

Principe de fonctionnement des systèmes de dépollution des moteurs thermiques à combustion interne

1 - Emissions de gaz polluants.

Les différentes réglementations applicables aux émissions des moteurs à combustion interne imposent des limites pour les gaz polluants applicables ou non en fonction du contexte de fonctionnement du moteur et du type de carburant utilisé (Diesel, gaz, hydrogène...).

Pour les moteurs Diesel les limitations s'appliquent aux polluants suivants :

- Le monoxyde de carbone (CO)
- Les hydrocarbures imbrûlés (HC)
- Les oxydes d'azote ou NOx (NO, NO₂, N₂O)
- Les particules fines en masse (PM) et en nombre (PN).

Les solutions utilisées en ligne d'échappement (fig. 1) pour limiter de façon optimale les émissions de ces gaz polluants sont :

- Catalyseur d'oxydation pour traiter le monoxyde de carbone (CO) et les hydrocarbures (HC)
- Filtre à particules pour traiter les particules fines (PM) et (PN)
- SCR (Selective Catalytic Reduction) pour traiter Les oxydes d'azote (NOx).

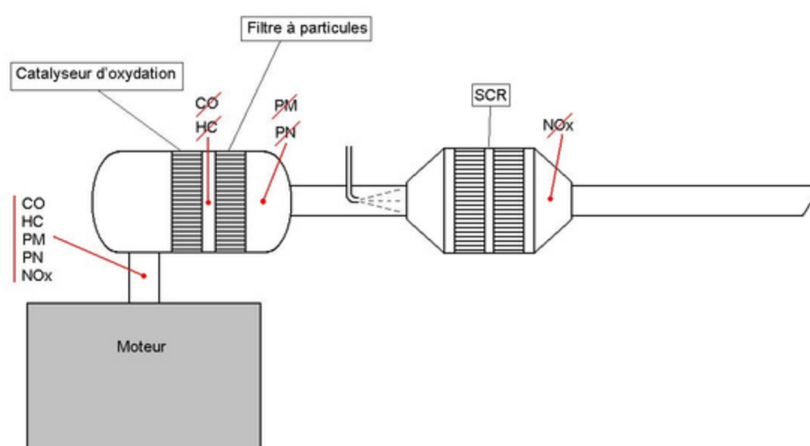


Figure 1 (Systèmes de dépollution en ligne d'échappement d'un moteur Diesel)

Ces systèmes de dépollution nécessitent des températures élevées pour fonctionner correctement. Ils doivent en conséquence être placés au plus près de la sortie du moteur.

2 - Le catalyseur d'oxydation

Les polluants de type HC, CO et autres COV sont oxydés à très haute température en H₂O et CO₂. Il s'agit de l'oxydation thermique. Pour que ces réactions chimiques s'opèrent à des températures plus faibles un catalyseur est utilisé pour réaliser une oxydation catalytique.

Le catalyseur d'oxydation qui est généralement le premier composant d'un système de dépollution sur une ligne d'échappement est positionné en tête au plus près de la sortie du moteur.

Sa fonction principale est de traiter les hydrocarbures imbrûlés (HC) et le monoxyde de carbone (CO), mais aussi les composés organiques volatils (COV), les aldéhydes, et autres polluants nocifs de l'air. C'est un système passif qui ne demande pas d'injection d'additif ou de régénérations régulières pour fonctionner.

Les réactions principales d'un catalyseur d'oxydation (fig. 2) sont :

- $\text{HC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$

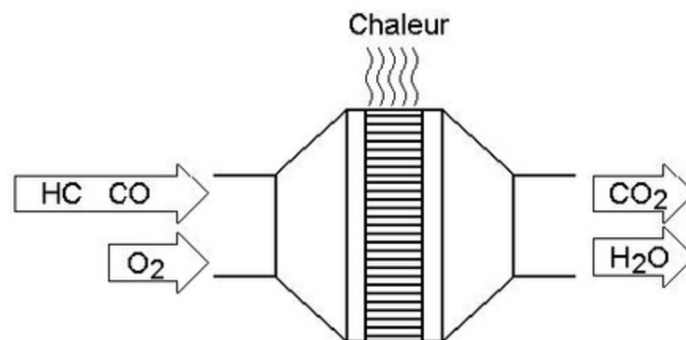


Figure 2 (Réactions principales d'un catalyseur d'oxydation)

Le substrat du catalyseur est constitué de multiples petits canaux au travers desquels le gaz s'écoule maximisant ainsi la surface de réaction. Il est imprégné de matériaux précieux (platine, palladium) pour que les réactions puissent s'opérer aux températures normales des gaz d'échappement.

