

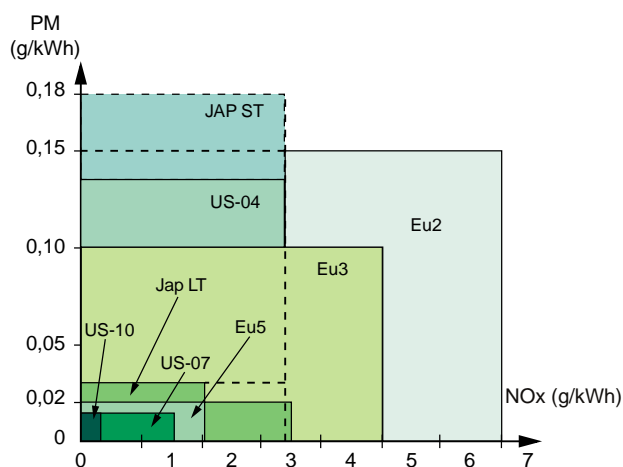
# Les techniques de dépollution des véhicules industriels

*Les normes d'émission des véhicules industriels allant vers une sévèrification croissante, de nombreux efforts de recherche sont aujourd'hui consentis pour la mise au point de systèmes de post-traitement. Ces systèmes devront conjuguer efficacité, durabilité et coûts d'exploitation réduits.*

## Introduction

Tout comme les véhicules particuliers, les véhicules industriels (bus, poids lourds), sont soumis depuis plusieurs années à des normes antipollution de plus en plus sévères,

Fig. 1 Les normes d'émissions PL



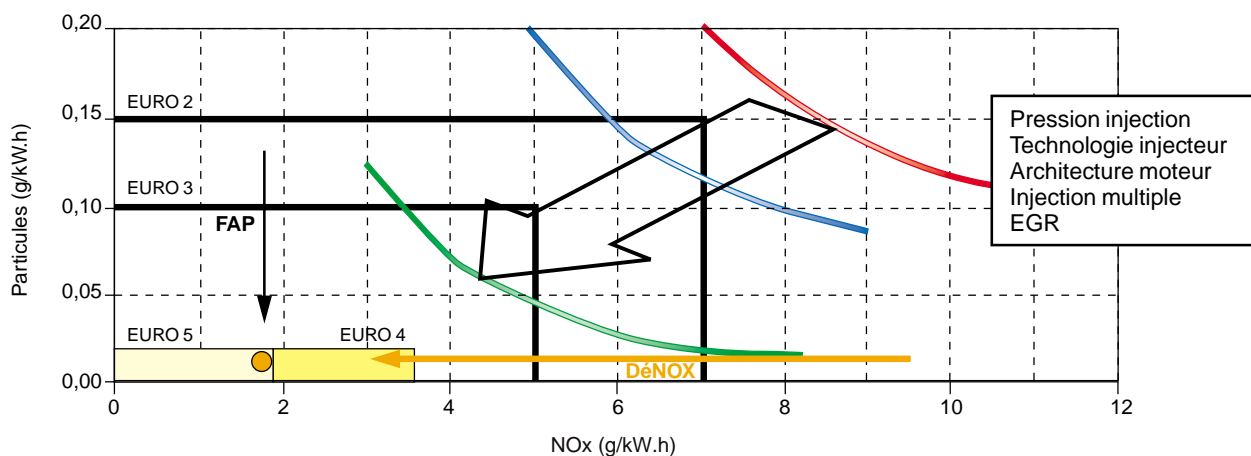
notamment en ce qui concerne les NOx et les particules (PM). La figure 1 illustre par exemple les évolutions des normes européennes, de Euro 2 (1996) à Euro 5 (2008), américaines, de US04 (2004) à US10 (2010) et japonaises.

L'atteinte de ces très bas niveaux d'émissions passe dans un premier temps par une amélioration des technologies moteur. Néanmoins, l'atteinte des objectifs fixés pour 2005 et au-delà, va nécessiter l'implantation sur les véhicules de systèmes de post-traitement des gaz d'échappement pour traiter les oxydes d'azote et les particules comme le montre la figure 2. De nombreux efforts de recherche sont consentis actuellement pour la mise au point de ces systèmes de post-traitement qui devront conjuguer efficacité, durabilité et coût d'exploitation réduits.

