

# Futures évolutions des motorisations dans l'automobile

**Un des défis majeurs d'aujourd'hui est celui de la maîtrise de l'impact de l'automobile sur l'environnement et particulièrement sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre, au premier rang duquel le gaz carbonique. De nombreux leviers doivent être activés pour rendre l'automobile, et plus généralement le transport routier, compatible avec le développement durable. Les innovations et les progrès technologiques sont amenés à jouer un grand rôle, particulièrement pour ce qui concerne les systèmes de motorisation.**

**par Philippe Pinchon  
Institut français du pétrole**

**L**e secteur des transports constitue aujourd'hui une composante essentielle des économies modernes. La grande mobilité des marchandises et des personnes est non seulement une caractéristique des pays

développés mais plus encore une condition au développement. De même, la mobilité individuelle qui s'appuie largement sur les véhicules automobiles a connu une croissance continue au cours des dernières décennies ; cette observation ne fait que traduire une aspiration profonde de la majorité de nos contemporains à une grande liberté de déplacement. L'automobile répond à un vrai besoin pour la satisfaction duquel il n'existe pas de véritable alternative. Le développement considérable des transports routiers, l'augmentation continue du parc mondial de véhicules associée à la croissance du nombre de trajets et à celle des distances moyennes parcourues, tout cela amène à s'interroger sur le caractère pérenne de ce développement. Des questions fondamentales sont posées. En particulier, alors que le secteur du transport consomme aujourd'hui près de 45 % du pétrole mondial, sera-t-on en mesure d'assurer un approvisionnement énergétique suffisant et à un coût économique acceptable pour accompagner le développement du secteur dans les décennies à venir ? Sera-t-on capable dans ce contexte, de réduire la pollution atmosphérique locale ? Dans quelle mesure parviendra-t-on à juguler l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports, voire à les réduire ? Telles sont les principales interrogations qui accompagnent le développement programmé du transport routier.

Relever tous ces défis nécessitera à coup sûr la conjonction de nombreuses actions volontaristes dans le domaine des équipements et infrastructures, de la réglementation, des comportements sociaux et de la technologie.

L'objectif de cet article est précisément de faire le point sur la contribution des technologies pour répondre aux enjeux du développement durable dans l'automobile.

## **Réduire la pollution locale due à l'automobile**

Les véhicules automobiles sont, dans leur quasi-totalité, équipés de moteurs thermiques alimentés avec des carburants liquides (essence ou gazole) issus de la transformation du pétrole. La combustion de ces hydrocarbures génère un certain nombre de polluants, émis à l'échappement des moteurs à la suite du processus de combustion. Certains de ces polluants font l'objet d'une réglementation : il s'agit, en particulier, du monoxyde de carbone (CO), des oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>, notés NO<sub>x</sub>), les hydrocarbures imbrûlés (HC) et les particules de suies. Le CO, les HC et les suies sont le résultat d'une combustion incomplète alors que les oxydes d'azote sont issus de la réaction entre l'oxygène et l'azote de l'air portés à haute température. Le secteur des transports contribue majoritairement aux émissions de NO<sub>x</sub> et de CO (voir la figure 1) et reste un contributeur important, quoique minoritaire, pour les particules et les hydrocarbures imbrûlés. L'effet de ces polluants s'exerce d'abord à l'échelle locale, notamment urbaine. Le premier effet est celui des polluants primaires, c'est-à-dire ceux issus directement du pot d'échappement, et la pollution va alors s'exercer à proximité immédiate des sources d'émissions, en particulier dans les zones de circulation dense et difficile. Un cas particulièrement critique est celui des rues

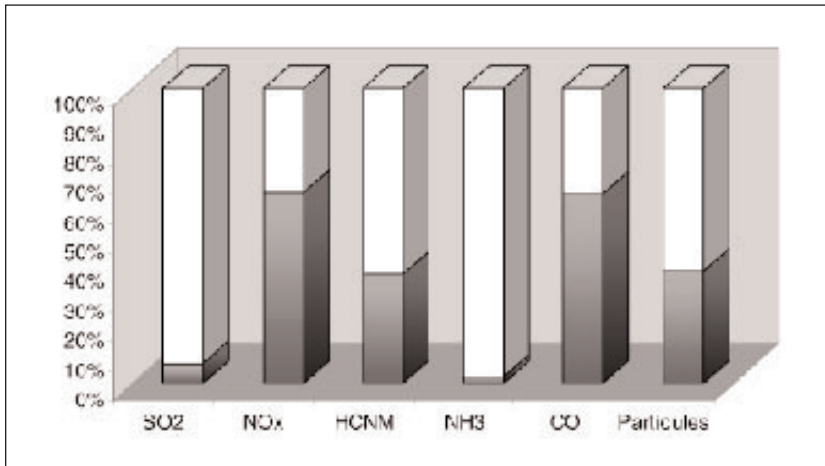


Fig. 1. - En grisé, contribution des transports aux émissions globales de polluants en Europe (2001).

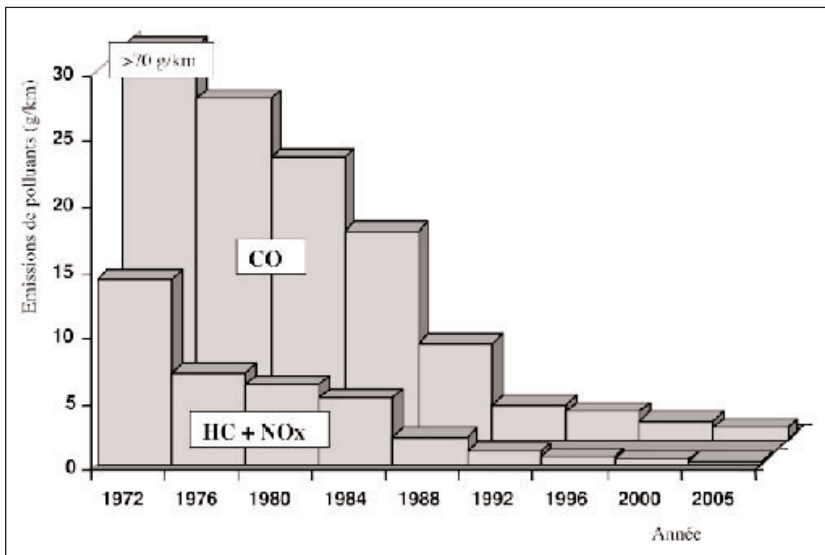


Fig. 2. - Evolution des normes anti-pollution européennes (limites d'émissions des véhicules automobiles).

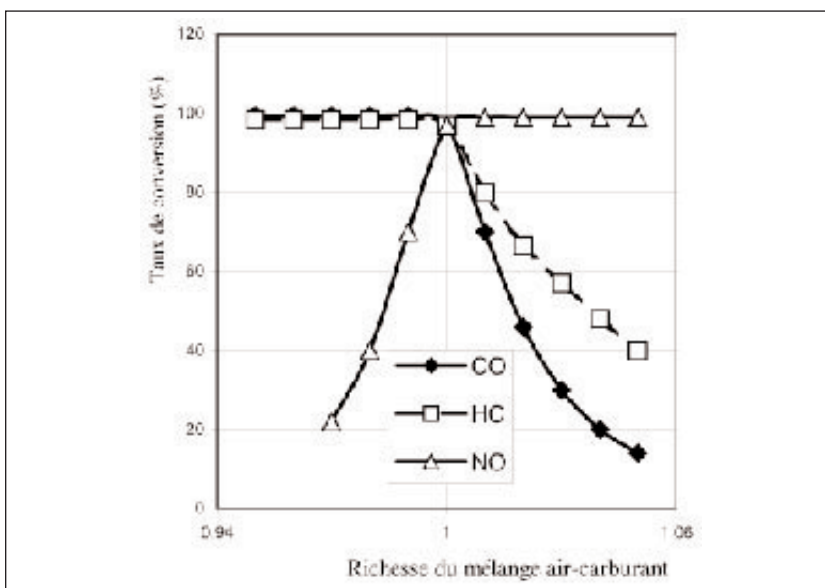


Fig. 3. - Principes de fonctionnement d'un catalyseur 3 voies.

« canyon », mal ventilées et bordées d'immeubles qui bloquent la dispersion des polluants atmosphériques. Les polluants primaires peuvent dans certaines conditions climatiques, caractérisées en particulier par un fort ensoleillement et peu de vent, être à l'origine d'une pollution dite secondaire, c'est-à-dire provoquée par une transformation chimique dans l'atmosphère. C'est notamment le cas de l'ozone qui est produit par un ensemble de nombreuses réactions chimiques complexes, activées par le rayonnement solaire et faisant intervenir les NO<sub>x</sub> et composés organiques volatils (COV) dont font partie les hydrocarbures imbrûlés. L'ozone est la cause de la plupart des pics de pollution estivaux qui se manifestent en général au voisinage des grandes agglomérations.

C'est pourquoi la réglementation anti-pollution automobile a adopté des cycles de conduite caractéristiques d'une circulation urbaine et péri-urbaine pour l'homologation des véhicules. Ces cycles correspondent à des conditions de fonctionnement pour lesquelles le moteur est relativement peu chargé. A titre indicatif, la vitesse moyenne du véhicule sur l'ensemble du cycle européen est de 32 km/h et ce dernier commence par un démarrage à froid. Les systèmes anti-pollution sont donc conçus pour être pleinement efficaces lors de conditions de fonctionnement difficiles mais représentatives des modes d'utilisation réelle des véhicules, même si la remise en cause du profil du cycle d'homologation pour défaut de réelle représentativité, est régulièrement portée à l'ordre du jour.

Depuis les années 70, les normes anti-pollution sont devenues de plus en plus sévères, notamment en Europe et aux Etats-Unis. Sous l'impulsion des pouvoirs publics, les limites d'émissions ont été réduites d'un facteur 10 à 100 en quelques décennies (voir la figure 2). Il est frappant de constater que ces objectifs ambitieux ont été effectivement atteints et ce résultat doit être essentiellement mis au crédit des progrès remarquables réalisés dans le domaine de la technologie. Des efforts de recherche et développement considérables sont en effet consentis depuis de nombreuses années par les bureaux d'étude des

constructeurs automobiles et les laboratoires de recherche mondiaux.