Le volume du catalyseur est directement lié au débit des gaz d'échappement et à leur température.

Le chargement en métaux précieux est lié à la concentration des divers gaz polluants à la sortie du moteur. Le taux de réaction dépend de la température du lit de catalyseur et du temps que les polluants passent dans le catalyseur.

Note : Les moteurs à essence utilisent des catalyseurs dits « 3 voies ». Il s'agit en effet d'un système réalisant 3 réactions chimiques : deux d'oxydation, oxydation des HC et oxydation des CO, et une de réduction des NOx. Ce système est composé de deux catalyseurs, un de réduction et un d'oxydation.

3 - Le traitement des particules des moteurs Diesel

Les particules de suie émises par les moteurs diesel peuvent être réduites (fig. 3) à différents niveaux d'efficacité en fonction du système de post traitement choisi :

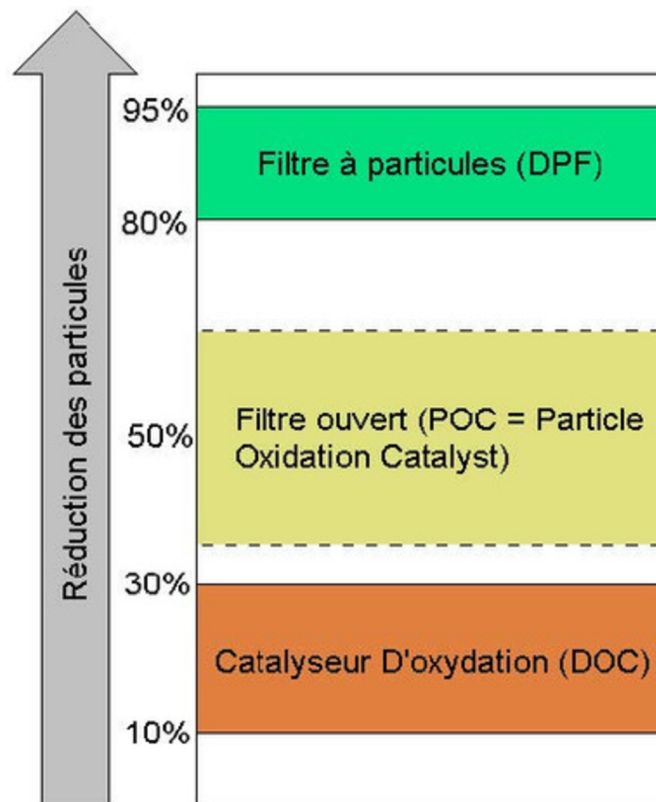


Figure 3 (Efficacité de réduction des particules)

Une très faible réduction des particules, de l'ordre de 10% à 30% est apportée par le catalyseur d'oxydation, qui peut être améliorée par l'ajout en série d'un filtre ouvert (POC).

En ajustant la quantité de métaux précieux du catalyseur d'oxydation (DOC), les NO produits par le moteur seront transformés en NO₂ qui permettront la régénération continue du POC sans besoin d'augmenter la température des gaz d'échappement.

Une réduction importante des particules ne pourra être apportée que par un FAP (DPF).

3.1 - Le filtre à particules (FAP) ou Diesel Particulate Filter (DPF)

Le FAP pour filtre à particule, ou en anglais DPF pour Diesel Particulate Filter, réduit significativement les émissions de particules des moteurs diesel. Il est constitué de multiples canaux bouchés de part et d'autre du filtre, ce qui oblige les gaz d'échappement à traverser les parois poreuses où les particules s'accumulent (fig.4).

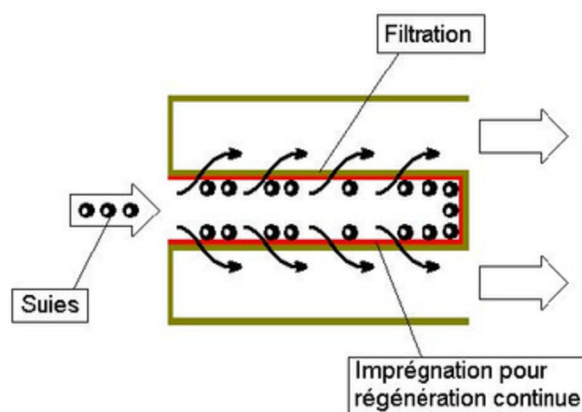


Figure 4 (Principe de filtration d'une cellule de FAP)

La régénération du filtre s'effectue en consommant les particules accumulées qui se transforment en produits gazeux.

