

## MOTORISATION ET CARBURANTS DIESEL : UN LARGE SPECTRE D'ÉVOLUTIONS À VENIR

### CONTEXTE GÉNÉRAL ET THÉMATIQUES DE RECHERCHE

B. Walter, J.F. Gruson et G. Monnier

*Institut français du pétrole, IFP, 1-4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex - France*  
e-mail : [bruno.walter@ifp.fr](mailto:bruno.walter@ifp.fr) - [j-francois.gruson@ifp.fr](mailto:j-francois.gruson@ifp.fr) - [gaetan.monnier@ifp.fr](mailto:gaetan.monnier@ifp.fr)

**Résumé – Motorisation et carburants Diesel : un large spectre d'évolutions à venir – Contexte général et thématiques de recherche** – Ce premier article de ce numéro spécial OGST « Motorisation Diesel : un large spectre d'évolutions à venir » est un préambule offrant un éclairage sur le contexte mondial à la fois du point de vue production énergétique (les ressources : le pétrole et ses alternatives) et du point de vue consommation énergétique (les transports et les moteurs thermiques). Il présente ensuite la position actuelle du couple « Gazole/moteur Diesel » dans ce paysage et fait le point sur les thématiques de recherche abordées tout au long de ce numéro.

### UN CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE MONDIAL QUI COMMANDE L'AVENIR...

Avant de nous concentrer sur le thème principal de ce numéro, à savoir le couple « Gazole/moteur Diesel », il est utile de rappeler auparavant l'ensemble du contexte énergétique qui commande l'avenir.

Une des grandes interrogations de notre siècle est l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et leur remplacement pour permettre d'assurer à la fois le développement économique des pays industrialisés et celui de l'ensemble des pays de la planète, même si le modèle économique de ce développement reste probablement à inventer. En ligne de fond à cette question, deux défis majeurs vont devoir trouver des solutions durables et acceptables pour nos économies : le changement climatique, conséquence de la hausse continue des émissions de gaz à effet de serre, en particulier le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) d'une part, la sécurité de nos approvisionnements énergétiques d'autre part.

Au final, c'est bien la chaîne des rendements successifs de toutes les transformations qui va définir l'efficacité du système énergétique mondial, où moins de 40 % de l'énergie primaire consommée correspond finalement à de l'énergie utile, le reste étant en grande partie dissipé ou perdu sous forme de chaleur dans l'atmosphère notamment.

Deux secteurs concentrent l'essentiel de cette « perte » :

- la génération d'électricité ex-combustibles dont les rendements vont de 30 à 55 % pour les installations les plus performantes (cycle combiné gaz naturel);
- le transport où les rendements des moteurs à combustion interne ne dépassent pas en moyenne 20 %. Ce secteur est toujours en très fort développement, lié notamment à un fort besoin en transport de marchandises issu en particulier de la généralisation de la production suivant le principe du flux tendu et d'une mondialisation des activités avec des productions et stockages délocalisés des lieux de vente ou de consommation.

## LES TRANSPORTS ET LE PÉTROLE...

### ...une longue histoire commune...

Dans le passé, si l'on se concentre donc sur ce secteur des transports, le pétrole (et ses produits dérivés, essentiellement l'essence, le carburant-aviation – jet – et le carburant Diesel ou gazole moteur) est apparu en quelque sorte comme une énergie alternative au charbon et au bois, offrant la possibilité de nouveaux développements technologiques à moindre coût. Sa croissance rapide a permis cet essor sans précédent dans les transports. Aujourd'hui, le pétrole détient un quasi monopole sur le marché des transports puisqu'il représente plus de 95% des besoins énergétiques de ce secteur qui se répartit entre quatre modes principaux: la route, qui va peser pour environ 1,6 milliard de tonnes (plus de 75 % du total), le rail, l'aérien et le maritime (Source : d'après *Oil and Gas Information*, données 2005 – édition 2007 – AIE Agence Internationale de l'Énergie/OCDE Organisation de Coopération et de Développement Économique).

### ...avec un fort ancrage des moteurs thermiques...

Les moteurs thermiques (à allumage commandé ou par compression) alimentés par des carburants hydrocarbonés sont très largement majoritaires dans ce domaine clé du transport routier et cette situation devrait perdurer : il n'existe pour l'instant et sans doute à court et moyen terme aucun réel challenge à ce type de transformateur d'énergie. 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 la combustion.

On voit ainsi se dessiner un paysage dans lequel le couple « pétrole/moteur thermique » joue un rôle de première importance.

L'un des défis des années et des décennies à venir sera de trouver des alternatives à ce couple ou à l'un au moins de ses deux protagonistes, à savoir le pétrole.

### Les alternatives au pétrole...

Une première alternative tend à remplacer le pétrole et ses dérivés par des biocarburants qui offrent un bilan CO<sub>2</sub> du puits à la roue globalement favorable, même si certaines difficultés dans ces évaluations ne sont pas complètement levées (émissions de N<sub>2</sub>O Protoxyde d'azote, problématique du changement d'usage des terres, méthodologie d'allocation des Gaz à Effet de Serre – GES – aux coproduits, etc.). Aujourd'hui, les biocarburants correspondent, d'une part, à l'éthanol (provenant des plantes sucrières : betteraves, cannes à sucre ou des céréales riches en amidon telles blé, maïs) et son dérivé l'ETBE Ethyl Tertio Butyl Ether, obtenu par réaction de l'éthanol avec de l'Isobutène (produit en raffinerie ou dans la pétrochimie); d'autre part, le biodiesel qui est le résultat d'une trans-estérification des huiles végétales, essentiellement le colza en Europe. Ces deux familles sont appelées biocarburants de première génération. L'analyse du cycle de vie de cette famille de biocarburants fait apparaître des gains en émissions de CO<sub>2</sub> du puits à la roue par rapport à un carburant traditionnel allant de 30 à 87 % pour les essences et de 39 à 64 % pour les Diesel pour les produits utilisés purs (Source : « Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context », WTW Report, Version 2c, March 2007). Dans le futur, émergeront des biocarburants obtenus via de nouveaux procédés et de nouvelles matières premières : bois, déchets végétaux et plus généralement matière ligno-cellulosique, etc. que l'on nomme biocarburants de seconde génération présentant un bilan CO<sub>2</sub> du puits à la roue encore plus favorable avec jusqu'à 90 % et plus de réduction (Source : idem). Plusieurs filières sont envisagées : la voie biochimique ou enzymatique basse température ou un traitement thermique de biomasse (bois, paille, déchets, etc.). Les gaz de synthèse obtenus peuvent conduire à la production d'éthanol ou de biodiesel de synthèse via par exemple la synthèse Fischer-Tropsch. Pour le biodiesel, une autre technique d'obtention est possible : un hydrotraitement poussé d'huiles végétales (ou animales) suivi d'une isomérisation, donnant accès à une coupe paraffinique à fort potentiel (c'est que l'on rencontre aujourd'hui sous l'appellation NextBtl).

