</i>			
60 000	0.928	2.764	-66.4%
90 000	1.257	3.703	-66.1%
120 000	2.043	4.622	-55.8%
<i>Oxydes d'azote (émissions moyennes, grammes/mile)</i>			
60 000	0.243	0.263	-7.5%
90 000	0.295	0.269	+9.7%
120 000	0.309	0.338	-8.6%

Les essais relatifs aux émissions par évaporation ont consisté à mesurer les hydrocarbures émanant du véhicule lorsque le moteur est à l'arrêt. Les niveaux mesurés pour les véhicules GNC étaient faibles (moins de 0.4 g/essai). Les niveaux des véhicules essence étaient très inférieurs. Ce résultat est surprenant car on pense généralement que les véhicules GNC ne produisent pas d'émissions par évaporation. Cependant, les essais prennent en compte les petites quantités de carburant gazeux qui pourraient s'échapper du système d'admission d'air et de carburant après l'arrêt du moteur. Des niveaux d'hydrocarbures similaires ont été mesurés pour d'autres véhicules exclusivement GNC.

A la fin de cette étude, Barwood avait fait tourner les taxis GNC pendant plus de 18 mois. La société comptait les utiliser environ cinq ans.

### ***Évaluation de bus urbains GNC en France***

*Source : ADEME*

*Type de véhicules à faibles émissions : bus GNC Euro 2.*

*Utilisation : transports en commun urbains.*

*Nombre de véhicules du parc : 60 véhicules GNC Euro 2 (Irisbus, Heuliezbus, Mercedes) opérant sur 6 sites, entre 1998 et 2001 (Nice, Les Ullis, RATP, Poitiers, Valence, Montbelliard).*

#### ***Description de l'expérience***

Le programme d'évaluation « bus propres » de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) comprenait une évaluation approfondie de bus roulant au GNC. L'étude a conclu que, par rapport aux bus diesel, les véhicules GNC présentent les caractéristiques suivantes :

- Émissions de NO<sub>x</sub> inférieures de 50 % et rejets de particules très faibles. Des résultats comparables ont été obtenus pour le CO et les HC. Les rejets de certains polluants augmentent avec l'ancienneté du bus (voir tableau C.5).

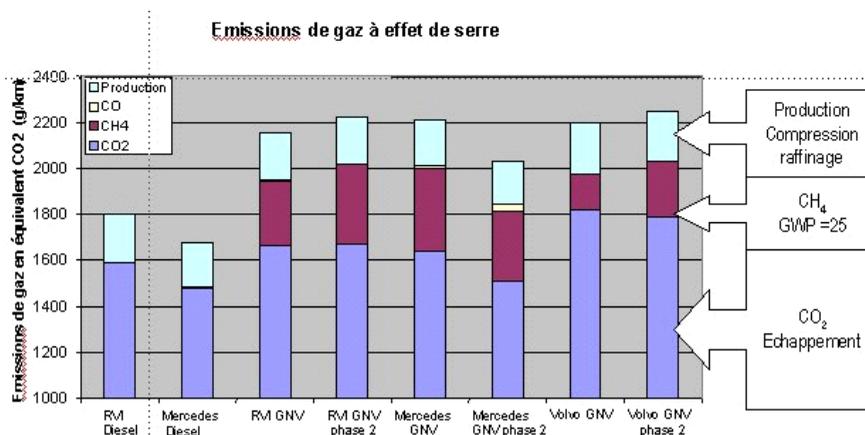
- Émissions de CO<sub>2</sub> (g/km) supérieures. Comme le montre la figure C.1, les émissions élevées de gaz à effet de serre (CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>) des bus GNC ont été observées sur la base d'un cycle du carburant complet.
- Meilleure acceptation de la part des groupes d'utilisateurs (chauffeurs, passagers) car les véhicules GNC produisent moins de bruit et de vibrations et émettent des odeurs moins désagréables.

**Tableau C.5. Comparaison des niveaux de polluants entre des bus urbains GNC et diesel en France**

Polluant G/km	Véhicule type A diesel	Véhicule type B diesel	Véhicule type A GNV		Véhicule type B GNV		Véhicule type C GNV	
			neuf	vieilli	neuf	vieilli	neuf	vieilli
CO	3,85	1,77	5,37	4,79	11,63	33,37	0,54	1,95
HC	1,14	1,17	8,34	10,3	4,96	9,86	5,21	7,7
Non méthaniques	-	-	14,6%	5,5%	1,2%	1,6%	2,2%	0,8%
NOx	30,12	19,71	14,73	15,72	8,25	8,17	13,42	16,29
Particules (masse)	0,422	0,282	0,036	0,027	0,026	0,045	0,025	0,047
Conso. Cycle ADEME /100km	61	56	78 nm3	83 nm3	81 nm3	77nm3	91 nm3	89nm3
Puissance max	110 KW	136 KW	103 KW	90 KW	103 KW	Non mesurée	127 KW	124 KW

Source : ADEME.

**Figure C.1. Émissions de gaz à effet de serre issues de bus GNC et diesel en France**



Source : ADEME.

La technologie GNC Euro 2 est soumise aux variations de la composition du gaz et manque d'un réglage fiable. La consommation de carburant des bus GNC augmente dans les embouteillages. Elle est également plus sensible aux conditions de trafic que les bus diesel. De nombreuses améliorations sont attendues de la technologie Euro 3.

Ces évaluations avaient pour cadre de référence les réglementations Euro 2. Les normes Euro 3 sont obligatoires depuis octobre 2001. De nouveaux moteurs GNC et remplissant les conditions Euro 3 sont désormais disponibles. L'adoption de la technologie de l'injection devrait permettre des progrès significatifs en termes de réduction des émissions de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub>. Les moteurs conformes aux normes Euro 3 n'ont toujours pas été évalués en usage réel.

## Biocarburants

Les biocarburants ont fait l'objet de beaucoup d'expérimentations de part le monde, même si leur utilisation ne s'est largement développée dans aucun pays – sauf au Brésil dans les années 1970 et 1980.

Les biocarburants proviennent de cultures comme le maïs et peuvent alimenter des moteurs essence ou diesel sans modification majeure.

Les raisons pour lesquelles ces carburants issus de la biomasse sont produits varient d'un pays à l'autre et d'une époque à une autre. Ils peuvent être valorisés afin de soutenir le prix du maïs ou du blé (comme ce fut le cas en Europe et dans certains États des États-Unis), à cause du manque de pétrole d'un pays ou parce que la production d'éthanol dérivé de la canne à sucre est élevée (comme au Brésil en 1973), ou dans le but d'obtenir un carburant à très faible niveau d'émissions (comme aux États-Unis ou en France). Au cours des années 80 et 90, les biocarburants ont été développés afin de réduire les émissions de CO, HC, NO<sub>x</sub> et PM et, plus récemment, les rejets de CO<sub>2</sub>. Aujourd'hui, les carburants issus de la biomasse sont en général produits principalement pour leur impact positif sur les niveaux de rejets de CO<sub>2</sub>.

Les technologies et les types de carburants sont différents :

- Méthanol (mélangé à de l'essence à 85 ou 95 %).
- Éthanol (mélangé à de l'essence à 10 % ou 85 %).
- ETBE1 ou MTBE (mélangé à de l'essence de 4 à 12 %).
- Diesters (mélangé à du carburant diesel de 5 à 30 %).

Tous ces biocarburants sont en principe issus des récoltes (ou des forêts). Cependant, la qualité et la disponibilité des cultures dépendent du climat, aussi une partie de ces carburants provient également du pétrole ou du gaz naturel (selon la saison et le type de récolte).

En Europe, il existe peu de programmes de développement de carburants spécifiques comme le diester à 100 % ou l'éthanol à 85 %. On utilise de préférence de l'essence normale à laquelle on ajoute 4 % d'ETBE ou du carburant diesel auquel on ajoute 2 à 5 % de diester.

En Amérique du Nord, certaines stations-service sont spécifiquement réservées à ce type de carburant (*i.e.* méthanol à 85 % ou éthanol à 85 %).

Les résultats ne sont pas significatifs, même après des années de recherche et de développement, et en dépit de nombreuses primes et subventions allouées à la production des récoltes et du carburant et à l'achat des véhicules roulant à ce type de carburant.

En France, en 2000, la production de diester était de 250 000 tonnes (0.6 % de la consommation totale de carburant pour les transports routiers – 42 Mt) et la production d'ETBE était de 170 000 tonnes (0.4 % de la consommation totale de carburant), une partie de l'ETBE provenant du gaz naturel.

<sup>1</sup> ETBE : ethyl-tertio-butyl-éther. MTBE : méthyl-tertio-butyl-éther.

Aux États-Unis, un rapport consacré aux « véhicules et carburants automobiles alternatifs – impact sur le secteur des transports » (Alternative Motor Fuels and Vehicles – Impact on the Transportation Sector) et publié le 10 juillet 2001 par le Bureau américain des Finances (General Accounting Office) – GAO-01-957T – aboutit aux conclusions suivantes :

« En 1992, le Congrès a voté l'Energy Policy Act qui avait notamment pour objectif le remplacement par des carburants alternatifs comme l'éthanol, le méthanol, le GPL, le GNC, le GNL, l'électricité, etc., d'au moins 10 % des carburants fossiles consommés par les LDV en 2000 et 30 % en 2010. L'AIE estime qu'en 2000, les carburants alternatifs ont représenté l'équivalent de 0.2 % de la consommation totale de carburants automobiles. (...) »

Le nombre de véhicules américains roulant aux carburants alternatifs est d'environ 1 million, soit 0.4 % du parc automobile total du pays.

Les raisons de la faible utilisation des biocarburants sont nombreuses et parfois complexes. L'une des causes est le coût des carburants issus de la biomasse. Aux États-Unis, le prix du biodiesel pur est beaucoup plus élevé que celui du carburant diesel issu du pétrole : il est de 1.95 à 3.00 USD par gallon (hors taxes), soit 250 à 400 % du coût du gazole. Les prix de la production des carburants en Europe sont listés dans le tableau C.6.

**Tableau C.6. Coûts de production comparés en centimes d'Euros/litre – Europe (hors taxes)**

Ethanol (bois)	Ethanol (maïs)	Méthanol (biomasse)	Méthanol (charbon)	Méthanol (gaz naturel)	Essence (pétrole)	Diesel (pétrole)
48-69	32-54	42-77	40-68	17-40	15-16	14-17

Une deuxième raison provient du coût supplémentaire des véhicules pouvant rouler à deux carburants différents. De tels véhicules bicarburants sont essentiellement développés aux États-Unis. A la fin de l'année 2001, les parcs spécifiques étaient estimés à 50 000 véhicules E85 et 17 000 véhicules M85 (Green Car Journal – vol. 10, n° 12 – décembre 2001 p. 138).

Enfin, la législation américaine autorise les constructeurs à bénéficier des crédits CAFE s'ils vendent des moteurs à carburants « flexibles » (E85/essence) alors qu'il est presque impossible de trouver dans le pays une station-service pour l'éthanol E85 (aux États-Unis, on compte 139 stations E85 pour 175 000 stations essence).

Bien que le méthanol ait été utilisé comme carburant alternatif, les programmes carburant méthanol au Japon et aux États-Unis ont été stoppés. Plusieurs problèmes sont liés au méthanol, comme la toxicité, la corrosion et ses faibles performances en matière d'économie de carburant par rapport aux véhicules diesel. Au Japon, les constructeurs automobiles ont cessé la production de véhicules alimentés au méthanol et aux États-Unis, pour l'année automobile 2002, aucun modèle d'utilitaire léger ou lourd roulant au méthanol n'était en production.

En ce qui concerne les polluants locaux (mesurés en g/km ou en g/mile), les biocarburants donnent les mêmes résultats que les carburants conventionnels essence, diesel, GPL ou GNC. Cependant, si l'on considère les émissions du puits à la roue, les biocarburants permettent d'obtenir jusqu'à 60 % (et ce chiffre peut encore être amélioré)

de rejets de CO<sub>2</sub> de moins par rapport au niveau des véhicules alimentés à l'essence ou au carburant diesel.

### ***Étude de cas relative aux biocarburants***

#### ***Évaluation de véhicules roulant aux biocarburants en République Tchèque***

*Type de véhicules à faibles émissions : véhicules commerciaux et bus roulant au bio-carburant.*

*Utilisation : transport de biens et de personnes dans des conditions de trafic usuelles.*

#### ***Description de l'expérience***

Le biocarburant (carburant biodiesel) distribué en République Tchèque est un mélange de méthylester d'huile de colza et d'hydrocarbure dérivé du pétrole brut (ou de pétrole brut directement). Les normes tchèques définissent les variantes suivantes pour le mélange de carburant et de méthylester d'huile de colza :

- Jusqu'à 5 % de méthylester d'huile de colza – cette composition de carburant n'est pas distribuée.
- Au moins 30 % de méthylester d'huile de colza – cette composition de carburant est distribuée via le réseau de stations-service.