Les progrès les plus importants ont été obtenus dans les domaines suivants :

- en premier lieu, les systèmes de post-traitement catalytique des polluants ; la catalyse dite « 3 voies » permet, par exemple, l'élimination simultanée des NO<sub>x</sub>, CO et HC (voir la figure 3) avec plus de 99 % d'efficacité lorsque le catalyseur est chaud ; ces systèmes nécessitent cependant la combustion d'un mélange air-carburant stoechiométrique (richesse égale à 1) ;

- le pilotage électronique de la plupart des paramètres de contrôle du moteur, en particulier l'injection, l'allumage et l'alimentation en air ;

- l'injection du carburant (l'apparition de systèmes d'injection directe haute pression, par exemple, a permis une amélioration sensible des performances du moteur diesel) ;

- le système de combustion (bénéficiant des progrès de la modélisation numérique, les chambres de combustion font l'objet d'une optimisation de plus en plus poussée) ;

- la qualité des carburants ; la lutte contre la pollution automobile et les normes anti-pollution ont été accompagnées d'un resserrement des spécifications des carburants. Des paramètres tels que teneur en benzène, en aromatiques, en soufre sont désormais réglementés.

Force est de reconnaître que cette politique basée sur le double volet réglementaire et progrès technologique a porté ses fruits. On a effectivement assisté à une diminution des rejets de polluants atmosphériques liés à l'automobile au cours de la dernière décennie, et les projections effectuées dans le cadre du programme européen Auto Oil indiquent que les émissions globales de polluants toxiques vont continuer à baisser en Europe (voir la figure 4). Le rythme de baisse de ces émissions est essentiellement contrôlé par les facteurs suivants :

- la mise en œuvre d'une nouvelle réglementation plus sévère qui accompagne les progrès techniques

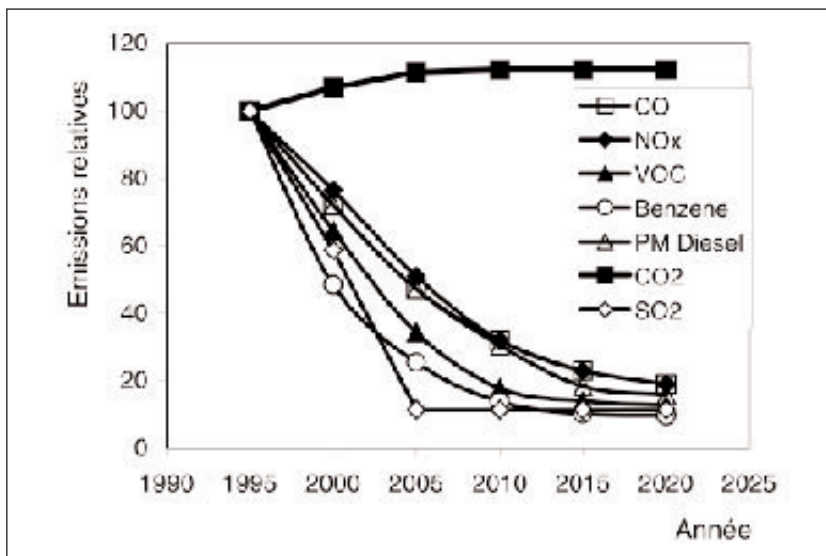


Fig. 4. - Evolution prévue des émissions de polluants automobile en Europe (Auto Oil 2000).

(l'intervalle de temps entre deux niveaux de réglementation est d'environ 5 ans) ;

- le taux de renouvellement du parc de véhicules, un facteur particulièrement important puisque la durée de vie moyenne d'un véhicule automobile est supérieure à 10 ans en France ;

- l'accroissement simultané du parc de véhicules automobiles européens et du trafic routier.

La figure 4 montre cependant que les émissions de CO<sub>2</sub>

n'ont pas suivi les mêmes tendances que celles des polluants atmosphériques. Le CO<sub>2</sub> est, en effet, un traceur de la consommation de carburant des véhicules et il n'existe pas de solution réaliste pour l'éliminer dans la ligne d'échappement elle-même. La croissance des émissions de CO<sub>2</sub> observée au cours des dernières années traduit plusieurs facteurs : l'accroissement du parc, l'augmentation du trafic routier et celle du poids moyen des véhicules du fait de l'amélioration des systèmes de sécurité et de confort. La stabilisation des émissions prévue au cours des dix prochaines années découle directement des mesures prises par l'ensemble des constructeurs d'automobiles pour réduire les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> des véhicules commercialisés en Europe.

## Réduire les émissions de CO<sub>2</sub>

Le CO<sub>2</sub> est l'un des gaz dits à effet de serre mis en cause dans le processus de réchauffement climatique et pour lesquels la Commission européenne s'est engagée à réduire les émissions de 8 % entre 1990 et 2012 dans le cadre de l'accord de Kyoto. Les transports routiers qui contribuent à hauteur de 22 % aux émissions de CO<sub>2</sub> en Europe sont donc concernés au premier chef. C'est dans ce contexte que les principales associations de constructeurs automobiles, dont l'ACEA (Association des constructeurs européens d'automobiles), ont pris l'engagement de réduire les émissions moyennes des véhicules commercialisés en Europe à 140 g/km en 2008, ce qui correspond à une réduction de 25 % par rapport à 1995. Une réduction supplémentaire à un niveau de 120 g/km est également envisagée à échéance 2012. Dans le même temps, cependant, les consommateurs continueront à réclamer plus de sécurité et de confort, ce qui se traduira en général par une augmentation du poids des véhicules.

Pour réduire dans de telles proportions les émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules automobiles, les principales voies d'actions consistent soit à mettre en œuvre des carburants à faible teneur en carbone ou plus précisément des carburants dont le cycle de vie conduit à des émis-

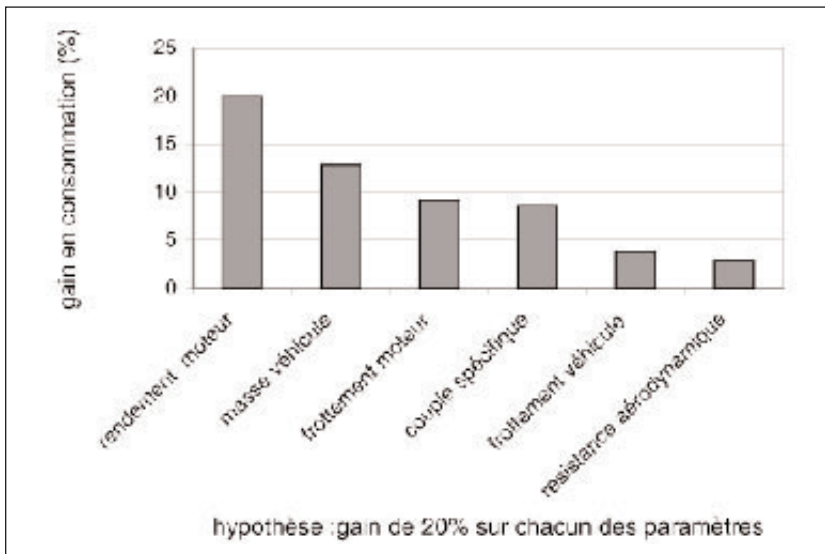


Fig. 5. - Principales voies de réduction de la consommation des véhicules automobiles : impact d'une amélioration de 20 % de chacun des principaux paramètres.

sions réduites de CO<sub>2</sub>, soit à réduire la consommation des véhicules, celle-ci étant, à carburant donné, proportionnelle aux émissions de CO<sub>2</sub>. Parmi les carburants à faible teneur en carbone on citera particulièrement le gaz naturel, dont la combustion, à même dégagement d'énergie, produit près de 23 % d'émissions de CO<sub>2</sub> en moins. Les biocarburants sont également intéressants dans la mesure où la croissance de la plante qui en est à l'origine consomme du CO<sub>2</sub> atmosphérique, ce qui conduit à un bilan

**Les transports routiers contribuent à hauteur de 22 % aux émissions de CO<sub>2</sub> en Europe**

net favorable : on retiendra notamment parmi les candidats possibles les esters méthyliques d'huile végétale, l'éthanol et le méthanol. Cependant, même si les biocarburants sont certainement amenés à jouer un rôle important dans le futur, ils ne peuvent guère prétendre à un taux de substitution des carburants d'origine pétrolière supérieur à quelques pour cents. La Commission européenne, dans une directive récente, envisage des taux de substitution de l'ordre de 6 % en 2010.

L'essentiel de la réduction de la consommation en carburant devra donc être réalisé via des progrès technologiques supplémentaires. La figure 5 illustre les différentes voies d'action qui peuvent être envisagées pour réduire la consommation d'un véhicule au cours du cycle d'homologation, plutôt caracté-

térisé par un parcours urbain et péri-urbain. On présente le gain de consommation (exprimé en pourcentage) généré par une amélioration de 20 % d'une caractéristique du véhicule. Le rendement du moteur est le paramètre dont l'action est la plus directe sur la consommation puisque toute amélioration dans ce domaine est directement répercutée sur la consommation en carburant. La réduction de la masse est

également très efficace mais cette voie d'action est limitée du fait de la

tendance à une augmentation des prestations de confort et de sécurité ainsi qu'à la demande croissante des consommateurs pour des véhicules de gamme supérieure, en général plus lourds. L'optimisation de la mise en œuvre des matériaux conventionnels et l'utilisation de nouveaux matériaux plus légers (caisse ou blocs moteur en aluminium, collecteur d'air en matière plastique, etc.) contribueront à l'allègement des véhicules. La réduction des frottements internes au moteur est une piste très intéressante puisqu'elle agit directement sur le rendement moteur lui-même. Cette piste a déjà été largement explorée au cours des dix dernières années et a d'ores et déjà permis aux moteurs de dernière génération de bénéficier de niveaux de consommation bien inférieurs à ceux de leur prédécesseurs. La réduction des

pertes par frottements a été rendue possible par une optimisation poussée de l'architecture moteur, incluant le dimensionnement de l'ensemble des pièces en mouvement et la conception du circuit de lubrification. La mise en œuvre de matériaux à faible coefficient de friction et de lubrifiants à basse viscosité contribuent également à ce résultat.

Longtemps considérée comme un moyen d'accroître les performances pures du moteur, l'augmentation du couple spécifique (couple maximum rapporté au litre de cylindrée) est aujourd'hui considérée comme l'un des moyens les plus efficaces pour réduire la consommation. C'est qu'elle est, en réalité, associée à une réduction de la cylindrée du moteur avec un maintien des performances (procédé dit de « *downsizing* »). Cette solution permet de réduire considérablement les pertes internes au moteur avec un effet direct sur le rendement énergétique. La réduction du frottement de la chaîne de transmission de l'ensemble du véhicule a un impact relativement faible du fait des excellents niveaux de rendement mécanique déjà atteints aujourd'hui et de la faible marge de manœuvre restante pour les faire progresser.

