

Les technologies bas CO₂ des véhicules routiers

La nécessaire poursuite de la réduction des émissions de CO₂ des véhicules routiers — véhicules légers, utilitaires et poids lourds — sera obtenue en agissant sur l'ensemble des bras de levier disponibles, à la fois au niveau du moteur mais aussi sur le véhicule lui-même. Les moteurs devraient continuer de diminuer en cylindrée, ce *downsizing* s'accompagnant d'une optimisation et d'une complexification accrue de la boucle d'air (systèmes de suralimentation et de recirculation des gaz d'échappement). Les frottements internes au moteur seront réduits et, de par les évolutions des composants (systèmes d'injection, distribution, post-traitement), le recours à des modes de combustion plus efficaces, à basse température ou très dilués, pourrait à terme concerner la production en grande série. Une meilleure gestion de l'énergie électrique à bord, associée à une électrification grandissante des véhicules depuis l'alimentation des auxiliaires jusqu'à l'électrification de la motorisation elle-même (hybridation), représente une voie d'amélioration très conséquente. La substitution progressive d'une partie de l'essence et du gazole par du Gaz naturel pour véhicule (GNV) sera également très bénéfique sur le plan des émissions de CO₂, d'autant plus dans le cas où la conception du moteur thermique aura été faite en tenant compte des caractéristiques du GNV (moteur avec un rapport volumétrique élevé). En ce qui concerne le véhicule, l'utilisation de pneumatiques de type « éco » permettant de réduire la résistance à l'avancement devrait se généraliser, et l'on devrait assister à une diminution de la masse des véhicules légers, facteur clé pour réduire la consommation de carburant.

Objectifs de réduction des émissions de CO₂ des véhicules routiers

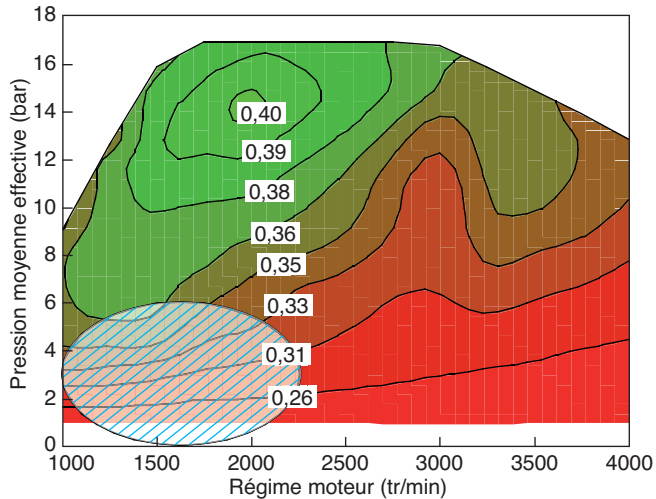
Les moteurs thermiques (à allumage commandé ou par compression) alimentés par des carburants hydrocarbonés sont très largement utilisés dans le domaine du transport routier, et cette situation devrait perdurer. Cette position prédominante depuis plus d'un siècle est le résultat d'évolutions technologiques continues dans de nombreux domaines, allant de l'adéquation entre le moteur et le carburant jusqu'à la dépollution des gaz d'échappement, en passant bien sûr par l'optimisation de la combustion.

Néanmoins, le rendement des moteurs à combustion interne ne dépasse pas en moyenne 20 % dans le cadre d'une utilisation en milieu urbain. En effet, en usage réel, les moteurs sont sollicités tantôt à forte charge, c'est-à-dire dans leur zone de bon rendement — jusqu'à 36 % pour un moteur essence et jusqu'à 45 % pour un moteur diesel de poids lourd — tantôt à faible charge, dans des zones de faible rendement, sans parler du ralenti où le rendement devient nul (figure 1).

Le contexte normatif concernant les émissions de polluants réglementés, et à terme les émissions de CO₂ en réponse aux engagements pris par les constructeurs européens, impose de trouver des solutions pérennes

Les technologies bas CO₂ des véhicules routiers

Fig. 1 - Carte de rendement typique d'un moteur diesel pour véhicule léger (zone hachurée : sollicitation du moteur pour un fonctionnement du véhicule en milieu urbain)



Source : IFP

sans affecter ni l'amélioration de la sécurité des véhicules, ni leur agrément de conduite, ni leur confort.