Les biocarburants, éthanol et ETBE ou biodiesel (de première génération ou de synthèse) peuvent être incorporés dans les carburants classiques à des taux d'introduction variables : en mélange banalisé à 5 % volume pour l'éthanol et le biodiesel aujourd'hui en Europe, avec une probable extension à 5,75 % en 2010 (7 % en France) puis 10 % en 2020 (projet de directives européennes), 10 % d'éthanol aux États-Unis, 22-25 % au Brésil, répondant à une volonté politique d'accroître la part des carburants ex-biomasse. Ces biocarburants peuvent être utilisés à des taux d'introduction plus élevés : en France, on citera des autobus ou des véhicules de flottes urbaines alimentés par un carburant contenant 70 % de gazole et 30 % de biodiesel, fonctionnant sous régime dérogatoire. Parallèlement à cette solution qui est mise en oeuvre sans aucune modification, il existe des moteurs Diesel adaptés pour fonctionner avec du biodiesel pur, moyennant quelques aménagements, concernant notamment les matériaux et la calibration du système d'injection. De même, il existe ce que l'on appelle communément les véhicules « FlexFuel », développés pour utiliser indifféremment plusieurs types de carburants à base d'essence et d'éthanol, comme l'E85 promu en Suède et plus récemment en France. Enfin signalons qu'outre ces performances en termes de CO<sub>2</sub>, les biocarburants utilisés sur des moteurs conventionnels permettent des réductions de 10 à 20 % des émissions de monoxyde de carbone (CO), hydrocarbures imbrûlés (HC), particules, sans en modifier le rendement. Les émissions d'aldéhydes des véhicules alimentés à l'éthanol devront cependant faire l'objet d'une plus grande attention.

Aujourd'hui, le développement de ces biocarburants liquides, éthanol et biodiesel, qui en pratique peuvent seuls permettre progressivement une substitution du pétrole dans les transports tout en continuant d'utiliser largement la logistique de transport et de distribution actuelle, fait l'objet de beaucoup d'attention tant de la part des médias que des pouvoirs politiques : la part des transports dans l'utilisation des énergies renouvelables est presque négligeable encore en 2006 au plan mondial, mais les projets se sont multipliés ces derniers mois avec comme objectifs d'essayer de réduire à la fois la dépendance au pétrole et les émissions de CO<sub>2</sub> des transports terrestres. Un autre enjeu très important est l'évaluation des ressources réellement mobilisables à moyen et long terme dans les différentes régions du Monde, aujourd'hui estimées autour de 20 % de la consommation mondiale.

Le contexte probablement durable des prix élevés pour le pétrole brut et le gaz naturel est évidemment un facteur favorable et nécessaire pour conforter cette tendance. Ce marché reste toutefois encore largement lié à des exonérations partielles ou totales des taxes pesant sur les carburants pétroliers ou à des mécanismes rendant obligatoire leur incorporation (remplacement du MTBE Methyl Tertio Butyl Ether aux États-Unis, Taxe Générale sur les Activités Polluantes – TGAP – en France...), mais aussi très sensible à des tensions sur les prix des matières premières agricoles, qui reflètent l'équilibre au plan mondial entre la production (aléas climatiques) et la demande qu'elle soit alimentaire ou énergétique.

### **Les alternatives et les renforts au moteur thermique classique...**

La seconde alternative est le remplacement du moteur thermique. 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 industrielle avant 2020 en pouvant être largement diffusées dans les décennies suivantes, on peut citer les véhicules électriques, les véhicules hybrides, les véhicules avec moteurs à combustion interne dédiés au gaz naturel.

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 décollage élevé, ce qui rend la conduite urbaine particulièrement agréable. Ils ont fait l'objet de développement depuis plus d'un siècle et d'incitations gouvernementales assez importantes, notamment récemment avec les véhicules ZEV Zero Emission Vehicle 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 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. Malgré la mise en œuvre de nouvelles technologies 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. Les évolutions prévisibles entre 2005 et 2020 suggèrent que la densité d'énergie d'une batterie haute performance, typiquement de 120 à 150 Wh/kg, restera très inférieure à celle d'un carburant liquide, environ 12 500 Wh/kg. Dès lors, la grande diffusion de cette motorisation passera par l'absence ou le prix prohibitif de combustible hydrocarboné et aussi par une disponibilité d'électricité dont l'origine ne provient pas de la combustion de carburant fossile. Ce dernier point est encore loin d'être d'actualité au niveau de la planète même si certains pays, comme la France avec le nucléaire ou l'Islande avec la géothermie, sont déjà très avancés.

En revanche, le **véhicule hybride** équipé d'un système de motorisation mixte thermique/électrique permet de combler partiellement cette lacune. 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, 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. 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 (une réduction de 30 à 40 % est envisageable).

Il faut cependant être conscient que l'hybridation conduit à embarquer deux systèmes de motorisations distincts ainsi qu'un système de stockage de l'énergie électrique (batteries ou super capacités) 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. C'est aussi la possibilité, notamment dans le cas d'une application dite « flexfuel », d'intégrer une proportion plus ou moins importante de carburants alternatifs.

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 même. 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, avec un faible rapport carbone sur hydrogène pour le méthane, principal constituant du gaz naturel, 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. 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 après l'utilisation de biocarburant 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 développements 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 une approche « downsizing » poussée, c'est-à-dire la réduction de cylindrée avec maintien des performances, associée à la turbo suralimentation ; 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).

Ainsi, pour se résumer, il existe de réels concurrents à ce couple « pétrole/moteur thermique », cependant ces alternatives ne seront pas à très court terme d'une grande aide pour assurer une transition énergétique dans un secteur où le pétrole détient toujours un quasi monopole. En effet, il ne serait pas réaliste de fixer une échéance précoce pour l'introduction massive de ces nouvelles approches compte tenu de la nécessaire modification des outils industriels et des échelles de temps associées.