Les gains à attendre d'une réduction de la traînée aérodynamique du véhicule sont également relativement modestes du fait de la vitesse moyenne relativement faible du cycle d'homologation. Bien entendu, ce paramètre devient au contraire prépondérant pour les grandes vitesses observées sur autoroute (130 km/h).

En conclusion, la méthode la plus efficace et la plus directe pour réaliser une réduction significative de la consommation en carburant des véhicules automobiles passe par l'amélioration du Groupe Moto Propulseur (GMP) constitué du moteur et de sa transmission. Les deux voies de progrès principales sont : d'une part l'augmentation du rendement du moteur et d'autre part, l'augmentation du couple et de la puissance spécifique en vue d'une réduction de la cylindrée à mêmes performances.

L'évolution du système de transmission est également un moyen très efficace pour réduire la consommation. Les dif-



férents systèmes proposés (transmission continue, boîte automatique, systèmes hybrides...) sont tous basés sur un découplage plus ou moins poussé entre vitesse du véhicule et régime de rotation du moteur. Cela permet une plus grande optimisation du point de fonctionnement du moteur en fonction des conditions d'utilisation.

La figure 6 présente l'évolution des émissions moyennes de CO<sub>2</sub> des véhicules européens prévue selon les engagements pris par l'ACEA ainsi que celle constatée de 1996 à 2001. Elle montre que les engagements de réduction ont jusqu'à présent été tenus. Ces résultats sont en grande partie attribuables à la diésélisation croissante des véhicules neufs (près de 40 % en 2003) et notamment des plus lourds et à l'amélioration du rendement des moteurs essence et diesel. On note, en particulier, pour ce dernier, un passage rapide de la technologie de l'injection indirecte à l'injection directe (ce qui correspond à environ 15 % de gain en rendement) et la mise en œuvre du *downsizing* à l'aide de la turbosuralimentation. Cette tendance à la substitution des moteurs à essence par des moteurs diesel va certainement se poursuivre ; elle a cependant une limite liée d'une part au surcoût engendré par la technologie du moteur diesel, difficile à admettre pour les véhicules d'entrée de gamme et, d'autre part, à de possibles tensions sur l'approvisionnement en gazole si la demande s'accroît encore de manière très importante. La poursuite de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dues à l'automobile passe donc par de nouveaux progrès, notamment pour les moteurs à essence.

## Le véritable enjeu du moteur diesel

Le moteur diesel à injection directe présente, du fait de son principe de combustion, une consommation en carburant et des émissions de CO<sub>2</sub> inférieures d'environ 30 % à celle du moteur à essence de même performance. Cette propriété est d'autant plus intéressante qu'il possède encore un potentiel de progrès via l'approche « *downsizing* », c'est-à-dire la réduction de cylindrée

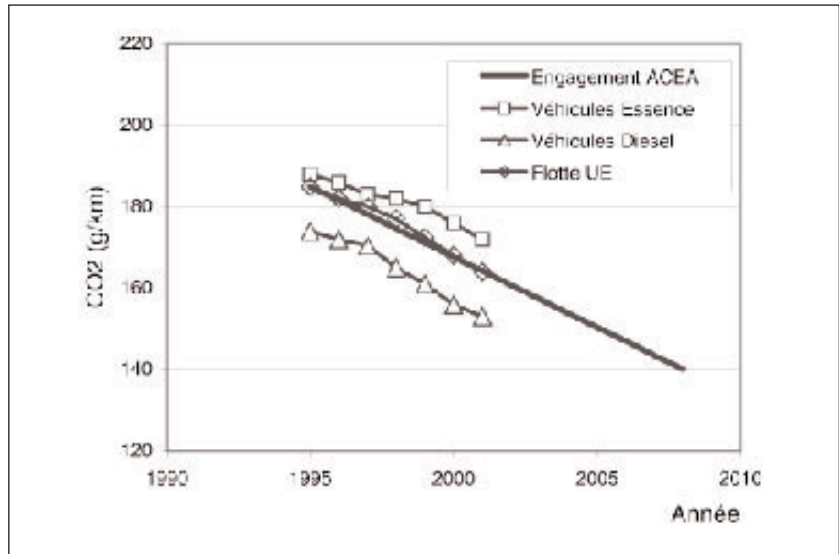


Fig. 6. - Evolution des émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules européens.

TABLEAU I  
Normes antipollution des automobiles européennes

		EURO III	EURO IV
g/km MVEG		2000	2005
Essence	CO	2,3	1
	HC	0,2	0,1
	NOx	0,15	0,08
Diesel	CO	0,64	0,5
	NOx	0,5	0,25
	HC+NOx	0,56	0,3
	PM	0,05	0,025

avec maintien des performances. Les principaux constructeurs européens ont ainsi mis sur le marché des familles de moteur diesel de modeste cylindrée (1,2 l à 1,5 l) mais dotées de performances spécifiques très élevées (couple spécifique de 150 Nm/l et puissance spécifique de 50 kW/l). Venant en remplacement de moteurs de cylindrée plus élevée, ils présentent par rapport à ceux-ci une réduction de consommation supplémentaire de 5 à 10 %. Cette évolution a été rendue possible par le développement de deux technologies clés : l'injection directe haute pression et la turbosuralimentation à géométrie variable. L'injection diesel à rampe commune permet d'atteindre d'ores et déjà des pressions maximales d'injection de 1 600 à 1 800 bars alors que la technique d'injecteur-pompe unitaire dépasse les 2 000 bars. La haute pression d'injection assure une introduction rapide du carburant à pleine charge tout en

réalisant une excellente pulvérisation. La turbosuralimentation récupère l'énergie disponible à l'échappement sur une turbine pour entraîner un compresseur, lequel introduit l'air d'admission sous pression. L'augmentation de la quantité d'air introduite permet de brûler plus de carburant et donc de produire plus d'énergie de combustion. Lorsque la turbine est équipée d'un système à géométrie variable, des ailettes orientables dévient le flux de gaz entrant. Leur orientation, pilotée par le calculateur moteur en fonction des conditions d'utilisation, permet une meilleure récupération de l'énergie échappement sur toute la gamme du régime moteur. Le moteur bénéficie ainsi d'un couple élevé à bas et haut régime.

Le véritable enjeu pour le futur du moteur diesel n'est pas relié au niveau de rendement qu'il devra atteindre puisqu'il est déjà excellent et que les évolutions attendues de l'injection et de

la turbosuralimentation vont conduire à de nouveaux progrès. Le véritable enjeu du moteur diesel tient plutôt dans sa capacité à respecter les futures normes d'émissions de polluants.

Les normes 2000 (EURO III) et de 2005 (EURO IV) (voir le tableau I) sont, en effet, différentes pour les véhicules équipés de moteur diesel et ceux munis de moteur à essence. Le moteur diesel, du fait de son mode de combustion avec excès d'air, ne peut pas bénéficier de la catalyse 3 voies pour la réduction des oxydes d'azote. Cette particularité explique que la limite réglementaire d'émission de NO<sub>x</sub> du moteur diesel soit moins sévère que celle du moteur à essence. Toutefois le traitement des émissions de NO<sub>x</sub> par le biais de l'optimisation de la combustion ne suffira plus pour atteindre les niveaux exigés par les futures normes en 2005 et au-delà. De même, les émissions de particules de suies devront faire l'objet d'un post-traitement à l'échappement de manière à satisfaire une réglementation toujours plus sévère.

C'est ainsi que de nombreuses technologies innovantes sont en préparation dans le but d'un traitement efficace et radical des émissions des moteurs diesel.

## Principales technologies innovantes

Les systèmes d'injection sont amenés à bénéficier de nouveaux progrès grâce, notamment, à la mise en œuvre de systèmes de commande piezo électrique. La grande précision de la commande permet de répartir la quantité injectée en de multiples injections (5 à 7 injections différentes) au cours du cycle thermodynamique. Cette technique permet, en modulant le processus de combustion, de réduire très fortement les émissions de CO, NO<sub>x</sub> et particules à la source. Ainsi la petite quantité injectée la première (l'injection pilote) a pour objectif la réduction du bruit et des NO<sub>x</sub>, celle injectée juste après l'injection principale, la réduction des émissions de suie. L'augmentation des pressions d'injection (1 800 à 2 000 bars) rendra possible une nouvelle réduction du diamètre des orifices d'in-

jection pour atteindre des dimensions de l'ordre de 100 μ. L'amélioration de la pulvérisation du carburant qui en est une conséquence, permet ainsi de réduire également les émissions de suies. Les équipementiers fabricants de systèmes d'injection travaillent aussi sur des injecteurs à orifice de section variable : des trous de petite section sont utilisés à faible charge pour assurer la qualité de la pulvérisation et on augmente la taille des orifices pour augmenter le débit massique de carburant à pleine charge.

Les chambres de combustion feront l'objet de nouvelles optimisations pour tirer tout le bénéfice des futurs équipements d'injection. La qualité de la combustion et les émissions de polluants sont en effet très sensibles à des détails géométriques de la chambre de combustion. La forme du piston doit donc être dessinée avec beaucoup de précision : les progrès considérables qui ont été réalisés ces dernières années dans la modélisation tridimensionnelle de la combustion bénéficieront aux bureaux d'études.

Les systèmes de post-traitement des gaz d'échappement font aujourd'hui l'objet de développements importants dans le but d'éliminer les NO<sub>x</sub> et les particules de suies émis par le moteur diesel.

Pour la réduction des émissions de NO<sub>x</sub>, deux technologies principales sont envisagées : la réduction sélective catalytique (SCR) et les pièges à NO<sub>x</sub>. La catalyse SCR dont l'application est surtout envisagée pour les poids lourds, nécessite d'installer un réservoir supplémentaire rempli d'un agent réducteur spécifique, en général de l'urée. L'urée est injecté dans la ligne d'échappement, en amont du catalyseur qui libère de l'ammoniac suite à une réaction d'hydrolyse. L'ammoniac est produit en proportion stoechiométrique pour réduire les NO<sub>x</sub>, afin que leur élimination soit quasi complète au sein du catalyseur SCR et qu'il ne subsiste plus d'ammoniac en sortie. Un capteur de NO<sub>x</sub> est donc nécessaire pour assurer le contrôle de l'injection d'urée. L'efficacité de ce système est assez importante : plus de 90 % des NO<sub>x</sub> sont

éliminés lorsque les gaz d'échappement sont situés dans la bonne fenêtre de température (200°C, 550°C). Un avantage important de ce dispositif est

### Le véritable enjeu du moteur diesel tient dans sa capacité à respecter les futures normes d'émissions de polluants

que son efficacité est indépendante du système de combustion, l'inconvénient principal réside dans

l'obligation d'embarquer un réservoir relativement volumineux d'urée.