Au-delà de l'aspect normatif, l'ensemble des utilisateurs de moyens de transports routiers aspire à une baisse de la consommation des véhicules. C'est particulièrement vrai pour les transporteurs, pour qui le carburant représente très souvent le deuxième poste de dépenses, après la masse salariale.

Dans ces conditions, l'ensemble des acteurs du transport est animé par l'objectif d'une diminution de la consommation de carburant des véhicules.

À noter que cet article n'aborde volontairement pas les sujets de l'hydrogène et de la pile à combustible, qui correspondent à des solutions à beaucoup plus long terme que l'ensemble des autres technologies évoquées dans les paragraphes qui suivent.

Les technologies bas CO₂ pour les véhicules particuliers

Technologies au niveau du véhicule

La consommation des véhicules est directement liée à la puissance délivrée par le moteur pour suivre la consigne de vitesse demandée par le conducteur. Cette puissance est utilisée pour contrebalancer trois forces résistantes :

- la force de frottement intégrant les efforts de roulage (pneu, roulement) et de transmission : au premier ordre, fonction de la vitesse véhicule,

- la force aérodynamique qui dépend de la surface frontale du véhicule, du coefficient de pénétration dans l'air (Cx) et du carré de la vitesse,
- la force d'inertie lors des phases d'accélération, due à l'inertie du véhicule et des pièces en rotation (principalement les roues et la transmission).

Dans un contexte où la sécurité des véhicules et leur confort sont en constante évolution, les technologies envisagées pour réduire la puissance demandée sont les suivantes.

La réduction des frottements des pneumatiques est un axe de développement majeur des équipementiers. On peut citer la commercialisation de pneus bas frottement avec des gains en consommation de l'ordre de 1 à 3 %. De nouveaux progrès dans ce domaine sont attendus avec un objectif de contribuer à la réduction des émissions de CO₂ des véhicules de 3 à 5 % à l'horizon 2012.

L'amélioration de l'aérodynamique des véhicules semble de plus en plus difficile en raison des exigences liées au design des véhicules, en rapport notamment avec l'attente des clients (par exemple, augmentation des surfaces frontales des véhicules du fait de la demande de monospaces). Elle est d'autant plus importante à forte vitesse : la réduction des vitesses de circulation contribue donc à limiter les pertes aérodynamiques. On peut signaler cependant que les nouveaux véhicules offrent des coefficients SCx — produit de la surface frontale S par le Cx — relativement bas.

La réduction de la masse du véhicule, par exemple par la réduction de leur taille. L'utilisation de matériaux à plus faibles densités (aluminium, composites) peut conduire à une amélioration significative des émissions de CO₂, ou du moins compenser l'augmentation de la masse moyenne des véhicules liée au confort (direction assistée, climatisation, vitres électriques, etc.) ou à la sécurité (*air bag*, renfort structurel, etc.). Après plusieurs décennies d'augmentation de la masse des véhicules liée au confort et à la sécurité, on commence à percevoir une inversion de tendance depuis quelques années (figure 2).

Technologies du groupe motopropulseur (GMP)

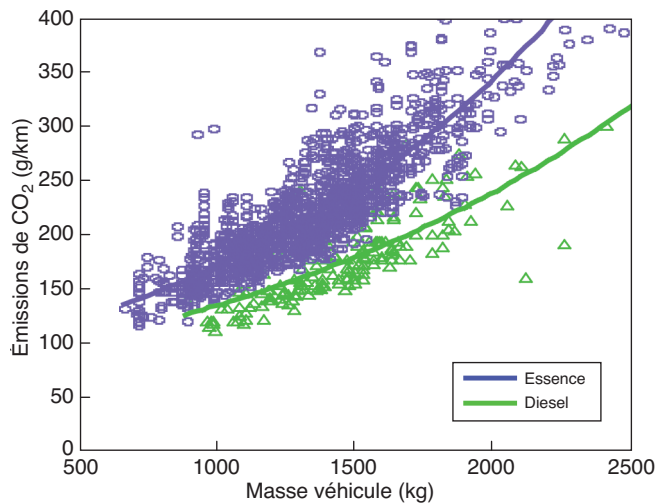
Les GMP conventionnels (essence et diesel)

Technologies communes essence et diesel

En dehors des améliorations au niveau de la combustion, le rendement des moteurs thermiques devrait continuer à s'améliorer, notamment grâce à des progrès dans les domaines suivants.