Dans ce secteur clé du transport routier, le couple « pétrole/moteur thermique » est donc pour l'instant encore incontournable.

### Les couples carburant/moteur...

Ce couple « pétrole/moteur thermique » se décline en deux associations « carburant/moteur » possibles.

Le **supercarburant** (y compris l'essence ordinaire) est associé au **moteur à allumage commandé**. Ce carburant, dont la qualité « sans plomb » est pratiquement générale dans le monde, est quasiment dédié à la voiture particulière, à quelques véhicules utilitaires et aux motocycles. Il représente au plan mondial environ 950 Mt par an (Source : estimations *IFP* d'après *AIE Agence Internationale de l'Énergie* et *PEL/KBC*). Il reste encore le carburant de référence pour la voiture.

En revanche, en Europe en général et particulièrement en France, sa consommation baisse régulièrement : elle est ainsi passée en France de 15,7 Mt en 1995 à 10,3 Mt en 2006 (Source : *CPDP Comité Professionnel Du Pétrole -2006*).

Son mode de production en raffinerie est complexe et nécessite plusieurs procédés successifs ou parallèles à la suite de la distillation atmosphérique du pétrole brut pour à la fois répondre aux exigences de qualité (isomérisation, reforming, alkylation, hydrodésulfuration) et de quantité (conversion tel le craquage catalytique).

Le couple « **Gazole/moteur Diesel** » est utilisé également pour les voitures particulières (principalement en Europe et plus particulièrement en France), beaucoup plus largement pour les véhicules utilitaires et quasiment exclusivement pour les poids lourds, les autocars ou autobus urbains, et pour une partie des usages maritimes. Le carburant gazole représente au plan mondial environ 650 Mt (Source: estimations *IFP* d'après *AIE* et *PEL/KBC*) et reste également en croissance.

En France, la consommation est ainsi passée de 22,9 Mt en 1995 à 31,9 Mt en 2006, répartie à 42 % sur les automobiles, 21 % sur les véhicules utilitaires légers et 34 % sur les poids lourds (Source : *CPDP-2006*). Le développement concerne les trois secteurs, mais avec un poids très marqué ces dernières années du marché automobile (plus des deux tiers de la croissance) qui est aujourd'hui « diésélisé » à plus de 71 % (Source : *CCFA Comité des Constructeurs Français d'Automobiles, MTETM Direction Générale de la Mer et des Transports*). Il en est de même en Europe de l'Ouest où la part de moteurs Diesel pour les véhicules particuliers devrait atteindre 57 % en 2017 (Source : *Delphi Diesel market view*, mars 2007).

Le mode de production de ce carburant gazole est resté pendant de nombreuses années plus simple que celui du supercarburant, ne nécessitant qu'une simple hydrodésulfuration dans la majorité des cas. Aujourd'hui, les exigences sur la qualité et les quantités nécessitent des désulfurations beaucoup plus poussées, mais surtout le recours à l'hydrocraquage catalytique (fortement consommateur d'hydrogène).

Depuis le début des années 70, dans les pays de l'OCDE et jusqu'à aujourd'hui encore, en particulier avec le développement rapide de la pollution urbaine dans des pays comme l'Inde ou la Chine, l'enjeu essentiel pour les Pouvoirs publics aura été de renforcer la qualité des carburants pour permettre la réduction progressive des émissions de polluants (monoxyde de carbone, hydrocarbures imbrûlés, oxydes d'azote, particules et oxydes de soufre principalement). Au niveau européen, cela s'est traduit par l'établissement de directives, plusieurs fois amendées et dont une prochaine version est en cours d'élaboration.

Ces changements ont été régulièrement et sont encore l'objet de débats animés entre l'industrie automobile utilisatrice de ces carburants et l'industrie pétrolière en charge de les produire. Depuis le début de la décennie, la focalisation s'est faite en Europe sur la teneur en soufre de ces carburants, qui va être ramenée à moins de 10 ppm à partir de 2009.

Les qualités de ces deux carburants gazole et supercarburant vont cependant différer largement d'une région du monde à l'autre sur des caractéristiques clés comme l'indice d'octane ou de cétane, la teneur en soufre ou en aromatiques. En conséquence, les compositions et les procédés de raffinage installés dans les raffineries vont pouvoir également varier considérablement.

### **Le couple prédominant : « Gazole/moteur Diesel »**

Ce numéro spécial est consacré au couple « Gazole/moteur Diesel » qui apparaît au terme de cette analyse comme l'acteur clé dans ce domaine essentiel des transports.

Le moteur Diesel est aujourd'hui incontournable du fait de sa performance en terme de rendement et donc d'émissions de CO<sub>2</sub> inférieures d'environ 25 % à celle du moteur à essence traditionnel de même performance. Cette propriété est d'autant plus intéressante qu'il possède encore un potentiel de progrès via l'approche « downsizing ». Les principaux constructeurs européens ont ainsi mis sur le marché des familles de moteurs Diesel de cylindrée modeste (1,2 l à 1,5 l) mais dotées de performances spécifiques très élevées (couple spécifique de 150-180 Nm par litre de cylindrée et puissance spécifique de 50-60 kW par litre de cylindrée). 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 turbo suralimentation notamment à géométrie variable. Le moteur Diesel est aujourd'hui capable de performances équivalentes voire meilleures que le moteur à essence. Cette évolution est telle que la plupart des constructeurs mettent aujourd'hui l'accent sur l'excellent compromis qu'il offre entre ses performances (valeurs de puissance et de couple spécifiques de respectivement 75 kW/l et 200 Nm/l pour les moteurs les plus pointus) et ses faibles émissions de CO<sub>2</sub>. En effet, la plupart des véhicules Diesel de classe moyenne sont annoncés à moins de 140 g/km et l'on commence à voir apparaître des véhicules Diesel du segment B (« citadines » ou « sous-compactes ») autour de 100 g/km, valeur qui n'était réservée jusqu'à aujourd'hui qu'aux petits véhicules Diesel du segment A (minis).

Le véritable enjeu pour le futur du moteur Diesel n'est donc 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 turbo suralimentation 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.