Le piège à NO<sub>x</sub> fonctionne sur la base d'une alternance entre des périodes où le piège stocke les NO<sub>x</sub> sous forme de nitrates et des périodes pendant lesquelles les NO<sub>x</sub> sont désorbés pour être réduits sur un catalyseur spécifique de type 3 voies. La régénération du piège s'effectue dans des conditions très précises de température et de mélange air-carburant : les gaz d'échappement doivent être le résultat d'une combustion en excès de carburant par rapport à la stoechiométrie pour que la réduction de NO<sub>x</sub> puisse être réalisée. Le contrôle moteur joue ici un rôle fondamental puisqu'il doit assurer que la succession des périodes de réglage pauvre et riche par rapport à la stoechiométrie ne se traduise ni par une augmentation des émissions des autres polluants (HC, CO, suies) ni par des à-coups sur le couple moteur. Ce système nécessite également un bon contrôle de la température d'échappement pour assurer un piégeage optimum des NO<sub>x</sub>, entre 250°C et 550°C. Il exige également l'utilisation de carburant sans soufre (< 10 ppm), faute de quoi le piège se sature très rapidement de sulfates et devient inopérant. Dans les conditions optimales, l'élimination des NO<sub>x</sub> est supérieure à 90 % au prix d'une surconsommation moyenne de 2 à 3 %.

La deuxième grande technologie qui équipe déjà de nombreux véhicules de la gamme PSA Peugeot Citroën est le filtre à particules. L'efficacité de filtration de ces systèmes, en général basés sur des monolithes en céramique (carbure de silicium, cordierite...), est supérieure à 95 %. La principale difficulté réside dans la régénération du filtre après une période de chargement en suies : il s'agit de brûler la masse carbonée sans provoquer des contraintes thermiques excessives pour

le matériau. La régénération spontanée du filtre s'effectue à une température supérieure à 600°C, température rarement rencontrée dans les conditions d'utilisation courante des véhicules diesel. Toutes les technologies de filtre à particules pour application à l'automobile proposent donc des dispositifs d'aide à la régénération. Toutes utilisent le contrôle de l'injection directe du carburant pour réaliser les conditions optimales de température en amont du filtre afin de faciliter la régénération : l'augmentation de la température d'échappement est obtenue, notamment, via le décalage de l'injection ou une post injection en fin de détente.

L'ajout d'un additif catalytique dans le carburant permet d'abaisser la température de combustion des suies à environ 450°C. Les additifs les plus connus sont à base de cérium et de fer. Le système FAP de PSA Peugeot Citroën inclut ainsi un réservoir supplémentaire pour l'additif qui est automatiquement ajouté au carburant à chaque remplissage. L'avantage de cette approche réside dans sa fiabilité ; l'inconvénient principal est lié à l'accumulation de cendres dans le filtre ce qui oblige à une opération de maintenance pour nettoyage à 120 000 km. PSA a cependant récemment annoncé qu'il allait bientôt porter cette distance à 200 000 km.

Le filtre à régénération continue (CRT : *Continuously Regenerating Trap*) proposé notamment par la société Johnson Matthey est basé sur l'utilisation de NO<sub>2</sub> comme agent oxydant des suies et ne nécessite pas de procédure spécifique pour la régénération. Un catalyseur d'oxydation placé en amont du filtre transforme NO en NO<sub>2</sub> lequel est utilisé pour oxyder les suies dans le filtre au fur et à mesure de leur piégeage. L'inconvénient de ce système est qu'il nécessite une température d'entrée des gaz de l'ordre de 300°C ce qui n'est que rarement le cas lors de la circulation en ville. Par ailleurs, il est nécessaire de maintenir les émissions de base de NO suffisantes pour oxyder les suies, ce qui est une contrainte difficile à satisfaire. Enfin, la durée de régénération est relativement importante. Le filtre à régénération continue n'est donc guère envisagé pour l'automobile ; c'est en revanche un bon candidat pour les

applications aux poids lourds qui, du fait de leurs conditions d'utilisation (moteur fortement chargé), sont mieux adaptés. Ce filtre nécessite cependant également l'utilisation d'un carburant à faible teneur en soufre de manière à éviter la formation de particules de sulfates sur le catalyseur d'oxydation.

Le filtre imprégné sur les parois duquel un catalyseur d'oxydation a été déposé permet également d'abaisser la température de régénération. Ici encore l'augmentation de la température au niveau requis pour la régénération est obtenue via une action du contrôle moteur sur l'injection de carburant. Ce type de filtre est également très sensible à la teneur en soufre du carburant qui doit être limitée (< 50 ppm) pour éviter l'émission de particules de sulfates.

Le couplage du piège à NO<sub>x</sub> et du filtre à particules permettra l'élimination des deux polluants simultanément. Cependant, cela pose le problème du positionnement respectif des deux dispositifs dans la ligne d'échappement. Celui-ci doit rester compatible avec les conditions de température nécessaires aux deux systèmes pour assurer leur bon fonctionnement et une durée de vie suffisante. Par ailleurs, les deux dispositifs présentent des phases de régénération périodique (dénitratation et désulfatation pour le piège à NO<sub>x</sub>, combustion des suies pour le filtre) opérées selon des processus différents. Les stratégies de contrôle moteur doivent donc garantir un déroulement optimum de ces phases, en évitant les interactions néfastes, voire en recherchant les synergies. En général, on préférera positionner le piège à NO<sub>x</sub> en amont du filtre à particules de manière à maintenir des conditions de température suffisantes.

La solution « ultime » est la catalyse dite « 4 voies » qui élimine les 4 polluants (NO<sub>x</sub>, HC, CO, particules) simultanément. Il s'agit d'un filtre imprégné d'un revêtement de type piège à NO<sub>x</sub> qui réalise les fonctions de filtration des suies et de piégeage des NO<sub>x</sub> sur le même support. Toyota a annoncé la commercialisation prochaine de son système DPNR qui fonctionne selon ce principe. La difficulté de cette approche réside dans la nécessité de laisser les sites actifs, qui assurent le piégeage et

la réduction des NO<sub>x</sub>, accessibles à la surface du filtre et éviter qu'une couche trop importante de suie ne les recouvre. La porosité du matériau céramique est donc particulièrement étudiée afin de limiter ce phénomène. La conception du support céramique doit de même éviter un accroissement excessif de la perte de charge due à la présence du revêtement catalytique.

*De nouveaux procédés de combustion* sont également à l'étude dans le but de réduire considérablement les émissions de NO<sub>x</sub> et de suies à la source sans pénalité sur la consommation et les émissions de CO<sub>2</sub>. Le principe de ces nouveaux procédés de combustion est de rendre le mélange air-carburant beaucoup plus homogène dans la chambre de combustion. En abaissant la température de combustion et en évitant les zones trop riches en carburant, on réduit très fortement la formation des NO<sub>x</sub> et de suies. Alors que dans un moteur diesel traditionnel, la combustion est contrôlée par le taux d'injection, ici c'est principalement le processus d'auto-inflammation qui doit être maîtrisé.

A titre d'exemple, le procédé NADI (Narrow Angle Direct Injection) exploite un système de combustion constitué d'un injecteur dont l'angle du cône d'injection est très fermé (60° contre 150° pour les systèmes traditionnels) et une chambre de combustion adaptée dans le piston. Ce système permet d'injecter le carburant très tôt dans le cycle moteur sans risque de mouillage des parois du cylindre, évitant ainsi la dilution du carburant dans le lubrifiant. Cela permet d'augmenter le temps consacré à l'homogénéisation du mélange air-carburant avant que l'auto-inflammation ne se produise. Une adaptation du taux de compression et du taux de recyclage des gaz brûlés est utilisée pour assurer un calage quasi optimum de la combustion, en modulant la vitesse des réactions d'auto-inflammation. Le procédé NADI permet de réduire les émissions de NO<sub>x</sub> dans un rapport 50 à 100 et les émissions de particules de suies dans un rapport de 5 à 10 (figure 7). Les inconvénients de ce type d'approche résident dans une tendance à l'augmentation des émissions de bruit, de CO et d'hydrocarbures

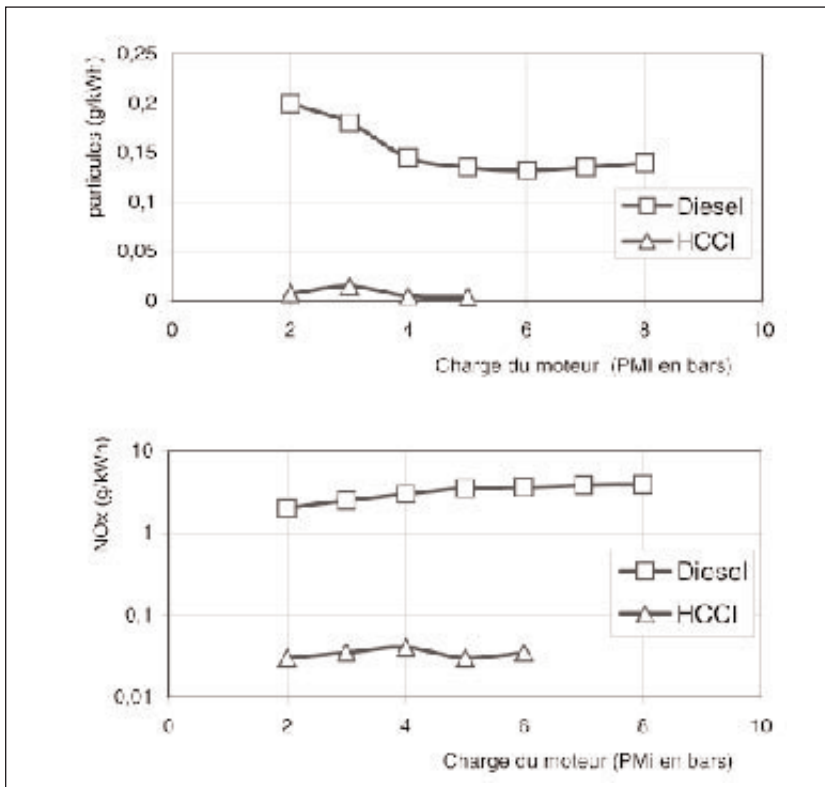


Fig. 7. - Emissions de particules et de NOx (échelle logarithmique). Comparaison entre diesel conventionnel et combustion HCCI (procédé NADI). 1 500 t/mn.