## L'évolution des technologies moteur

Les progrès accomplis au niveau des systèmes d'injection et de suralimentation, le recours à la recirculation des gaz d'échappement, l'émergence de nouveaux procédés de combustion ont permis et permettent d'envisager encore une

Fig. 2 Évolution des technologies et compromis NOx/Particules



# Les techniques de dépollution des véhicules industriels

réduction importante des émissions à la source des moteurs diesel, notamment ceux équipant les véhicules industriels.

## Les systèmes d'injection

L'injection diesel à rampe commune (common-rail) atteint d'ores et déjà des pressions maximales d'injection de 1600 à 1800 bars alors que la technique d'injecteur-pompe unitaire dépasse les 2000 bars ; l'amélioration de la pulvérisation du carburant qui en résulte, permet de réduire de façon notable les émissions de suies. Ces systèmes d'injection bénéficient également de nouvelles technologies de commande permettant de répartir la quantité injectée en de multiples injections (jusqu'à 5 à 7 injections différentes en common-rail) au cours du cycle thermodynamique. Cette technique permet, en modulant le processus de combustion, de réduire très fortement les émissions de CO, NOx et particules à la source tout en agissant également sur le bruit.

## L'EGR

La recirculation des gaz d'échappement à l'admission du moteur (EGR) permet, en abaissant par dilution de la charge les températures de combustion, de limiter la formation des oxydes d'azote. C'est un moyen couramment utilisé sur les véhicules industriels avec des taux d'EGR modérés, qui restent compatibles avec le maintien des objectifs de consommation et de durabilité des moteurs. L'EGR est le moyen de contrôle des NOx utilisé aux États-Unis où les systèmes de post-traitement type SCR ne sont pas admis pour le moment.

## La suralimentation

L'évolution des systèmes de suralimentation : turbine et compresseur à géométrie variable, suralimentation double étage, permet, grâce à l'augmentation et la meilleure gestion et utilisation de l'air admis, d'améliorer les performances des moteurs (augmentation du couple sur toute la plage de régime), d'augmenter les puissances spécifiques tout en réduisant la consommation et les émissions de polluants (notamment les NOx, en autorisant de plus forts taux d'EGR).

## La conception des chambres de combustion

Pour tirer bénéfice des évolutions technologiques dans le domaine de l'injection, de la suralimentation et utiliser au mieux l'EGR, la forme de la chambre de combustion doit être optimisée pour améliorer la qualité de la combustion et donc réduire les émissions de polluants. Cette optimisation fait de plus en plus appel à la modélisation 3D grâce aux progrès accomplis ces dernières années par les codes de calcul.

## Les nouveaux procédés de combustion

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 NOx et de suies, tout en minimisant les effets sur la consommation et le bruit. La plupart des constructeurs et de nombreux instituts de recherche travaillent à l'adaptation de ces nouveaux procédés pour le véhicule industriel (Caterpillar, IFP, Lund, etc.).

À titre d'exemple, le procédé IFP NADI™ (Narrow Angle Direct Injection) exploite un système de combustion constitué d'un injecteur dont l'angle du cône d'injection est très fermé (60° contre 150° pour les systèmes traditionnels) et une chambre de combustion adaptée dans le piston. Ce système permet d'injecter le carburant très tôt dans le cycle moteur sans risque de mouillage des parois du cylindre, évitant ainsi la dilution du carburant dans le lubrifiant. Cela permet d'augmenter le temps consacré à l'homogénéisation du mélange air-carburant avant que l'auto-inflammation ne se produise. Une adaptation du taux de compression et du taux de recyclage des gaz brûlés est utilisée pour assurer un calage quasi-optimum de la combustion, en modulant la vitesse des réactions d'auto-inflammation. Les inconvénients de ce type d'approche résident dans une tendance à l'augmentation des émissions de bruit, de CO et d'hydrocarbures imbrûlés. Ces problèmes sont résolus là encore par le recours à des stratégies d'injection multiple adaptées pour la maîtrise du bruit et par l'utilisation d'un catalyseur d'oxydation pour l'élimination des HC et du CO.

