

Année universitaire 2021

Module : Les Moteurs à combustion interne II

Semestre 2

Préface

Ce cours est réalisé en utilisant les informations et illustrations mis à la disposition du grand public sur l'industrie automobile dans les livres et les sites spécialisés supportés par : Google, You tube etc. M

Mis à part l'organisation et le choix du contexte conformément au module le Moteur Diesel du programme officiel de la filière.

L'auteurship des illustrations, des schémas et des démonstrations, revient de droit à leurs auteurs d'origines comme mis à la disposition du grand public.

Note:

Certains contenus ne sont peut être pas retraçables, vu leur ancienneté, leur retrait par leurs auteurs ou simplement sont dépassés et remplacés par du matériels nouveaux.

Contribution du Dr. M. Naoun

Deuxième partie

IV. La pollution Automobile

Depuis toujours, il a été su et dit que le Diesel est plus polluant que l'essence ou le GPL.

Lui a été associées des fumées noires opaques, salissantes et une mauvaise odeur.

Depuis l'arrivée des systèmes antipollution l'essence comme le gasoil se concurrencent en quantité comme en qualité.

De même qu'une différenciation des éléments polluants est établie.

Depuis le procédé d'injection, la combustion à la ligne d'échappement les éléments nocifs sont traqués et éliminés respectivement pour chaque type de carburant.

IV.1 Définition

La lutte de la pollution des moyens de transport est l'une des préoccupations principales des constructeurs automobiles.

Pour ces raisons des systèmes de réduction de la pollution des moteurs sont introduits et constamment améliorés.

La pollution des échappements des moyens de transport est presque 27% de la pollution d'air dans notre planète terre. Ces gaz sont très nocifs pour la santé de l'être humain comme les différentes maladies respiratoires et d'autres nombreuses maladies, comme l'allergie. Les échappements des moyens de transport sont un vrai problème mondial.

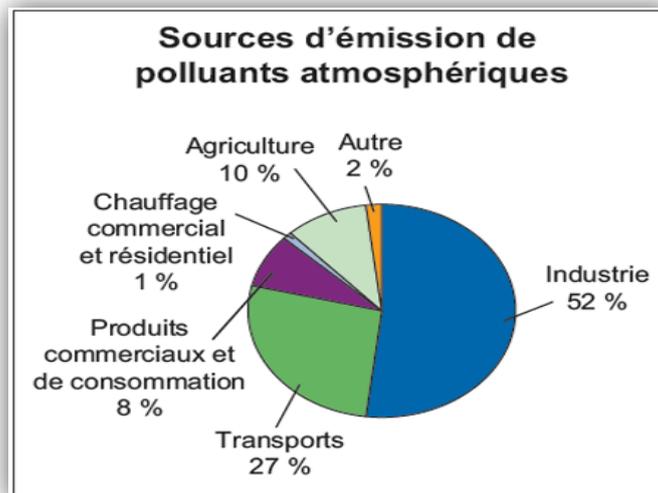


Figure 1. Schéma du pourcentage de la pollution automobile

IV.2 La pollution Diesel

La pollution se traduit par l'émanation de gaz toxiques qui sont nuisibles à l'environnement et à la santé.

IV.2.1 Chimie des gaz liés à la pollution

L'automobile est directement responsable de l'émission de deux gaz à effet de serre : du dioxyde de carbone (CO_2) en grande quantité et, dans une moindre mesure, du dioxyde d'azote (NO_2). Indirectement, l'automobile contribue aussi à la présence d'ozone (O_3) dans l'atmosphère terrestre.

La pollution automobile est le résultat de réactions chimiques :

IV.2.2 Définitions des composés

Masse molaire des principaux éléments (kg.kmol^{-1}) :

- Hydrogène (**H**) : 1
- Carbone (**C**) : 12
- Azote (**N**) : 14
- Oxygène (**O**) : 16

Masse volumique des corps en présence (kg.m^{-3} à 273 K et 1013 hPa (hectopascal)) :

- Diazote (N_2) : 1,25
- Dioxygène (O_2) : 1,43
- Dioxyde de carbone (CO_2) : 1,96
- Eau (H_2O) : 1 000
- Gazole : 845
- Essence : 760
- GPL : 550

IV.2.3. Formules chimiques des composés

- Formule chimique de l'air pur (gaz rares assimilés au diazote) :

Composition massique de l'air : dioxygène (O_2) 23 % ; diazote (N_2) 77 %

- masse molaire du dioxygène : $16 \times 2 = 32 \text{ kg}$

- masse d'air contenant une kilomole de dioxygène : $(32 / 23) \times 100 = 139 \text{ kg}$

- masse de diazote correspondante : $139 - 32 = 107 \text{ kg}$

- masse molaire du diazote : $14 \times 2 = 28 \text{ kg}$

- coefficient du diazote : $107 / 28 = 3,8$

Formule chimique de l'air pur : $\text{O}_2 + 3,8 \text{ N}_2$

- Formule chimique du gazole :

Composition massique du gazole : carbone (C) 87 % ; hydrogène (H) 13 %

Indice du carbone : $87 / 12 = 7,25$; indice de l'hydrogène : $13 / 1 = 13$

formule chimique : **C_{7,25}H₁₃**

- Formule chimique de l'essence :