TABLEAU II  
Technologies envisagées pour la réduction de la consommation des moteurs  
(VVT : soupapes à calage variable ; VVL : soupapes à levée variable ;  
VCR : taux de compression variable).

(à masse et motorisation identique du véhicule)	Gain en consommation par rapport au moteur conventionnel actuel (essence, catalyse 3 voies)
<b>MOTEUR DIESEL</b>	
• Injection directe, turbo-suralimentation	30 %
<b>MOTEUR à ESSENCE</b>	
<i>Action sur la combustion</i>	
• Injection Directe (IDE), combustion stratifiée	10 à 15 %
• Combustion par Auto-inflammation (CAI)	10 à 15 %
<i>Distribution variable</i>	
• VVT, VVL admission + VVT échappement	7 à 10 %
• soupapes électromécaniques (« camless »)	10 à 13 %
<i>Suralimentation par turbo et réduction de cylindrée</i>	
• injection directe	10 à 15 %
• IDE + VVT, VVL admission	18 à 20 %
• IDE + VVT, VVL admission + VVT échappement	25 %
• IDE + VVT, VVL adm. + VVT échap. + VCR	30 %
<b>MOTEUR NON CONVENTIONNEL</b>	
• véhicule hybride (essence ou diesel)	20 à 50 %
• pile à combustible (basse température, avec ou sans reformeur embarqué)	20 à 50 %

imbrûlés. Ces problèmes sont résolus, là encore, par le recours à des stratégies d'injection multiple adaptées pour la

maîtrise du bruit et par l'utilisation d'un catalyseur d'oxydation pour l'élimination des HC et du CO. Une combinai-

son entre nouveau procédé de combustion réduisant les émissions à la source et système de post-traitement avancé devrait donc permettre au moteur diesel de respecter les futures réglementations anti-pollution malgré leur sévérité croissante.

## Les moteurs à essence : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et amélioration du rendement énergétique

Le système de post-traitement qui équipe les moteurs à essence est basé sur la catalyse 3 voies qui élimine simultanément le CO, les HC et les NO<sub>x</sub>. Ce dispositif qui a, depuis son introduction, bénéficié de nombreuses améliorations tant sur le plan de l'efficacité que sur celui de la durabilité est aujourd'hui particulièrement performant. A titre d'exemple, les véhicules qui ont été homologués en Californie comme étant conformes à la réglementation SULEV (*Super Ultra Low Emissions Vehicle*, avec une limite de NO<sub>x</sub> six fois plus faible que EURO IV) ne sont pas si éloignés des véhicules conventionnels. Sur ces moteurs à essence, le post-traitement des gaz d'échappement effectué par de la catalyse 3 voies est en général associé à un dispositif contrôlant l'aérodynamique interne et permettant d'améliorer la stabilité de combustion lors du démarrage à froid, d'un collecteur d'échappement isolé thermiquement pour assurer une montée en température plus rapide du catalyseur, d'une injection d'air à l'échappement pour accélérer l'amorçage du catalyseur à basse température, d'un piège à HC qui les restitue au catalyseur lorsque celui-ci est en température, d'un catalyseur d'amorçage placé au plus près de la soupape d'échappement et, enfin, d'un système de régulation de richesse très performant. Il est donc possible d'atteindre des niveaux d'émissions extrêmement bas avec le catalyseur 3 voies, surtout lorsqu'on garde en mémoire que l'on peut, en plus, envisager de le préchauffer électriquement avant le démarrage du moteur, solution déjà en série sur certains véhicules fortement motorisés.



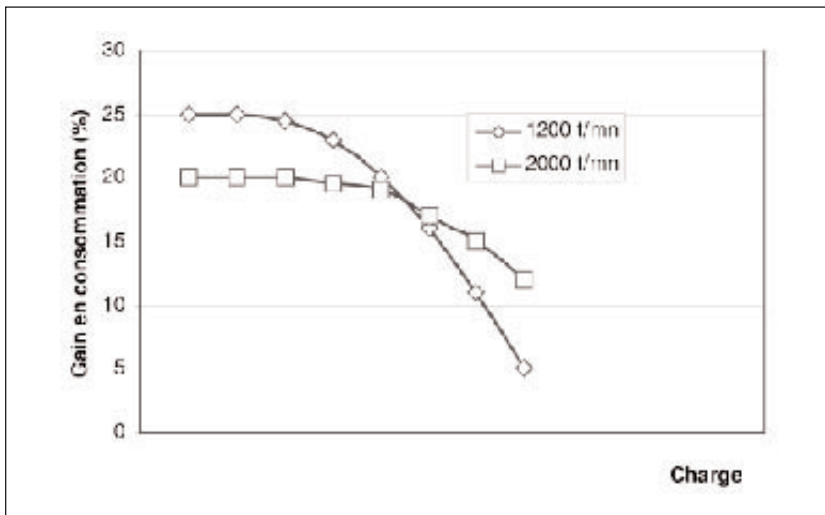


Fig. 8. - Gains en consommation par rapport à la technologie conventionnelle (stoéchiométrie) réalisés avec l'injection directe et la combustion stratifiée (cylindrée 1,2 l).

Ces différents dispositifs ont bien sûr un coût mais sont extrêmement efficaces. En réalité le véritable enjeu du moteur à essence c'est la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et par conséquent l'amélioration de son rendement énergétique.

Le tableau II présente les différentes technologies qui peuvent être envisagées pour réduire la consommation des moteurs à essence et donc réduire l'écart avec les moteurs diesel, estimé aujourd'hui à environ 30 %. La plupart des solutions proposées conduisent à une réduction des pertes liées à une réduction des pertes liées aux transferts de gaz et aux flux thermiques aux parois, dont l'effet est d'autant plus pénalisant aux faibles charges.

La première approche consiste à utiliser l'injection directe du carburant dans la chambre au lieu de l'injection indirecte, quant à elle effectuée en amont des soupapes d'admission afin de réaliser une combustion « stratifiée ». Le contrôle de l'injection permet de positionner un nuage riche en carburant au voisinage de la bougie d'allumage et de remplir le reste de la chambre avec de l'air. Ce type de combustion nécessite une optimisation poussée de la forme de la chambre et des caractéristiques de l'injection. La stratification de la combustion est réalisée via un calage d'injection positionné non loin du moment de l'allumage, au voisinage du point mort haut du piston. La figure 8 donne un exemple de réalisation sur un moteur de 1,2 l de cylindrée. Les gains de consommation sont ici de l'ordre de

20 % à faible charge. Sur le cycle d'homologation, les gains attendus du fait de la mise en œuvre de l'injection directe et de la combustion stratifiée sont de l'ordre de 10 à 15 %. L'inconvénient de ce procédé est qu'il n'est plus compatible avec la catalyse 3 voies du fait de son fonctionnement en mélange pauvre : il est donc nécessaire d'équiper la ligne d'échappement d'un piège à NO<sub>x</sub>, qui a tendance à dégrader le gain en consommation et nécessite une alimentation du moteur avec des carburants peu soufrés (< 10 ppm). En Europe, PSA Peugeot-Citroën et Volkswagen commercialisent déjà des véhicules équipés de ce type de moteur.

Les nouveaux procédés de combustion de type CAI (*Controlled Auto Ignition*) visent aux mêmes résultats que l'injection directe et combustion stratifiée, mais sans le recours à la technologie du piège à NO<sub>x</sub>. Selon cette approche, le mélange air-carburant est allumé par auto-inflammation et non plus par la bougie d'allumage. Cette auto-inflammation est provoquée par la rétention dans le cylindre de gaz chauds issus de la combustion lors du cycle précédent. Du fait de la dilution du mélange par une grande quantité de gaz résiduels, les pertes sont faibles et les émissions de NO<sub>x</sub> très fortement réduites, si bien

qu'un système de post-traitement n'est plus nécessaire. Ce procédé cible une réduction de la consommation de l'ordre de 10 à 15 %. Les travaux d'optimisation en cours visent à étendre le mode de fonctionnement CAI sur une plus grande zone d'utilisation du moteur et à contrôler les transitions CAI-combustion conventionnelle lors des phases transitoires.

Les systèmes de distribution variable constituent également une solution intéressante pour la réduction de la consommation des moteurs à essence. Ces dispositifs, pilotés par le calculateur électronique, peuvent faire varier le moment d'ouverture, voire la levée des soupapes d'admission et d'échappement et proposer des réglages optimaux en fonction des conditions d'utilisation du moteur. Les gains en consommation qui peuvent être obtenus (entre 7 et 13 %) dépendent des possibilités du système. Le système le plus simple, déjà largement utilisé se

**Le véritable enjeu du moteur à essence, c'est la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et l'amélioration de son rendement énergétique**

contente de faire varier le calage angulaire de l'arbre à cames qui commande les soupapes. Si on le combine à un système double-levée commandé par l'hydraulique, on peut réaliser un certain nombre de fonctions induisant une amélioration du rendement : l'augmentation du couple spécifique pour le *downsizing* du moteur, la réduction des pertes liées au transfert des gaz, l'augmentation de la vitesse de combustion, la déconnexion de cylindres (autre approche du *downsizing*), la variation du taux de compression. Le niveau supérieur est illustré par le système Valvetronic mis en série par BMW. Ce dispositif permet de faire varier la levée de la soupape en continu, ce qui conduit à une optimisation beaucoup plus poussée des réglages et à des gains en consommation relativement élevés (10 % de gain sont revendiqués par BMW). Enfin, la plupart des constructeurs étudient la possibilité d'implanter des systèmes, à base de commandes hydrauliques ou électromagnétiques, qui seraient totalement flexibles. Dans ce cas, les levées de soupape deviennent indépendantes d'un arbre à cames

et peuvent se produire à n'importe quel moment du cycle. Ces solutions, malheureusement relativement complexes et coûteuses, ouvrent de nouvelles voies d'optimisation originales qui présentent un potentiel de gain en consommation supplémentaire.