Les raisons pour lesquelles cette composition de carburant est utilisée sont les suivantes :

- Dégradabilité biologique.
- Abattements fiscaux.

Le carburant doit être conforme aux normes tchèques (CSN) concernées et son niveau d'émissions nocives doit être garanti au moins aussi bon que celui du carburant diesel standard.

Le biocarburant est utilisé dans des moteurs à allumage par compression sans modification préalable des réglages du moteur. Par rapport aux véhicules diesel similaires, on observe pour les véhicules biocarburants :

- Une légère diminution des paramètres de puissance (environ 3 à 5 %)
- Une consommation de carburant légèrement plus élevée (environ 3 à 5 %)

La qualité du carburant s'est progressivement améliorée et l'utilisation à long terme des biocarburants n'a eu aucun impact négatif sur la fiabilité des moteurs et de leurs pièces, ou sur les périodes de remplacement de l'huile. Certains problèmes peuvent apparaître quand la qualité du carburant varie entre plusieurs fabricants.

#### ***Évaluation en usage réel***

Au niveau des paramètres des émissions, les essais ont identifié des niveaux de fumée, de particules et de CO plus faibles. Les rejets de NO<sub>x</sub> sont légèrement plus élevés ou bien comparables aux niveaux du carburant diesel. La consommation de carburant est légèrement supérieure. Les émissions de CO<sub>2</sub> en g/km sont plus importantes pour le biodiesel que pour les véhicules diesel.

Aucune conséquence négative sur la sécurité de fonctionnement n'a été observée par rapport à la situation des voitures diesel.

Aucun changement pratique n'a également été observé. Le réseau des stations-service est adéquat. En cas d'indisponibilité locale, le véhicule peut être alimenté en carburant diesel.

Sur le plan pratique, le fonctionnement du véhicule est semblable à celui du véhicule roulant au carburant de base. Aucun changement n'est nécessaire au niveau de l'entretien de routine, que ce soit en fréquence ou en type d'opérations requises. Si le véhicule n'est pas utilisé pendant assez longtemps (ex. véhicules agricoles saisonniers spécifiques), il est recommandé de consommer tout le biocarburant et de remplir le réservoir de diesel pour cette période car le biodiesel peut éventuellement être l'objet de réactions de polymérisation.

Les biocarburants respectant les exigences de qualité de la norme n'ont aucun impact négatif sur la vie utile ou la fiabilité des véhicules. Les émissions du biocarburant et d'autres carburants sont présentées dans le tableau comparatif C.7. Le réseau de stations-service est adéquat. La vente de carburant dépend des abattements fiscaux car les coûts de production sont en général plus élevés que ceux du carburant diesel. La consommation actuelle de biocarburant représente environ 5 % du total des ventes de carburant diesel. Sans changement décisif de la production agricole, il n'y aura aucune augmentation significative de la production de biocarburant.

**Tableau C.7. Comparaison des propriétés de base des carburants alternatifs**

	Moteur allumage commandé avec catalyseur	Moteur allumage compression (diesel)	GNC	GPL avec catalyseur	Biodiesel	Huile de colza	Hydrogène	Véhicule électrique **
Applicabilité	0	0	0	0	0	0	0	-
Disponibilité	0	0	0	-	-	--	---	--
Économie	0	+	-	0	-	0	---	---
Infrastructure	0	0	-	-	0*	--	---	-
Émissions limitées								
CO	0	+	+++	+++	+	+	+++	+
HC	0	+	++	+++	+	+	+++	+
NO <sub>x</sub>	0	-	+++	++	-	-	++	+
PM	0	-	+++	+++	-	---	+++	++
CO <sub>2</sub>	0	+	++	++	++	++	+++	-

0 comparable - légèrement pire

+ légèrement meilleur -- pire

++ meilleur --- nettement pire

+++ nettement meilleur

\* réseau de stations-service manquant

\*\* dépend de la source d'énergie électrique

## Véhicules électriques

A l'exception des tramways et des trolleybus (qui disposent de lignes permanentes d'alimentation), le nombre de véhicules routiers électriques était de moins de 45 000 dans le monde en 2001. Certains pays possèdent également un important parc de bicyclettes et cyclomoteurs électriques.

Parmi les membres de l'OCDE, les parcs de véhicules électriques les plus importants se trouvent dans les pays suivants :

- Royaume-Uni : 15 000 véhicules électriques dont 10 000 camionnettes de livraison du lait.
- États-Unis : 10 000.
- France : 7 400.
- Japon : 3 800 (2 000 petites voitures, 400 voitures particulières), dont 530 actuellement en service.
- Italie : 2 000 (l'Italie possède également plus de 25 000 bicyclettes et cyclomoteurs électriques).
- Mexique : 2 000 véhicules électriques.

La plupart des pays européens possèdent de petits parcs de véhicules électriques (ex. 1 100 en Belgique, 800 en Suisse, 320 en Suède, etc.).

D'importants programmes de recherche et de développement ont été lancés dans de nombreux pays au début des années 90 (par exemple, en France, Italie, Suède, Allemagne, au Japon et aux États-Unis). Ces développements étaient motivés principalement par le mandat californien relatif aux véhicules à zéro émissions. En France, une usine de production d'une capacité de 50 à 100 véhicules électriques par jour a été mise en service par le constructeur automobile Peugeot. La production actuelle est de 2 à 3 véhicules par jour.

Les avantages et les désavantages des véhicules entièrement électriques sont bien connus. Ils sont résumés ci-dessous :

### *Avantages*

- Aucune pollution locale résultant du fonctionnement électrique.
- Niveau de bruit très faible.
- Entretien nécessaire très faible.
- Énergie de freinage récupérée en partie (très positif en utilisation urbaine).

### *Désavantages*

Trois problèmes bien connus existent :

- L'autonomie (90 à 200 km) et les performances sont assez faibles par rapport à celles des véhicules conventionnels.
- Le coût total (véhicule, batteries et consommation électrique) par kilomètre est identique voire supérieur à celui des véhicules conventionnels.
- Le bilan énergétique – du puits à la roue – n'est pas positif si l'on compare les véhicules électriques à des voitures conventionnelles de mêmes performances. C'est le cas, en particulier, pour le bilan CO<sub>2</sub> du puits à la roue quand l'électricité provient du gaz ou du charbon, ce qui est le plus fréquent (le bilan CO<sub>2</sub> est cependant meilleur quand l'électricité est nucléaire ou hydraulique).

De plus, les véhicules électriques présentent les désavantages suivants :

- Ils sont difficiles à utiliser sur autoroute car leur vitesse est inférieure à celle des autres véhicules, y compris les camions.
- Le temps de recharge est long.
- Le prix du véhicule est plus élevé (de 50 % à 100 % de plus) que celui d'un véhicule essence similaire.
- Les stations de recharge sont peu nombreuses.

### *Conclusions*

Les ventes de véhicules électriques restent très limitées, même si des subventions sont accordées dans certains pays pour encourager leur achat. Les ventes totales, bus et bennes à ordures inclus, représentent deux à trois véhicules électriques par jour en France et aux États-Unis.

L'amélioration des performances des batteries est nécessaire pour augmenter les performances et l'autonomie des véhicules. Quelques opérations de recherche et développement ont été lancées pour remplacer les batteries au plomb par des batteries nickel-métal-hydrure ou lithium-ion. Cependant, il n'existe aucune certitude quant à des améliorations dans un futur proche grâce à de nouvelles batteries. Une autre approche consiste à utiliser des prolongateurs d'autonomie (voir véhicules hybrides).

Tous les pays sont d'accord sur le fait que les véhicules électriques présentent le meilleur potentiel en zone urbaine : petites voitures, camionnettes de livraison, etc. Il existe un marché substantiel, mais il y aurait besoin d'assistance supplémentaire pour développer ce marché. L'un des exemples de changement de réglementation pouvant contribuer au développement du marché des véhicules électriques serait l'obligation pour les conducteurs de stopper le moteur lorsqu'ils quittent le véhicules, comme c'est le cas pour les camionnettes de livraison du lait au Royaume-Uni.

## *Études de cas relatives aux véhicules électriques*

### *Évaluation des voitures électriques dans le cadre d'un service de temps partagé (La Rochelle, France)*

*Type de véhicules à faibles émissions : voitures électriques (batteries cadmium-nickel).*

*Utilisation : temps partagé en zone urbaine, service LISELEC.*

*Nombre de véhicules du parc : 50 voitures LISELEC — 25 Peugeot 106 et 25 Citroën Saxo*

#### **Description de l'expérience**

Proposé par PSA Peugeot Citroën, Keolis et Alcatel CGA Transport, le service Liselec est un concept de mobilité urbaine destiné aux villes qui souhaitent élargir leur offre de transports publics. Il fournit à ses abonnés un accès en temps partagé à des voitures électriques accessibles 24h/24 à des stations de libre-service.

Inauguré à la Rochelle le 22 septembre 1999, le système connaît des résultats commerciaux encourageants. En un an, plus de 250 clients se sont abonnés au service et utilisent quotidiennement les 50 voitures LISELEC – 25 Peugeot 106 et 25 Citroën Saxo – déployées à la Rochelle.

Les voitures sont réparties sur six stations de recharge correspondant aux points névralgiques de la ville, comme la gare SNCF, la gare routière et l'université. Devant la progression régulière du nombre d'abonnés, soit quatre à cinq nouvelles inscriptions par semaine, La Rochelle a décidé d'élargir son service en proposant deux nouvelles stations dès l'automne 2001.

La clientèle LISELEC est plutôt jeune (50 % ont moins de 35 ans) et compte 75 % d'hommes. Elle comprend en premier lieu des étudiants (32 %), des artisans et des commerçants (15 %), des employés (13 %) et des cadres supérieurs et professions libérales (12 %).

A la mi-septembre 2000, les 50 voitures avaient parcouru un total d'environ 100 000 km. La distance moyenne d'un trajet était de 8 km, la durée médiane d'utilisation était de 38 minutes et la durée moyenne d'un trajet était de 10 minutes. Au total, quelque 15 000 déplacements ont été accomplis avec les voitures LISELEC.

Une enquête réalisée en février 2001 auprès de 130 clients a confirmé l'impression positive donnée par le programme. Les abonnés apprécient surtout le confort de conduite de la voiture, le système de libre-service, la disponibilité des voitures dans des stations et la compétence du personnel de l'agence commerciale.

A la fin de l'année 2001, le nombre de clients (abonnés) avait presque doublé et atteignait 471 et 2 200 déplacements par mois étaient effectués.

Les autorités ont désormais construit sept stations et l'objectif est d'élargir le service afin d'inclure des utilitaires légers pour le transport de fret.

**Évaluation en usage réel***Coûts de fonctionnement*

- Le budget de fonctionnement est d'environ EUR 30 500/mois (50 % de main-d'oeuvre, 14 % de frais de gestion et 36 % d'entretien des voitures et des stations – dont 43 % du dernier chiffre pour la location des batteries). Les opérations de maintenance et le retour des voitures aux stations représentent un pourcentage de conduite des opérateurs de 45 % des kilomètres parcourus par les clients.
- Abonnement client : EUR 5.50/mois, EUR 0.09/minute, EUR 0.18/km (chiffres de mai 2002).

Moyenne en 2001	Par le trajet d'un client (moyenne 6 km)	Par km
Coûts de fonctionnement totaux	EUR 10.70	EUR 1.75
Tarif	EUR 4.00	EUR 0.67

**Véhicules électriques dans des stations touristiques (Bad Hofgastein et Werfenweng) : le projet modèle, Autriche**

*Source : Bundesministerium für Land –und Forstwirtschaft, Umwelt and Wasserwirtschaft*

*Type de véhicules : véhicules électriques (voitures, scooters et cycles).*

*Utilisation : usage professionnel et tourisme.*

*Nombre de véhicules du parc : 99 (51 e-scooters, 30 e-cycles, 3 véhicules électriques légers et 15 e-voitures).*

**Description de l'expérience**

Bad Hofgastein est une station touristique très connue de la vallée de Gastein, dans le Land de Salzbourg (Autriche). Elle compte 6 800 habitants. Elle propose 8 000 lits et comptabilise un million de nuitées.

Werfenweng est située à environ 45 km au sud de Salzbourg, à 1 000 m au-dessus de la mer sur un plateau surplombant la vallée salzbourgeoise. Le village compte 650 habitants répartis dans des groupes d'habitations isolés. Quelque 1 800 lits sont proposés et environ la moitié des 195 000 nuitées annuelles sont comptabilisées pendant la saison hivernale.

Un projet modèle dans le domaine de l'environnement, du tourisme et de la mobilité a été lancé par les ministères autrichiens de l'agriculture, des forêts, de l'environnement et de la gestion des eaux, de l'innovation, des transports et de la technologie, et de l'économie et du travail, par la province de Salzbourg ainsi que par deux communautés modèles, Bad Hofgastein et Werfenweng, et soutenu par l'Union européenne.