Les technologies bas CO₂ des véhicules routiers

Fig. 2 - Influence de la masse du véhicule sur les émissions de CO₂



Source : IFP

La réduction des frottements internes au GMP avec un effet très positif sur les utilisations urbaines des véhicules. Parmi les technologies à venir, on peut citer des formulations de lubrifiants avancés, une meilleure maîtrise de la thermique du moteur, des nouveaux traitements de surface au niveau de la distribution et du vilebrequin, une réduction des surfaces de frottement au niveau des pistons et une optimisation de la segmentation.

L'évolution de la transmission avec l'augmentation du nombre de rapports de boîte de vitesses ou l'allongement du dernier rapport, de manière à réduire le régime de rotation du moteur de telle sorte à solliciter les zones de fonctionnement plus optimales en termes de rendement. Ceci est associé à un pilotage précis de la transmission en fonction de l'utilisation du véhicule. Les boîtes automatiques ou manuelles robotisées se généralisent également pour permettre un meilleur confort de conduite associé à une gestion optimisée du GMP, et à un gain en consommation grâce à l'amélioration constante des rendements.

L'amélioration de la gestion des auxiliaires, notamment via leur électrification. Des pompes de direction assistée électrique sont déjà commercialisées, et des pompes à eau ou des pompes à huile électriques sont à l'étude.

L'amélioration de la gestion thermique du moteur pour réduire le temps de montée en température du moteur ou permettre à celui-ci de fonctionner avec une plus forte température du liquide de refroidissement, de manière à améliorer les frottements et le rendement de la combustion.

L'introduction de la fonction *stop&start* qui permet de couper le moteur quand le véhicule est arrêté (feu rouge, embouteillage, etc.). Sa généralisation dépend du rapport

coût/gain en émissions de CO₂, et son introduction pour les moteurs à allumage commandé et diesel est en cours.

L'amélioration de l'utilisation de l'énergie électrique avec l'introduction d'alternateurs pilotés, la gestion de la sollicitation de la batterie, ou le développement de batteries améliorées en termes de performances et durabilité.

Technologies spécifiques au GMP essence

Le moteur essence lorsqu'il fonctionne à la stœchiométrie est un excellent convertisseur d'énergie pour atteindre un faible niveau de pollution locale (normes d'émissions sur cycle NEDC¹) du fait d'un post-traitement maîtrisé des gaz d'échappement via la catalyse 3-voies. En revanche, il présente des émissions de CO₂ nettement supérieures à celles du moteur diesel, de l'ordre de 20 à 30 %. Ceci est dû principalement à son mode de fonctionnement par vannage de l'admission pour contrôler la charge entraînant des pertes par pompage, et à sa combustion à plus haute température entraînant des pertes thermiques. L'utilisation de rapport volumétrique de compression modéré pour éviter des combustions destructrices (cliquetis, *rumble*, etc.) est également source de moins bon rendement. Les technologies à venir permettant d'améliorer le fonctionnement du moteur essence sont les suivantes :

- la réduction de la cylindrée, couplée à la suralimentation,
- la distribution variable,
- la désactivation de cylindre,
- la combustion stratifiée,
- l'introduction de nouveaux modes de combustion,
- la cylindrée et le taux de compression variables.

La réduction de la cylindrée, rendue possible par la suralimentation des moteurs essence pour augmenter couple et puissance spécifiques, présente le plus gros potentiel pour réduire les émissions de CO₂ avec des gains pouvant atteindre 25 %. Des gains de 10 % ont été démontrés avec des véhicules commercialisés (qui satisfont donc les normes d'émissions de polluants) équipés de moteur essence suralimenté en injection indirecte. De même, l'utilisation de moteur suralimenté en injection directe équipé de déphaseurs d'arbres à cames (VVT : *Variable Valve Timing*) permet des gains de 20 à 22 %. À plus long terme, la combinaison éventuelle avec des technologies permettant de faire varier le taux de compression permettrait des gains pouvant atteindre 25 à 30 %.

Des véhicules équipés de moteurs essence à combustion stratifiée ont été introduits sur le marché avec des gains en consommation sur cycle de l'ordre de 10 % et un

(1) New European Driving Cycle.