Cependant, l'approche du *downsizing* basée sur la suralimentation par turbo-compresseur et la réduction de la cylindrée avec maintien des performances est probablement la plus prometteuse sur le plan du potentiel de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Cette approche peut être déclinée à différents niveaux de performance en fonction de la technologie qu'on est prêt à lui adjoindre. Par exemple, l'utilisation de l'injection directe de carburant présente un intérêt considérable. En effet, lorsque le carburant est introduit dans le cylindre indépendamment de l'air, il est possible d'utiliser le flux d'air entrant pour balayer vers l'échappement les gaz brûlés chauds issus du cycle précédent et encore présents dans le cylindre. Ces gaz chauds sont, en effet, très néfastes à la combustion à plein charge puisqu'ils ont tendance à générer du cliquetis, combustion anormale qui peut conduire à la destruction du moteur. Sur les moteurs suralimentés, on a tendance à combattre l'apparition du cliquetis par la diminution du taux de compression du moteur, au détriment du rendement. C'est ce qui est généralement pratiqué dans le cas de l'injection indirecte ; ceci explique que les gains attendus soient relativement limités dans ce dernier cas : de l'ordre de 10 à 15 % de réduction de la consommation.

L'injection directe apporte plusieurs avantages. Tout d'abord, lorsqu'elle est associée à un système de distribution variable à l'admission, il est possible de balayer les gaz brûlés et, donc, d'augmenter le couple spécifique à bas régime. En injectant le carburant directement dans la chambre, on profite également du refroidissement provoqué par la vaporisation du carburant : si le jet d'injection est correctement positionné, les frigories sont communiquées directement à l'air admis et non aux parois du moteur. Cet effet de refroidissement

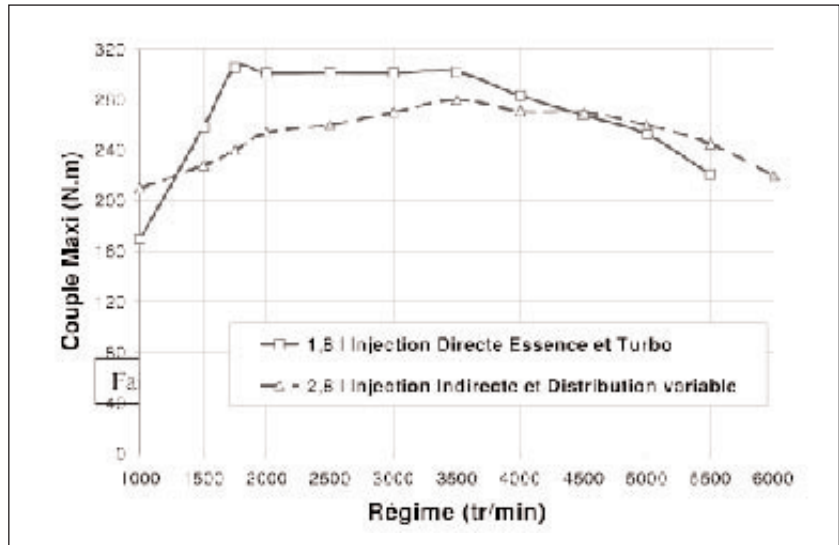


Fig. 9. - Exemple de *downsizing* : avec des performances maximales proches, le moteur de 1,8 l de cylindrée permet, en utilisation urbaine, une réduction de consommation

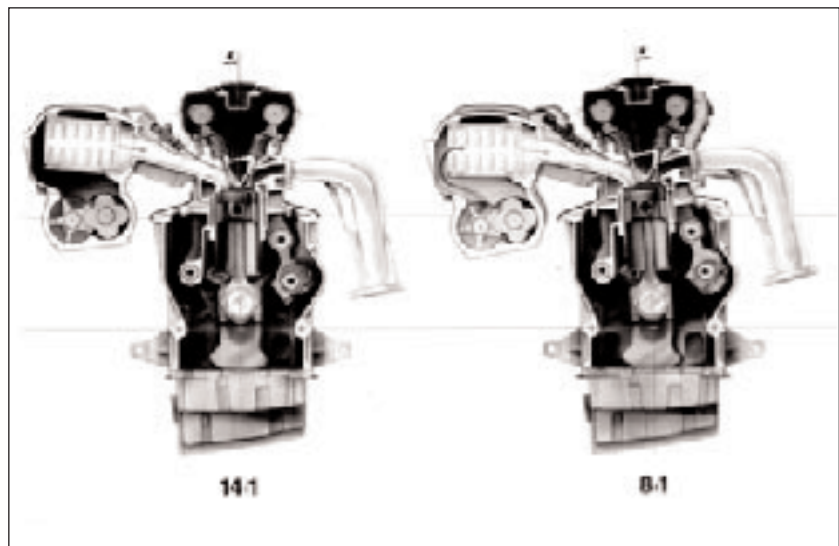


Fig. 10. - Moteur à taux de compression variable SAAB. Le taux peut varier de 8:1 à 14:1 par inclinaison de la culasse sur le bloc moteur.

permet d'augmenter la résistance du moteur au cliquetis et la densité de l'air admis. Ces deux effets ont des conséquences très positives sur le couple spécifique du moteur. Le gain en consommation peut atteindre 25 % lorsqu'on équipe également le moteur d'une distribution variable à l'échappement. Un *downsizing* de l'ordre de 50 %, c'est à dire le maintien des performances du moteur malgré une cylindrée deux fois plus faible, est alors possible.

La figure 9 présente, à titre d'exemple de réalisation concrète, une comparaison entre deux moteurs à essence, l'un à aspiration naturelle de 2,8 l de

cylindrée, l'autre suralimenté de 1,8 l de cylindrée. On constate que le plus petit moteur atteint un couple comparable au moteur de 2,8 l, sauf peut être à très bas et très haut régime. Toutefois, l'écart de consommation en carburant sur le cycle d'homologation est de l'ordre de 18 % au bénéfice du plus petit moteur.

Un dernier raffinement est envisageable pour atteindre des niveaux de réduction de consommation de l'ordre de 30 % : il s'agit de mettre en œuvre, en combinaison avec l'approche précédente, un système à taux de compression variable. Ce dernier dispositif, quoique relativement lourd

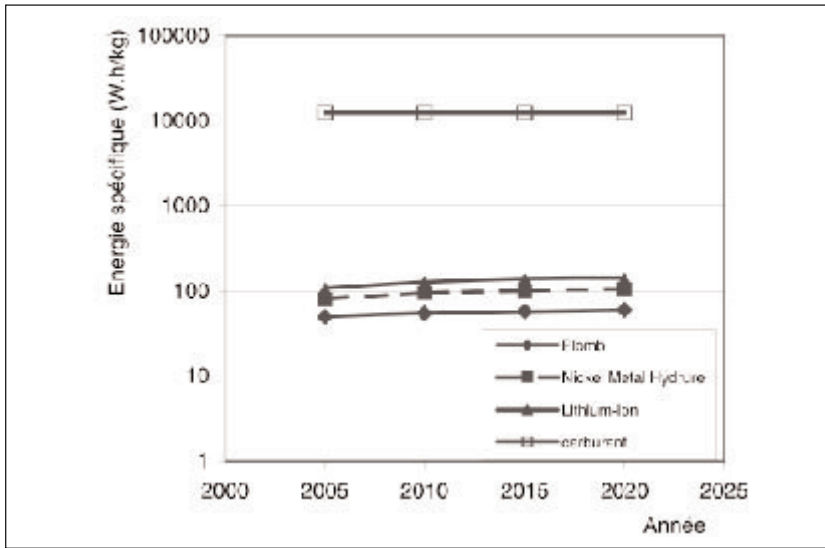


Fig. 11. - Evolution prévisible de l'énergie spécifique des batteries électriques : comparaison avec celle d'un carburant d'origine pétrolière.

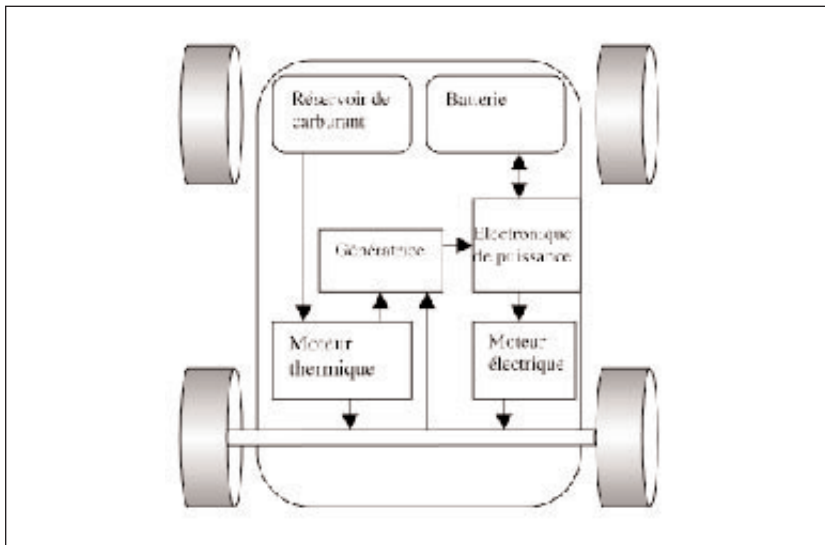


Fig. 12. - Schéma de principe d'un véhicule hybride thermique-électrique.

et complexe, permet de ne limiter le taux de compression qu'à pleine charge pour éviter le cliquetis et de maintenir des taux de compression élevés à faible charge pour conserver un bon rendement.

La figure 10 présente un exemple de disposition permettant la mise en œuvre du taux de compression variable ; il s'agit du système proposé par SAAB qui permet de faire varier le taux de compression de 14:1 à 8:1 en fonction des besoins. Selon ce dispositif le volume de la chambre de combustion est modifié, par déplacement de la culasse par rapport au piston à l'aide d'une articulation entre bloc moteur et culasse.

## Les motorisations non conventionnelles

Par motorisation non conventionnelle, on entend soit une remise en cause profonde de l'architecture des systèmes de motorisation actuels, soit des moteurs ou systèmes de conversion d'énergie dédiés à un nouveau type de combustible tels que gaz naturel, éthanol ou hydrogène. Parmi les motorisations non conventionnelles ayant atteint un stade de développement suffisamment avancé pour être,

soit déjà sur le marché, soit envisagées pour une production en série avant 2020, on peut citer :

- les véhicules électriques ;
- les véhicules hybrides ;
- les véhicules à pile à combustible ;
- les véhicules avec moteurs à combustion interne dédiés au gaz naturel ou à l'hydrogène.