Il s'agit d'une régénération active lorsque la température des gaz doit être augmentée en agissant sur les paramètres d'injection du moteur (série de post-injections et augmentation de la charge) pour atteindre la température requise au processus de régénération.

Il s'agit d'une régénération passive lorsque la charge du moteur ainsi que l'imprégnation du filtre par des matériaux spéciaux permettent d'atteindre une température suffisante en continue. Il faut en ce cas faire attention au risque d'obturation du FAP des moteurs de secours mis en route périodiquement avec une charge nulle ou insuffisante.

Lors de la régénération, les particules de carbone s'oxydent pour former du CO_2 et possiblement du CO qui est indésirable. Les particules de carbone réagissent aussi avec le NO_2 pour former du NO .

La maîtrise des pertes de charge induites par l'accumulation des particules est un élément important de la conception d'un FAP.

3.2 - Le Filtre ouvert ou Particle Oxidation Catalysts (POC)

Le POC pour Particle Oxidation Catalysts, est un système de « filtre ouvert », contrairement au FAP qui est un « filtre fermé ».

Le POC capture et stocke les particules un temps suffisant pour qu'une oxydation catalytique puisse les convertir.

Un POC saturé en particules assurera toujours la circulation des gaz d'échappement mais perdra en capacité de conversion. Contrairement à un FAP il n'y a pas de risque de blocage du système de dépollution.

La particularité de ce type de filtre est qu'il sera typiquement constitué d'un substrat métallique (fig.5) sous forme de feuilles plates et ondulées enroulées autour d'elles même.



Figure 5 (Substrat métallique constitutif d'un POC)

L'oxydation des particules est réalisée en phase de régénération active ou passive où le dioxyde d'azote (NO_2) généré par le catalyseur d'oxydation (DOC) placé en amont entre en réaction avec les particules de suie pour les transformer en produits gazeux.

4 - Le SCR

4.1 - La dépollution des oxydes d'azote

Deux technologies sont principalement utilisées pour réduire la production des oxydes d'azote (NO_x), l'EGR (Exhaust Gas recycling) et le SCR (Selective Catalytic Reduction).

L'EGR recycle une partie des gaz d'échappement à l'admission réduisant ainsi l'apport en oxygène ce qui limite la production de NO_x . L'EGR peut être réalisée soit (fig. 6) par un croisement des soupapes à un moment opportun du cycle moteur (Internal EGR using Negative Valve Overlap) ou (fig. 7) par un circuit externe reliant l'échappement à l'admission où le débit de recyclage est contrôlé par une vanne dite « vanne EGR ».

Bien qu'effectives, ces technologies présentent une efficacité insuffisante pour atteindre les taux de réduction de NO_x demandés aujourd'hui.

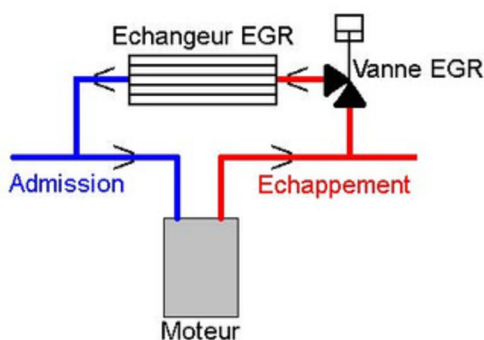


Figure 6 (EGR interne)

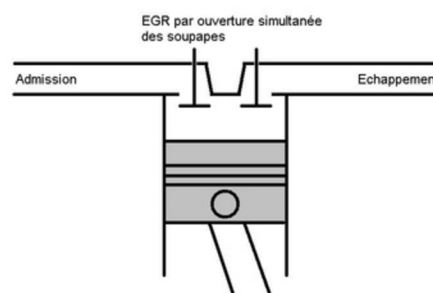


Figure 7 (EGR Externe)

Le SCR (fig. 8) permet en complément de l'EGR une réduction significative des taux de NOx et est à ce jour la technique la plus efficace.

Une solution liquide d'urée (ou AdBlue) est injectée dans la conduite d'échappement en amont du SCR, solution qui se décompose en ammoniacque sous l'effet de la chaleur et entre en réaction chimique dans le SCR pour transformer les NOx en Azote (N₂), en vapeur d'eau (H₂O), et en gaz carbonique (CO₂).