**Objectifs**

Le projet a pour objectifs de créer un produit « de tourisme sans voiture » de haute qualité, de mettre en place des concepts de trafic innovants, d'exclure les véhicules à moteur à combustion interne des centres-villes, de dynamiser les technologies de transport innovantes et d'améliorer la qualité de l'environnement.

51 e-scooters, 30 e-cycles, trois véhicules électriques légers et 15 e-voitures (soit un total de 99 véhicules électriques) ont été financés sur une période de deux ans démarrant en 2000, et l'une des premières stations solaires de recharge de véhicules électriques a été mise en place en Autriche.



Photo : Stations solaires de recharge de véhicules électriques à Werfenweng (Autriche).

### *Approche*

Deux approches différentes ont été choisies pour lancer les véhicules électriques. A Werfenweng, c'est la Werfenweng Aktiv KEG (association touristique locale) qui gère tous les véhicules électriques et les loue aux touristes et aux habitants. Les voitures de loisir (vélo-taxi, Fun Rider, Biga) font l'objet d'une attention particulière. Deux Renault Clio et trois e-scooters Peugeot sont disponibles pour des excursions dans la région.

A Bad Hofgastein, les véhicules électriques sont réservés à un usage professionnel, aux livraisons, aux hôtels, ainsi qu'aux artisans locaux. A cet effet, cinq Peugeot 106 électriques, huit Peugeot Partner électriques, une Graf Carello (au total, 14 véhicules électriques à usage commercial) et 28 e-scooters Peugeot (dont 13 pour un usage commercial) ont été achetés. Pour le tourisme, un certain nombre d'e-cycles et 16 Arrows de Wachauer (e-scooters) ont été acquis par un groupe d'hôtels souhaitant orienter sa participation vers la mobilité durable.

### *Évaluation en usage réel*

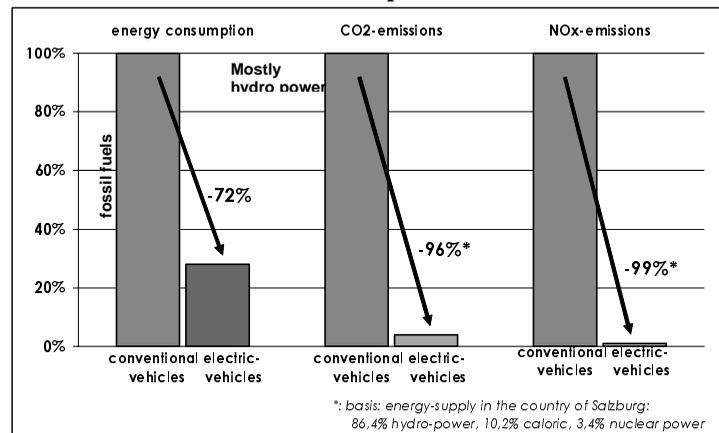
L'utilisation des 14 voitures électriques acquises en 2001 à des fins commerciales à Bad Hofgastein a récemment fait l'objet d'une évaluation. Il devait être déterminé si les véhicules convenaient à l'usage qui en était fait à Bad Hofgastein. L'étude a conclu qu'il est possible de passer des véhicules à moteur à combustion interne à des véhicules électriques dans le cadre d'objectifs clairement définis pour des hôtels ou des entreprises à condition que les coûts d'achat supplémentaires par rapport à ceux des voitures conventionnelles soient compensés par des subventions. Les utilisateurs potentiels peuvent être sensibilisés par des campagnes d'informations, des démonstrations de véhicules ou des tours d'essais, visant à leur démontrer la fiabilité et les capacités des véhicules électriques.

La distance totale parcourue par les véhicules est déjà de 47 000 km. Quelque 270 km par jour, soit 7 % du kilométrage potentiellement remplaçable à des fins professionnelles à Bad Hofgastein, sont désormais effectués dans des conditions respectueuses de l'environnement. Les véhicules électriques ont prouvé leur succès commercial. L'autonomie de la batterie d'environ 100 km est suffisante pour effectuer des livraisons locales. Les véhicules sont des produits industriels dont la maintenance est assurée sur place.

L'impact de ces véhicules sur l'environnement a été évalué au moyen d'indicateurs comme la consommation d'énergie, les émissions de polluants atmosphériques (NO<sub>x</sub> étant le principal polluant et un précurseur de l'ozone au niveau du sol), les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>) et le bruit.

## L'impact des véhicules électriques sur l'environnement

### Environmental effects of the operation of electric vehicles



\* Base : fourniture d'énergie dans le land de Salzbourg : 86.4 % hydroélectrique, 10.2 % thermique, 3.4 % nucléaire.

Par rapport aux véhicules à moteur à combustion interne (ex. diesel), les véhicules électriques consomment moins d'énergie (environ -72 %). Au-delà, la consommation d'énergie issue des carburants fossiles peut être remplacée presque complètement par des sources d'énergie renouvelables (hydroélectricité).

La conversion de l'énergie en énergie électrique est la source d'une réduction des rejets de CO<sub>2</sub> (d'environ -96 %) et de NO<sub>x</sub> (d'environ -99 %) par rapport aux rejets dus au fonctionnement de véhicules conventionnels. Grâce à l'emploi de véhicules électriques, la consommation d'énergie peut être réduite de 86.8 GJ (24.1 MWh), les émissions du CO<sub>2</sub> influant sur le climat de 11.3 t et les rejets de NO<sub>x</sub> de 53 kg pendant la durée du projet.

D'après le nombre de déplacements « professionnels » quotidiens au départ de Bad Hofgastein à destination de la communauté ou de la vallée de Gastein, la consommation d'énergie a été réduite de 5.1 %, les émissions de CO<sub>2</sub> de 6.7% et les émissions de NO<sub>x</sub> de 6.5 %. Si tous les trajets remplaçables par des déplacements à l'électricité l'étaient, les émissions de CO<sub>2</sub> pourraient être réduites de 13 %. Ces chiffres correspondent aux objectifs de réduction fixés pour l'Autriche dans le Protocole de Kyoto.

Grâce au faible niveau de bruit des moteurs des véhicules électriques, on peut également envisager une réduction des émissions sonores dans les centres des villages et des villes, en particulier pendant les démarrages, les accélérations et lorsque les véhicules se déplacent à vitesse réduite (< 50 km/h).

### Conclusions

La mise en place de 99 véhicules électriques dans deux communautés en seulement deux ans a été un succès. Les véhicules suscitent encore un vif intérêt dans ces deux zones, la réponse des utilisateurs est encourageante. Les bénéfices pour l'environnement évalués jusqu'à présent sont également encourageants pour la suite du projet.

## Nouvelles technologies

Cette section s'intéresse aux véhicules hybrides et aux véhicules à pile à combustible.

### Véhicules hybrides

A la fin des années 80, la recherche et le développement de véhicules hybrides étaient principalement motivés par le potentiel de réduction des émissions de polluants locaux (CO, HC, NO<sub>x</sub>) dans les zones urbaines que représentaient des véhicules utilisant à la fois un moteur traditionnel et un moteur électrique. A l'intérieur des zones urbaines, un tel véhicule pouvait rouler à l'électricité alimenté par des batteries. Hors de ces zones, le moteur classique permettait d'obtenir plus de puissance et de recharger les batteries.

De nombreux véhicules hybrides expérimentaux ont été développés dans les années 80 et 90. L'une des solutions proposées a été L'Audi Duo équipée d'un moteur électrique sur l'essieu arrière et d'un moteur à combustion interne sur l'essieu avant : les résultats ont été modestes en termes d'économie de carburant. Les objectifs ont aujourd'hui changé, le but principal étant désormais de réduire les émissions de polluants locaux et de fortement réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

Deux familles de véhicules hybrides d'architecture différente existent : en série ou en parallèle. D'un point de vue technique, l'opération la plus difficile est l'optimisation technique requise pour contrôler toutes les connections entre la génération de l'électricité, d'un part, et les exigences en termes d'utilisation de l'énergie, d'autre part. Parmi les applications en usage à ce jour figurent :

- Les voitures particulières (Toyota et Honda) : environ 130 000 véhicules hybrides étaient utilisés à la fin 2002 (60 000 au Japon et les autres aux États-Unis, au Canada et en Europe).
- Les camionnettes de livraison : moins de 1 000 dans le monde.
- Les bus : environ 200 aux États-Unis et 200 en Europe.

Les batteries des voitures hybrides peuvent être rechargées sans raccord au réseau électrique. Pour les camions de livraison et les bus, il est possible d'effectuer la recharge des batteries pendant la nuit.

Les résultats sont positifs pour les deux modèles de voitures (Prius de Toyota et Insight de Honda). La Toyota Prius est une berline pouvant accueillir 5 passagers, elle pèse 1 220 kg, est équipée d'un moteur essence de 53 kW et d'un moteur électrique de 33 kW. Ses résultats indiquent des réductions de 5 à 10 % des NO<sub>x</sub> et de 10 à 20 % du CO<sub>2</sub> en usage urbain, de 5 à 10 % sur route et de zéro sur autoroute. La voiture est conçue pour que le moteur traditionnel ne fonctionne que lorsqu'il est le plus efficace. En Europe, la Prius est répertoriée à 120 g CO<sub>2</sub>/km, tandis que les voitures équivalentes (poids, performances, espace habitacle, etc) se situent à 150 à 170 g CO<sub>2</sub>/km ou plus (en applications essence).

Dans le cas des bus, le bilan énergétique et environnemental donne des résultats différents. Par exemple, à New York, les gains de CO<sub>2</sub> observés entre le modèle hybride Orion IV et le modèle diesel Nova dépendent du cycle utilisé :

- 40 % sur le cycle des bus de NY.
- 32 % sur le cycle de Manhattan.
- 29 % sur le cycle combiné NY.
- 20 % sur le cycle CDB (de NYCT 2/2000).

D'autres essais ont donné des résultats moins importants par rapport aux bus diesel (de même technologie de moteur, nombre de passagers, carrosserie, etc.) dans les mêmes conditions de fonctionnement (utilisation en ville).

Des essais comparatifs ont été entrepris en France sur deux parcs : douze bus hybrides et dix bus traditionnels identiques. Le poids des batteries et le refroidissement des systèmes électroniques et des batteries<sup>2</sup> aboutit à une consommation de carburant identique pour les deux flottes. Dans le cas des bus hybrides, il faut également un surplus d'électricité pour charger les batteries.

Les constructeurs automobiles ont lancé d'importants programmes de développement de véhicules hybrides. Il existe plusieurs architectures, allant du type hybride « léger » équipé d'un petit moteur électrique au véhicule hybride « complet » doté d'un moteur électrique puissant. En 2003, de nouveaux modèles sont apparus, dont un véhicule hybride avec prolongateur d'autonomie et système hybride léger (moteur d'arrêt et démarrage automatique).

L'objectif est de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 15 à 50 % par rapport aux niveaux des véhicules traditionnels, en particulier en usage urbain. Cependant, étant donné les progrès réalisés sur les véhicules conventionnels, il est de plus en plus difficile d'optimiser la consommation de carburant des véhicules hybrides par rapport aux nouveaux moteurs diesel équipés de la technologie de rampe commune et très peu consommateurs de carburant. Les travaux en cours suggèrent de privilégier la technologie hybride pour les voitures de taille moyenne ou large, et non sur les petites voitures.

---

<sup>2</sup> (\*) La durée de vie des batteries est également un problème en France et à New York.

## Études de cas relatives aux véhicules hybrides

### Évaluation de l'Audi Duo hybride aux Pays-Bas

*Type de véhicules à faibles émissions : Audi Duo hybride (moteur thermique diesel et moteur électrique).*

*Utilisation : voiture particulière. Au cours du projet, les véhicules ont été conduits par des utilisateurs ou groupes d'utilisateurs très différents.*

*Nombre de véhicules du parc : 10.*

#### **Description de l'expérience**

L'Audi Duo est un véhicule hybride parallèle équipé de deux arbres de transmission : un moteur diesel à combustion interne et un moteur électrique. Le moteur électrique est utilisé soit comme moteur pour entraîner les roues, soit comme générateur. Le conducteur peut sélectionner la propulsion du véhicule au moyen d'un commutateur de mode. Trois modes de fonctionnement sont possibles : diesel uniquement, électrique uniquement ou hybride (appelé duo). Lorsque le mode sélectionné est le troisième, le système de gestion de la voiture choisit la propulsion en fonction de la puissance requise et de l'état de charge de la batterie.

La batterie de l'Audi Duo peut être rechargée de trois façons différentes :

- Branchement du véhicule sur le réseau électrique. La voiture peut être branchée au réseau électrique au moyen d'une simple prise. L'unité de charge de la batterie convertit la tension du réseau (220 V AC) en tension continue adaptée à la batterie.
- Pendant la conduite, au moyen du moteur à combustion interne. Le moteur thermique diesel est la source d'alimentation principale de la voiture. Le moteur électrique fonctionne comme un générateur et absorbe de la puissance pour charger la batterie. La tension du générateur est convertie au moyen d'un inverseur à la tension de charge appropriée.
- Freinage à récupération : pendant le freinage, le moteur électrique fonctionne comme un générateur. Une partie de l'énergie de freinage est stockée dans la batterie.