Composition massique de l'essence : carbone (C) 84 % ; hydrogène (H) 16 %

Indice du carbone : $84 / 12 = 7$; indice de l'hydrogène : $16 / 1 = 16$

Formule chimique : **C₇H₁₆**

- Formule chimique du GPL :

Composition du GPL : butane (C₄H₁₀) 50 % ; propane (C₃H₈) 50 %

formule chimique approchée : **C_{3,5}H₉**

IV.3 Notion de combustion

- Combustion du gazole : **C_{7,25}H₁₃**



O₂ : dioxygène

N₂ : diazote

CO₂ : dioxyde de carbone

H₂O : eau

À partir de la masse molaire de chaque élément présent dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :

1 kg de gazole + 3,36 kg de dioxygène + 11,2 kg de diazote → 3,19 kg de CO₂ + 1,17 kg d'eau + 11,2 kg de diazote

À partir de la masse volumique de chaque corps intervenant dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :

1 litre de gazole + 1 985 litres de dioxygène + 7 570 litres de diazote → 1 375 litres de CO₂ + 1 litre d'eau + 7 570 litres de diazote

- Combustion de l'essence : **C₇H₁₆**



À partir de la masse molaire de chaque élément présent dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :

1 kg d'essence + 3,52 kg de dioxygène + 11,76 kg de diazote → 3,08 kg de CO₂ + 1,44 kg d'eau + 11,76 kg de diazote

À partir de la masse volumique de chaque corps intervenant dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :

1 litre d'essence + 1 870 litres de dioxygène + 7 150 litres de diazote → 1 195 litres de CO₂ + 1,1 litre d'eau + 7 150 litres de diazote

- Combustion du GPL : **C_{3,5}H₉**



À partir de la masse molaire de chaque élément présent dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :

1 kg de GPL + 3,6 kg de dioxygène + 12 kg de diazote → 3 kg de CO₂ + 1,6 kg d'eau + 12 kg de diazote

À partir de la masse volumique de chaque corps intervenant dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :

1 litre de GPL + 1 390 litres de dioxygène + 5 320 litres de diazote → 850 litres de CO₂ + 0,875 litre d'eau + 5 320 litres de diazote

IV.4 Formation des oxydes

- Formation de monoxyde de carbone : **2 C + O₂ → 2 CO**
- Formation de monoxyde d'azote : **N₂ + O₂ → 2 NO**
- Formation de dioxyde d'azote : **2 NO + O₂ → 2 NO₂**
- Formation d'ozone : **3 O₂ → 2 O₃**

IV.5 Énergie libérée par la combustion du carburant (Méga Joules/ Kg)

- Énergie brute libérée par la combustion du carburant :

Gazole : **44,3 MJ.kg⁻¹ (37,4 MJ.l⁻¹)**

Essence : **46,9 MJ.kg⁻¹ (35,6 MJ.l⁻¹)**

GPL : **48,7 MJ.kg⁻¹ (26,8 MJ.l⁻¹)**

- Énergie nette libérée par la combustion du carburant :

Gazole : **41,7 MJ.kg⁻¹ (35,2 MJ.l⁻¹)**

Essence : **43,7 MJ.kg⁻¹ (33,2 MJ.l⁻¹)**

GPL : **45,1 MJ.kg⁻¹ (24,8 MJ.l⁻¹).**[7]

IV.5.1 Bilan de CO₂, de NO_x et de particules.

La motorisation diesel relâche un peu moins de dioxyde de carbone : 123 grammes par kilomètre parcouru, contre 127 pour les véhicules essence selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

Cela dit, parmi les différents polluants de l'air, en plus du CO₂, les véhicules diesel sont également à l'origine de l'émission d'oxydes d'azote, les NO_x – définis comme NO_x = NO + NO₂) – et de particules en suspension.

Les véhicules diesel émettent cinq fois plus de NO_x que les véhicules essence, et deux tiers des particules fines du trafic routier.

V. Effets des polluants sur la santé

V.1. La Pollution de l'air: quelques faits

- On estime que la pollution de l'air tue entre 2,7 et 3,0 millions d'êtres par an — soit environ 6 % de toutes les morts annuelles.
- Environ 9 morts sur 10 imputables à la pollution de l'air ont lieu dans les pays en développement, où vit approximativement 80 % de la population mondiale.
- Environ 2,5 milliards d'habitants vivent avec des niveaux élevés de pollution de l'air dans des espaces intérieurs. Cette pollution est due à la combustion de bois, de fientes animales, de résidus de récolte et de charbons pour la cuisson et le chauffage. La plupart des victimes de la pollution des espaces intérieurs sont des femmes et des filles, qui ont la charge principale de la cuisson et des soins ménagers.
- La pollution de l'air des espaces extérieurs touche plus de 1,1 milliard d'habitants, surtout dans les villes. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) estime qu'on pourrait empêcher environ 700.000 morts par an dans les pays en développement si on ramenait à des niveaux moins dangereux trois principaux polluants de l'atmosphère — CO, PM et Pb.
- Il est estimé en 1995 à près de 100 milliards de dollars par an le coût direct de la pollution urbaine de l'air dans les pays en développement. A elle seule, la bronchite chronique entraîne environ 40 milliards de dollars de dépenses.
- Dans les villes où il n'y a pas de mesures antipollution, des millions de gens sont mis en danger par la pollution des espaces extérieurs. Des villes à population dense et grandissante, comme Bangkok, Manille, Mexico et New Delhi, sont souvent ensevelies sous un voile de pollution provenant de camions, d'automobiles et d'émissions industrielles non réglementées.