Les *véhicules électriques* ont suscité beaucoup d'intérêt dans le passé du fait de leurs avantages intrinsèques. Ils ont fait l'objet d'incitations gouvernementales assez importantes (véhicules ZEV en Californie). Des opérations de démonstrations de grande ampleur ont été menées et pourtant ce type de véhicule n'a jamais rencontré le succès attendu et la diffusion de ces véhicules est restée confidentielle. Bien sûr, les avantages de cette motorisation sont bien réels : pas d'émissions de polluant, des émissions sonores très réduites, un couple au décollage élevé, ce qui rend la conduite urbaine particulièrement agréable. Cependant, le problème principal tient aux performances limitées et à l'autonomie beaucoup trop réduite de ces véhicules, typiquement 100 à 200 km en usage réel. Cette situation est essentiellement due aux performances encore insuffisantes des batteries utilisées pour le stockage de l'énergie électrique à bord du véhicule. Les batteries de puissance doivent, en effet, posséder un certain nombre d'attributs pour convenir à une application embarquée. La densité de puissance exprimée en kW/kg doit être suffisamment élevée pour procurer des capacités d'accélération suffisantes et pour être capable de récupérer l'énergie au freinage. La densité d'énergie (exprimée en W.h/kg) doit être importante pour garantir une autonomie suffisante sans entraîner une surcharge excessive. Enfin, le nombre de cycles charge-décharge que pourra supporter la batterie est un paramètre important pour sa durée

de vie en utilisation réelle.

Malgré la mise en œuvre de nouvelles technologies, au côté des batteries au plomb, telles que les batteries Nickel-Cadmium, Nickel métal hydrure ou Lithium-ion, et malgré les progrès déjà

réalisés ou à venir, il n'y a guère d'espoir que la densité d'énergie des batteries augmente considérablement. La figure 11 présente les évolutions prévisibles entre 2005 et 2020. La densité d'énergie d'une batterie haute performance typiquement de 120 Wh/kg restera très inférieure à celle d'un carburant liquide, environ 12 500 Wh/kg.

Le *véhicule hybride* équipé d'un système de motorisation mixte thermique/électrique permet de combler partiellement cette lacune. Un schéma de principe de ce type est présenté en figure 12. Celui-ci est équipé de deux systèmes de stockage d'énergie, d'une part un réservoir de carburant et d'autre part une batterie. Il possède également deux types de motorisation thermique et électrique. Dans la configuration la plus flexible, tout type de combinaisons est théoriquement possible, le moteur thermique pouvant être utilisé aussi bien pour la recharge des batteries que pour l'entraînement du véhicule et le moteur électrique pouvant être utilisé aussi bien pour mouvoir le véhicule que pour récupérer son énergie de freinage. L'hybridation conduit donc à de nombreuses voies d'optimisation de l'utilisation de l'énergie à bord du véhicule. Le véhicule hybride permet de réduire considérablement les émissions de polluants (un fonctionnement tout électrique est même possible en ville par exemple) ainsi que la consommation (réduction de 40 à 50 % envisageable). Il faut cependant être conscient que l'hybridation conduit à embarquer deux systèmes de motorisation distincts, un système de stockage de l'énergie électrique (batteries ou supercapacités) et de l'électronique de puissance. Cela correspond à un surcoût important et à une augmentation non négligeable du poids du véhicule. Cependant, l'intérêt de l'hybridation c'est également sa grande modularité ce qui permet d'envisager toute une gamme de possibilités entre l'hybridation légère, à coût et performance modérés jusqu'à l'hybridation totale, à performances et coût élevés. Suivant le niveau de technologie mise en œuvre, on pourra par exemple appliquer les stratégies indiquées dans

TABLEAU III

Fonctions	Puissance du moteur électrique	Gain en émissions de CO <sub>2</sub>
1 - Arrêt du moteur thermique au ralenti	2 kW	8 %
2 - 1 + récupération de l'énergie de freinage	3 kW	13 %
3 - 1 + 2 + downsizing du moteur thermique et assistance en accélération	10 kW	30 %
4 - 1 + 2 + 3 hybride total série/parallèle	30 kW	45 %

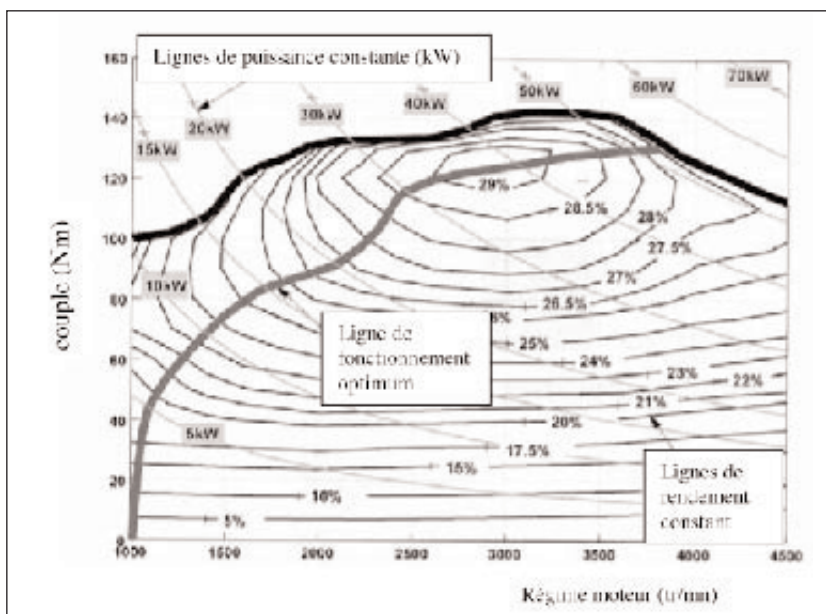


Fig. 13. - Ligne de fonctionnement optimum du système de motorisation d'un véhicule hybride.

le tableau III (pour un véhicule de 1 300 kg environ).

Dans le cas de la stratégie d'hybridation totale série/parallèle, il est possible d'optimiser à chaque instant le point d'utilisation du moteur en fonction de la demande en puissance. Le couple peut être totalement découplé du régime et les phases de recharge des batteries mises en œuvre sur la base d'une stratégie de rendement maximum. Le contrôle moteur fait en sorte que le point de fonctionnement du moteur soit toujours localisé sur une ligne optimale (voir la figure 13). Les *piles à combustible* font l'objet de nombreux développements. Elles présentent de nombreux avantages de principe tels que des émissions de polluants très faibles et potentiellement des émissions de CO<sub>2</sub> également modestes, à condition que la production d'hydro-

gène ne soit pas elle-même génératrice d'émissions trop importantes.

Compte tenu de la complexité engendrée par la création d'un réseau de distribution d'hydrogène, des difficultés technologiques qui subsistent (stockage de l'hydrogène à bord du véhicule) et du coût aujourd'hui excessif de cette approche, la plupart des analystes considèrent qu'une production en série significative de véhicules équipés de piles à combustible est peu probable avant 2015-2020.

En tout état de cause, les enjeux restent importants avant que la pile à combustible puisse être envisagée à grande échelle en particulier. On devra particulièrement :

- réduire le coût des composants qui est aujourd'hui d'un ordre de grandeur trop élevé ; une réduction importante de la masse de platine déposée sur la mem-



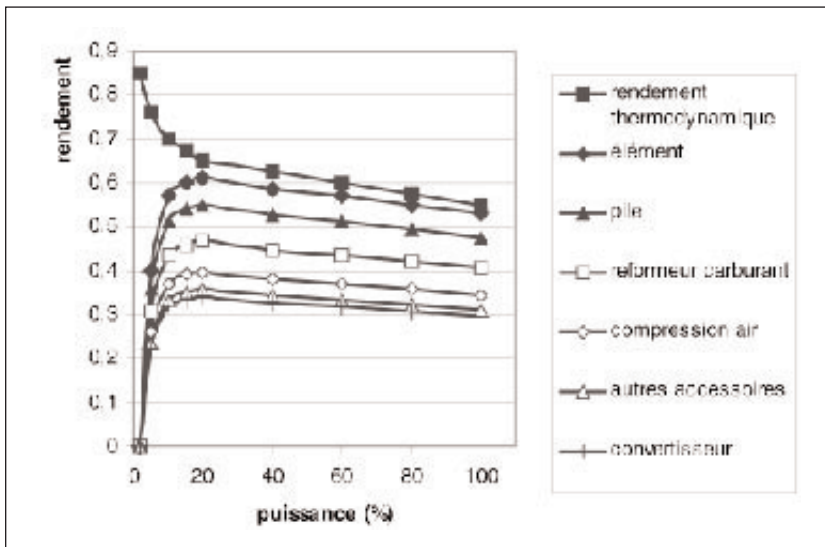


Fig. 14. - Cascade des rendements d'une pile à combustible à membrane polymère.

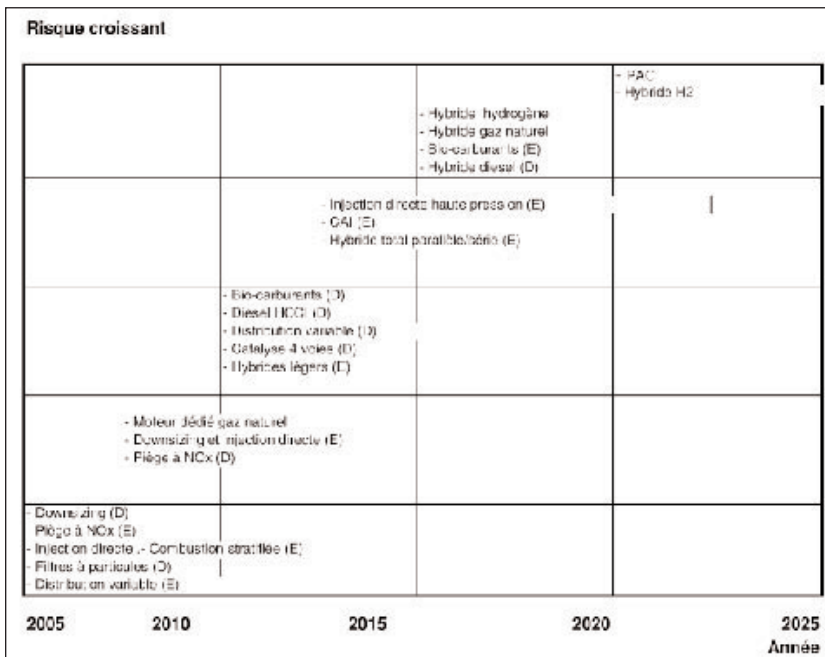


Fig. 15. - Echéances prévisibles pour une application significative des technologies futures dans la motorisation automobile.