Les deuxième et troisième méthodes de recharge de la batterie ne sont possibles que lorsque l'état de charge de la batterie est inférieur à 80 %.

Le projet Audi Duo est un projet de démonstration de dix véhicules. Il a pour objectif d'identifier plus précisément des champs d'application prometteurs et d'accroître les possibilités de mise en oeuvre des véhicules hybrides parallèles.

Les modèles de conduite et le comportement des conducteurs sont d'importants paramètres influant sur la consommation d'énergie et les émissions du véhicule. En surveillant activement ces variables, il est possible d'évaluer les types d'utilisation pour lesquels la Duo est une voiture plus propre et/ou plus efficace sur le plan énergétique que son équivalent diesel conventionnel.

Pendant six mois, quelque 100 conducteurs sélectionnés dans tous les Pays-Bas et issus de plusieurs catégories d'utilisateurs ont conduit l'Audi Duo pendant deux semaines chacun. TNO Automotive a développé une méthodologie d'évaluation afin de permettre des comparaisons des valeurs environnementales.

La performance environnementale de l'Audi Duo dépend principalement de la technologie du véhicule et de la façon dont celui-ci est utilisé dans la vie courante par différents conducteurs. Afin d'évaluer la technologie du véhicule, la construction de

l'arbre de transmission de l'Audi Duo a été analysée en détail et les spécifications des composants ont été résumées. Afin d'obtenir des informations concernant l'emploi du véhicule dans la pratique, trois Audi Duo ont été équipées d'un système de surveillance embarqué conçu pour mesurer et enregistrer les paramètres pertinents à prendre en compte pour l'étude environnementale. Le processus d'acquisition des données comprend :

- Les paramètres relatifs à la conduite, pour l'enregistrement de l'utilisation du véhicule sur route (horaires de début et fin des séquences de conduite, distance parcourue, vitesse du véhicule).
- Les paramètres relatifs à la batterie et à la charge (horaires de début et fin de charge, quantité d'énergie électrique stockée (kWh), tension de la batterie, intensité et état de la charge).
- Les paramètres relatifs au véhicule, comme la vitesse du moteur thermique, la position de la pédale d'accélération, la vitesse sélectionnée, la source d'énergie utilisée, le mode choisi (diesel/électrique/hybride) et la consommation de carburant.

### *Évaluation en usage réel*

Les performances environnementales ont été évaluées par des mesures effectuées sur un banc à rouleaux. Les cycles de conduite (couple vitesse-temps) ont été développés sur la base des données de conduite rassemblées. Au nombre de 14, ils peuvent être considérés comme représentatifs des types d'utilisation spécifiques du véhicule (ex. urbain, rural ou route, ainsi que pourcentage du temps passé en mode diesel ou électrique). Ces cycles ont été appliqués à l'Audi Duo, ainsi qu'à un véhicule diesel de référence (Audi A4 Avant 1.9 TDI) sur un banc à rouleaux. Les performances environnementales de l'Audi sont résumées qualitativement dans le tableau C.8.

**Tableau C.8. Performances environnementales de l'Audi Duo pour chaque domaine d'application**

	Urbain			Rural			Autoroute
	Diesel % élevé	Diesel 40 %	Électrique % élevé	Diesel % élevé	Diesel 60 %	Électrique % élevé	Électrique 5 à 15 %
CO	+	+	++	0	0	0	0
HC	0	+	++	-	0	++	-
NO <sub>x</sub>	--	+	++	--	0	++	--
PM <sub>10</sub>	-	+	++	-	0	++	--
SO <sub>2</sub>	-	+	++	-	0	++	-
CO <sub>2</sub>	0/+	0	-	0	0	-	0
Conso. énergie	0/+	0	-	0	0	-	0

++ Bénéfice environnemental important.

+ Bénéfice environnemental.

0 Neutre.

- Désavantage environnemental.

-- Désavantage environnemental important.

Des conclusions sont tirées de l'étude, d'une part, pour les polluants (émissions de CO, HC, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> et SO<sub>2</sub>), et d'autre part, pour l'efficacité énergétique (utilisation d'énergie et CO<sub>2</sub> responsable du réchauffement de la planète) :

### *Pollution*

- Pour être intéressante sur le plan environnemental, l'Audi Duo doit être conduite en mode électrique aussi souvent que possible dans les zones urbaines et rurales.
- Lorsque l'Audi Duo est conduite à la fois en mode diesel et électrique (cas pour lequel elle a été développée), elle est plus respectueuse de l'environnement dans

les zones urbaines. Dans les zones rurales, les performances environnementales obtenues sont similaires à celles du véhicule de référence.

- En zones urbaines et rurales, il est déconseillé de conduire en mode diesel la majeure partie du temps (sauf en ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub>). Dans ces champs d'application, l'Audi Duo est plus polluante que la voiture conventionnelle équivalente (en particulier pour les rejets de NO<sub>x</sub>).
- A l'exception des émissions de CO<sub>2</sub>, les performances environnementales sur autoroute sont moins bonnes que celle du véhicule diesel équivalent.

#### *Efficacité énergétique*

- Sur la base du puits à la roue, l'Audi Duo n'est plus efficace que le véhicule conventionnel dans presque aucun champ d'application.
- Plus la conduite s'effectue en mode électrique, moins l'efficacité énergétique est importante par rapport à celle du véhicule de référence (du fait de la source d'électricité utilisée aux Pays-Bas).
- En conduite urbaine, l'Audi Duo utilisée en mode à la fois diesel et électrique est légèrement plus efficace que le véhicule conventionnel si le moteur thermique diesel recharge la batterie (conduite en « maintien de charge »).

Le potentiel de réduction des émissions (en zones urbaines et rurales) de l'Audi Duo atteint apparemment son maximum lorsque le véhicule est utilisé aussi souvent que possible en mode électrique, mais ce résultat s'obtient au prix de l'efficacité énergétique.

La méthode de calcul des émissions de CO<sub>2</sub> utilisée prend en compte les émissions pendant la production d'électricité et de carburant aux Pays-Bas. Dans la plupart des cas, le taux d'émissions de CO<sub>2</sub> de l'Audi Duo est égal ou supérieur (jusqu'à 30 % en conduite électrique rurale) au taux du véhicule de référence (les émissions de CO<sub>2</sub> moyennes du véhicule de référence sont de 210 g/km).

#### *Consommation de carburant*

La consommation de carburant et d'électricité de l'Audi Duo est présentée dans le tableau C.9.

**Tableau C.9. Consommation de carburant et d'électricité de l'Audi Duo**

	Diesel	Électrique	
Moteur diesel	6.8 litre/100 km (km diesel)	Arbre de transmission électrique	20.3 kWh/100 km (km électrique)
Chauffage externe	0.2 litre/100 km	Auxiliaires électriques (lumière, direction assistée etc.)	1.2 kWh/100 km

#### *Exploitation et entretien*

La plupart des utilisateurs se sont déclarés satisfaits des performances pratiques de l'Audi Duo. Ils préféreraient conduire en mode électrique, c'est-à-dire quand le véhicule est propre (pas d'émissions directes), souple et silencieux. Le silence de la voiture a été un facteur très positif pour la majorité des conducteurs.

L'enquête réalisée auprès des utilisateurs a identifié les points à améliorer suivants :

- Autonomie limitée en mode électrique.
- Capacité d'accélération du véhicule en mode diesel et électrique.
- Fonctionnement du « mode duo » du commutateur de mode de conduite (diesel/électrique/hybride).
- Charge de la batterie sur le réseau électrique.

L'aspect extérieur de l'Audi Duo est le même que celui de l'Audi A4 Avant conventionnelle mais le fonctionnement est très différent. D'une part, le conducteur doit utiliser le commutateur de mode pour sélectionner le mode de conduite approprié. D'autre part, le véhicule est équipé d'une boîte de vitesses semi-automatique : il n'y a pas de pédale d'embrayage mais le conducteur change les vitesses à la main (comme pour une boîte de vitesses manuelle). La plupart des utilisateurs se sont rapidement habitués à ces caractéristiques spécifiques du véhicule.

Hormis les opérations de maintenance de routine pendant lesquelles aucun problème particulier n'est survenu, quelques difficultés sont apparues sur plusieurs Audi Duo au niveau du fonctionnement et de la capacité de la batterie. Ces problèmes ont été résolus par l'importateur néerlandais.

### ***Évaluation de bus hybrides à Avignon (France)***

*Source : ADEME.*

*Type de véhicules à faibles émissions : véhicules hybrides diesel.*

*Utilisation : bus urbains.*

*Nombre de véhicules du parc : 4 véhicules Mercedes Cito diesel électriques et 5 Neoplan hybrides (diesel électrique avec batterie de stockage et unité de gestion de l'énergie).*

#### ***Description de l'expérience***

Dans le cadre du « programme bus propres » entrepris par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) entre 1998 et 2001, l'ensemble des technologies actuellement utilisées pour les bus urbains ont été évaluées en usage réel.

Les bus hybrides ont été évalués par rapport à des bus diesel de référence : le RVI Agora (bus standard de 12 mètres) et le Mercedes O405 (minibus de 10 mètres).

#### ***Évaluation en usage réel***

L'évaluation a abouti aux conclusions suivantes :

- Évaluation des quatre Mercedes Cito :
- Les réductions d'émissions de polluants ne sont pas significatives, excepté pour le NO<sub>x</sub>. La consommation moyenne de carburant est légèrement supérieure à celle des bus diesel. Tous les véhicules fonctionnaient comme un bus diesel normal.
- Évaluation des cinq Neoplan hybrides :
- L'évaluation a été réalisée pour trois niveaux de charge de batterie : 80 %, 55 % et 30 %.
- Une bonne corrélation est observée entre les émissions et les niveaux de charge de la batterie, excepté pour le CO et les HC. Dans les conditions de fonctionnement, la consommation totale de carburant des bus hybrides (recharge incluse) est supérieure à celle des bus diesel. Le Neoplan est un prototype de

technologie complexe qui a fait l'objet de nombreux problèmes techniques pendant l'essai. Il devrait donner de meilleurs résultats quand la technologie sera plus développée et affinée.

- Le personnel et les voyageurs évaluent très positivement les deux types de bus (moins de bruit et bon confort).

**Tableau C.10. Émissions de polluants et consommation de carburant du RVI Agora (diesel) et du Mercedes O405 (hybride)**

			RESULTATS en g/km					Consommation l/100 km
			CO	HC	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Part.	BC
RVI AGORA	N°1	Moyenne	3,52	1,19	30,17	1589	0,485	59,53
		Int. Conf.	0,321	0,194	0,708	11	0,079	
	N°2	Moyenne	4,18	1,10	30,07	1619	0,359	60,68
		Int. Conf.	0,092	0,157	1,06	9,5	0,043	
MERCEDES O405	N°1	Moyenne	1,63	0,95	18,26	1480	0,236	55,39
		Int. Conf.	0,10	0,09	1,24	27	0,029	
	N°2	Moyenne	1,92	1,39	21,17	1483	0,329	55,51
		Int. Conf.	0,14	0,23	1,12	39	0,036	

**Tableau C.11. Émissions de polluants du bus Neoplan hybride selon l'état de charge de la batterie**

		RESULTATS en g/km					Etat de charge Batterie		Conso. l/100 km	
		CO	HC	NO <sub>x</sub>	Part.	CO <sub>2</sub>	initial	variation	DV	BC
Etat de charge : 80 %	Moyenne	0,61	0,20	9,90	0,33	1181	92,44	-3,78	45,14	44,64
	Int. Conf.	0,12	0,04	0,29	0,03	14,99	0,43	1,15	0,56	0,57
Etat de charge : 55 %	Moyenne	0,59	0,21	11,81	0,34	1372	85,40	0,50	52,13	51,81
	Int. Conf.	0,10	0,03	1,07	0,04	139,71	2,16	3,68	5,16	5,20
Etat de charge : 30 %	Moyenne	0,64	0,27	17,78	0,47	2093	72,47	19,13	79,08	79,09
	Int. Conf.	0,06	0,02	0,50	0,07	79,09	2,50	2,60	3,05	2,99

### Évaluation de bus hybrides à Terni, Rome et Ferrara (Italie)

Type de véhicules à faibles émissions : bus hybrides série.

Utilisation : bus urbains.

Nombre de véhicules du parc : 4 hybrides et 2 bus conventionnels à Terni. Le projet s'est également étendu à 2 autres villes italiennes, Rome et Ferrara, pour un total de 24 bus hybrides.