- Non seulement la pollution de l'air constitue un danger pour la santé, elle réduit aussi la production alimentaire et les récoltes de bois, parce que des niveaux élevés de pollution empêchent la photosynthèse.

V.2 Inhalation des Particules

Mis à part les maladies de la peau et la pollution des eaux, les voies respiratoires sont directement touchées par la pollution de l'air. Le taux de particules inhalées conduit à différents degrés de pénétration des particules dans le système respiratoire.

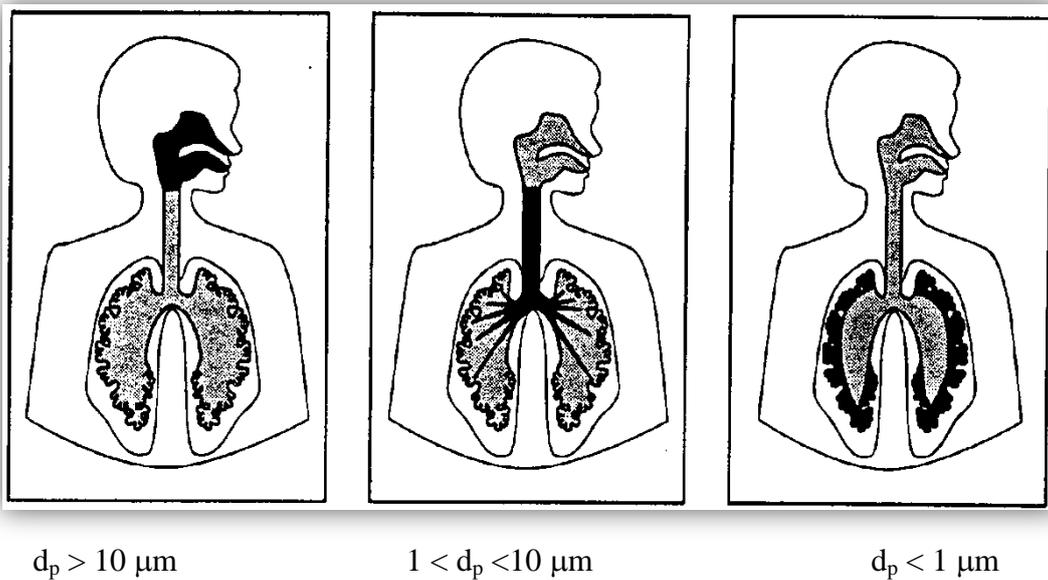


Figure V.1. Représentation de l'inhalation des particules fines

V.3 Différents types de polluants

- Le SO_2 se transforme en acide sulfurique, avec effet pulmonaire, notamment bronchique.
- les particules fines ; elles se fixent plus ou moins profondément sur l'appareil respiratoire interne. Leur toxicité est à long terme et dépend : de leur taille, de leur forme et de leur composition chimique. (hydrocarbures polycycliques absorbés, silice, métaux lourds toxiques, etc.). Les effets directs apparaissent essentiellement à long terme
- le polluant primaire NO se fixe sur l'hémoglobine avec effet mutagène. Le NO_2 qui entraîne une baisse des fonctions respiratoires et de la résistance aux infections, il favorise la synthèse de l'immunoglobuline E, un marqueur de l'allergie.
- l'ozone (O_3) agit par irritation des muqueuses oculaires et pulmonaires et aggrave les symptômes allergiques.

- le CO se fixe sur l'hémoglobine à la place de l'oxygène, entraînant syncope, asphyxie et même décès.
- les hydrocarbures et les composés organiques volatils (COV, précurseurs de l'ozone), ont une toxicité variable. Le benzène et le formaldéhyde (formol) sont des cancérigènes reconnus.

V.4 Effets sur la santé humaine

V.4.1 Généralités :

Chaque jour, que ce soit en plein air, à l'intérieur d'un logement ou dans un cadre professionnel, nous respirons plus de dix mètres cubes d'air. Cet air pénètre directement dans nos poumons pour passer dans notre sang. S'il est pollué, cet air est source de symptômes ou de maladies au niveau individuel et peut induire une surmortalité (décès prématurés) et une réduction de l'espérance de vie au niveau de la population.

Par ailleurs, des dépôts d'origine atmosphérique (dans l'eau et le sol, sur la végétation) peuvent avoir des conséquences indirectes sur la santé humaine en contaminant les aliments et l'eau que nous ingérons.

Des substances peuvent également avoir un effet indirect sur la santé en provoquant des phénomènes tels l'augmentation des UV-B ou le réchauffement climatique.

La pollution de l'air ambiant consiste le plus souvent en un mélange (ou « cocktail ») de polluants provenant d'origines variées (industries, circulation automobile, logements, agriculture,...) et les polluants sont parfois présents en très faible quantité. Par ailleurs, l'exposition peut avoir lieu sur une courte ou sur une longue période. L'établissement d'une relation de cause à effet entre la santé et la pollution de l'air est donc plus complexe que dans le cadre d'une exposition aiguë à une substance isolée. Néanmoins, les informations ci-dessous donnent un aperçu des différents impacts sanitaires de la pollution de l'air.