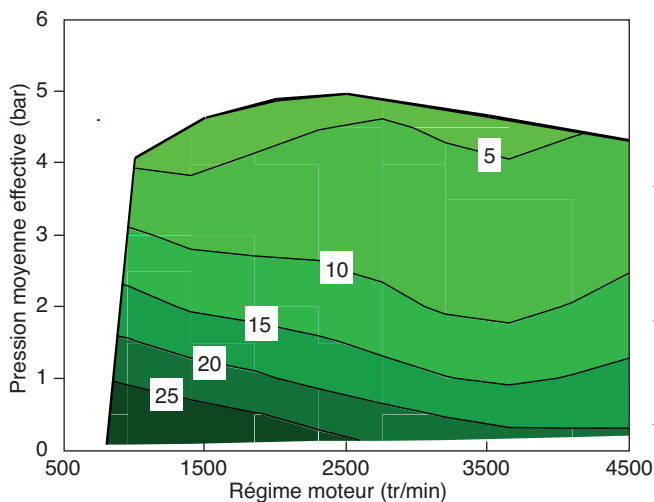
Les technologies bas CO₂ des véhicules routiers

potentiel de l'ordre de 15 %. Des progrès sont attendus dans les domaines clés de l'injection directe et des systèmes de post-traitement pour permettre de réduire le coût de ces systèmes et d'améliorer la consommation client, notamment sur des utilisations plus chargées du moteur.

L'introduction de nouveaux modes de combustion, comme le CAI² (auto-inflammation contrôlée du carburant), devrait permettre des gains en consommation de 10 à 20 % aux faibles charges (utilisation urbaine du véhicule) avec un fonctionnement en mélange pauvre sans avoir recours à des systèmes complexes de post-traitement des oxydes d'azote (NO_x), mais au prix d'une gestion plus complexe de la boucle d'air intégrant la nécessaire recirculation de très forts taux de gaz brûlés.

La déconnexion de cylindres, qui consiste à désactiver des cylindres à charges partielles, permet des gains de l'ordre de 10 à 15 %. Cette technologie est apparue il y a quelques années sur des gros moteurs (V12 et V8) et elle a été appliquée plus récemment sur moteur V6 de 3,5 l de cylindrée. Dans le futur, l'application pourrait être étendue aux moteurs 4 cylindres en ligne, représentant la grande majorité des applications européennes, sous réserve de trouver une solution pour pallier les problèmes de vibration et d'acyclismes liés à la désactivation (figure 3).

Fig. 3 - Potentiel de gain en consommation (en %) lié à la désactivation, à charge partielle, de 2 cylindres sur un moteur 4 cylindres



Source : IFP (concept OVaLID®)

La distribution variable présente différents niveaux de complexité : allant d'un simple déphaseur (VVT : *Variable Valve Timing*) à des systèmes sans arbre à cames de type électromagnétique ou électrohydraulique permettant d'ajuster chaque levée des soupapes en fonction de la demande moteur, en passant par des systèmes

[2] Controlled Auto Ignition.

mécaniques permettant une levée variable (VVL : *Variable Valve Lift*). L'utilisation de VVT autorise des gains de l'ordre de 3 à 5 %, notamment en favorisant la recirculation interne des gaz brûlés. En combinaison avec des systèmes VVL, des gains de 5 à 10 % sont possibles. Enfin, l'utilisation de systèmes plus complexes, sans arbre à cames, pourrait offrir des gains de 10 à 13 % et jusqu'à 18 %, avec de la déconnexion de cylindres.

Technologies spécifiques au GMP diesel

Comparé au moteur à allumage commandé, le moteur diesel possède un très bon rendement, notamment aux charges partielles, fréquemment utilisées sur véhicule. En revanche, son principe de fonctionnement conduit à des émissions de NO_x en milieu oxydant (mélange pauvre), ce qui rend difficile une réduction par catalyse à l'échappement. Le challenge consiste donc à baisser les émissions d'oxydes d'azote sans pénaliser le rendement, voire en l'améliorant. Les technologies qui permettront d'améliorer le compromis consommation/émissions de polluants du moteur diesel sont les suivantes :

- réduction de la cylindrée,
- suralimentation avancée,
- refroidissement des gaz d'échappement recirculés,
- introduction de nouveaux modes de combustion (LTC, HCCI, etc.),
- système d'injection avancé,
- système de distribution variable,
- systèmes de post-traitement des gaz d'échappement avancés.

Les systèmes d'injection à rampe commune très majoritairement utilisés ont largement contribué à améliorer la combustion des moteurs diesel. Les progrès réalisés et à venir dans le domaine des injections multiples et de l'augmentation des pressions d'injection améliorent le compromis entre consommation de carburant, émissions de polluants et bruit de combustion. Parmi les technologies à venir, on peut citer les injecteurs à contrôle direct de la levée de l'aiguille, qui permettent un étagement de la combustion grâce à une très bonne précision des quantités injectées. Combinée à de plus forts taux de gaz recirculés, cette technologie permet des gains en consommation de l'ordre de 4 % en ajustant le profil de la combustion à iso émissions de polluants.