#### Description de l'expérience

Le projet THERMIE FLEETS, pour Fairly Low Energy and Environmental Transport System (système de transport environnemental à faible énergie), a été réalisé dans la ville de Terni et se centrait sur le lancement de bus hybrides de transports en commun. Le projet s'étendait également à deux autres villes italiennes, Rome et Ferrara, pour un total de 24 bus hybrides. A Terni, l'utilisation du biocarburant a aussi été testée sur deux bus conventionnels. Les bus (quatre hybrides et deux conventionnels) étaient équipés d'un système complet de gestion des données, afin d'enregistrer toutes les données utiles à l'évaluation des performances et de l'efficacité de la technologie des bus hybrides série. Par ailleurs, une enquête a été menée auprès des habitants de la ville pour déterminer leur niveau d'acceptation de l'initiative. Les essais en situation réelle ont été importants car ils ont permis de détecter des problèmes techniques. Le constructeur des bus a donc obtenu

des résultats très intéressants pouvant contribuer à l'amélioration de la fiabilité des véhicules. Les conclusions relatives aux réductions des émissions polluantes sont également très prometteuses.

#### *Évaluation en usage réel*

Une campagne d'essais spécifique s'est déroulée à Terni sur des bus hybrides et conventionnels. Les résultats sont indiqués dans le tableau C.12. Il s'agit des valeurs moyennes des émissions spécifiques des bus hybrides et diesel. Le parc de bus hybrides a un impact très positif en termes de réduction d'émissions de polluants mais un impact négligeable en matière de consommation de carburant.

**Tableau C.12. Émissions de polluants comparées des bus hybrides série et Euro 2**

Émission spécifiques (g/km)	CO	VOC	NO <sub>x</sub>
Bus Euro 2	5.05	0.82	24.92
Bus hybrids série	0.3	0.59	11.55

Comme indiqué dans le tableau C.13 relatif à la consommation de carburant, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> est négligeable. Les mauvais résultats des bus hybrides en termes d'efficacité proviennent de la difficulté à assurer un bon bilan énergétique en service, c'est-à-dire à obtenir le même niveau de charge des batteries à la fin de chaque trajet. La recharge de la batterie entraînait donc un surplus de consommation de carburant.

**Tableau C.13. Consommation de carburant en équivalent de litres d'essence pour 100 km**

Bus Euro 2	43.7 (carburant diesel)
Bus hybrids série	41.0 (carburant diesel)

Aucun problème de sécurité n'a été noté. Selon les conclusions de l'expérience, la technologie hybride est prometteuse, mais doit encore résoudre quelques problèmes de fiabilité. De plus, les coûts supplémentaires actuels des véhicules hybrides limitent la généralisation de leur utilisation. Cependant, on peut s'attendre à des améliorations substantielles réalisables grâce à l'introduction de nouveaux composants et une stratégie de commande plus efficace, ce qui ferait croître l'intérêt suscité par cette technologie.

L'enquête réalisée auprès des conducteurs de bus hybrides afin d'évaluer leurs réactions a rapporté que presque tous (96 %) les interviewés trouvaient les bus hybrides simples ou très simples à conduire.

Les résultats de l'étude ne sont pas tous positifs puisque de nombreux dysfonctionnements ont été détectés pendant la période d'essai, d'où une disponibilité réduite des nouveaux bus. La plupart des pannes provenaient de problèmes de batterie. En effet, les véhicules hybrides dépendent de batteries à usage général. L'emploi de batteries spécialement conçues (*i.e.* dont les caractéristiques visent à répondre à la demande des bus hybrides) devrait réduire voire éliminer ce genre de problèmes.

## Véhicules à pile à combustible

Un véhicule à pile à combustible est un véhicule électrique dont la batterie est remplacée par un nouveau concept de source d'énergie produisant de l'électricité directement à bord du véhicule à partir d'hydrogène ou d'essence.

Les piles à combustible ont pour intérêt de pouvoir produire de l'électricité avec une efficacité théorique supérieure à celle des moteurs à combustion interne, en particulier à très faible charge. Les premières applications étaient réservées aux centrales électriques stationnaires, mais les applications destinées aux véhicules routiers et aux transports mobiles semblent également prometteuses.

Des expérimentations de piles à combustible sont actuellement réalisées pour les voitures, les camionnettes de livraison et les bus. Depuis 1997, de nombreux véhicules expérimentaux (voitures particulières et bus) ont été testés dans plusieurs pays. Cependant, bien que la décision de produire des bus en grande quantité ait été prise par certaines entreprises en 1997, des problèmes techniques et économiques sont apparus en 2000. Ces difficultés incluent la nécessité de :

- Réduire fortement la taille et surtout le prix des piles à combustible.
- Produire et stocker de l'hydrogène. L'hydrogène peut être fabriqué à partir du gaz naturel ou par électrolyse de l'eau. Dans ce cas, le bilan énergétique dépend de l'origine de l'électricité (ex. nucléaire, charbon ou gaz).
- Refroidir les piles. L'efficacité énergétique étant très inférieure à 100 %, voire probablement de 60 % seulement, le refroidissement de la pile présente une difficulté technique importante. Si la pile est de forte puissance, l'échangeur thermique doit être très grand.

Les véritables raisons de l'utilisation des piles à combustible pour produire l'électricité de traction des sources mobiles ne sont pas très claires. Si l'hydrogène est issu de l'essence au moyen d'un reformeur chimique embarqué dans le véhicule, le bilan CO<sub>2</sub> n'est pas nécessairement positif par rapport à celui d'un moteur essence conventionnel.

Néanmoins, trois constructeurs (Toyota, Daimler-Chrysler et BMW) ont décidé de produire des véhicules à pile à combustible en 2003. De quelques unités chacun seulement, les procédés de production en série permettront cependant d'évaluer le prix réel et les contraintes pendant les phases de production et d'utilisation.

Toyota produit le modèle FCHV (véhicule hybride à pile à combustible) : une voiture hybride équipée d'une pile à combustible de 90 kW, d'un moteur électrique de 80 kW et d'une batterie de stockage nickel-métal-hydrure. Plusieurs véhicules circulaient à Tokyo en 2003, et neuf stations d'alimentation en hydrogène étaient disponibles. Une extension est prévue aux États-Unis.

Daimler-Chrysler produit 30 bus à pile à combustible. En 2003, ces bus circulaient dans plusieurs villes d'Europe.

En 2003 également, BMW devait démarrer la première production en série de véhicules équipés d'une pile à combustible. Cependant, l'application devait se limiter à un groupe auxiliaire de puissance produisant l'électricité pour les accessoires uniquement afin d'éviter les problèmes de taille, de prix et de refroidissement.

En définitive, la dernière application est peut-être la meilleure. Une petite pile à combustible et un petit groupe de batteries peuvent suffire à produire la puissance électrique nécessaire à bord de la voiture pour les auxiliaires tandis qu'un moteur à combustion interne assure la propulsion. Le gain en CO<sub>2</sub> serait substantiel. Mais il faudra du temps avant que la production en série de piles à combustible pour les véhicules routiers ne soit réalisable.

### *Aperçu des projets de recherche et développement relatifs à la pile à combustible menés dans quelques pays de l'OCDE*

#### Australie

Soutenu par le gouvernement australien, le gouvernement de l'Australie occidentale participe à l'essai global, organisé par Daimler-Chrysler, relatif à la technologie des bus à pile à combustible alimentée à l'hydrogène. Trois bus ont été livrés en 2002 et les essais s'achèveront en 2004.

Les objectifs de ce projet sont les suivants :

- Démontrer les bénéfices fonctionnels, environnementaux et sociaux générés par la mise en service de bus à pile à combustible en Australie occidentale et potentiellement au sein du parc australien.
- Déterminer et faciliter le développement des infrastructures nécessaires à la production et la distribution d'hydrogène comme carburant.
- Fournir un banc d'essai pour la mise en oeuvre en Australie d'un cadre réglementaire couvrant le fonctionnement des transports alimentés à l'hydrogène.
- Faciliter le lancement de bus à pile à combustible en Australie occidentale et au sein du parc des transports en commun australiens.

Il n'existe aucun plan concernant l'alimentation en carburant des véhicules à pile à combustible en Australie. Les essais sur les bus devraient contribuer à l'évaluation des questions relatives à ce sujet.

#### Islande

L'entreprise Icelandic New Energy Ltd. a été créée en partenariat avec des sociétés étrangères afin d'évaluer le potentiel du carburant hydrogène et les infrastructures requises à l'échelle du pays entier. Les premiers véhicules testés sont 3 bus. L'expérimentation a débuté au début 2003 et la première station d'alimentation en hydrogène du monde a ouvert en avril 2003.

De nombreux autres projets sont prévus concernant les véhicules, les infrastructures et les navires. L'objectif est de créer une société alimentée à l'hydrogène à grande échelle avant 2050.

#### Japon

Depuis 2001, Daimler-Chrysler, Mazda, Honda et Toyota ont obtenu du ministère la certification successive de leurs véhicules à pile à combustible. Huit constructeurs (Toyota, Nissan, Honda, DaimlerChrysler, HM, Hino, Mitsubishi et Suzuki) ont pour le moment fait la démonstration sur route de leurs propres véhicules à pile à combustible. Ces véhicules devraient être disponibles pour le grand public en 2005.

## Royaume-Uni

L'EPSRC finance un programme régulièrement évalué de recherche sur les piles à combustible. Cette étude se concentre sur les matériaux nécessaires aux constructeurs de piles à combustible. La prochaine étape du programme de véhicules Forsight doit inclure un appel d'offres.

Un véhicule de livraison à pile à combustible circule actuellement dans Londres. D'autres projets d'essais d'exploitation ont débuté en 2002. Ils utilisent deux bus à pile à combustible.

Les conclusions de ces projets seront rendues vers 2005.

## États-Unis

### *FreedomCAR and Fuel Initiative*

Le 28 janvier 2003, le président Bush a annoncé une initiative de 1.2 milliard de dollars nommée FreedomCAR and Fuel Initiative (initiative carburant et FreedomCAR) visant à inverser la tendance de la dépendance américaine en pétrole étranger, actuellement en augmentation. L'objectif est de développer la technologie nécessaire à la commercialisation de piles à combustible alimentées à l'hydrogène – une méthode non polluante et non contributrice à l'effet de serre pouvant s'appliquer aux voitures, aux poids lourds, aux habitations et aux entreprises. L'initiative bénéficiera d'un financement de 720 millions de dollars au cours des cinq prochaines années afin de développer les technologies et les infrastructures utiles à la production, au stockage et à la distribution d'hydrogène pour les véhicules à pile à combustible et la génération d'électricité. S'appuyant sur le programme FreedomCAR (Cooperative Automotive Research) lancé en janvier 2002, le président Bush propose d'attribuer un total de 1.7 milliard de dollars au cours des cinq prochaines années au développement de piles à combustible alimentées à l'hydrogène, d'infrastructures et de technologies automobiles de pointe.

Réalisées en partenariat avec le secteur privé, les initiatives FreedomCAR et carburant doivent à elles deux contribuer au développement de nouveaux véhicules et de technologies, ainsi que des infrastructures requises, de sorte que, dès 2020, il soit pratique et rentable pour un grand nombre d'américains de choisir des véhicules à pile à combustible. En réduisant les besoins en pétrole importé, ces initiatives pourraient accroître de façon importante la sécurité énergétique américaine. Elles représentent également l'un des composants clés de la stratégie présidentielle relative au changement de climat et à la dépollution de l'air.

Pour plus d'informations, vous pouvez consulter :  
<http://www.eere.energy.gov/hydrogenfuel/>

### *California Fuel Cell Partnership*

En Californie, les constructeurs automobiles, les compagnies de production d'énergie, les entreprises de développement de piles à combustible et les autorités gouvernementales collaborent au développement de véhicules à pile à combustible. Ils ont créé un partenariat afin de présenter une technologie automobile nouvelle capable de promouvoir des solutions environnementales pratiques et d'un prix abordable. Pour la première fois, des entreprises automobiles et des fournisseurs de carburants s'associent pour tester à l'exploitation des véhicules à pile à combustible dans des conditions de conduite quotidienne réelles. Le California Fuel Cell Partnership (partenariat californien pour la

pile à combustible) compte faire circuler jusqu'à 60 voitures particulières et bus à pile à combustible entre 2000 et 2003. Outre les essais des véhicules, le partenariat considère les problèmes liés aux infrastructures d'alimentation en carburant et prépare le marché californien à cette nouvelle technologie.

Les quatre principaux objectifs spécifiques du projet sont les suivants :

- Tester à l'exploitation cette technologie en faisant circuler et en testant en Californie des véhicules dans des conditions de conduite réelle.
- Démontrer la viabilité de la technologie des infrastructures alternatives, dont des stations-service d'alimentation en hydrogène ou en méthanol.
- Explorer les pistes de commercialisation potentielles, de l'identification des problèmes au développement de solutions.
- Accroître la prise de conscience du grand public et améliorer l'image des véhicules à pile à combustible, afin de préparer le marché à une commercialisation.

Pour plus d'informations, vous pouvez consulter : <http://www.drivingthefuture.org/>.