V.4.2 Quelques chiffres :

- 3,7 millions de décès prématurés en 2012 dans le monde dus à la pollution ambiante de l'air extérieur dans les zones urbaines et rurales (OMS) ;
- 420 000 décès prématurés causés en 2010 par la pollution atmosphérique dans l'UE (Source : Commission Européenne).
- 21 400 décès prématurés en UE-25 en 2000 causés par l'ozone troposphérique.
- 13 000 décès prématurés par an, dont 24 enfants, causés par les PM_{2,5} en Belgique en 2000.
- 350 000 décès prématurés (dont 680 enfants) causés par les PM_{2,5} dans la population de l'UE-25. S'ajoutent à cela des centaines de milliers de cas de bronchites, des

milliers d'hospitalisations ainsi que des millions de journées de médication (Source : Programme CAFE).

- Une augmentation à long terme de 10 µg/m³ des concentrations de PM 2,5 dans l'air ambiant provoquerait un accroissement (Source : OMS):
- de 6 % des risques de mortalité ;
- de 12 % des risques de maladies cardiovasculaires;
- et de 14 % des risques de cancers des poumons.
- 7,3 % de la mortalité totale serait attribuable à l'exposition chronique aux concentrations en PM10 supérieures à 20 µg/m³ à Liège en 2004 (Source : APHEIS).

V.4.3 Effets de l'inhalation et l'ingestion de polluants atmosphériques :

V.4.3.1 Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz toxique qui se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang. Dans l'environnement extérieur, les concentrations en CO sont bien plus faibles que celles rencontrées en milieu intérieur lors d'intoxications mais on peut malgré tout observer certains effets neurologiques et même des troubles cardio-vasculaires ou pulmonaires chez les personnes à risque.

Par ailleurs, le CO participe aux mécanismes de formation de l'ozone troposphérique.

V.4.3.2. Dioxyde de soufre

Le dioxyde de soufre (SO₂) est un gaz irritant qui agit en synergie avec d'autres substances notamment les particules en suspension. Il est associé à une altération de la fonction pulmonaire chez l'enfant et à une exacerbation des symptômes respiratoires aigus chez l'adulte. Les personnes asthmatiques y sont particulièrement sensibles. Le SO₂ peut provoquer une hausse de la mortalité liée à des accidents cardio-vasculaires. Il est devenu tristement célèbre suite à de graves épisodes de pollution ayant causé de nombreux décès dans les populations exposées: Londres en 1952 ou Engis en 1930.

Le SO₂ contribue également à la formation de particules secondaires.

V.4.3.3. Oxydes d'azote

Le dioxyde d'azote (NO₂) est un gaz irritant. A partir d'une certaine concentration, il peut entraîner une altération de la fonction respiratoire, une hyperréactivité bronchique chez l'asthmatique et un accroissement de la sensibilité des bronches aux infections chez l'enfant.

Aux teneurs généralement mesurées dans l'air ambiant, le monoxyde d'azote (NO) n'est pas considéré comme toxique.

Les NO_x interviennent également dans le processus complexe de formation et de destruction d'ozone dans la basse atmosphère et dans la formation de particules fines secondaires.

V.4.3.4 Particules fines en suspension

Les particules en suspension (ou particulate matter, PM) sont néfastes pour la santé. L'éventail des effets est large, mais ce sont surtout les systèmes respiratoires et cardiovasculaires qui sont affectés. Rien ne permet de penser qu'il existe un seuil au-dessous duquel on pourrait s'attendre à ce qu'il n'y ait aucun effet indésirable sur la santé. Toute augmentation du niveau de concentration de particules entraîne une augmentation des effets sanitaires dans les populations exposées.

L'importance des effets négatifs pour la santé dépend, outre de la constitution et de la sensibilité de chaque individu, de la composition des poussières (certains types de particules fines sont plus nuisibles que d'autres, p. ex. les suies issues de la combustion du charbon, du diesel et du bois), de leur concentration, du temps d'exposition et de la distribution des tailles de particules.

Après inhalation, la fraction inférieure à 10 µm (les particules plus grosses sont plus facilement éliminées par capture dans le nez) se dépose dans la partie supérieure du système respiratoire. Les plus petites pénètrent dans le système respiratoire encore plus profondément, où elles se déposent. De là, elles entrent plus facilement et rapidement dans la circulation sanguine.

Les particules d'un diamètre aérodynamique de 10 µm ont une pénétration alvéolaire de 1,3 %, les particules de 5 µm une pénétration de 30 %, celles de 4 µm une pénétration de 50 % et celles de 1 µm sont associées à une pénétration de 97 %. Une partie des petites particules est exhalée.