L'utilisation de systèmes mécaniques de distribution variable est une voie intéressante pour réduire les émissions de HC et de CO et rendre ainsi possible l'utilisation de combustion basse température aux faibles charges (utilisation urbaine) avec un effet positif sur la consommation (3 à 4 %) et les émissions de NO_x. De plus, des gains

Les technologies bas CO₂ des véhicules routiers

supplémentaires à charges moyennes peuvent être obtenus en utilisant des systèmes plus complexes.

Les nouveaux modes de combustion bas-NOx comme la combustion basse température (LTC : *Low Temperature Combustion*), déjà appliqués à faibles charges, devraient voir leur champ d'application étendu avec pour objectif d'intégrer toute l'utilisation du moteur en milieu urbain. Pour cela, des progrès sont attendus dans le domaine du contrôle moteur (combustion bouclée) et de la boucle d'air (suralimentation double étage par exemple).

La gestion de la température des gaz admis avec notamment l'utilisation d'échangeurs de forte capacité pour refroidir les gaz brûlés recirculés ou l'air en aval du compresseur, ce qui permet d'améliorer le compromis NOx/consommation.

Des systèmes de suralimentation évolués, comme la suralimentation double étage récemment commercialisée sur des véhicules haut de gamme. Ces systèmes permettent des gains en rendement, grâce à un fonctionnement avec un plus fort excès favorable à la réduction des émissions brutes de polluants et à un calage de la combustion optimale en termes de rendement. La généralisation à l'ensemble de la gamme sera fonction du coût additionnel et des progrès à venir dans le rendement des turbocompresseurs adaptés aux petites cylindrées.

En fonction de leur efficacité, les nouveaux systèmes de post-traitement des oxydes d'azote peuvent permettre de déplacer le compromis NOx/consommation des moteurs et ainsi avoir un effet bénéfique sur les émissions de CO₂. Les développements en cours et les efficacités des systèmes de post-traitement complexes associant le traitement des NOx, des particules, du CO et des HC permettent de moins contraindre les réglages de la combustion en visant des rendements optimaux, l'augmentation des polluants engendrée étant prise en charge par le système de post-traitement.

Les alternatives et les renforts au moteur thermique classique

Parmi les motorisations non conventionnelles ayant atteint un stade de développement suffisamment avancé pour être commercialisées ou bien envisagées pour une production industrielle avant 2020 (et pouvant être largement diffusées dans les décennies suivantes), on peut citer les véhicules électriques et les véhicules hybrides.

La nécessaire diversification des sources énergétiques pour la production de carburants alternatifs (permettant une offre plus importante), conduit également à des couplages carburants/technologies pertinents. En parallèle des biocarburants de première et deuxième générations,

l'utilisation des carburants gazeux tels que par exemple le gaz naturel offre des perspectives très intéressantes.

Les véhicules électriques ont toujours suscité beaucoup d'intérêt du fait de leurs avantages intrinsèques : pas d'émission locale de polluants, des émissions sonores très réduites, un couple au démarrage élevé, ce qui rend la conduite urbaine particulièrement agréable. Ils ont fait l'objet de développements depuis plus d'un siècle (la première automobile créée par Ferdinand Porsche était un véhicule électrique !) et d'incitations gouvernementales importantes. Des opérations de démonstrations de grande ampleur ont été menées et pourtant ce type de véhicule n'a jamais rencontré le succès attendu : sa diffusion est restée confidentielle. 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. La diffusion de cette motorisation, limitée probablement, au moins dans un premier temps, à des applications très ciblées, est cependant annoncée par plusieurs constructeurs ; ceci passe néanmoins par le développement d'un réseau permettant la recharge des véhicules (bornes de recharge, stations équipées). Pour que la filière soit intéressante du point de vue du CO₂, cela passe également par une disponibilité d'électricité dont l'origine ne provient pas de la combustion de combustibles fossiles.

En revanche, le véhicule hybride permet de combler partiellement cette lacune. Celui-ci est équipé de deux systèmes de stockage d'énergie — un réservoir de carburant et une batterie — et de deux types de motorisation, thermique et électrique. Dans la configuration la plus flexible, tous types de combinaisons sont théoriquement possibles, 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.