## Conclusions

En 2002, même après de nombreuses initiatives prises par de nombreux pays Membres, les véhicules alternatifs à faibles émissions polluantes représentaient moins de 5 à 6 % du parc automobile de ces pays. Bien que la plupart des États offrent des subventions et/ou des réductions de taxes sur les carburants spécifiques (ex. GPL, GNC, biocarburants, etc.), les ventes de véhicules à carburant alternatif restent très faibles.

Certains résultats positifs ont été obtenus pour des parcs spécifiques, comme les bus ou les camions à ordures. Mais même en 2002, la proportion de nouveaux bus ou camions de ramassage roulant au GPL ou au GNC reste faible (presque 30 % en France, mais moins dans tous les autres pays). Parmi les raisons de tels résultats figurent :

- Le coût supplémentaire d'achat du véhicule.
- La taille restreinte du marché.
- Les difficultés d'alimentation en carburant.
- Les ventes des véhicules d'occasion.

Cependant, la raison majeure est due aux moteurs conventionnels (essence et diesel). Ceux-ci ont continué de s'améliorer et donnent aujourd'hui de très bons résultats en termes d'émissions de polluants locaux par rapport au GPL, au GNC et aux autres carburants alternatifs. De plus, les performances des moteurs conventionnels ont augmenté en termes de vitesse et d'efficacité énergétique, en particulier dans le cas des moteurs diesel conventionnels. En conséquence, les avantages précédents des « véhicules à faibles émissions » ont disparu peu à peu.

Dans le domaine des émissions de CO<sub>2</sub>, les constructeurs automobiles produisent maintenant de nombreux modèles générant moins de 120 g CO<sub>2</sub>/km selon les cycles d'essai officiels européens. A la fin 2001, plus de 200 000 voitures particulières rejetant 120 g CO<sub>2</sub>/km ou moins ont été vendues en Europe. Tous ces véhicules étaient équipés de moteurs diesel.

Des essais de piles à combustible sont en cours pour les voitures, les camionnettes de livraison et les bus. Depuis 1997, de nombreux véhicules expérimentaux ont été testés (voitures particulières et bus) dans plusieurs pays. Certains problèmes techniques et économiques ont été identifiés. Des partenariats de recherche sont maintenant largement développés à l'échelle internationale afin de trouver des solutions permettant aux piles à combustible de devenir à l'avenir l'une des formes de propulsion privilégiée.

## **Annexe D**

### **INFORMATIONS ET INCITATIONS DANS LES PAYS DE L'OCDE**

La présente annexe résume les réponses recueillies au cours de l'enquête effectuée par le groupe de travail de l'OCDE concernant les incitations visant à promouvoir l'utilisation de véhicules à faibles émissions. Dans certains cas, le groupe de travail a également ajouté des informations concernant des pays n'ayant pas répondu.

La présente annexe contient les informations suivantes :

#### **Incitations financières**

- Résumé des taxes différentielles sur les « véhicules à faibles émissions » (tableau D.1)
- Liste des pays offrant des subventions en espèces ou des réductions à l'achat d'un véhicule neuf alimenté en carburant alternatif (tableau D.2)
- Résumés par pays des informations et incitations proposées pour les véhicules à faibles émissions (tableau D.3)

#### **Incitations relatives aux carburants propres**

- Résumé des incitations fiscales pour les carburants « propres » (tableau D.4)

#### **Promotions des véhicules à faibles émissions par l'information auprès du public**

- Résumé des guides environnementaux sur les véhicules (tableau D.5)

Les tendances principales sont analysées dans la partie principale du rapport.

**Tableau D.1. Résumé des taxes différentielles sur les véhicules « à faibles émissions »**

Country	Base des taxes différentielles sur les véhicules à faibles émissions (PT = achat « isolé »/impôt sur le revenu/subvention ; AT = taxe annuelle/subvention; ID = droit d'importation)							
	Normes d'émissions	Consommation carburant / CO <sub>2</sub>	Véhicule à carburant alternatif			Technologie alternative		
			GPL	GN	Autre	Hybride	Pile à comb.	Véhicule électrique
Autriche		PT						PT
Belgique	PT							
Canada		PT	PT	PT				
Rép. tchèque	PT							
Danemark		PT						
France			PT	PT	PT	AT		PT
Hongrie	AT							
Islande				ID			ID	ID
Italie							PT & AT	PT & AT
Japon	PT & AT (les deux conditions sont nécessaires!)			PT & AT	PT & AT	PT & AT <sup>1</sup>	PT & AT	PT & AT
Malaisie				AT				
Pays-Bas	PT, AT	AT?				PT & AT	AT	PT & AT
Suède	AT					AT		AT
Suisse								PT
Royaume-Uni		AT	PT & AT	PT & AT		PT & AT		PT & AT
États-Unis			PT	PT	PT	PT	PT	PT

1. AT est donnée suivant les normes d'émissions et la consommation du carburant.

**Tableau D.2. Liste des pays offrant des subventions en espèces ou des réductions à l'achat d'un véhicule neuf alimenté en carburant alternatif**

Pays	Subventions/réductions pour l'achat d'un véhicule neuf alimenté en carburant alternatif		
	LPG	NG	Other
Australie	√	√	
Canada		√	
France	√ (taxis)	√	√
Italie	√	√	
Japon		√	√ (électrique)
Pays-Bas		√	
Royaume-Uni	√	√	
États-Unis	√	√	√ (méthanol, hydrogène)

**Tableau D.3. Résumés par pays des informations et incitations proposées pour les véhicules à faibles émissions**

<b>Pays</b>	<b>Australie</b>
<b>Sources d'informations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les données relatives à la consommation de carburant sont disponibles sur papier ou sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.greenhouse.gov.au/transport/fuelguide/">www.greenhouse.gov.au/transport/fuelguide/</a></li> <li>• Marquage de la consommation de carburant des véhicules.</li> </ul>
<b>Incitations</b>	
<b>Pays</b>	<b>Belgique</b>
<b>Sources d'informations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les données relatives à la consommation de carburant et aux émissions sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.emis.vito.be/mobiliteit">www.emis.vito.be/mobiliteit</a></li> <li>• Marquage de la consommation de carburant.</li> </ul>
<b>Incitations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction de la taxe d'achat pour les voitures Euro 4 vendues en 2002, 2003 et 2004.</li> </ul>
<b>Pays</b>	<b>Canada</b>
<b>Sources d'informations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les données relatives à la consommation de carburant sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://autosmart.nrcan.gc.ca/pubs/fcg3_e.cfm">http://autosmart.nrcan.gc.ca/pubs/fcg3_e.cfm</a></li> <li>• Marquage de la consommation de carburant.</li> </ul>
<b>Incitations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subventions sur les coûts d'achat pour les véhicules au gaz naturel.</li> </ul>
<b>Pays</b>	<b>République tchèque</b>
<b>Sources d'informations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les données relatives à la consommation de carburant et aux normes d'émissions sont disponibles sur les sites Internet des constructeurs automobiles.</li> </ul>
<b>Incitations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction de 25 % sur la taxe routière pour les véhicules Euro 3 à partir du 1er janvier 2002.</li> </ul>
<b>Pays</b>	<b>Danemark</b>
<b>Sources d'informations</b>	
<b>Incitations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxes spécifiques liées à la consommation de carburant.</li> <li>• Réductions substantielles des taxes sur les véhicules pour les véhicules à très faible consommation de carburant (essence : &lt; 4 L/100 km ; diesel : &lt; 3.5 L/100 km).</li> </ul>
<b>Pays</b>	<b>Finlande</b>
<b>Sources d'informations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les données relatives à la consommation de carburant et aux émissions sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.motiva.fi/autotietokanta">www.motiva.fi/autotietokanta</a></li> </ul>
<b>Incitations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les taxes sur les véhicules varient en fonction des normes d'émissions et de la technologie du véhicule.</li> </ul>

**Tableau D.3. Résumés par pays des informations et incitations proposées pour les véhicules à faibles émissions (suite)**

<b>Pays</b>	<b>France</b>
<b>Sources d'informations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les données relatives à la consommation de carburant sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.transports.equipement.gouv.fr/">http://www.transports.equipement.gouv.fr/</a></li> <li>• Les données relatives aux subventions d'achat sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.environnement.gouv.fr/actua/cominfos/dosdir/DIRPPR/dosdppr.htm#transport">http://www.environnement.gouv.fr/actua/cominfos/dosdir/DIRPPR/dosdppr.htm#transport</a></li> </ul>
<b>Incitations</b>	<p>Subventions d'achat pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxis GPL : EUR 3 050 jusqu'au 31 décembre 2002 puis EUR 2 000 jusqu'au 31 décembre 2003 (pas plus de 3 000 subventions ou véhicules).</li> <li>• Bus GN, camions bennes GN, biogaz, électriques ou hybrides : EUR 7 500 par bus la première année d'achat ou pendant trois ans pour au moins 40 bus.</li> <li>• Voitures ou camionnettes électriques : EUR 3 050 par véhicule remplaçant définitivement un véhicule initialement immatriculé avant 1993 (pas plus de 25 000 subventions ou véhicules).</li> <li>• Véhicules électriques deux roues : EUR 510 par véhicule (pas plus de 2 500 subventions ou véhicules).</li> <li>• Filtres à particules : EUR 1 300 € par bus initialement immatriculé avant le 01/01/1991 et le 31/12/2000 (pas plus de 1 000 subventions ou filtres).</li> </ul>
<b>Pays</b>	<b>Hongrie</b>
<b>Sources d'informations</b>	
<b>Incitations</b>	<p>Taxe routière différentielle fondée sur les normes d'émissions comme suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Euro 0 : Taxe complète</li> <li>• Euro 1 : 75 %</li> <li>• Euro 2 : 50 %</li> <li>• Euro 3/4 : 25 %</li> </ul>
<b>Pays</b>	<b>Islande</b>
<b>Sources d'informations</b>	
<b>Incitations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de droit d'importation sur les véhicules GNC et zéro émissions.</li> </ul>
<b>Pays</b>	<b>Italie</b>
<b>Sources d'informations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les données relatives à la consommation de carburant sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://mica-dgfe.casaccia.enea.it/">http://mica-dgfe.casaccia.enea.it/</a></li> <li>• Les informations relatives aux incitations sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.ceiuni.it/CIVES/Quadroin.htm">http://www.ceiuni.it/CIVES/Quadroin.htm</a></li> </ul>
<b>Incitations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesures fiscales visant à réduire d'un montant allant jusqu'à EUR 4 300 le prix des véhicules électriques.</li> <li>• Exemption de la taxe de circulation annuelle pendant les cinq premières années pour les véhicules électriques, dont les motocycles et les cyclomoteurs.</li> </ul>

**Tableau D.3. Résumés par pays des informations et incitations proposées pour les véhicules à faibles émissions (suite)**

Pays	Japon
Sources d'informations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les données relatives aux émissions et à la consommation de carburant sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.mlit.go.jp/jidosha/nenpi/nenpilist/nenpilist.html">http://www.mlit.go.jp/jidosha/nenpi/nenpilist/nenpilist.html</a></li> </ul>
Incitations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réduction de la taxe annuelle sur les véhicules pour les voitures et autres véhicules légers pendant la première année suivant l'achat, en fonction des émissions et de la consommation de carburant, comme suit : <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 50 % de réduction pour les véhicules électriques, GNC et méthanol.</li> <li>➤ 50 % pour 1/4 des émissions stipulées dans les normes + consommation de carburant cible de 2010.</li> </ul> </li> <li>Réductions sur les taxes d'achat pour les véhicules GNC, hybrides, méthanol et électriques.</li> <li>Subventions accordées aux autorités locales pour encourager l'incorporation de véhicules « propres » dans leur parc.</li> <li>Prêts à faible intérêt accordés aux organisations pour encourager l'achat de véhicules GN, électriques, méthanol et hybrides.</li> </ul>
Pays	Pays-Bas
Sources d'informations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Guide sur l'économie de carburant disponible sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.hetnieuwerijden.nl/">http://www.hetnieuwerijden.nl/</a></li> <li>Informations sur les émissions obligatoires dans les publicités.</li> <li>Marquage des véhicules relatif à l'énergie.</li> </ul>
Incitations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réduction de la taxe d'achat pour les voitures Euro 4 vendues en 2002, 2003 et 2004.</li> <li>Réduction des taxes annuelles sur les véhicules pour les véhicules à faible consommation de carburant et faibles émissions.</li> <li>Pas de taxe sur les véhicules pour les véhicules électriques et hybrides.</li> </ul>
Pays	Suède
Sources d'informations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les données sur la classification environnementale des véhicules sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.internat.environ.se/documents/legal/vehicule/vehicule.pdf">http://www.internat.environ.se/documents/legal/vehicule/vehicule.pdf</a></li> </ul>
Incitations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réduction de la taxe annuelle la première année pour les véhicules Euro 4.</li> <li>Pas de taxe sur les véhicules pendant les cinq premières années pour les véhicules électriques et hybrides.</li> </ul>

**Tableau D.3. Résumés par pays des informations et incitations proposées pour les véhicules à faibles émissions (suite)**