En Europe, les normes 2005 (EURO IV) et les futures normes envisagées à l'horizon 2008-2010 (EURO V) sont 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 trois voies pour la réduction des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>). 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 afin de permettre le développement de cette motorisation qui présente le niveau de rendement le plus élevé. Toutefois, le traitement des émissions de NO<sub>x</sub> reste un point important et des actions par le biais de l'optimisation de la combustion et par celui de système de dépollution complexe de type DéNO<sub>x</sub> (déjà utilisé en poids lourds depuis 2006 en Europe) seront nécessaires pour aller vers le « fuel neutral », c'est-à-dire l'uniformisation des normes d'émissions entre moteur Diesel et moteur à essence. C'est d'ailleurs déjà le cas aux États-Unis pour la norme Tier 2 applicable entre 2004 et 2009. Les niveaux de suies requis par la norme Euro V en Europe devraient imposer l'implantation systématique de la technologie du filtre à particules de manière à satisfaire une réglementation toujours plus sévère.

L'introduction graduelle de nouveaux modes de combustion dits « à basse température » sur une plage de moins en moins restreinte de fonctionnement du moteur semble maintenant nécessaire pour satisfaire les normes à venir (EURO V et VI). 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'introduction du carburant par le système d'injection, ici c'est principalement le processus d'auto-inflammation qui doit être maîtrisé. Les inconvénients de ce type d'approche résident dans une tendance à l'augmentation des émissions de bruit, du monoxyde de carbone et d'hydrocarbures imbrûlés. Ces problèmes sont résolus par le recours à des stratégies d'injections multiples adaptées pour la maîtrise du bruit et par l'utilisation d'un catalyseur d'oxydation ou de technologies spécifiques type distribution variable (VVA) pour l'élimination des polluants (HC et CO) ou encore par la plus forte suralimentation. Une combinaison entre nouveaux procédés de combustion réduisant les émissions à la source et systèmes de post-traitement avancés devrait donc permettre au moteur Diesel de respecter les futures réglementations anti-pollution malgré leur sévérité croissante tout en conservant son leadership en terme de consommation et d'émission de CO<sub>2</sub>.

Au plan européen, les grands enjeux qui vont concerner le couple « Gazole/moteur Diesel » dans les années à venir peuvent être résumés comme suit :

- L'adaptation éventuellement requise des caractéristiques carburant à l'évolution des modes de combustion Diesel (combustion basse température, HCCI Homogeneous Charge Compression Ignition, LTC Low Temperature Combustion etc.) : quel indice de cétane, quelle volatilité...? Dans la maîtrise et le contrôle de la combustion de ces nouvelles technologies, le carburant aura un rôle majeur. En effet, il apparaît clairement qu'un carburant formulé pour disposer d'un parfait contrôle de la vaporisation, de la phase d'auto-inflammation et du déroulement de la combustion apportera une aide précieuse pour une récupération maximale d'énergie. On peut donc penser que le développement de ces nouveaux modes de combustion s'accompagnera d'une évolution plus marquée des carburants, avec notamment plus de poids donné aux phénomènes chimiques mis en jeu lors de la combustion, ce qui pourrait conduire à une révision de paramètres clés tels que, par exemple, la courbe de distillation ou l'indice de cétane, et à l'émergence de nouveaux critères plus propices à la représentation du déroulement de la combustion. Une orientation vers un carburant « plus technologique » pourra être envisagée.
- La capacité éventuelle à produire des quantités supplémentaires de gazole par le raffinage européen dans un contexte assez incertain aussi bien concernant la demande que l'offre.

Sur l'évolution de la demande elle-même, les questions sont nombreuses : poursuite de la diésélisation du parc véhicules particuliers ? Maintien d'une demande résiduelle en fuel domestique ? Basculement de consommation des soutes maritimes du « fuel lourd Haute Teneur en Soufre (HTS) ou Basse Teneur en Soufre (BTS) » vers un gazole marine ? Évolution de la fiscalité ?

Sur l'offre là aussi, les interrogations subsistent : quantité de biodiesel (1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> génération) ou de gazole de synthèse disponible, en particulier via les filières « Gas-To-Liquids (GTL) ou Biomass-To-Liquids (BTL) » ? Investissements dans des capacités de conversion dans un cadre où les émissions de CO<sub>2</sub> des raffineries européennes font l'objet de quotas nationaux ?

Enfin, cette incertitude est renforcée par la problématique européenne d'accroissement continue des excédents d'essence qui trouve aujourd'hui son débouché « naturel » essentiellement aux États-Unis et qui pourrait encore se renforcer avec le développement de l'incorporation d'éthanol, et de déficit croissant en distillats moyens (jet, gazole et/ou fuel domestique), aujourd'hui compensé par les importations en provenance de Russie.

Au plan mondial, la grande incertitude concerne une percée significative de la motorisation Diesel dans l'automobile dans des pays comme la Chine ou les États-Unis ce qui à terme bousculerait sensiblement les équilibres actuels du raffinage.

Ainsi, pour résumer, historiquement marqué par des interrogations voire des accusations en matière d'impact sur la santé publique en raison des émissions de particules, le moteur Diesel pourrait profiter des développements de technologies de dépollution (filtre à particules, SCR Selective Catalytic Reduction), des nouveaux modes de combustion (LTC, HCCI) et de la nécessité de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> pour accroître encore davantage sa suprématie.

## Les principales évolutions à venir pour le Diesel et les thèmes de recherche associés

Ce numéro spécial a pour but de faire le point sur les évolutions à venir pour le couple « Gazole/moteur Diesel » au travers des différents axes de recherche développés à l'IFP :