On distingue plusieurs niveaux d'hybridation selon la puissance de la partie électrique. Le véhicule « micro hybride » dispose d'un moteur électrique d'environ 2 à 6 kW. Outre la fonction *stop&start* déjà évoquée précédemment, il est possible de récupérer une petite partie de l'énergie cinétique du véhicule au freinage. La catégorie *mild hybrid* concerne les véhicules équipés de motorisations électriques d'environ 10 à 15 kW. La capacité de récupération d'énergie au freinage est accrue et le moteur électrique est en mesure d'assister le moteur thermique pour la traction du véhicule. Avec des puissances électriques encore supérieures — 20 kW et

Les technologies bas CO₂ des véhicules routiers

au-delà — le véhicule *full hybrid* autorise, en plus, des déplacements du véhicule en mode tout électrique, sans recours au moteur thermique.

Les gains en consommation procurés par l'hybridation sont tributaires des conditions d'utilisation du véhicule. Ils sont maximisés lors des roulages urbains, et ce d'autant plus que le parcours est exigeant (nombreuses phases d'accélération/décélération et d'arrêts de courte durée). Certains usages types seraient particulièrement adaptés à l'utilisation de véhicules hybridés : distribution du courrier, livraison en zone urbaine, ramassage des ordures ménagères, etc.

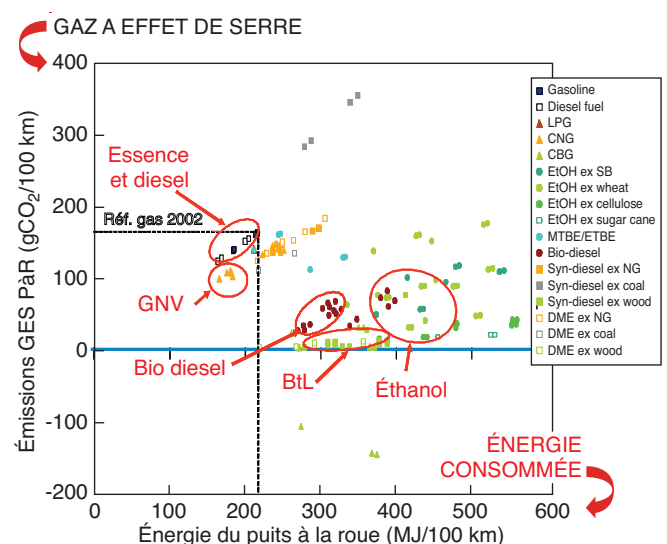
Si les *micro hybrid* et *mild hybrid* permettent en moyenne des gains en consommation de 5 à 20 % par rapport au véhicule essence offrant des performances similaires, le véhicule *full hybrid* peut, dans certains cas, réduire considérablement les émissions de polluants (fonctionnement tout électrique en ville par exemple) ainsi que la consommation : une réduction de 30 à 40 % est envisageable pour les véhicules essence. Pour les véhicules diesel, présentant à la base un meilleur rendement, le gain est de l'ordre de 20 à 30 %. Il faut cependant être conscient que l'hybridation conduit à un surcoût important, notamment à cause de la batterie. Les batteries font d'ailleurs l'objet de nombreux travaux de R&D visant en particulier à réduire le recours à des matériaux chers, à améliorer l'autonomie et à assurer un fonctionnement sûr.

Enfin le moteur dédié au gaz naturel est également considéré comme un très bon candidat, du fait notamment des qualités spécifiques de ce carburant. 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 de par sa composition (essentiellement du méthane). Par ailleurs, le gaz naturel présente un indice d'octane élevé (de l'ordre de 130), ce qui permet d'optimiser le rapport volumétrique conduisant à une augmentation du rendement thermodynamique du moteur. Cette caractéristique permet également d'éviter les nécessaires dégradations des avances à l'allumage rencontrées sur les moteurs essence, et donc les enrichissements qui en découlent pour les conditions de fonctionnement en pleine charge : il s'ensuit des gains importants par rapport à l'essence qui peuvent atteindre 10 % en condition de pleine charge.