Pays	Royaume-Uni
<b>Sources d'informations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les données relatives aux émissions, au bruit et à la consommation de carburant sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.vcacarfueldata.org.uk">www.vcacarfueldata.org.uk</a></li> <li>• Les données relatives aux véhicules alimentés en carburant « propre » sont disponibles sur Internet à l'adresse : <a href="http://www.est-powershift.org.uk/ps_register.cfm">www.est-powershift.org.uk/ps_register.cfm</a></li> </ul>
<b>Incitations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction du droit d'accise annuel sur les véhicules en fonction des émissions de CO<sub>2</sub> principalement, mais également du carburant et du type de technologie comme détaillé dans le tableau ci-après.</li> <li>• Taxe sur les voitures d'entreprise en fonction des niveaux d'émissions de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Programme du parc visant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> (voir <a href="http://www.greenerfleet.org.uk/index.html">http://www.greenerfleet.org.uk/index.html</a>).</li> </ul>
Pays	États-Unis
<b>Sources d'informations</b>	<p>Les données relatives aux émissions et à la consommation de carburant sont disponibles sur Internet aux adresses de plusieurs sites, dont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="http://www.epa.gov/autoemissions">http://www.epa.gov/autoemissions</a></li> <li>• <a href="http://www.fueleconomy.gov">http://www.fueleconomy.gov</a> (consommation de carburant et émissions de gaz à effet de serre uniquement)</li> <li>• <a href="http://www.arb.ca.gov/msprog/ccbg/ccbg.htm">http://www.arb.ca.gov/msprog/ccbg/ccbg.htm</a> (émissions nocives uniquement)</li> <li>• <a href="http://www.greenercars.com/indexplus.html">http://www.greenercars.com/indexplus.html</a></li> </ul>
<b>Incitations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crédits de taxes pour l'achat de véhicules électriques, à pile à combustible, hybrides et à carburant alternatif.</li> <li>• Taxe « Gas Guzzler » de USD 1 000 à 7 000 sur les voitures à forte consommation de carburant.</li> <li>• Prescriptions d'achat de parcs pour les LEV dans les zones à fort degré de pollution (voir <a href="http://www.epa.gov/otaq/cff.htm">http://www.epa.gov/otaq/cff.htm</a>).</li> </ul>

**Tableau D.4. Résumé des incitations fiscales pour les carburants « propres »**

Pays	Incitations fiscales pour les carburants « propres » ER = réduction du droit d'accise*; EF = sans accise								
	Carburants à faible teneur en soufre				Carburants alternatifs				
	Essence		Gazole		GPL	GN	Éthanol	Méthanol	Autres
	50ppm	10ppm	50ppm	10ppm					
Australie	-	-	ER**	-	EF	EF	EF	-	-
Belgique	ER	-	ER	-	EF	EF	-	-	-
Rép. tchèque	-	-	-	-	ER	EF	-	-	ER (biodiesel)
Danemark	-	-	ER	-	-	-	-	-	-
Finlande	-	-	ER	-	EF	EF	-	-	-
Hong Kong, Chine	-	-	ER	-	-	-	-	-	-
Islande	-	-	-	-	-	EF	-	-	-
Italie	-	-	-	-	ER	ER	-	-	ER (biodiesel)
Japon	-	-	-	-	-	-	EF	EF	-
Pays-Bas	ER	-	ER	-	-	EF	N/A	EF-	-
Norvège	-	-	ER	-	-	EF	-	-	-
Suède	ER	-	ER	ER	-	-	-	-	-
Suisse	ER	ER**	ER	ER**	-	-	-	-	-
Royaume-Uni	ER	-	ER	-	ER	ER	-	-	ER (hydrogène)
États-Unis	-	-	-	-	ER	ER	EF	ER	ER

\* La réduction du droit d'accise peut être une réduction directe de l'accise sur le carburant spécifié ou une augmentation de l'accise sur les carburants dont la teneur en soufre est supérieure à celle du carburant spécifié (le deuxième cas s'applique par exemple au Royaume-Uni).

\*\* Proposé.

Tableau D.5. Résumé des guides environnementaux sur les véhicules

Country	Source	Informations relatives aux guides environnementaux					Présentation des informations				Support			
		Scope/contenu		Autres			Conformité aux normes	Classement du parc global	Classement de la classe	Classement combiné effet de serre et pollution de l'air	Internet	Papier		
		Effet de serre	Pollution de l'air	Bruit	Coûts de fonctionnement	Données de certification								
		CO <sub>2</sub>												
Australie	AGO	✓								✓*			✓	✓
Belgique	VITO	✓	✓				✓			✓**			?	?
Canada	NRCAN	✓			✓								✓	✓
Finlande	Motiva	✓	✓			✓ (NOx+HC)							✓	
France		✓												
Japon	MLIT, MOE	✓	✓	✓				✓ (only low emission standards and fuel consumption)				✓	✓	
Pays-Bas	Novem	✓								✓**			✓	
Suède	EPA	✓	✓					✓					✓	
Royaume-Uni	VCA	✓	✓	✓		✓		✓	✓**				✓	✓
États-Unis	EPA	✓	✓	✓					✓				✓	
	DOE	✓	✓		✓					✓			✓	
	ARB		✓					✓***					✓	
	ACEEE	✓	✓		✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓

\* 5 meilleures performances seulement dans chaque groupe ; \*\* pour la consommation de carburant/le CO<sub>2</sub> uniquement ; \*\*\* seuls les véhicules dont les performances sont supérieures aux normes minimales sont listés

Noms des sources : ACEEE – Conseil américain pour une économie efficace au plan énergétique ; AGO - Australian Greenhouse Office ; ARB – Conseil des ressources atmosphériques (Californie) ; EPA – Agence de la protection de l'environnement ; DOE – Département de l'énergie ; MLIT – Ministère du territoire, de l'infrastructure et des transports ; MOE – Ministère de l'environnement ; Motiva – Centre d'informations sur l'énergie pour l'efficacité énergétique et les sources d'énergie renouvelables ; NRCAN – Dept des ressources naturelles, Canada ; VCA – Agence d'homologation des véhicules ; VITO – Institut flamand de la recherche technologique.

## Annexe E

# PRODUCTION D'HYDROGÈNE À PARTIR DE SOURCES FOSSILES

La présente contribution a été soumise par l'Islande. Elle décrit les procédés de production d'hydrogène en vue de l'application potentielle à grande échelle des véhicules à pile à combustible.

### Gaz naturel

Le reformage à la vapeur (SMR) du gaz naturel est le procédé de production d'hydrogène à grande échelle le plus efficace. Il s'agit de la conversion catalytique endothermique d'hydrocarbures légers en présence de vapeur d'eau. A l'échelle industrielle, ce procédé met en jeu habituellement des températures de l'ordre de 850 °C et des pressions d'environ 2.5 MPa. Il est utilisé dans des centrales de reformage à la vapeur dont les capacités avoisinent les 100 000 Nm<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/h.

Ce procédé permet d'atteindre des efficacités de 73 %. Celles-ci peuvent même aller jusqu'à 86 % lorsque de la vapeur haute pression utilisable est produite en même temps (surplus de vapeur).

La production locale d'hydrogène par reformage à la vapeur est moins efficace du fait du faible surplus de vapeur disponible. Cependant, l'oxydation partielle catalytique du gaz naturel conduit à des efficacités de 80 % ou plus.

### Pétrole

L'oxydation partielle (POX) des mazouts lourds est également une méthode de production d'hydrogène. Il s'agit de la conversion exothermique ou autothermique d'hydrocarbures lourds (ex. pétrole résiduel issu du traitement du pétrole brut) en présence d'oxygène et de vapeur. A l'échelle industrielle, ce procédé présente une capacité similaire à celle du SMR, soit environ 100 000 Nm<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/h. Il est techniquement fiable. Deux versions de ce procédé sont actuellement utilisées : les procédés de gazéification de Texaco et Shell. Leur efficacité est d'environ 50 %.

### Charbon

La réaction chimique d'oxydation partielle du charbon, communément appelée gazéification, est semblable à l'oxydation partielle du pétrole. Hormis les équipements nécessaires à la préparation initiale du charbon, les composants du procédé de la centrale sont les mêmes que pour la gazéification du pétrole. Le charbon est réduit en poudre fine puis mélangé à de l'eau, ce qui permet d'obtenir une suspension solide de 50 à 70 % pouvant être pompée.

Il existe deux types de procédés de gazéification du charbon, le procédé Toppers-Totzek sous pression atmosphérique et le procédé Texaco sous une pression d’environ 5.5 MPa. La gazéification du charbon est d’une efficacité semblable à celle de la POX des mazouts lourds.

L’efficacité de ce procédé est comparable à celle de l’oxydation partielle du pétrole lourd. Ce procédé n’est utilisé à l’échelle commerciale que dans les pays gros producteurs de charbon comme la Chine et l’Afrique du Sud. Les efficacités énergétiques des différentes méthodes de production d’hydrogène à partir de sources fossiles sont résumées dans le tableau 2.

## Émissions

Les émissions de dioxyde de carbone issues de la production d’hydrogène (à l’exception de la compression, du stockage, du transport, etc.) peuvent être calculées à partir des efficacités énergétiques des procédés de production d’hydrogène. La production de 1 MJ d’hydrogène requiert 2 MJ de mazout lourd, 1.9 MJ de charbon ou 1.16 MJ de gaz naturel (procédé d’efficacité de 86 %). Les émissions sont listées ci-après en g/MJ et par type de combustible. Elle sont calculées d’après les facteurs d’émission de la combustion des carburants et ne prennent pas en compte la production, le raffinage, le transport, le stockage et la compression de ces carburants.

**Tableau E.1. Émissions de CO<sub>2</sub> pour différentes sources d’énergie**

Source d’énergie	g CO <sub>2</sub> /MJ
Lignite	111 <sup>1</sup>
Houille (gazéification)	92 <sup>2</sup>
Pétrole résiduel	78 <sup>2</sup>
Gaz naturel	57 <sup>2</sup>

**Tableau E.2. Efficacités énergétiques et émissions de CO<sub>2</sub> pour la production de H<sub>2</sub> à partir de sources fossiles**

Efficacité énergétique	Émissions de CO <sub>2</sub> en g/MJ		
Pétrole	50 %	156	Oxydation partielle non catalytique du mazout lourd (procédés de gazéification Texaco et Shell) <sup>3</sup>
Charbon	52 %	177	Gazéification <sup>4</sup>
Gaz naturel	86 %	66	Production centralisée d’hydrogène à partir de GN, sans export de vapeur ou d’électricité <sup>5</sup>
	71 %	80	Production centralisée d’hydrogène à partir de gaz naturel, avec export de vapeur ou d’électricité <sup>3</sup>
	79 %	72	Production d’hydrogène gazeux aux stations service à partir de GN <sup>3</sup>

<sup>1</sup> [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

<sup>2</sup> Greet emissions model, Argonne National Laboratories ; [www.transportation.anl.gov/ttrdc/greet](http://www.transportation.anl.gov/ttrdc/greet)

<sup>3</sup> Rapport NREL : C.E.G. Padro et V. Putsche « Survey of the Economics of Hydrogen Technologies », NRL/TP-570-27079.

<sup>4</sup> [www.fe.doe.gov](http://www.fe.doe.gov), site Internet du DOE.

<sup>5</sup> J.J.J. Louis, « Well-to-wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions for Various Vehicle Technologies », article SAE 2001-01-1343.

## Coûts

Les coûts de production d'hydrogène par SMR ou gazéification du charbon ont été étudiés par Lipman et DeLucchi<sup>6</sup> et sont listés dans le tableau E.3. Il apparaît clairement que la méthode de production d'hydrogène la plus rentable est le reformage à la vapeur du gaz naturel à grande échelle (en faisant l'hypothèse d'un prix du gaz naturel de 4 à 6 USD/GJ et d'un prix du charbon de 1.5 USD/GJ).

**Tableau E.3. Coûts de production d'hydrogène**

Coûts de production d'hydrogène, prévisions après 2000 <sup>6</sup>	USD/GJ
<b>Hydrogène par reformage à la vapeur du gaz naturel</b>	
Grande centrale (18 000 GJ/jour)	6.4 - 8.6
Petite centrale (180 GJ/jour)	13.8- 16.5
<b>Hydrogène par gazéification du charbon</b>	
Grande centrale (18 000 GJ/jour)	8.6
Petite centrale (9180 GJ/jour)	13

## Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

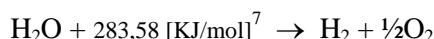
### *Théorie*

La production d'hydrogène à partir de sources fossiles engendre des gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone. De plus, le gaz hydrogène issu des sources fossiles n'est pas très pur : il doit être purifié avant de pouvoir être utilisé. C'est pourquoi, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, lorsque l'électricité est issue de sources d'énergie renouvelables, présente des avantages substantiels par rapport à la production à partir de sources fossiles :

- Aucun dégagement de gaz à effet de serre ou d'autres polluants atmosphériques.
- Pureté très élevée du gaz hydrogène produit par électrolyse (> 99.5 %).
- Procédé de production très simple à partir d'eau et d'électricité seulement.

