

Le Diesel

L'actualité récente, qu'elle soit nationale ou internationale, a jeté un coup de projecteur sur les véhicules à motorisation Diesel. Cette solution, qui présente l'avantage d'un rendement global supérieur à celui d'un moteur à allumage commandé (moteur essence, GPL et gaz naturel), reste incontournable dans le transport routier de marchandises. Elle a même gagné d'importantes parts de marché sur le segment des véhicules légers dans certaines régions du monde. Le Diesel est cependant aujourd'hui au centre de nombreuses polémiques et dénoncé pour son impact négatif sur la qualité de l'air.

Cette fiche fait le point sur l'évolution des motorisations Diesel dans le monde et tente d'apporter un éclairage sur l'impact du Diesel sur les émissions de polluants locaux, les solutions techniques pour y remédier et les évolutions probables que la diffusion de ces solutions implique.

Consommation de gazole routier dans le monde : quelle évolution ?

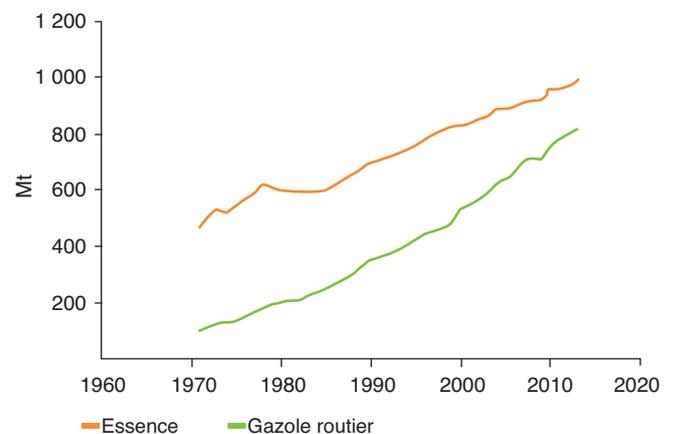
Le gazole représente aujourd'hui 45% de la consommation mondiale de carburants routiers d'origine fossile. Cette part n'était que de 19 % au début des années 70. Avec le développement du transport de marchandises, du transport de passagers et la diésélisation progressive de certains parcs automobiles, la demande en gazole a été multipliée par plus de sept sur les quarante dernières années, alors que celle de l'essence n'a fait, dans le même temps, que doubler (fig. 1).

Le ratio gazole/essence s'est continuellement accru sur cette période dans pratiquement toutes les régions du monde (fig. 2).

En Europe, où la diésélisation du parc a été particulièrement forte, le gazole représente aujourd'hui les deux tiers des carburants routiers. Cette situation fait de l'Europe la première zone importatrice de distillats moyens, malgré des capacités de raffinage lui permettant de couvrir sa demande globale interne en produits pétroliers.

Dans les années à venir, l'augmentation de la consommation de carburants, liée au développement du transport de marchandises, la forte diminution de la consommation unitaire des véhicules particuliers et la plus grande électrification du parc automobile sont autant d'éléments qui devraient contribuer à l'augmentation, ou au maintien, de la part du gazole dans la demande mondiale de carburants routiers. IFPEN estime que le gazole pourrait, en 2035, représenter plus de 50% des carburants routiers.

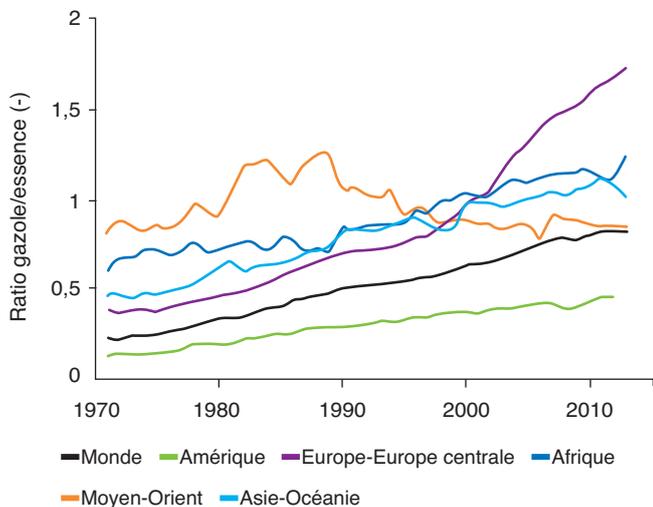
Fig. 1 – Évolution de la consommation d'essence et de gazole routier dans le monde entre 1971 et 2013



Source : IFPEN

Le Diesel

Fig. 2 – Évolution du ratio gazole/essence dans différentes régions du monde depuis 1971