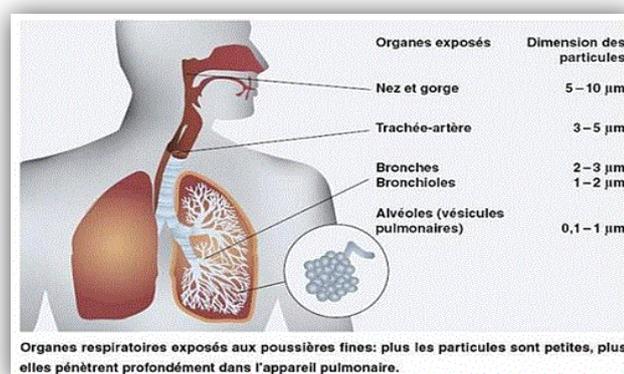


Figure V.2. Pénétration des particules fines dans le système respiratoire

VI. MOYENS DE PROTECTION CONTRE LA POLLUTION AUTOMOBILE

VI.1. La ligne d'échappement

Aujourd'hui, la ligne d'échappement d'un véhicule ne se limite plus à réduire les bruits des gaz moteur, elle contribue à faire diminuer l'émission d'éléments toxiques polluants.

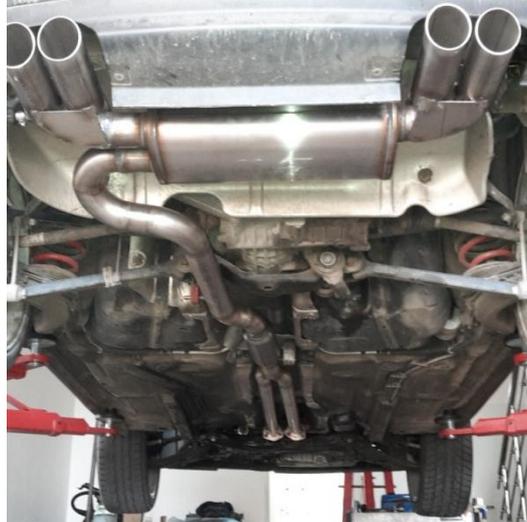


Figure VI.1. Présentation de la ligne de d'échappement

VI.1.1. Différence entre moteur en ligne et moteur en V

Si on a l'habitude d'avoir affaire à une seule ligne d'échappement, les voitures plus haut de gamme équipées d'un généreux moteur V6 en ont généralement deux. En effet, ce type de moteur a besoin de deux tubulures d'échappement car il est divisé en deux grandes parties (deux de trois cylindres chacune). Un moteur en ligne, qu'il soit disposé longitudinalement (ex : 6 cylindres BMW) ou transversalement facilite l'installation d'un échappement unique.

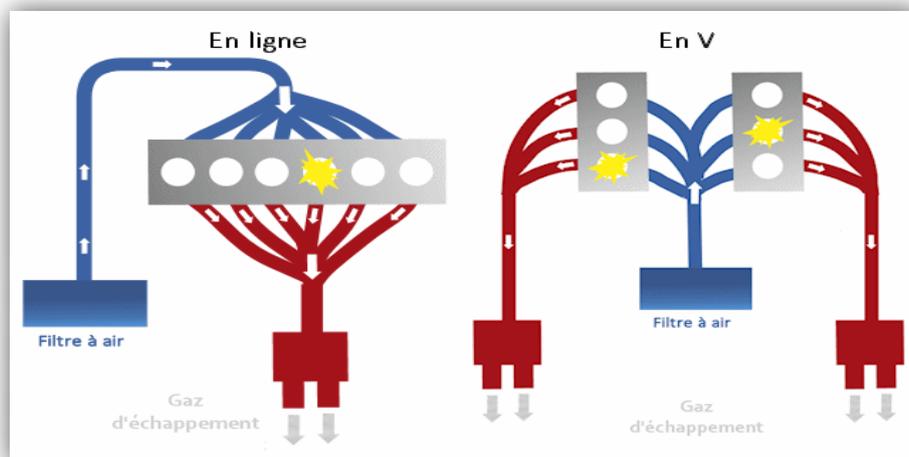


Figure VI.2. Schéma de la ligne d'échappement en ligne et en V

La mode étant aux doubles sortis d'échappement, les constructeurs essayent de faire sortir deux tubes même sur les moteurs en ligne



Figure VI.3. Doubles sortis d'échappement en ligne & V6

Les 330d et Classe C 320 CDI illustrent parfaitement la différence

VI.1.2. Les composantes et le rôle de chacune

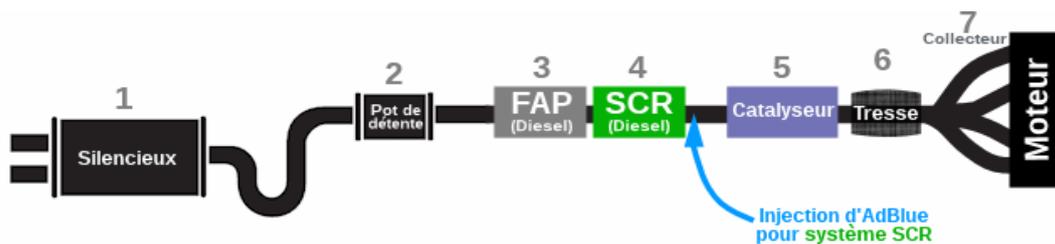


Figure VI.4. Schéma de la ligne d'échappement avec système SCR moteur diesel

S'il y avait un **turbo**, il se situerait juste après le collecteur d'échappement (7) tout comme un possible pré-catalyseur. Il existe d'autres dispositions que celle indiquée ci-dessus, et que l'ordre peut changer. Le FAP n'est par exemple pas forcément joint au catalyseur mais cela arrive souvent. Enfin, une vanne (EGR) est présente pour renvoyer une partie des gaz d'échappement dans le moteur pour refroidir la combustion (essence et diesel), non indiquée ici.