Enfin, avec un faible rapport carbone sur hydrogène, les émissions de CO₂ du moteur sont fortement réduites par rapport aux carburants d'origine pétrolière (- 23 % environ à même énergie introduite). Au final, un moteur optimisé au gaz naturel peut prétendre à une réduction des émissions de CO₂ de l'ordre de 5 à 10 % par rapport à un

moteur diesel. En revanche, comme pour tout carburant gazeux, des problèmes d'autonomie peuvent se poser. L'utilisation du gaz naturel dans un véhicule hybride est potentiellement l'une des solutions les plus performantes, avec l'utilisation de biocarburants, sur le plan du bilan « du puits à la roue » des émissions de CO₂. Sur le plan technologique, les moteurs à gaz naturel sont souvent issus de l'adaptation de moteurs à essence existants : deux approches sont envisagées. La première est basée sur une approche du type *downsizing* poussée avec maintien des performances, grâce à la turbo suralimentation. L'étape suivante, encore plus performante, consiste à intégrer un tel moteur dans un véhicule hybride. La production en série de telles motorisations avancées est certainement amenée à se développer, tant pour des applications pour véhicules légers que pour les bus et les véhicules urbains (figure 4).

Fig. 4 - Émissions « du puits à la roue » des carburants alternatifs



Source: Étude EUCAR/JRC/CONCAWE, 2005

Les technologies bas CO₂ pour les poids lourds et les bus

Véhicules lourds pour le transport de marchandises et de passagers sur de longues distances

Dans ce secteur, le moteur diesel est exclusivement utilisé en raison de ses performances et des basses consommations spécifiques qu'il permet d'atteindre. Par rapport aux moteurs de véhicules légers, les moteurs de poids lourds sont majoritairement sollicités sur véhicule dans des conditions de forte charge, c'est-à-dire dans des conditions optimales en termes de rendement de combustion.

Les technologies bas CO₂ des véhicules routiers

Si l'on prend en compte les possibilités limitées de diminution de la masse des véhicules (leur vocation est justement de transporter de la masse) et leurs performances aérodynamiques, la marge de manœuvre en termes de réduction de consommation est plus limitée que pour les véhicules légers, d'autant plus que les conducteurs sont des professionnels formés à la conduite économique.

Dans un contexte normatif sévère et à l'instar du moteur diesel pour les véhicules légers (VL) et les véhicules utilitaires (VU), les développements en cours ou envisagés pour la partie moteur sont globalement similaires à ceux dédiés aux applications VL, et plus particulièrement :

- augmentation de la puissance spécifique,
- systèmes de suralimentation avancés,
- distribution variable,
- combustions bas-NOx,
- refroidissement poussé de la boucle d'air,
- systèmes d'injection hautes performances (pression, taux d'introduction),
- réduction des frottements internes.

Le recours à ces technologies contribue à l'amélioration de la combustion, à la réduction de la masse du GMP et à une amélioration globale du compromis émissions/bruit/efficacité énergétique. Bien qu'aucune norme ne soit pour l'instant envisagée pour la limitation des émissions de CO₂, les acteurs de ce secteur sont bien évidemment soucieux de réduire leur impact.

Probable évolution des technologies

Augmentation de la puissance spécifique : pour des cylindrées moyennes de 11-12 l, l'objectif est d'atteindre des puissances développées de l'ordre de 350 kW. La capacité des moteurs récents à supporter des pressions cylindre très élevées (240 bar) permet de limiter la déchéance de puissance qui résulte de la nécessaire augmentation de la recirculation des gaz brûlés (EGR) envisagée pour respecter les futures normes EURO VI. En effet, l'augmentation des pressions, admission nécessaire pour assurer une consommation d'air qui permette de maintenir les conditions idoines en termes de richesse, quel que soit le taux d'EGR, a pour effet direct d'augmenter la pression cylindre.

Systèmes de suralimentation avancés : ces dernières années, la technologie de turbine à géométrie variable a été largement utilisée pour augmenter les pressions de suralimentation à basse charge et bas régime, et permettre de mieux gérer le taux de recirculation de gaz brûlés si nécessaire. Comme signalé, la réduction drastique des émissions de NOx et de particules qu'impose la norme EURO VI va conduire à augmenter le niveau d'EGR

consommé par le moteur : on s'oriente donc vers des technologies de type turbocompresseur double étage, qui offrent de nombreuses possibilités d'architecture entre le circuit d'air et le circuit EGR, et permettent de réduire sensiblement la contre-pression échappement (qui impacte le rendement du moteur).

Comme pour les applications VL, le potentiel offert par la distribution variable est réel, notamment pour la réduction des émissions de HC et CO et pour augmenter les taux d'IGR (gaz brûlés internes) favorables dans certaines conditions aux combustions bas-NOx. Le recours à des cycles de type Atkinson ou Miller (avance ou retard de la fermeture des soupapes d'admission) permettant d'améliorer également, dans certaines conditions, les rendements, est envisagé. Mais la puissance consommée pour assurer le fonctionnement de ces systèmes reste pour l'instant un axe de progrès.