Dans l'état actuel des développements appliqués aux poids lourds, le procédé NADI™ permet de réduire les émissions de NOx dans un rapport de 10 à 50 tout en maintenant un niveau de suies très bas sur plus de la moitié de la plage d'utilisation. Les travaux se poursuivent pour étendre cette zone jusqu'à la pleine charge.

## Le traitement des particules

Les filtres à particules utilisant des monolithes céramique (carbure de silicium ou cordiérite) présentent une efficacité de filtration largement supérieure à 90 %, y compris pour les particules ultra-fines. La principale difficulté réside dans la régénération du filtre qui consiste périodiquement à brûler les suies contenues dans le filtre. Différents principes sont utilisés en PL pour gérer cette régénération.

## Le filtre CRT (Continuously Regenerating Trap)

Ce filtre à particules, proposé par la société Johnson Matthey, est basé sur l'utilisation de NO<sub>2</sub> comme agent oxydant des

# Les techniques de dépollution des véhicules industriels

suies et ne nécessite pas de procédure spécifique pour la régénération qui s'effectue de manière continue. Un catalyseur d'oxydation placé en amont du filtre transforme NO en NO<sub>2</sub> lequel est utilisé pour oxyder les suies dans le filtre au fur et à mesure de leur piégeage. Ce système est efficace à partir de 260 °C et nécessite un rapport NOx/Particules supérieur à 8 et idéalement 20-25. Ce filtre nécessite cependant également l'utilisation d'un carburant à faible teneur en soufre (< 50 ppm).

## Le filtre catalytique

Un catalyseur d'oxydation imprégnée sur les parois du filtre permet également d'obtenir une régénération continue à partir de 300 °C. En cas de chargement de suie faisant suite à des fonctionnements prolongés à faible charge, une régénération active peut être provoquée via une action du contrôle moteur sur l'injection de carburant. Une partie du carburant est alors utilisée pour le réchauffage du filtre afin de déclencher la combustion des suies accumulées.

## Les systèmes destinés au retrofit de moteurs existants

Parallèlement à l'amélioration de la dépollution des véhicules neufs dictée par la réglementation antipollution, on assiste également au développement de systèmes de retrofit destinés à équiper des véhicules anciens, en particulier les bus ou les bennes à ordures. Les systèmes dits « passifs » sont généralement basés sur l'utilisation d'un additif mis dans le carburant et qui permet d'abaisser la température d'initiation de la combustion des suies et d'accélérer la régénération du filtre à particules. Les systèmes « actifs » sont basés généralement sur l'utilisation d'un filtre précédé d'un catalyseur d'oxydation. L'élévation de température nécessaire à la régénération du filtre est obtenue par exemple par l'injection de gazole, au moyen d'un injecteur placé dans la ligne d'échappement. Les hydrocarbures injectés vont

s'oxyder sur le catalyseur et générer la chaleur nécessaire à la régénération. Des systèmes de ce type sont proposés par la société Airmeex qui équipe de nombreuses flottes de bus en France (fig. 3).

Fig. 3

Vue d'un système Retrofit pour bus



## Le traitement des oxydes d'azote

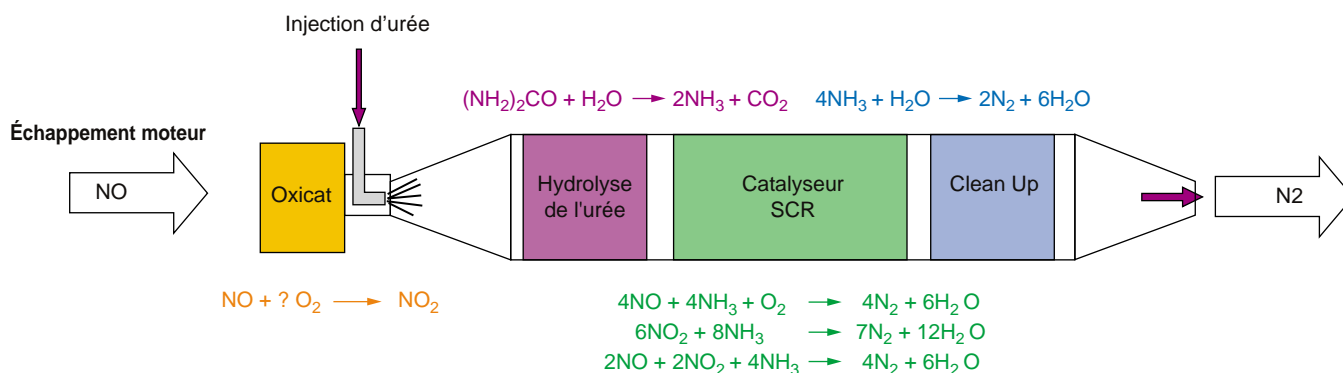
Pour la réduction catalytique des oxydes d'azote, deux technologies principales sont envisagées : la SCR (Selective Catalytic Reduction) et les pièges à NOx.