Source : IFPEN

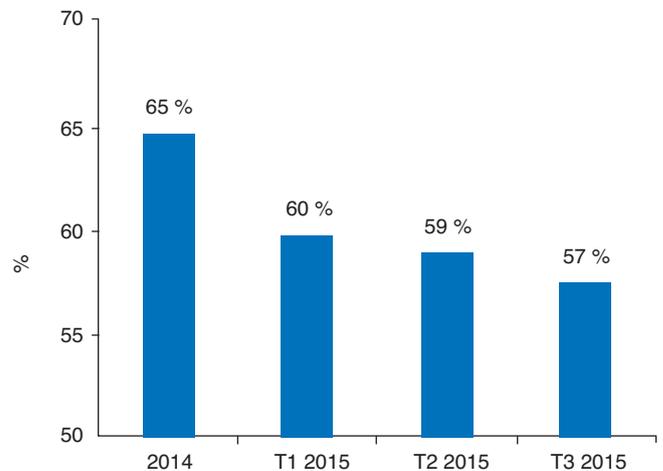
La motorisation Diesel : un développement dans les parcs de véhicules légers très varié suivant les régions et les pays

Dans le monde, les moteurs Diesel équipent la majorité des véhicules lourds, camions, bus, etc., et ce, quel(le) que soient les régions ou pays.

L'adoption des motorisations Diesel dans les parcs de voitures particulières (VP) est, en revanche, beaucoup plus variable. À l'échelle mondiale, la voiture essence reste dominante. Dans de nombreux pays, la part du Diesel dans le parc VP est très faible : moins de 1 % en Chine, un peu moins de 2 % aux États-Unis, 3 % au Brésil et au Japon.

Cette règle connaît cependant un certain nombre d'exceptions. Conséquence de politiques industrielles et fiscales favorables, la voiture particulière à motorisation Diesel a pu prendre une place non négligeable dans certaines zones parmi les plus importantes. C'est le cas, par exemple, dans l'Europe des 27, où le parc VP en circulation est constitué à 35 % de véhicules Diesel. Ce pourcentage atteint même des sommets dans quelques pays comme la Belgique (60 %), la France (57 %), l'Autriche (55 %) ou encore l'Espagne (52 %). En Europe, alors que le Diesel n'était qu'un marché de niche jusqu'au début des années 1990, les ventes ont progressivement augmenté au cours des vingt dernières années, dépassant 70 % des nouvelles immatriculations VP en 2010 en France, en Belgique ou en Espagne et 50 % dans la plupart des autres pays européens.

Fig. 3 – Évolution, en France, de la part du Diesel dans les nouvelles immatriculations VP



Source : CCFA

Les tendances récentes sur les motorisations Diesel, pour les VP, sont cependant plus modérées dans beaucoup de pays européens. Avec l'accroissement de la part de marché des véhicules de gamme inférieure (segments A et B), la demande en voitures Diesel, solution plus coûteuse pour les petits véhicules, se contracte. En France, la part de marché du Diesel dans les nouvelles immatriculations est ainsi passée sous la barre des 60 % en 2015 (fig. 3).

Ailleurs, l'Inde a également connu une diésélisation importante de son parc de VP depuis le début des années 2000. Les motorisations Diesel représentaient 40 % du parc de VP en 2010 et plus de 70 % des ventes.

La diésélisation d'un parc VP s'explique généralement par des politiques incitatives, comme un niveau de taxation différencié induisant un écart important entre le prix à la pompe du gazole et le prix à la pompe de l'essence. C'est le cas en Inde où les taxes (prélevées par le gouvernement central et l'État ou le territoire) peuvent pratiquement aller du simple au double entre le gazole et l'essence. Le différentiel de taxation explique aussi en partie l'engouement pour le Diesel dans les pays européens.

Mais d'autres mécanismes ont pu favoriser le choix de ce type de motorisation. En France, par exemple, outre le niveau de taxation différent entre essence et gazole, les entreprises ont la possibilité de récupérer 80 % à 100 % de la TVA sur les dépenses de carburant des véhicules de tourisme et des véhicules utilitaires. Cette mesure est applicable au gazole (à l'essence E85 et au GPL également), mais exclut l'essence. De la même manière, la taxe sur les véhicules de société, calculée selon la puissance fiscale, favorise les motorisations Diesel. Enfin, le système de bonus-malus écologique, appliqué en fonction des émissions de CO₂ du véhicule, a aussi contribué, au

Le Diesel

début de sa mise en place, à avantager les motorisations Diesel. Mais les mesures récentes en termes d'évolution de la TICPE (Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques) des carburants ou du bonus écologique tendent à réduire l'intérêt pour le Diesel.