brane de la pile doit notamment être réalisée ;  
 - améliorer le rendement effectif des piles à membrane polymère qui est aujourd'hui assez éloigné du rendement théorique du fait, notamment, de la consommation des auxiliaires (voir la figure 14) ;  
 - définir un moyen de stockage de l'hydrogène à bord du véhicule qui soit à la fois économique et sûr ;  
 - définir et réaliser les infrastructures pour la distribution de l'hydrogène ;

- définir les mesures et règles de sécurité relative à la conception des véhicules et à la distribution de l'hydrogène ;  
 - définir une ou des filières énergétiques pour la production de l'hydrogène à partir d'énergie primaire, les critères de ces filières étant le coût de production, la disponibilité de la source d'énergie primaire, l'efficacité énergétique et le cycle de vie caractérisé par de faibles émissions de CO<sub>2</sub>.  
 Si un réseau de distribution d'hydrogène devient disponible on peut égale-

ment envisager son utilisation dans des moteurs à combustion interne dédiés à l'hydrogène. Les problèmes spécifiques qui se posent alors sont proches de ceux des moteurs à essence avec l'inconvénient d'une baisse importante du couple et de la puissance spécifique (-40 à 50 %) par rapport à l'essence, qui doivent être rétablis par la turbosuralimentation. Cette solution est souvent envisagée comme une étape vers la pile à combustible puisqu'elle permet de commencer la validation de toute la filière hydrogène sans la nécessité de produire un grand nombre de véhicules équipés de ce convertisseur.

Le moteur dédié au gaz naturel est également considéré comme un très bon candidat du fait notamment des qualités spécifiques de ce carburant. Les réserves de gaz naturel sont en effet très importantes et estimées à 200 ans de production dans les conditions actuelles. Les gisements sont assez bien répartis sur la planète ce qui limite les risques de rupture d'approvisionnement liés aux problèmes géopolitiques. Les émissions de polluants sont potentiellement plus faibles que celles des moteurs conventionnels, du fait des propriétés du gaz et leur toxicité et leur réactivité dans l'atmosphère sont moindres du fait de sa composition. Par ailleurs, le gaz naturel présente un indice d'octane assez élevé (de l'ordre de 130) ce qui permet d'en tirer parti par une augmentation du rendement du moteur. Enfin, du fait du faible rapport carbone sur hydrogène du méthane, les émissions de CO<sub>2</sub> sont fortement réduites par rapport aux carburants d'origine pétrolière (-23 % environ à même énergie produite). Au final, un moteur optimisé au gaz naturel peut prétendre à une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 5 à 10 % par rapport à un moteur diesel. Enfin, l'utilisation du gaz naturel dans un véhicule hybride est potentiellement l'une des solutions les plus performantes sur le plan des émissions de CO<sub>2</sub> analysées selon un bilan « du puits à la roue ». Sur le plan technologique, les moteurs à gaz naturel sont souvent issus de la conversion de moteurs diesel ou à essence existants puisque le marché relativement réduit de ce type de motorisation n'incite pas à des développe-

ments lourds spécifiques. Dans le cas d'une optimisation du moteur pour une utilisation du gaz naturel, deux approches sont envisagées. La première est basée sur un *downsizing* poussé associé à la turbosuralimentation ; l'étape suivante, encore plus performante, consiste à intégrer un tel moteur dans un véhicule hybride. La mise en série de telles motorisations avancées est certainement amenée à se développer tant pour des applications à des véhicules légers que pour les bus et les véhicules urbains dans le cadre d'incitations de l'Union européenne en vue de concourir aux objectifs de Kyoto. La Commission européenne a en effet publié une directive visant à une substitution progressive des carburants conventionnels par du gaz naturel (2 % en 2010, 5 % en 2015, 10 % en 2020).

## Les échéances d'apparition

La plupart des technologies qui ont été décrites plus haut nécessiteront encore de nombreux développements avant de pouvoir être appliquées à une production en grande série. Il n'est pas de tout exclu que des difficultés imprévues ne conduisent finalement au constat d'une impossibilité d'application. Ces difficultés peuvent être de toutes natures : économique, technique, commerciale, etc. L'échéancier qui est présenté à la figure 15 se concentre sur les technologies susceptibles d'apporter un gain significatif en matière d'émissions de polluants et de CO<sub>2</sub> et qui, *a priori*, sont susceptibles d'une application assez large. A titre indicatif, les échéances d'apparition sont définies comme étant les dates à partir desquelles on estime qu'une technologie particulière pourrait être amenée à équiper une part significative du parc automobile européen (typiquement 1 %). On prend également l'hypothèse que passé ce stade, la technologie considérée devrait continuer à se répandre ; c'est notamment le cas des technologies génériques dont les avantages sont cumulables. En ordonnée, on a fait figurer une échelle de l'estimation du risque d'échec de la technologie considérée. D'une manière générale, plus les développements

nécessaires sont importants, plus l'échéance sera lointaine et plus le risque d'échec sera grand.

L'échéance de 2005 concerne des procédés qui sont déjà appliqués aujourd'hui et dont on pense qu'ils possèdent un potentiel suffisamment intéressant pour connaître un développement important au cours des prochaines années. A contrario, l'incertitude sur le déploiement en 2020 de la pile à combustible est très grande compte tenu notamment du nombre de problèmes à résoudre d'ici là.

D'une manière générale, les aspects réglementaires et fiscaux joueront un rôle considérable dans l'accélération ou le ralentissement de cet échéancier. En particulier, la suite de

l'accord entre l'ACEA et la Commission européenne sur les limites d'émissions de CO<sub>2</sub> après 2008 ou encore l'ampleur des incitations en faveur du gaz naturel, des biocarburants ou de l'hydrogène sera fondamentale pour entretenir les efforts de R & D et amener les différentes innovations envisagées sur le marché. Sur ce plan, et étant donné le risque élevé de certaines options notamment les plus lointaines, il paraît important de respecter un équilibre entre solutions de transition et solutions à long terme et de maintenir un effort de développement sur différentes solutions concurrentes ou complémentaires.

S'il est difficile de prédire ce qui sera la situation de l'énergie et du transport en 2020, on peut d'ores et déjà prévoir qu'il régnera une certaine diversité tant pour les sources d'énergie que pour les systèmes de motorisation. C'est cette diversité qu'il nous faut commencer à préparer et à gérer.

## Vers une diversité des sources d'énergie et des systèmes de motorisation

L'automobile, moyen de transport individuel par excellence, occupe une

place très importante dans les économies modernes. C'est qu'il n'existe pas de véritable alternative à cet objet technologique qui occupe désormais une place à part dans l'inconscient collectif et qui suscite des sentiments mélangés de type passion-rejet de la part de nos concitoyens. Il paraît d'ores et déjà acquis que le développement de l'automobile va se poursuivre même si tout le monde convient que les modes de transport alternatifs doivent également avoir leur place et être le plus possible encouragés.

Dans ces conditions, il est important que l'expansion de l'automobile et des transports routiers en général, s'inscrive dans un contexte de développement durable et que des efforts

importants soient consentis pour réduire, voire faire disparaître certaines des nuisances induites.

En premier lieu, la réduction des émissions de polluants atmosphériques dus aux transports routiers reste une priorité importante. Il est donc probable que les normes antipollution seront de plus en plus sévères au cours des prochaines années. En parallèle, leur contribution aux émissions de gaz à effet de serre devra être réduite pour rendre compatible une croissance continue, qui accompagne le développement mondial, avec les engagements de la communauté internationale vers une réduction importante des émissions de gaz tenus pour responsables du changement climatique.

Dans ce mouvement qui vise à contrôler les conditions du développement de l'automobile, il paraît certain que la technologie sera amenée à jouer un rôle considérable, comme cela a déjà été le cas au cours des décennies précédentes.

Des innovations techniques importantes sont en préparation pour maîtriser les émissions de polluants des moteurs diesel modernes, qui sont par ailleurs très performants sur le plan des émissions de CO<sub>2</sub>. Les émissions de NO<sub>x</sub> et de suies seront réduites à la source, via la maîtrise de la combustion, rendue possible par l'introduction de systèmes d'injection

**Une directive de la Commission européenne vise à une substitution progressive des carburants conventionnels par du gaz naturel (2 % en 2010, 5 % en 2015, 10 % en 2020)**

que l'expansion de l'automobile et des transports routiers en général, s'inscrive dans un contexte de développement durable et que des efforts

très performants, pilotés par un contrôle électronique sophistiqué. Les systèmes de post-traitement comme les filtres à particules et les pièges à NO<sub>x</sub> complètent le dispositif qui devrait conférer au moteur diesel des émissions polluantes ultra basses.

Le moteur à essence qui est pénalisé par un handicap d'environ 30 % de surconsommation par rapport au moteur diesel va, lui aussi, bénéficier d'un grand nombre d'innovations technologiques. L'une des voies les plus prometteuses est le *downsizing* ou réduction de la cylindrée avec maintien des performances. La combinaison de différentes technologies au premier lieu desquelles, la turbosuralimentation, l'injection directe d'essence et la distri-

bution variable permettront de réduire la consommation d'environ 25 % par rapport aux technologies conventionnelles d'aujourd'hui.

L'introduction des systèmes hybrides thermiques/électriques permettra également, au prix cependant d'une complexité et d'un coût économique accrus, de faire progresser le rendement du groupe motopropulseur qu'il soit basé sur un moteur essence ou diesel. L'intérêt de la motorisation hybride est qu'elle peut être mise en œuvre de manière progressive, partant de solutions relativement simples et peu coûteuses et évoluant vers plus de complexité et un coût plus élevé, mais associé à des réductions de consommation beaucoup plus importantes.

Il est probable que le futur se caractérise par une diversité des sources d'énergie et des systèmes de motorisation. Dans ce contexte, les moteurs dédiés à des carburants alternatifs comme le gaz naturel ou les biocarburants pourront trouver une place significative du fait de leur excellent potentiel en matière d'émissions nettes de CO<sub>2</sub>.

Les piles à combustible sont également envisagées, mais à une échéance assez lointaine, puisqu'il faudra d'abord traiter l'ensemble des problèmes posés par la mise en œuvre d'une filière énergétique totalement nouvelle. La production d'hydrogène sans émissions connexes de CO<sub>2</sub> est notamment l'un des enjeux les plus importants. ●