### La SCR

La réduction catalytique sélective par l'ammoniac, employée depuis très longtemps sur les installations fixes de combustion, possède une efficacité de 90 % lorsque les gaz sont situés dans la fenêtre de température du catalyseur (200-500 °C). Sur véhicule, le réducteur employé n'est pas l'ammoniac mais une solution aqueuse d'urée (NH<sub>2</sub>CONH<sub>2</sub>) qui injectée à l'échappement va libérer de l'ammoniac par une

Fig. 4

Schéma d'un système SCR



## Les techniques de dépollution des véhicules industriels

réaction d'hydrolyse.

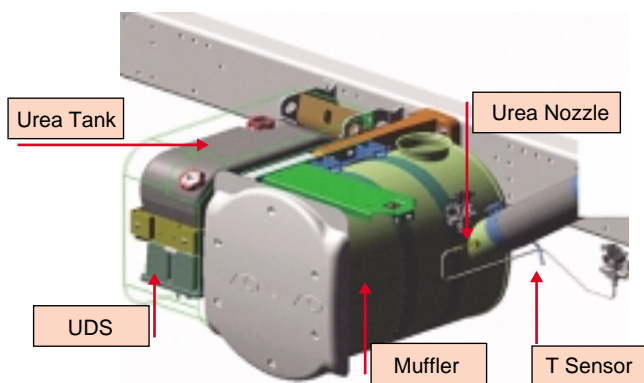
La figure 4 donne une vue schématique d'un système SCR. Le catalyseur d'oxydation placé en amont permet d'augmenter le rapport  $\text{NO}_2/\text{NO}$  des gaz d'échappement et ainsi d'accroître l'efficacité de conversion notamment à basse température en tenant compte du fait que la réaction de  $\text{NO}_2$  avec  $\text{NH}_3$  est plus rapide que la réaction de  $\text{NO}$  avec  $\text{NH}_3$ .

Le catalyseur dit de « clean-up » placé en aval du système permet de traiter les éventuels rejets d'ammoniac excédentaire, notamment pendant les phases transitoires.

La mise au point du système pour une application véhicule va nécessiter de calibrer très précisément la quantité d'urée injectée en fonction de la quantité de  $\text{NOx}$  émis par le moteur, de la température d'échappement, des caractéristiques du catalyseur. À ce titre, la présence du catalyseur de clean-up offre une latitude supplémentaire et permet d'atteindre des taux de conversion des  $\text{NOx}$  plus élevés sans réémission d'ammoniac à l'atmosphère.

La figure 5 donne un exemple du système implanté sur un véhicule. Pour les applications envisagées pour Euro 4, les consommations volumiques d'urée représentent de l'ordre de 4 à 8 % de la consommation de gazole.

Fig. 5 Implantation sur véhicule d'un système SCR



Comme on le voit, la SCR est une technique de traitement des  $\text{NOx}$  très efficace dont la sortie en série est prévue par de nombreux constructeurs comme DaimlerChrysler, DAF, Volvo, Iveco et Renault Trucks à partir de 2005. Son principal avantage est d'être sans impact majeur sur le fonctionnement du moteur qui peut donc bénéficier d'une optimisation accrue du rendement énergétique et donc autoriser une diminution des émissions de  $\text{CO}_2$ . Son inconvénient réside dans la nécessité d'embarquer à bord du véhicule et donc de distribuer dans des réseaux appropriés, l'urée nécessaire à son bon fonctionnement.

### Le piège à $\text{NOx}$

Le piège à  $\text{NOx}$  qui permet d'atteindre des taux d'efficacité comparables à celle de la SCR, sans présenter l'inconvénient d'embarquer un réducteur supplémentaire, représente une alternative pour le traitement des oxydes d'azote qui suscite actuellement de nombreux développements.