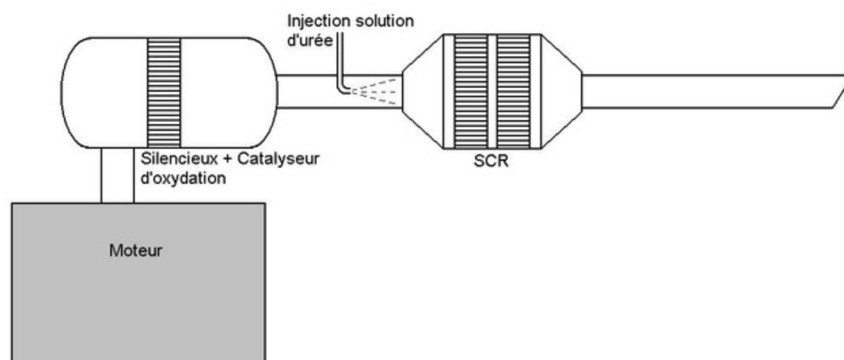


Figure 8 (Système SCR)

4.2 - La réduction catalytique sélective

Le convertisseur catalytique de type monolithique est formé en structure de nid d'abeille constitué de nombreux canaux au travers desquels les gaz passent et subissent une réaction catalytique. La réaction catalytique se produit sur les zones actives de conversion déposées en couche fine solide sur le substrat.

De l'ammoniaque (NH₃) est utilisée en agent de réduction dans un SCR. L'ammoniaque est générée à partir d'une solution d'urée et d'eau injectée dans la conduite d'échappement. La solution d'urée connue sous le nom d'AdBlue comprend 67.5% d'eau et 32.5% d'urée.

La décomposition thermique de la solution pulvérisée, d'eau et d'urée, engendre après évaporation de l'eau en première réaction la formation d'un équivalent NH_3 et d'un acide isocyanique (HNCO) intermédiaire. La réaction suivante, au contact du catalyseur, est l'hydrolyse de l' HNCO qui engendre idéalement la formation de NH_3 et de gaz carbonique.

Les quatre réactions de base (fig. 9) de réduction des NO_x dans un SCR à injection de solution d'urée sont :

- Thermolyse de l'urée : $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HNCO}$
- Hydrolyse du HNCO : $\text{HNCO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{CO}_2$
- Réaction SCR standard : $4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 6\text{H}_2\text{O}$
- Réaction SCR rapide : $2\text{NH}_3 + \text{NO} + \text{NO}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$

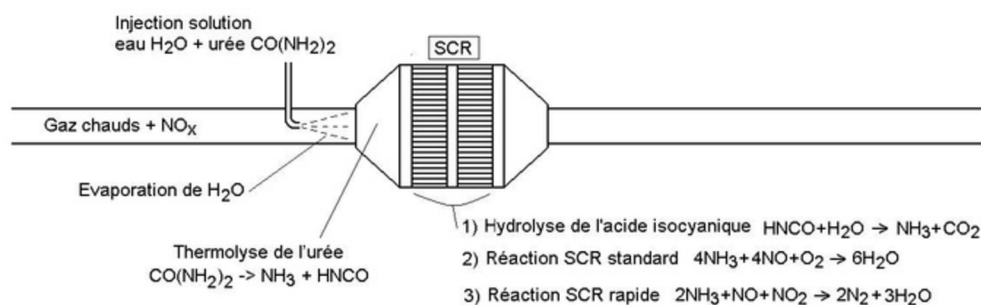


Figure 9 (Réactions de réduction catalytique sélective d'un SCR)

L'un problème courant est l'oligomérisation et la polymérisation de l' HNCO en un dérivé solide de l'urée qui se décompose lentement même à haute température. Les conséquences sont, une dispersion hétérogène de l'ammoniaque, et une obturation potentielle du catalyseur et de la conduite de sortie.

Le système d'injection doit assurer une bonne homogénéité de la dispersion de NH_3 sur la surface du catalyseur.

Les données typiques caractérisant un système SCR sont :

- Débit max des gaz (Nm^3/h)
- Température des gaz à l'entrée du SCR ($^{\circ}\text{C}$)
- Taux de NO_x à l'entrée du SCR (mg/Nm^3)
- Réduction de NO_x requise (%)
- Taux maximum de NH_3 (ppm)
- Perte de charge du SCR (mbar).