- Limitation de la pollution globale (CO<sub>2</sub>) au niveau carburant par l'utilisation de nouveaux biocarburants (notamment à travers la valorisation de la glycérine par la *Formulation d'un nouveau biocarburant Diesel à base de glycérol* et une étude portant sur le *biodiesel en Europe : tendances de marché et perspectives technologiques*) tout en maîtrisant l'impact de la formulation d'un carburant Diesel sur la combustion et en particulier sur les nouveaux modes de combustion (*Combustion en mode HCCI : impact de la formulation d'un carburant Diesel sur l'initiation et la combustion – Potentiel de l'ajout d'oléfine dans une base gazole*).
- Limitation de la pollution atmosphérique, par la compréhension de l'origine de ces émissions (émissions de HC en combustion bas NO<sub>x</sub> à travers une *Investigation des émissions d'hydrocarbures imbrûlés en combustion Diesel à basse température avec guidage paroi*), et de la corrélation entre la préparation du mélange et la combustion par le *Développement de techniques de diagnostic optique pour corrélérer le mélange et l'auto-inflammation en injection directe Diesel haute pression*). La modélisation et le calcul 3D complètent cette compréhension en permettant de prévoir les tendances qualitatives et quantitatives des émissions de polluants. Les deux articles *Modélisation 0D des émissions polluantes Diesel : développement et utilisation d'une méthodologie de couplage entre un modèle de combustion Diesel 0D et un modèle de polluants* et *Modélisation quantitativement prédictive des polluants : un pré-requis essentiel pour l'aide au développement des concepts HCCI et LTC Diesel* en sont une illustration. Enfin, la réduction des émissions polluantes passe également par l'évaluation du potentiel de nouvelles technologies comme par exemple la distribution variable (*Distribution variable et combustion Diesel homogène : quel intérêt ?*).
- Amélioration de l'agrément, des performances à charge partielle et pleine charge par des travaux de *Développement d'un contrôle moteur Diesel HCCI basé sur la simulation avec des performances temps réel*. En particulier, de nombreux travaux portent sur le *Contrôle expérimental des boucles d'air et d'egr d'un moteur HCCI suralimenté*. Enfin, la calibration moteur est un élément essentiel permettant de figer les réglages moteur dans ses différentes zones de fonctionnement. La *Comparaison de différentes méthodes de calibration moteur fondées sur des plans d'expérience* fait le point sur cette thématique spécifique.

Manuscrit final reçu en avril 2008

Publié en ligne en juillet 2008



## DIESEL ENGINES AND FUELS: A WIDE RANGE OF EVOLUTIONS TO COME

### GENERAL CONTEXT AND RESEARCH THEMES

B. Walter, J.F. Gruson and G. Monnier

Institut français du pétrole, IFP, 1-4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex – France  
e-mail: bruno.walter@ifp.fr - j-francois.gruson@ifp.fr - gaetan.monnier@ifp.fr

*Abstract – Diesel Engines and Fuels: a Wide Range of Evolutions to Come – General Context and Research Themes – The first article of this special OGST issue “Diesel Engines: a wide range of evolutions to come” is an introduction to throw light on the global context both from the point of view of energy production (resources: oil and its alternatives) and from the point of view of energy consumption (transport and thermal engines). It then describes the current position of the “Diesel fuel/engine” pair in this context and provides an update on the research themes discussed throughout this issue.*

### A GLOBAL ENERGY CONTEXT CONTROLLING THE FUTURE...

Before focusing on the main theme of this issue, the “Diesel fuel/engine” pair, it is worthwhile first mentioning the overall energy context controlling the future.

One of the main concerns of our century is the depletion of fossil fuels and their replacement in order to guarantee the economic development of both the industrialised countries and that of every country across the globe, even if the economic model of this development has still probably not yet been invented. Behind this question lie two major challenges, for which sustainable solutions acceptable for our economies must be found: firstly the climatic change, consequence of the continued increased in greenhouse gases, especially carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and secondly the guarantee of our energy supplies.

Ultimately, it is the chain of successive efficiencies of all the conversions which will define the efficiency of the global energy system, where less than 40% of the primary energy consumed finally corresponds to useful energy, the rest being largely dissipated or lost as heat in the atmosphere, in particular.

Most of this “loss” can be attributed to two sectors:

- electricity generation, from fuels with efficiencies from 30% to 55% for the most efficient installations (natural gas combined cycle);
- transport, where the efficiencies of internal combustion engines do not generally exceed 20%. Development in this sector remains very strong, due in particular to the high requirement in goods transport caused by generalisation of production according to the just-in-time principle and globalisation of activities, with production and storage delocalised from the sale or consumption sites.

### TRANSPORT AND OIL...

#### ...a Long History in Common...

In the past, if we concentrate on the transport sector, oil (and its derived products, mainly gasoline, jet fuel and Diesel fuel) appeared, in one sense, as an alternative energy to coal and

wood, offering the possibility of new low-cost technological developments. Its rapid growth led to this unprecedented boom in transport. Oil currently holds a virtual monopoly on the transport market, representing over 95% of the energy requirements in this sector, distributed between four main modes: road, with a share of about 1.6 billion tonnes (more than 75% of the total), rail, air and sea (Source: Oil and Gas information, 2005 data – 2007 edition – IEA International Energy Agency/OECD Organisation for Economic Cooperation and Development).

### **...Firmly Anchored in Thermal Engines...**

In this key field of road transport, the overwhelming majority of thermal engines (spark or compression ignition) are fuelled by hydrocarbon fuels, a situation which is likely to continue: for the time being, and probably in the short and medium term, there is no real challenge to this type of energy converter. This situation, which has prevailed for more than a century, is the result of continuous technological evolutions in numerous fields ranging from the mutual adaptations between engine and fuel to depollution of exhaust gases, in addition to combustion of course.

We therefore observe the emergence of a landscape in which the “oil/thermal engine” pair plays a leading role.

One of the challenges for the years and decades to come will be to find alternatives to this pair, or to at least one of its two protagonists, *i.e.* oil.

### **Alternatives to Oil...**

A first alternative tends to replace oil and its derivatives by biofuels which offer a globally favourable well-to-wheel CO<sub>2</sub> balance, even though some there still remain some difficulties in these evaluations (emissions of N<sub>2</sub>O nitrous oxide, modification in land use, methodology used to allocate greenhouse gases to coproducts, etc.). Currently, biofuels correspond firstly to ethanol (from sugar plants: sugar beet, sugar cane or starch-rich cereals such as wheat, maize) and its derivative ETBE ethyl tertio butyl ether, obtained by reaction of ethanol with isobutene (produced in refinery or in petrochemistry), and secondly biodiesel which is the result of transesterification of vegetable oils, mainly rape oil in Europe. These two families are known as first-generation biofuels. Analysis of the life cycle of this family of biofuels reveals gains in well-to-wheel CO<sub>2</sub> emissions, compared with a traditional fuel, ranging from 30% to 87% for gasolines and 39% to 64% for Diesel fuel for products used pure (Source: “Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context”, WTW Report, Version 2c, March 2007). In the future, we will see the development of biofuels obtained using new processes and new raw materials: wood, vegetable waste and more generally lignocellulosic material... known as second-generation biofuels, offering an even more favourable well-to-wheel CO<sub>2</sub> balance, with a reduction of up to 90% and more (same source). Several methods are considered: the low-temperature biochemical or enzyme pathways or thermal treatment of biomass (wood, straw, waste, etc.). The synthesis gases obtained may lead to the production of ethanol or synthetic biodiesel using, for example, the Fischer-Tropsch synthesis. Another technique can be used to produce biodiesel: deep hydrotreatment of vegetable (or animal) oils followed by isomerisation, resulting in a high-potential paraffin (currently used to produce the “second-generation biofuel” called NexBtl).