Le principe de fonctionnement d'un piège à  $\text{NOx}$  est basé sur l'alternance de 2 phases :

- un fonctionnement normal en mélange pauvre durant lequel les oxydes d'azote, après avoir été oxydés en  $\text{NO}_2$ , sont stockés sous forme de nitrates sur une masse adsorbante ;
- un fonctionnement en mélange riche durant lequel les  $\text{NOx}$  sont déstockés puis réduits par les réducteurs ( $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ) présents à l'échappement.

Le déstockage et la réduction des oxydes d'azote nécessitent donc un fonctionnement à une richesse du mélange air/carburant supérieure ou égale à 1, inhabituel pour un moteur diesel. Ce fonctionnement est obtenu par modification des réglages moteur (débit d'air, phasage et durées des injections, taux d'EGR). L'objectif des développements en cours est d'optimiser ces basculements de richesse pour atteindre le meilleur compromis  $\text{NOx}$ /surconsommation de carburant.

Les conditions de déstockage (niveau de richesse, réglages) influent sur sa durée et son efficacité : le déstockage, par exemple, est plus court à richesse élevée ( $> 1,15$ ) et meilleur pour des réglages privilégiant les émissions de  $\text{CO}$  plutôt que d' $\text{HC}$ . La régénération provoque également une forte montée en température du piège qui peut conduire à sortir de la fenêtre de stockage du piège et donc limiter l'efficacité de la phase de piègeage suivante.

La conjugaison de l'influence de ces différents paramètres tant sur le stockage que sur le déstockage montre que le meilleur compromis  $\text{NOx}$ /consommation est obtenue pour des richesses élevées de déstockage comme on le voit sur la figure 6.

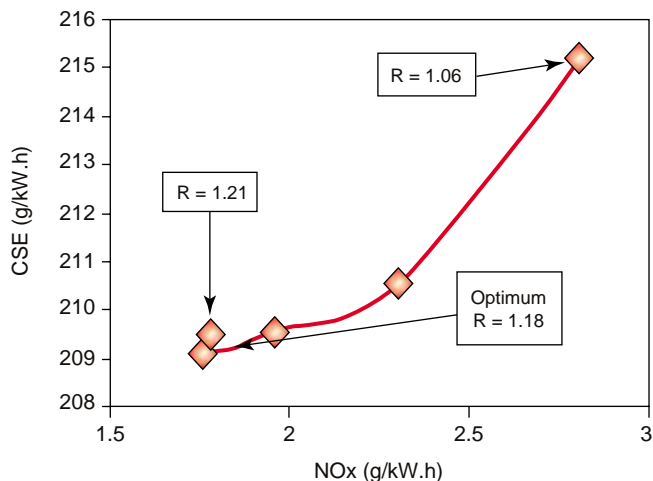
Grâce à l'optimisation de l'ensemble du système, on peut ainsi atteindre des efficacités de réduction d'environ 80 % pour des surconsommations en gazole de 2 à 5 %. Pour éviter les relargages de  $\text{CO}$  et d' $\text{HC}$  qui peuvent se produire lors des passages riches, on prévoit l'installation en aval du piège d'un catalyseur d'oxydation permettant de les traiter (un peu sur le même principe que le catalyseur de clean-up pour la SCR).

Le piège à  $\text{NOx}$  exige également l'utilisation d'un carburant sans soufre ( $< 10$  ppm). En effet en présence de soufre, le piège se sature progressivement de sulfates, plus stables que les nitrates, qui font chuter rapidement son efficacité et vont

# Les techniques de dépollution des véhicules industriels

nécessiter de désulfater périodiquement le piège par des passages riches à haute température.

Fig. 6 Piège à NOx : compromis NOx/consommation en carburant



Contrairement à la SCR, le piège à NOx fonctionne en étroite interaction avec le moteur à travers la gestion des passages riches. L'optimisation des stratégies devra donc tenir compte de leur impact éventuel sur le fonctionnement moteur et sa durabilité (dilution du lubrifiant, contraintes thermiques, etc.) et intégrer également le vieillissement thermique du piège. Les passages riches notamment sur les points de forte charge conduisent à des émissions de fumées qui rendent indispensable l'utilisation d'un filtre à particules.