Diesel et environnement : entre émissions globales de CO₂ et émissions locales de particules et de NOx

CO₂ et consommation d'énergie

Les besoins et les aspirations des clients, l'économie de carburant et son corollaire – les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) – ainsi que la réduction des émissions polluantes sont les principaux défis auxquels l'industrie du transport doit répondre. Satisfaire ces trois exigences en même temps reste un challenge difficile. Les gouvernements fixent des réglementations détaillées concernant notamment les émissions de polluants et de CO₂, mais passer ces normes est une contrainte pour les constructeurs qui doivent surtout proposer des produits que les clients veulent acheter, au prix qu'ils sont prêts à payer. Dans la majorité des cas, les consommateurs veulent un véhicule économique, permettant de transporter des personnes et des marchandises, et répondant à leurs aspirations concernant la sécurité, le plaisir de conduite et le confort.

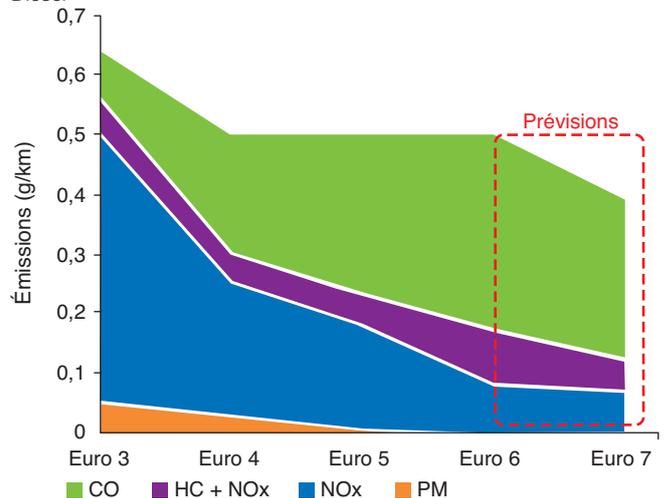
Les premiers règlements mis en place par les gouvernements concernaient les émissions de polluants locaux. Ainsi, les limitations concernant les émissions de monoxyde de carbone (CO), d'oxydes d'azote (NO₂ et NO, aussi appelés NOx), de particules (PM) et d'hydrocarbures imbrûlés (HC) ont été instaurées, dès 1975 en Californie, et dans les années 1990 en Europe, pour l'automobile et les poids lourds.

Les réglementations sur les émissions de CO₂ sont arrivées plus tard, à la suite d'une prise de conscience générale de l'impact des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le réchauffement climatique. Des mesures ont été adoptées, notamment en Europe, depuis 2007, et ont permis de focaliser les efforts de tous les constructeurs sur les réductions d'émissions de GES. L'augmentation de la part des moteurs Diesel dans le parc automobile européen, déjà importante consécutivement à une orientation politique d'efficacité énergétique des principaux États membres, s'est vite imposée comme une solution très séduisante pour atteindre rapidement les objectifs fixés par la réglementation sur le CO₂. En effet, en raison de leur cycle thermodynamique plus efficace, les motorisations Diesel offrent un rendement supérieur de 10 à 15% par rapport aux moteurs à essence,

ce qui a conduit au quasi-monopole du Diesel dans le transport de marchandises terrestres et maritimes. De plus, le consommateur, qui achète le carburant au litre et non au kWh d'énergie, bénéficie d'un avantage supplémentaire en consommation en litres aux 100 kilomètres de l'ordre de 10%, grâce à un gazole plus dense que l'essence.

Cependant, depuis la mise en place des normes Euro 5 en 2009 (fig. 4), le compromis entre les émissions de CO₂ et les polluants locaux, notamment les NOx pour les Diesel, est plus difficile à trouver. Généralement, une combustion Diesel émettant moins de NOx émet plus de particules. De même, les stratégies de combustion mises en œuvre pour réduire la consommation de carburant et les émissions de CO₂, émettent généralement plus de NOx.

Fig. 4 – Évolution des normes d'émissions en Europe pour les véhicules Diesel



Source : Frost & Sullivan : Euro Emission Standards-Diesel Engines

Ainsi, pour atteindre les objectifs fixés, des stratégies de combustion et de dépollution complexes ont été mises en place par les constructeurs, et ont permis d'obtenir de bons résultats sur le cycle d'homologation NEDC (*New European Driving Cycle*), en vigueur depuis 1973. Cependant, ces solutions sont souvent limitées dans leur efficacité lors de la conduite réelle, qui est plus dynamique et qui sollicite des fonctionnements du moteur non couverts par le cycle actuel. De ce fait, dans certaines conditions réelles de roulage, les moteurs Diesel actuels ont tendance à émettre plus de NOx qu'attendus par la norme. Ces lacunes seront cependant corrigées avec l'adoption du nouveau cycle WLTC (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle*) qui sera en vigueur à partir de 2017, et des essais en conditions réelles d'utilisation (RDE pour *Real Driving Emissions*).