Les systèmes d'injection du type *Common-Rail* (CR) jouent un rôle prépondérant dans la maîtrise de combustions efficaces et peu polluantes. Ils constituent une offre alternative au système injecteur-pompe massivement utilisé. Grâce aux stratégies d'injections multiples du CR, le déroulement de la combustion est mieux contrôlé avec des bruits de combustion également mieux maîtrisés. Des gains importants en performance sont atteints avec l'augmentation des pressions d'injection, propices notamment à une meilleure pulvérisation des jets dont la forme peut être parfaitement adaptée à la géométrie de la chambre de combustion. Dans ce domaine, les équipementiers font preuve d'innovation en proposant des systèmes qui offrent toutes les latitudes de réglage recherchées qu'offre le CR, sans modifier les architectures des culasses conçues pour l'implantation de système injecteur-pompe.

Les travaux en cours sur les combustions bas-NOx ou basse-température (LTC) montrent tout le potentiel de cette approche, qui permet de pratiquement supprimer les émissions brutes de NOx et de particules à basses charges. Ces approches restent aujourd'hui compétitives par rapport à des solutions plus classiques basées sur un réglage du moteur proche de l'optimal en termes de rendement associé à un système de post-traitement DéNOx tel que la SCR (*Selective Catalytic Reduction*) utilisant l'urée comme réducteur.

Endurance, sécurité

Les systèmes développés pour les applications poids lourds sont contraints par des exigences en termes de durabilité très importantes au regard du nombre de kilomètres parcourus (500 000 km de durabilité ou sept ans imposés par la réglementation). On notera que le recours à des quantités massives d'EGR et à des boucles d'air complexes peut augmenter les risques de défaillances

Les technologies bas CO₂ des véhicules routiers

nécessitant des développements importants avant la mise sur le marché. L'éventualité d'augmenter la masse autorisée des véhicules devra faire l'objet d'une adaptation du circuit de freinage. Si la mise en circulation de véhicules à fort tonnage (par exemple 60 t) impose notamment de bien estimer l'impact sur l'infrastructure routière, elle se justifie en termes de bilan énergétique global : en effet, à grande échelle, le surcoût de consommation qu'engendre le transport d'une masse plus importante est compensé par la baisse du nombre de véhicules en circulation pour le même tonnage transporté. À l'échelle du transporteur, le coût du kilogramme transporté par kilomètre semble également plus favorable.

Autres véhicules

Pour les applications véhicules ne nécessitant pas de forte puissance (véhicule de livraison urbain par exemple), les moteurs utilisés ont des cylindrées de l'ordre de 4 à 6 l. Les attentes en termes de développements sont similaires à celles des plus gros moteurs avec cependant des spécificités liées aux plus nombreuses phases d'arrêt et de démarrage du moteur : la gestion des transitoires et du système de post-traitement s'apparente dans ce cas davantage à celle des moteurs de VL.

Pour les bus urbains de transport de public ou les bennes à ordures ménagères (BOM), les moteurs ont des cylindrées intermédiaires, de 8 à 9 l, développant

des puissances de 250 à 300 kW. Le mode de sollicitation basé sur des alternances entre un fonctionnement au ralenti et des conditions de pleine puissance nécessite des optimisations particulières de la boucle d'air.

Les prochaines évolutions pour le poids lourd

On retrouve les mêmes perspectives en poids lourds concernant l'électrification importante des moteurs et des véhicules. Si le mode thermique pur restera le mode utilisé pour les applications transport routier de marchandises (avec une électrification de certains organes et la mise en place de systèmes permettant la récupération des énergies de freinage), le niveau d'hybridation et d'électrification sera d'autant plus important à terme que l'application est urbaine et de faible puissance. Les véhicules tout électrique devraient en ce sens être proposés pour des missions urbaines de livraison.

En ce qui concerne le GNV pour une application poids lourds, il est aujourd'hui utilisé pour des applications BOM et bus urbains.

*Thierry Colliou, Bertrand Gatellier, Pierre Leduc,
Dominique Soleri & Richard Tilagone
thierry.colliou@ifp.fr - bertrand.gatellier@ifp.fr -
pierre.leduc@ifp.fr - dominique.soleri@ifp.fr &
richard.tilagone@ifp.fr
Manuscrit remis en décembre 2008*