- (1) **Le silencieux** : c'est le dispositif qui sert à diminuer les bruits produits par les gaz sortant de l'échappement.
- (2) **Pot de détente** : fort ressemblant à un silencieux, il a pour rôle de réduire la vitesse et la pression de l'échappement avant que les gaz n'arrivent en bout de ligne.
- (3) **Le filtre à particules** : appelé FAP et présent sur les véhicules diesel (sur essence à injection directe à partir de 2016), il est constitué d'une matière absorbante poreuse

constituée de carbure de silicium, qui sert à filtrer jusqu'à 95% des gaz polluants. Les FAP et le catalyseur se trouvent souvent au même endroit mais ce n'est pas toujours le cas. Le catalyseur peut se retrouver bien plus en amont.

- **(4) SCR (Selective Catalytic Reduction)** : il s'agit d'un catalyseur nouvelle génération spécialisé dans la transformation des NOx, il a besoin d'additif (envoyé par un injecteur placé sur la ligne d'échappement) et il faut donc se réapprovisionner régulièrement.
- **(5) Le catalyseur** : élément obligatoire sur tous les véhicules à essence depuis 1993, et sur les véhicules à diesel depuis 1999, cette composante sert à transformer les gaz nocifs (monoxyde de carbone, hydrocarbures, oxydes d'azote, de soufre et de plomb, en substances non polluantes (gaz carbonique, azote, eau). Le pré-catalyseur est un deuxième catalyseur placé plus près du collecteur d'échappement, là où les gaz sont plus chauds.
- **(6) Flexible / Tresse d'échappement** : c'est tout simplement un flexible qui donne de la souplesse pour la jointure collecteur / ligne d'échappement. Si ce joint était rigide les risques de casses/fissures seraient importants, il faut en effet faire face à toutes les vibrations.
- **(7) Le collecteur d'échappement** : il se trouve à la sortie des cylindres; il comporte autant de conduits que de cylindres, et ils se rejoignent tous sur vers le conduit central de la ligne d'échappement.
- **La sonde lambda** : elle sert à mesurer en temps réel les éléments dont sont composés les gaz d'échappement. C'est l'élément qui permet de doser le mélange air/carburant par le calculateur (qui contrôle lui-même l'injection). Il peut y en avoir deux (voitures récentes), une entre le collecteur et le catalyseur et l'autre après le catalyseur.
- **Sonde de température de FAP** : il y en a deux, une à l'entrée du FAP et l'autre en sortie. Cela sert à donner des indications au calculateur afin de gérer l'injection mais aussi les régénérations du FAP.
- **Sonde de pression** : comme son l'indique, elle sert à mesurer la pression dans l'échappement. Information destinée au calculateur qui permet de savoir si le filtre à particules est bouché (il y a deux sondes, une à l'entrée et l'autre à la sortie afin de mesurer le différentiel)

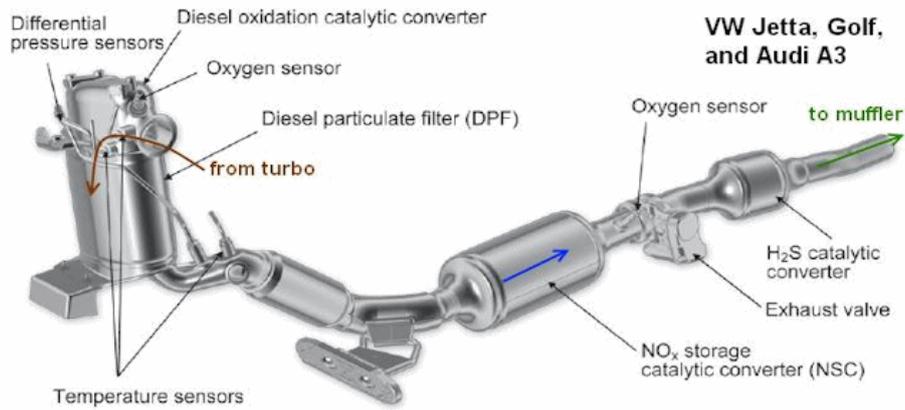


Figure VI.5. Représentations de la ligne d'échappement de moteur VW Jetta, Golf & Audi A3

IV.1.2.1. Montage diesel très répandu

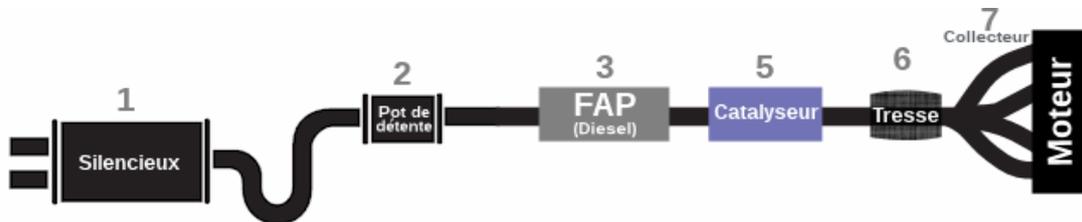


Figure VI.6. Schéma de la ligne d'échappement moteur diesel

La majorité des diesels actuels ont un catalyseur et un FAP (les plus anciens n'ont ni l'un ni l'autre). Le SCR est assez récent en Europe contrairement aux USA.