The biofuels, ethanol and ETBE or biodiesel (first generation or synthetic) can be incorporated in varying proportions in the traditional fuels: in standard blend of 5% by volume for ethanol and biodiesel currently in Europe, with a probable extension to 5.75% in 2010 (7% in France) then 10% in 2020 (European directives project), 10% ethanol in the United States, 22-25% in Brazil, in response to a political objective to increase the share of fuels ex-biomass. These biofuels can be added in higher blend rates: in France, this is the case with buses or urban vehicle fleets running on fuel containing 70% Diesel fuel and 30% biodiesel, operating under a tax exoneration scheme. Along with this solution, implemented without any modifications, some Diesel engines have been adapted to operate with pure biodiesel, given several improvements concerning in particular the materials and calibration of the injection system. Other “FlexFuel” vehicles have also been developed to run on a number of different types of gasoline- and ethanol-based fuels, such as

E85 promoted in Sweden and more recently in France. Lastly, note that in addition to this performance in terms of CO<sub>2</sub>, biofuels used on conventional engines offer 10% to 20% reductions in emissions of carbon monoxide (CO), unburnt hydrocarbons (HC), particulates, with no change in efficiency. Greater attention must nevertheless be paid to aldehyde emissions from vehicles running on ethanol.

The media and the political authorities are currently paying close attention to the development of these liquid biofuels, ethanol and biodiesel, which in practice are the only ones that can progressively replace oil in the transport sector while allowing full use of the current transport and distribution logistics: in 2006 globally the share of transport in the use of renewable energies is still virtually negligible, but the number of projects has multiplied over the last few months in attempts to reduce both the dependence on oil and the CO<sub>2</sub> emissions from road transport. Another key stake is the evaluation of the resources truly available in the medium and long term in the various regions of the world, currently estimated at about 20% of world consumption.

The fact that crude oil and natural gas prices are likely to remain high in the long term is obviously a favourable factor which is an essential condition to support this trend. However, this market is still closely related to partial or total exemptions of taxes levied on petroleum fuels or to mechanisms imposing their incorporation (replacement of MTBE methyl tertio butyl ether in the United States, General Tax on Polluting Activities – TGAP – in France, etc.), but also highly sensitive to tensions on the prices of raw agricultural materials, which reflect the balance at world scale between supply (climatic hazards) and demand, whether in terms of food or energy.

### **Alternatives and Reinforcements for the Traditional Thermal Engine...**

The second alternative is replacement of the thermal engine. The non-conventional engines which have reached a sufficiently advanced stage of development to be either already on the market or considered for industrial production before 2020 for large-scale distribution in the future decades include electric vehicles, hybrid vehicles and vehicles with internal combustion engines dedicated to natural gas.

**Electric vehicles** have always generated considerable interest due to their intrinsic advantages: no local emission of pollutants, very low noise emissions, high starting torque making urban driving extremely pleasant. They have been under development for more than a century and have benefited from considerable state incentives, in particular recently with the zero emission vehicles (ZEVs) in California. Although large scale demonstration operations have been carried out, this type of vehicle has never obtained the success expected and distribution has remained very low. The main problem concerns the limited performance and poor autonomy of these vehicles, typically 100 to 200 km in real use. This situation is largely due to the still insufficient performance of the batteries used to store electrical energy on board the vehicle. Despite the implementation of new technologies and the progress already made or expected, we cannot realistically expect to see a significant increase in the energy density of the batteries. The improvements expected between 2005 and 2020 suggest that the energy density of a high-performance battery, typically 120 to 150 Wh/kg, will remain well below that of a liquid fuel, which is about 12 500 Wh/kg. Prerequisites for widespread use of this engine will therefore be insufficient or prohibitively expensive hydrocarbon fuel, as well as the availability of electricity not produced by the combustion of fossil fuel. This latter point is still far from being a reality on a global scale, even though some countries, such as France with nuclear energy or Iceland with geothermal energy, have already made significant progress.

In contrast, the **hybrid vehicle** equipped with mixed thermal/electric propulsion partially fills this gap. It is equipped with two energy storage systems, a fuel tank and a battery. It also has two types of propulsion, a thermal engine and an electric motor. In the most flexible configuration, all combinations are theoretically possible, the thermal engine can be used to recharge the batteries and drive the vehicle, the electric motor can be used to propel the vehicle and also to recover its braking energy. Hybridisation therefore offers numerous ways of optimising the use of energy on board the vehicle. Hybrid vehicles considerably reduce pollutant emissions (all-electrical operation is even possible in town, for example) as well as consumption (30% to 40% reduction is possible).

We must nevertheless remember that hybrid vehicles must carry two separate drive systems as well as an electrical energy storage system (batteries or super-capacitors) and the power electronics. This leads to a substantial extra cost and a non-negligible increase in vehicle weight. However, hybridisation offers the advantage of being highly modular, opening the way to a complete range of possibilities between light hybridisation, with moderate cost and performance, up to total hybridisation, with high cost and performance. With the so-called “flexfuel” application, in particular, it also offers the possibility of incorporating a greater or lesser proportion of alternative fuels.

Lastly, the **engine dedicated to natural gas** is also considered to be an excellent candidate, in particular due to the special qualities of this fuel. Concerning pollutants, emissions are potentially lower than those of conventional engines due to the gas properties, and toxicity and reactivity in the atmosphere are lower due to the gas composition. In addition, car manufacturers can take advantage of the fact that natural gas has a fairly high octane number (about 130) to increase the engine efficiency. Lastly, since methane, the main component of natural gas, has a low carbon-to-hydrogen ratio, CO<sub>2</sub> emissions are considerably reduced compared with petroleum-based fuels (approximately –23% for equivalent energy production). An engine optimised to run on natural gas can claim a reduction in CO<sub>2</sub> emissions of about 5% to 10% compared with a Diesel engine. As with all gas fuels, however, autonomy may be a problem. Based on a well-to-wheel balance analysis, the use of natural gas in hybrid engines is potentially one of the most efficient solutions after use of biofuel regarding CO<sub>2</sub> emissions. From the technological aspect, natural gas engines are often produced by converting existing Diesel or gasoline engines, since the relatively narrow market for this type of engine does not encourage specific large-scale developments. When optimising engines to run on natural gas, two approaches can be considered. The first is based on a deep downsizing approach, in other words reduction of engine displacement with same performance, associated with turbo-supercharging; the next step, resulting in even better performance, consists in integrating this type of engine in a hybrid vehicle. We can expect to see mass production of these advanced engines both for light vehicle applications as well as for buses and urban vehicles, as part of the European Union incentives to contribute to the Kyoto objectives. The European Commission has in fact published a directive aimed at progressive substitution of conventional fuels by natural gas (2% in 2010, 5% in 2015, 10% in 2020).