## Le traitement combiné des NOx et des particules

### Piège à NOx + filtre à particules

La mise au point d'un système combinant piège à NOx et filtre à particules va nécessiter de définir la technologie de filtre la mieux adaptée au traitement combiné (CRT, filtre catalytique, régénération avec additif dans le carburant), de définir la position respective des deux systèmes et de combiner les stratégies de contrôle moteur nécessaires au bon fonctionnement des deux systèmes (stockage/déstockage des nitrates, désulfatation du piège à NOx, régénération du filtre à particules) afin d'optimiser le compromis global NOx/Particules/surconsommation.

Lors de cette optimisation, la gestion thermique du système complet sera particulièrement importante puisqu'elle devra tenir compte de la fenêtre d'efficacité du piège, de la fenêtre d'efficacité du filtre CRT ou du filtre catalytique selon le choix retenu, de l'impact de la régénération sur la durabilité du piège si celui-ci est placé en aval du filtre.

La solution optimale dépendra donc de l'application visée : émissions de base du moteur, températures d'échappement, conditions d'utilisation (roulage urbain ou autoroutier).

### SCR + filtre à particules

De la même façon, des systèmes combinent SCR et filtre à particules. Là encore, le choix des positionnements respectifs devra répondre aux exigences des deux systèmes en terme de fenêtre d'efficacité, de stratégies de régénération et de durabilité.

### Le 4-voies

La solution « ultime » en terme de dépollution est la catalyse 4-voies qui élimine simultanément les 4 polluants (CO, HC, NOx et particules). Elle consiste à imprégner sur un support filtrant une formulation capable de traiter le CO, les HC et les NOx.

La difficulté de cette approche réside dans la nécessité de laisser les sites actifs qui assurent le traitement des NOx, accessibles à la surface du filtre et éviter qu'une couche trop importante de suie ne les recouvre. La porosité du matériau céramique est donc particulièrement étudiée afin de limiter ce phénomène. La conception du support céramique doit de même éviter un accroissement excessif de la perte de charge due à la présence du revêtement catalytique.

Pour les véhicules particuliers, Toyota a ainsi commercialisé sur véhicule léger le système DPNR qui est un filtre imprégné d'un revêtement de type piège à NOx. Des applications du même type sont en développement pour le PL. Des concepts 4-voies basés sur la technologie SCR sont également à l'étude.

## Conclusion

Le respect des normes anti-pollution appliquées aux véhicules industriels a nécessité et nécessitera encore d'importantes évolutions technologiques tant au niveau des moteurs que par la mise au point de systèmes complexes de traitement des gaz d'échappement. Ces évolutions qui doivent se faire en considérant, par ailleurs, les contraintes de consommation et de durabilité propres à ces applications, auront des répercussions sur le coût des véhicules.

Des estimations montrent que les deux solutions (EGR + Filtre à particules ou SCR + Filtre à particules), envisageables à court terme pour le respect de niveaux de type US07, se traduisent par un surcoût de la chaîne cinématique de l'ordre de 25 à 30 %. En terme d'impact sur la consommation, la voie SCR, qui autorise des réglages moteur à meilleur rendement, présente, par rapport à l'EGR, un avantage de 3 à 5 % (consommation corrigée de la consommation d'urée), avantage qui se

## Les techniques de dépollution des véhicules industriels

traduit par des gains en CO<sub>2</sub> de l'ordre de 6 % si l'on considère les émissions du puits à la roue. Le surcoût annuel d'utilisation (incluant le carburant, l'urée, la maintenance, etc.) est d'environ 50 \$ pour la SCR contre 500 \$ pour l'EGR. L'impact annuel du surinvestissement (coût du système, coût d'utilisation, impact sur la charge transportée, etc.) est quant à lui estimé à 1500 \$ pour la SCR et 2000 \$ pour la solution EGR.

*Remerciements* : L'auteur remercie la société Renault Trucks pour les informations et l'aide qu'elle a apportée pour la rédaction de cet article.

*Brigitte Martin*  
*brigitte.martin@ifp.fr*

*Manuscrit définitif remis le 17 décembre 2004*