Le Diesel

Particules : un problème traité

Pour traiter les particules, le filtre à particules (FAP ou *Diesel Particulate Filter* – DPF), lancé en 2000, est maintenant quasi généralisé et 98% des moteurs Diesel seront équipés de FAP en 2020. Cette solution très efficace a l'avantage de traiter systématiquement tous les gaz d'échappement du moteur quel que soit son usage, et donc dans toutes les conditions de fonctionnement du véhicule.

Son point sensible reste sa régénération qui doit avoir lieu, pour une automobile, tous les 350 à 1000 km suivant l'usage. En effet, les suies accumulées dans ce filtre doivent régulièrement être brûlées pour éviter son obturation. Cette combustion ne peut se faire spontanément qu'au-dessus d'une température de l'ordre de 450°C, à l'instar du système de pyrolyse d'un four de cuisson. Pour atteindre cette température, il faut, dans certains cas, notamment de circulation urbaine, réaliser un réglage spécifique du moteur pour augmenter artificiellement la température des gaz d'échappement et déclencher ainsi la régénération au prix d'une surconsommation momentanée.

La combustion des suies est également, par nature, exothermique et doit donc être maîtrisée pour éviter tout endommagement du FAP, constitué généralement de carbure de silicium, voire de cordiérite ou de titanate d'aluminium. Cette contrainte implique que les réglages de combustion minimisent les émissions de particules à la source, afin d'éviter des régénérations trop fréquentes affectant la consommation de carburant, et pouvant entraîner des problèmes de fiabilité du FAP. Comme nous l'avons indiqué au préalable, un compromis doit alors être trouvé pour les émissions de NOx car elles varient en sens inverse des émissions de particules lors d'un réglage moteur (fig. 5).

NOx : un problème plus complexe

Les NOx se forment lors de la combustion, avec la température comme paramètre de premier ordre. Ainsi, tout réglage ou dispositif permettant de limiter la température de combustion limitera ces émissions.

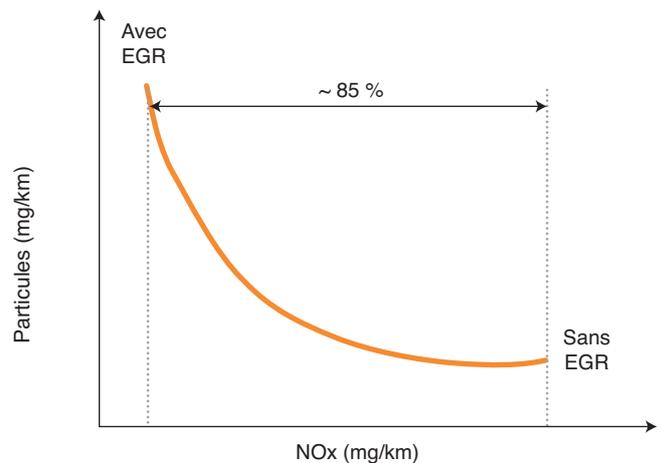
Les principales solutions permettant de réduire les émissions de NOx sont d'agir sur la combustion par le recyclage des gaz d'échappement (*Exhaust Gas Recirculation*, EGR), ou de post-traiter les gaz d'échappement au travers d'un piège à NOx (*Lean NOx Trap*, LNT) et/ou par la réduction catalytique sélective (*Selective Catalytic Reduction*, SCR).

La recirculation des gaz d'échappement (EGR) dans les gaz d'admission permet de diminuer cette température, et donc les NOx, en diluant la combustion avec des gaz inertes et en diminuant la pression partielle d'oxygène,

d'où une augmentation des particules. L'EGR, et notamment l'EGR refroidi, est donc la solution la plus répandue depuis le déploiement des normes Euro, permettant de satisfaire les exigences jusqu'à Euro 5, voire Euro 6, sans ajouter de solution complémentaire pour traiter les NOx.