Summing up, although there are serious challengers to this “oil/thermal engine” pair, in the short term these alternatives will be of little use in helping to achieve an energy transition in a sector where oil still holds a virtual monopoly. In fact, considering the need to modify the industrial tools and the associated time scales, it would be quite unrealistic to set an early deadline for massive introduction of these new approaches.

In a key sector like road transport, the “oil/thermal engine” pair is therefore a necessity, at least for the time being.

### Fuel/Engine Pairs...

The “oil/thermal engine” pair is available in two possible “fuel/engine” combinations.

**Premium grade gasoline** (including ordinary gasoline) is associated with the **spark-ignition engine**. This “lead-free” fuel, found virtually throughout the world, is almost exclusively dedicated to private vehicles, a few utility vehicles and motorcycles. Global consumption is about 950 Mt per year (Source: *IFP* estimations according to *IEA International Energy Agency* and *PEL/KBC* data). It still is the reference fuel for cars.

In Europe in general, however, and especially in France, we observe a steady decline in consumption: in France, it has dropped from 15.7 Mt in 1995 to 10.3 Mt in 2006 (Source: CPDP – Professional Committee for Petroleum – 2006).

Its production in the refinery is complex, requiring several successive or parallel processes after atmospheric distillation of crude oil to meet both quality (isomerisation, reforming, alkylation, hydrodesulphurisation) and quantity (conversion such as catalytic cracking) requirements.

The “**Diesel fuel/engine**” pair is also used for private vehicles (mainly in Europe and more especially in France), much more extensively for utility vehicles and almost exclusively for heavy goods vehicles, coaches and urban buses, as well as some marine applications. Global consumption of Diesel fuel represents about 650 Mt (Source: *IFP* estimations according to *IEA* and *PEL/KBC* data) and is also increasing.

In France, consumption has increased from 22.9 Mt in 1995 to 31.9 Mt in 2006, with 42% for cars, 21% light utility vehicles and 34% heavy goods vehicles (Source: CPDP-2006). Development concerns all three sectors, but with a very strong increase over the last few years in the private vehicle market (more than two thirds of the growth) with more than 71% of cars now running on Diesel fuel (Source: *CCFA – French Automotive Manufacturers Committee, MTETM – Directorate-General for Sea and Transport*). We observe the same situation in *Western Europe*, where Diesel engines in private vehicles are expected to reach 57% in 2017 (Source: *Delphi Diesel* market view, March 2007).

For many years, this Diesel fuel was easier to produce than premium grade gasoline, only requiring desulphurisation in most cases. Current quantity and quality regulations call for much deeper desulphurisation, but above all the use of catalytic hydrocracking (a large hydrogen consumer).

Since the early seventies in the OECD countries and still up to today, in particular with the rapid development of urban pollution in countries like India and China, the main stake for the public authorities has been to improve the fuel quality to allow a progressive reduction in pollutant emissions (mainly carbon monoxide, unburnt hydrocarbons, nitrogen oxides, particulates and sulphur oxides). In Europe, this led to the creation of directives, amended a number of times, with a new version in the pipeline.

These changes have been, and still are, the subject of heated debates between the automotive industry using these fuels and the petroleum industry responsible for their production. Since the start of the decade, Europe has focused on the sulphur content of these fuels, which will be reduced to below 10 ppm from 2009.

The qualities of these two fuels, Diesel fuel and premium grade gasoline, will nevertheless vary significantly from one part of the world to another in terms of key characteristics, such as the octane and cetane numbers, the sulphur and aromatic contents. Consequently, the compositions and the refining processes implemented in the refineries will also vary considerably.

### **Predominant Pair: “Diesel Fuel/Engine”**

This special issue is dedicated to the “Diesel fuel/engine” pair which, following this analysis, stands out as the key player in this essential field of transport.

The Diesel engine has now become a vital component of the transport sector, in view of its performance in terms of efficiency and therefore CO<sub>2</sub> emissions some 25% less than a traditional gasoline engine of equivalent performance. This property is even more interesting since further progress can still be expected via downsizing. The leading European car manufacturers have commercialised families of Diesel engines which, although having small displacement (1.2 l to 1.5 l), offer very high specific performance (specific torque 150-180 Nm per litre, specific power 50-60 kW per litre). Compared with the larger engines, they are replacing, they offer a further 5%-10% reduction in consumption. This improvement has been achieved by the development of two key technologies: direct high pressure injection and turbo-supercharging, in particular variable geometry turbo-supercharging. The performance offered by Diesel engines is now as good as or even better than that of gasoline engines. This evolution is such that most manufacturers now stress the excellent compromise it offers between performance (specific power and torque respectively 75 kW/l and 200 Nm/l for the most advanced engines) and its low CO<sub>2</sub> emissions. The value given for most mid-range Diesel vehicles is in fact less than 140 g/km, and B-segment Diesel vehicles (“city” or “subcompact” cars) are now appearing on the market with values of around 100 g/km, a figure which until now was reserved for the small A-segment Diesel vehicles (minis).

Consequently, the real stake for the future of the Diesel engine is not related to the level of efficiency it will have to reach, since it is already excellent, and the evolutions expected from injection and turbo-supercharging will bring further progress. The real stake for the Diesel engine lies more in its ability to comply with the future standards on pollutant emissions.