VI.1.2.2. Essence :



Figure IV.7. Schéma de la ligne d'échappement moteur essence

La ligne d'échappement d'un moteur à essence est plus simple même si le FAP va finir par être installé sur les véhicules futurs.

VI.1.2.3 Différence entre essence et diesel

Si les deux ont en commun le catalyseur (pas identiques toutefois..), le filtre à particules mais aussi le catalyseur SCR reste pour le moment réservés au diesel.

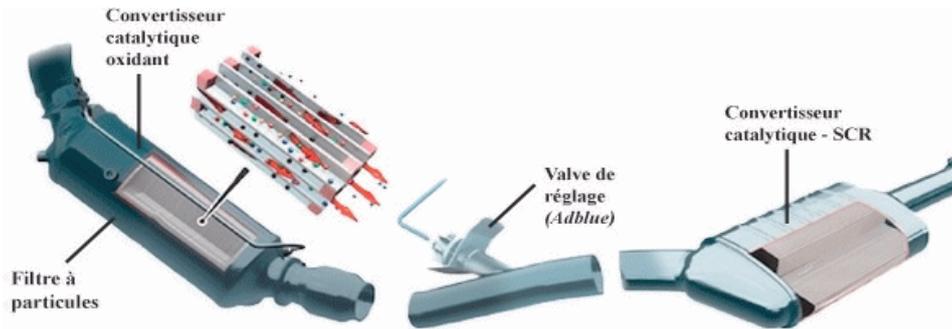


Figure VI.8. Schéma de la ligne d'échappement des diesels modernes (Euro6) de PSA

VI.1.3. différents éléments de la ligne de dépollution

VI.1.3.1. Convertisseur Catalytique (HC, CO et NOx)

Le pot catalytique ou catalyseur est un élément de l'ensemble du pot d'échappement des moteurs à combustion interne qui vise à réduire la nocivité des gaz d'échappement.



Figure VI.9. Schéma vue d'un pot catalytique à enveloppe

VI.1.3.1.1. Constitution de catalyseur

Il est constitué d'une chambre d'acier inoxydable dans laquelle sont conduits les gaz d'échappement, lesquels traversent les conduits d'une structure en nid d'abeille généralement faite en céramique.

L'intérieur des conduits est recouvert d'une fine couche de cristaux combinant de l'alumine, de l'oxyde de cérium et au moins trois « métaux précieux » à savoir les métaux rares du groupe des platinoïdes : outre le platine lui-même, le palladium et le rhodium qui contiennent aussi jusqu'à 228 ppt d'osmium.

La structure interne du pot est conçue pour offrir une grande surface de contact entre les éléments catalyseurs et les gaz d'échappement. Au milieu des années 1990, un pot catalytique contenait de 3 à 7 g de platine et de 0,5 à 1,5 g de rhodium.



Figure VI.10. Schéma vue de la structure interne d'un pot catalytique

VI.1.3.1.2. Fonctionnement de catalyseur

Les éléments catalyseurs déclenchent ou accentuent les réactions chimiques qui tendent à transformer les constituants les plus toxiques des gaz d'échappement (monoxyde de carbone, hydrocarbures imbrûlés, oxydes d'azote), en éléments moins toxiques (eau, dioxyde de carbone et diazote).

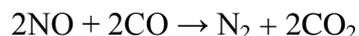
Il existe deux grands types de pot catalytique, chacun adapté à la nature du carburant utilisé.

1. catalyseur dit à *trois voies* (pour les moteurs à essences) ;
2. catalyseur dit à *deux voies* associé ou non à un filtre à particules pour les moteurs Diesel.

VI.1.3.1.2.1. Catalyseur à trois voies

Il provoque trois réactions simultanées :

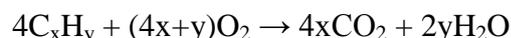
1. Une réduction des oxydes d'azote en diazote et en dioxyde de carbone :



2. Une oxydation des monoxydes de carbone en dioxyde de carbone :



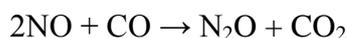
3. Une oxydation des hydrocarbures imbrulés (HC) en dioxyde de carbone et en eau :



Le pot n'est efficace qu'à partir d'environ 400 °C, ce qui explique qu'il soit peu efficace sur de petits trajets (notamment en ville), qui ne laissent pas le temps au pot catalytique de chauffer suffisamment.

Les réactions d'oxydation (demandant une forte présence d'oxygène) et de réduction (demandant une faible présence d'oxygène) sont contradictoires. Elles ne se produisent simultanément que si la quantité d'air lors de la combustion est optimale. Ceci est assuré par la sonde lambda qui renseigne le calculateur de gestion du moteur sur la quantité de carburant à injecter.