Dans la mesure où l'intégration de l'EGR avait déjà nécessité des adaptations moteur importantes (échangeur, boucle d'air complexe, vannes EGR, etc.) pour les premières normes Euro, cette technologie, avec ses variantes haute pression (HP) et basse pression (BP), reste la solution de base privilégiée par les constructeurs. Son utilisation intensive peut cependant poser des problèmes de fiabilité du dispositif et de ses constituants, comme les vannes de dosage du débit ou les échangeurs, mais aussi limiter les performances du moteur en couple, en puissance, ainsi que les temps de réponse en transitoire. Ceci a conduit les constructeurs à limiter son usage à certaines conditions de fonctionnement du moteur.

Fig. 5 – Illustration de la corrélation entre évolution des particules et évolution des NOx



Source : IFPEN

Avec la sévérité croissante des normes, notamment pour les poids lourds et l'automobile, le niveau d'émission de NOx, atteint uniquement par des réglages de combustion, ne suffit plus et le niveau Euro 6 impose le recours à un système complémentaire de post-traitement catalytique du type LNT et/ou SCR.

Le LNT est appliqué principalement sur les véhicules légers, de petite et moyenne tailles, en fonction du facteur poids/puissance et des conditions d'utilisation. Les constructeurs, ayant une forte proportion de véhicules compacts, sont susceptibles d'adopter cette solution comme principale technologie pour la réduction des NOx. Le principe du LNT consiste à stocker les NOx, sous forme de nitrates, et à les déstocker périodiquement et à les réduire, majoritairement en azote, au

Le Diesel

moyen d'un apport de réducteurs. Cet apport peut être réalisé par une combustion à richesse élevée ou par injection d'hydrocarbures à l'échappement. Les LNT comportent des matériaux de stockage des oxydes d'azote, constitués d'éléments basiques, de type oxyde de baryum, et de métaux précieux de type platine, palladium et rhodium, catalysant la réaction d'oxydation de NO en NO₂, nécessaire à la formation et à la réduction des nitrates. Cette purge, plus fréquente que la régénération du FAP, induit une surconsommation momentanée de carburant. Pour limiter cette dernière, les émissions de base du moteur doivent être minimisées, ce qui impose le cumul avec le système EGR. Enfin, le piège ne fonctionne correctement que dans une certaine plage de température des gaz d'échappement et reste sensible à l'empoisonnement, notamment par le soufre, imposant des phases supplémentaires de désulfatation.

La SCR, dont les segments clés sont les SUV (*Sport Utility Vehicle*), les grandes berlines, les monospaces et les véhicules utilitaires, est également combinée avec des systèmes EGR à haute ou basse pression. Des constructeurs automobiles comme PSA Peugeot Citroën ont fait le choix de généraliser d'entrée cette technologie à toutes leurs applications. Ce choix a également été fait par les constructeurs de poids lourds. L'efficacité du système permet de conserver des réglages moteur optimisant la consommation de carburant. Le prix élevé reste un gros frein à l'adoption massive de cette solution. L'augmentation des volumes pourrait cependant réduire son prix significativement à l'horizon 2020.

Le système SCR est composé d'un catalyseur et d'un système de stockage et d'injection d'un réducteur, en l'occurrence l'ammoniac contenu dans une solution

aqueuse contenant 32,5% d'urée, l'*Adblue*. Il permet de convertir les oxydes d'azote en diazote et en eau et ainsi de réduire d'environ 90% les émissions de NO_x des gaz d'échappement. Comme pour le LNT, la fenêtre d'activité du catalyseur est cependant limitée et peut affecter la performance du système, notamment lors des fonctionnements à froid. Enfin, la consommation d'*Adblue* est directement proportionnelle au débit de NO_x à traiter, ce qui reste un enjeu majeur pour le constructeur, pour des questions de maintenance et de coût d'exploitation. Dans ce cadre, la minimisation des émissions de NO_x du moteur ainsi que la généralisation du traitement des NO_x, sur l'ensemble des phases de fonctionnement du moteur, restent des points clés à travailler.

Pour conclure, il existe aujourd'hui un panel de solutions permettant de traiter les émissions, notamment de NO_x et de PM. Cependant, comme les exigences en matière d'émissions de polluants, tant dans les normes qu'en conditions réelles, sont de plus en plus strictes, ces solutions sont de plus en plus complexes à mettre en œuvre dans une maîtrise du coût global des moteurs Diesel. Ce type de motorisation, fort de son potentiel pour maîtriser les émissions de CO₂, verra donc probablement, dans les années à venir, son périmètre d'application se restreindre aux automobiles de segments supérieurs, aux utilitaires et au transport de marchandises.

Gaëtan Monnier – gaetan.monnier@ifpen.fr

Tanja Ivanić – tanja.ivanic@ifpen.fr

Nathalie Alazard-Toux – nathalie.alazard@ifpen.fr

Manuscrit remis en janvier 2016