In Europe, standards 2005 (EURO IV) and the future standards to be expected by 2008-2010 (EURO V) are different for Diesel- and gasoline-engined vehicles. Since combustion takes place in conditions of excess air, the Diesel engine cannot benefit from three-way catalysis to reduce nitrogen oxide ( $\text{NO}_x$ ) emissions. This explains why the statutory limit for  $\text{NO}_x$  emissions for Diesel engines is less strict than that for gasoline engines, to promote the development of this type of engine which offers the best efficiency level. Treatment of  $\text{NO}_x$  emissions nevertheless remains a central point and actions through optimisation of combustion and complex  $\text{deNO}_x$  type depollution systems (already used in Europe on heavy goods vehicles since 2006) will be required to move towards “fuel neutral” standards, *i.e.* harmonisation of emission standards between Diesel and gasoline engines. This is already the case in the United States for the Tier 2 standard applicable between 2004 and 2009. The soot levels required by the Euro V standard in Europe should impose the systematic installation of particle filter technology to meet increasingly stringent regulations.

The progressive introduction of new “low temperature” combustion modes on a less and less restricted operating range of the engine now seems necessary to meet the future standards (EURO V and VI). The principle of these new combustion processes is to make the air-fuel mixture much more homogeneous in the combustion chamber. By lowering the combustion temperature and avoiding zones too rich in fuel, the formation of  $\text{NO}_x$  and soot is significantly reduced. While in a traditional Diesel engine combustion is controlled by the amount of fuel injected, in this case it is mainly the auto-ignition process which must be controlled. Unfortunately, this type of approach tends to increase emissions of noise, carbon monoxide and unburnt hydrocarbons. These problems are solved by the use of multiple injection strategies adapted to control noise and the use of an oxidation catalyst or specific technologies such as variable valve actuation (VVA) to eliminate pollutants (HC and CO), or higher supercharging. A combination between new combustion processes reducing raw emissions together with advanced post-treatment systems should therefore enable the Diesel engine to comply with the future anti-pollution regulations, despite their increasing severity, whilst preserving its leadership in terms of consumption and  $\text{CO}_2$  emission.

In Europe, the main stakes which will concern the “Diesel fuel/engine” pair over the next few years can be summarised as follows:

- Possible need to adapt fuel characteristics to the new Diesel combustion modes (HCCI – Homogeneous Charge Compression Ignition, LTC – Low Temperature Combustion, etc.): what cetane number, what volatility, etc.? The fuel will play a major role in combustion control for these new technologies. It is clear that a fuel formulated to offer perfect control of vaporisation, the auto-ignition phase and the combustion process will obviously go a long way towards maximising energy recovery. We might therefore expect development of these new combustion modes to be accompanied by more radical changes in the fuels, with in particular more emphasis placed on the chemical phenomena occurring during combustion, which could lead to a revision of key parameters such as the distillation curve and the cetane number, and to the emergence of new criteria better suited to representing the combustion process. A move towards a “more technological” fuel could be considered.
- The possible capacity for the European refining industry to produce additional quantities of Diesel fuel in a climate which is relatively uncertain, both in terms of supply and demand.

There are numerous questions concerning the trend in the actual demand: will the percentage of private vehicles running on Diesel fuel continue to increase? Will there remain a residual demand in domestic fuel oil? Will there be a shift in consumption for bunker from “Low Sulphur Content (LSC) or High Sulphur Content (HSC) fuel oils” to marine fuel oil? Will taxation change?

Uncertainties also remain regarding the supply: quantity of biodiesel (1st and 2nd generation) or synthetic Diesel fuel available, especially via the Gas-To-Liquids (GTL) and Biomass-To-Liquids

(BTL) processes? Investments in conversion capacities in a context where CO<sub>2</sub> emissions from European refineries are subject to national quotas?

Lastly, this uncertainty is increased by the European issue concerning the continued rise in excess gasoline which currently finds a “natural” market mainly in the United States and which could be further increased with the development of ethanol incorporation and growing shortage of middle distillates (jet fuel, Diesel and/or domestic fuel oil), currently compensated by imports from Russia.

Globally, the major uncertainty concerns a significant breakthrough of Diesel engines in the automotive industry of countries such as China and the United States, which would potentially significantly disturb the current refining equilibria.

In conclusion, historically marked by questions and even accusations regarding the impact on public health due to particulate emissions, the Diesel engine could take advantage of developments in depollution technologies (particle filter, SCR – Selective Catalytic Reduction), new combustion modes (LTC, HCCI) and the need to reduce CO<sub>2</sub> emissions to further increase its supremacy.

### **Main Evolutions to Come for Diesel, Associated Research Themes**

The aim of this special issue is to provide an update on the evolutions to come for the “Diesel fuel/Engine” pair through the various research axes developed at IFP:

- Limitation of global pollution (CO<sub>2</sub>) due to the fuel through the use of new biofuels (especially through the conversion of glycerine by *Glycerin for New Biodiesel Formulation* and a study on *Biodiesel in Europe: Market Trends and Technological Perspectives*) while controlling the impact of Diesel fuel formulation on combustion and in particular on the new combustion modes (*Homogeneous Charge Compression Ignition: Formulation Effect of a Diesel Fuel on the Initiation and the Combustion – Potential of Olefin Impact in a Diesel Base Fuel*).
- Limitation of atmospheric pollution, through an understanding of the origin of these emissions (HC emissions in low NO<sub>x</sub> combustion through *An Investigation of Unburned Hydrocarbon Emissions in Wall-Guided, Low Temperature Diesel Combustion*) and the correlation between preparation of the mixture and combustion through the *Development of Optical Diagnostic Techniques to Correlate Mixing and Auto-ignition Processes in High Pressure Diesel Jets*). Additional information can be obtained by 3D modelling and calculation, by predicting the qualitative and quantitative trends in pollutant emissions. The two articles *Development of a Coupling Approach between 0D D.I. Diesel Combustion and Pollutant Models: Application to a Transient Engine Evolution* and *Quantitative Pollutant Modelling: an Essential Prerequisite for Diesel HCCI and LTC Engine Design* are an illustration of this. Lastly, reducing pollutant emissions also involves evaluating the potential of new technologies such as variable valve actuation (*Variable Valve Actuation Systems for Homogeneous Diesel Combustion: How Interesting are They?*)
- Enhanced driving comfort, performance at partial and full loads through studies on *HCCI Diesel Engine Control Design Using Advanced Simulation with Real Time Capabilities*. In particular, numerous studies concern *Global airpath control for a Turbocharged Diesel HCCI Engine*. Lastly, engine calibration is an essential feature used to fix the settings of the engine in its various operating zones. *Comparison of Engine Calibration Methods Based on DoE* provides an update on this specific theme.

*Final manuscript received in April 2008  
Published online in July 2008*