Ces avantages combinés à l'abondance des sources d'énergie renouvelable islandaises font de l'électrolyse de l'eau une méthode de production d'hydrogène privilégiée en Islande.

Le procédé d'électrolyse consiste à appliquer une source d'électricité à de l'eau pour dissocier ses éléments de base, l'hydrogène et l'oxygène.



Deux électrodes, l'anode et la cathode, sont placées dans un électrolyte et on applique un potentiel électrique pour initier la réaction. En théorie, l'énergie électrique nécessaire est déterminée par l'enthalpie libre de l'eau (283.58 [KJ/mol]). La tension théorique requise est d'environ 1.2 V mais en pratique, la tension utilisée est plutôt de l'ordre de 2 V du fait de la résistance des électrodes et de l'électrolyte.

<sup>6</sup> T.E. Lipman et M.A. DeLucchi (1996), « Hydrogen-fuelled vehicles », *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 17, p. 562.

<sup>7</sup> D.D. Wagman *et al.*, eds. (1982), « Tables NBS des propriétés thermodynamiques » *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 11, suppl. 2.

Trois procédés généraux ont été développés pour l’électrolyse de l’eau :

1. Électrolyse de l’eau au moyen d’électrolytes aqueux alcalins, utilisation d’une membrane fine pour éviter le mélange des gaz générés, c’est-à-dire l’oxygène et l’hydrogène, et pour séparer l’anode et la cathode.
2. Électrolyse de l’eau au moyen d’une membrane ou d’un électrolyte polymère solide. Système utilisant une membrane d’échange d’ions perméable aux protons comme électrolyte et comme séparation des cellules d’électrolyse. L’eau à dissocier ne requiert aucun électrolyte dissout pour augmenter sa conductivité. Elle est ajoutée uniquement du côté de l’anode.
3. Électrolyse de vapeur d’eau à haute température, entre 700 et 1 000 °C, utilisant comme électrolyte un matériau céramique perméable aux ions oxygène. L’eau à dissocier est ajoutée sous forme de vapeur du côté de la cathode. La dissociation électrolytique forme un mélange de vapeur et d’hydrogène. Les ions  $O^{2-}$  sont transportés à travers le matériau céramique vers l’anode où ils sont libérés sous forme d’oxygène.

La technologie Norsk Hydro est un procédé du premier type. C’est donc celui qui est considéré dans cette étude de faisabilité.

### *Technologie Norsk Hydro d’électrolyse de l’eau*

Norsk Hydro Electrolysers AS fournit l’une des technologies d’électrolyse alcaline conventionnelle les plus efficaces actuellement sur le marché. Les premiers électrolyseurs Norsk Hydro bipolaires à filtre-presses ont été construits en 1927 pour être utilisés dans les usines d’ammoniac de l’entreprise. Les deux plus grands sites d’électrolyse du monde ont été installés en Norvège. Ils utilisent plus de 300 électrolyseurs et produisent plus de 60.00 Nm<sup>3</sup>/h d’hydrogène. Cette technologie s’appuie sur une conception éprouvée des cellules et de l’ensemble cellules/électrolyseur.

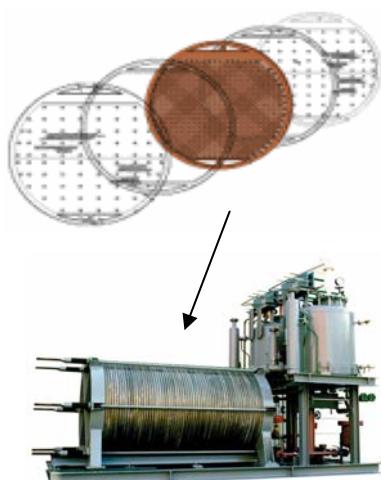


Figure E.1. Électrolyseur Norsk Hydro

La cellule standard est composée de deux électrodes, deux joints et un cadre de membrane. Le montage est illustré par la figure E.1. Les électrodes, les joints et la membrane sont disposés en sandwich et forment ainsi deux compartiments de cellule séparés par la membrane. Les électrodes et le cadre sont plaqués nickel. Les revêtements catalytiques activent également les électrodes situées à l’avant. La membrane est constituée d’un matériau polymère. Au fond de la cellule se trouvent des ouvertures. Il s’agit des conduites d’alimentation et de distribution d’électrolyte. Les gaz hydrogène et oxygène s’échappent par des conduites d’extraction du gaz et de l’électrolyte, respectivement. Ces conduites sont situées au sommet de la cellule.

L'ensemble des cellules de l'électrolyseur est monté sous la forme d'un filtre-presse assemblé entre deux cadres métalliques rigides. L'électrolyte issu du refroidisseur est acheminé vers la conduite d'alimentation. Les gaz produits ainsi qu'une partie de l'électrolyte s'échappent par les conduites d'extraction en direction des séparateurs d'oxygène et d'hydrogène. Les barres-bus sont connectées aux électrolyseurs au niveau des faces avant et arrière. Pour des raisons de sécurité, la face avant est raccordée à la terre.

L'électrolyseur complet est composé d'un bloc de cellules (module EL) et d'un système d'électrolytes (module ES). Les tailles du bloc de cellules et du système d'électrolytes, en particulier les séparateurs gaz/lessive alcaline, sont déterminées par la capacité de production de gaz requise. La circulation de l'électrolyte est forcée afin d'assurer une dissipation de chaleur optimale et une concentration en électrolyte uniforme dans toutes les cellules, de sorte que l'électrolyseur fonctionne dans les meilleures conditions. Norsk Hydro Electrolysers propose deux types de systèmes d'électrolytes standard. Le premier est fourni avec des refroidisseurs de gaz et des joints étanches, et les traces de KOH dans le gaz en aval sont supprimées au moyen d'un compresseur à anneau liquide. Le second est fourni sans refroidisseurs de gaz ni joints étanches, et le gaz en aval est purifié au moyen d'un laveur de gaz standard (module SC).

## LISTE DES ABRÉVIATIONS UTILISÉES DANS CE RAPPORT

ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
AIE	Agence internationale de l'énergie
Anti-NOx	Catalyseur sélectif NO <sub>x</sub>
APU	Groupe auxiliaire de puissance ( <i>Auxiliary Power Unit</i> )
bhp	Cheval vapeur britannique (unité correspondant à 745.7 watts environ) ( <i>British Horse Power</i> )
CAFE	<i>Corporate Average Fuel Economy</i> (USA)
CARB	Conseil californien des ressources atmosphériques ( <i>Californian Air Resources Board</i> )
CEE/ONU	Commission économique pour l'Europe des Nations Unies
CID	Cylindrée (en pouces cubes) ( <i>Cubic Inch Displacement</i> )
CNG	Gaz naturel comprimé ( <i>Compressed Natural Gas</i> )
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
COV	Composés organiques volatils
CRT	Piège à régénération continue ( <i>Continuous Regenerating Trap</i> )
CVT	Transmission variable continue ( <i>Continuous Variable Transmission</i> )
EGR	Recirculation des gaz d'échappement ( <i>Exhaust Gas Recirculation</i> )
EPA	Agence de protection de l'environnement ( <i>Environmental Protection Agency</i> )
ESC	Cycle européen, régime permanent ( <i>European Steady-state Cycle</i> )
ETC	Cycle européen, régime transitoire ( <i>European Transient Cycle</i> )
EUDC	Cycle de conduite extra-urbain ( <i>Extra Urban Driving Cycle</i> )
EV	Véhicule électrique ( <i>Electric Vehicle</i> )
EZEV	Véhicule équivalent zéro émissions ( <i>Equivalent Zero Emissions Vehicle</i> )
FCEV	Véhicule électrique à pile à combustible ( <i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> )
GHG	Gaz à effet de serre ( <i>Greenhouse Gas</i> )
GRPE	Groupe de travail sur la pollution et l'énergie CEE/ONU
HEV	Véhicule électrique hybride ( <i>Hybrid Electric Vehicle</i> )
HP	Cheval vapeur ( <i>Horse Power</i> )
HV	Véhicule hybride ( <i>Hybrid Vehicle</i> )
ICE	Moteur à combustion interne ( <i>Internal Combustion Engine</i> )
ISA	Alternateur de démarreur intégré ( <i>Integrated Starter Alternator</i> )
IUC	Conformité en cours d'utilisation ( <i>In Use Compliance</i> )
JAMA	Association des constructeurs japonais d'automobiles ( <i>Japan Automobile Manufacturers Association</i> )
KAMA	Association des constructeurs coréens d'automobiles ( <i>Korea Automobile Manufacturers Association</i> )
LEV	Véhicule à faibles émissions ( <i>Low-Emission Vehicle</i> )
LPG	Gaz de pétrole liquéfié ( <i>Liquefied Petroleum Gas</i> )
MON	Indice d'octane du moteur ( <i>Motor Octane Number</i> )
MPG	Mile par gallon
MPV	Véhicule polyvalent ( <i>Multi Purpose Vehicle</i> )
NG	Gaz naturel ( <i>Natural gas</i> )
OBD	Diagnostic embarqué ( <i>On-board Diagnostics</i> )
OMS	Organisation mondiale de la santé
PM	Particule ( <i>Particulate Matter</i> )
PNGV	Programme pour une nouvelle génération de véhicules (États-Unis)
ppm	Parties par million
SUV	Véhicule 4x4 de loisir ( <i>Sports Utility Vehicle</i> )
UDC	Cycle de conduite urbain ( <i>Urban Driving Cycle</i> )
UE	Union Européenne
ZEV	Véhicule à zéro émissions ( <i>Zero Emission Vehicle</i> )

## LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL SUR LES VÉHICULES À FAIBLES ÉMISSIONS

**Président** : M. Jean DELSEY (France)

### **Australie**

M. Jonathan REAL  
Département des transports et des services régionaux

### **Canada**

M. Dave BLACK

### **États-Unis**

M. Shang HSIUNG  
Federal Transit Administration

M. James SHROUD  
Federal Highway Administration

### **France**

Mme Véronique AURAND  
CERTU

M. Jean DELSEY  
INRETS

M. François RAMBAUD  
CERTU

### **Hongrie**

M. Ivan POLLAK  
Institut des sciences des transports (KTI)

M. Miklos SZOBOSZLAY  
Ministre des transports et de la gestion de l'eau

### **Islande**

M. Hreinn HARALDSSON  
Administration des routes publiques

M. Jon Bjorn SKULASON  
Icelandic New Energy Ltd

### **Italie**

M. Antonio MATTUCCI  
ENEA

## **Japon**

M. Hiroki MATSUMOTO

Ministère du territoire, de l'infrastructure et des transports

M. Satoru MIZUSHIMA

Délégation japonaise auprès de l'OCDE

M. Yoshiharu NAMIKAWA

Ministère du territoire, de l'infrastructure et des transports

M. Hirofumi OHNISHI

Ministère du territoire, de l'infrastructure et des transports

Mr. Takahiro OOMORI

Ministère du territoire, de l'infrastructure et des transports

M. Yukata TAKADA

Organisation pour la promotion des véhicules à faibles émissions (LEVO)

M. Ryugo TOJI

Ministère du territoire, de l'infrastructure et des transports

M. Shigeru UEKI

Organisation pour la promotion des véhicules à faibles émissions (LEVO)

## **Mexique**

M. Gaudencio NIEMBRO

CONAE (Comisión Nacional para el Ahorro de Energía)

M. Javier OSORIO

CONAE (Comisión Nacional para el Ahorro de Energía)

## **Pays-Bas**

M. Leo SCHLOSSER

Centre de recherche sur le trafic routier

Ministère des transports, des travaux publics et de la gestion de l'eau

## **République Tchèque**

M. Rudolf CHOLAVA

Centre de recherche des transports

## **Royaume-Uni**

M. Patrick ERWIN

DTLR

Mme Caroline WOOD

DTLR

**Conférence européenne des ministres des transports (CEMT)**

M. Stephen PERKINS

**Agence internationale de l'énergie (AIE)**

M. Lewis FULTON

M. Thomas Daniel HOWES

**OCDE, Direction de l'environnement**

M. Peter WIEDERKEHR

**OCDE, Division des transports**

Mme Véronique FEYPELL-DE LA BEAUMELLE

M. Anthony OCKWELL

M. John WHITE

**Membres du comité de rédaction**

M. Jean DELSEY (France)

Mme Véronique FEYPELL-DE LA BEAUMELLE (OCDE)

M. Antonio MATTUCCI (Italie)

M. Ivan POLLAK (Hongrie)

M. Jonathan REAL (Australie)

M. Leo SCHLOSSER (Pays-Bas)

M. Miklos SZOBOSZLAY (Hongrie)

M. John WHITE (OCDE)

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16  
IMPRIMÉ EN FRANCE  
(77 2004 02 2 P) ISBN 92-64-10496-8 - n° 53414 2004