Une réaction parasite de ce type de catalyseurs aux températures élevées :



VI.1.3.1.2.2. Catalyseur à deux voies (moteur diesel)

Les catalyseurs d'automobiles vendus dans les années 1990-2000 visent à convertir le monoxyde de carbone (CO) et les hydrocarbures imbrûlés (HC) en dioxyde de carbone (CO₂) et en eau (H₂O), tout en réduisant la masse de particules du carburant diesel. Ils n'éliminent pas les oxydes d'azote (NO_x) ni ne diminuent la quantité de particules émises.

VI.1.3.1.2.3. Impacts environnementaux, positifs et négatifs

a) Impacts négatifs

Face au nombre croissant des véhicules motorisés et pour limiter la pollution de l'air, depuis la fin des années 1990, de nombreux pays ont rendu un élément catalyseur obligatoire pour les moteurs à essence et/ou diesel. Cependant les véhicules sont toujours plus nombreux, ils parcourent des distances croissantes et certains polluants ne sont pas traités par les catalyseurs.

Enfin, il semble que certains pots catalytiques vieillissent mal et puissent perdre une partie de leur contenu dans l'environnement. Outre que ces métaux sont précieux, ils peuvent polluer. Les pots catalytiques créent, de plus, une perte de charge à l'échappement et dégradent le rendement du moteur, accroissant donc sa consommation

b) Impacts positifs

Les pots catalysés ont permis de diminuer les émissions de 3 polluants : monoxyde de carbone (CO, toxique), oxydes d'azote (précurseurs de l'ozone) ainsi que des hydrocarbures imbrûlés (polluants et parfois mutagènes et cancérrogènes), et indirectement du plomb (en favorisant les carburants sans plomb).

VI.1.3.2. La sonde lambda

VI.1.3.2.1. Définition

Une sonde lambda aussi appelée sonde à oxygène est un capteur destiné à mesurer le taux de dioxygène d'un gaz.

Elle est souvent installée dans l'échappement des moteurs thermiques afin de contrôler la teneur en oxygène des gaz brûlés.



Figure VI.11. Schéma Vue d un sonde lambda

Les modèles récents sont équipés d'une double sonde à oxygène (dite "lambda") liée à un calculateur électronique qui pilote la quantité de carburant à injecter dans le moteur (le rapport idéal air/carburant).

Si la proportion de carburant augmente, les rejets de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures (HC) augmentent aussi, si elle diminue (mélange pauvre), c'est le taux d'oxydes d'azote (NOx) qui augmente et, par suite la probabilité de production d'[ozone](#) et peut-être de nitrate, autre type d'oxydant produit par la circulation).

VI.1.3.2.2. Composés-tampons

Ce sont des composés (rhodium, mais surtout oxyde de cérium) ajouté à l'alumine du support pour limiter l'impact des variations de composition des gaz en stockant un peu d'oxygène quand il est en excès pour le rejeter quand il manque.

VI.1.3.2.3. Rôle de la sonde lambda

La sonde lambda donne les informations sur le pourcentage d'oxygène des gaz burlés au calculateur.

Avec la chaleur de gaz le calculateur moteur va ajuster le rapport air-carburant et le maintenir à un niveau optimal.

La sonde lambda permet de :

- garantir un mélange air/carburant idéal.
- garantir des conditions de fonctionnement optimales pour le catalyseur.
- réduire les émissions toxiques.
- réduire la consommation de carburant du véhicule

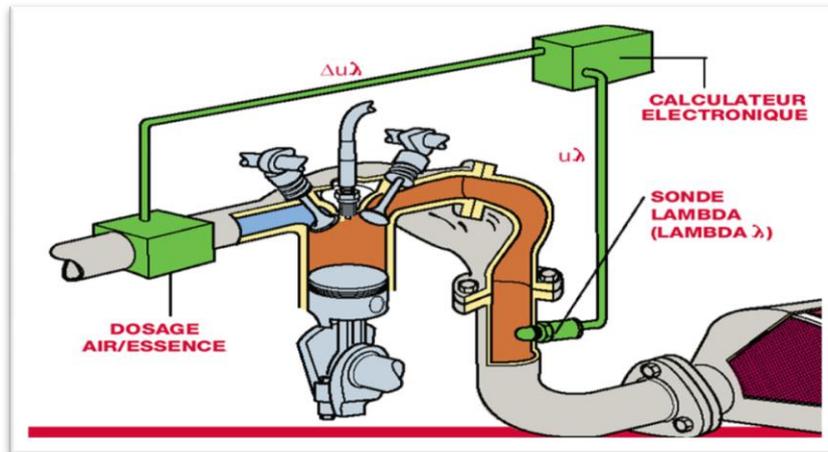


Figure VI.12. Schéma Vue de l'application de la sonde lambda dans la ligne d'échappement

VI.1.3.2.4. Mode de fonctionnement

La sonde lambda joue un rôle décisif dans la dépollution des véhicules et le processus de régulation des émissions de gaz nocifs : elle permet au catalyseur de fonctionner de manière optimum.

Chaque véhicule possédant un catalyseur régulé dispose au minimum d'une sonde lambda. Les véhicules les plus récents ont besoin de deux sondes.

La sonde lambda se compose essentiellement d'un corps en céramique spéciale dont les surfaces présentent des électrodes en platine perméables aux gaz. L'action de la sonde se fonde sur deux types de facteurs physiques : d'une part cette céramique est poreuse et permet ainsi à l'oxygène de l'air de se diffuser, d'autre part la céramique devient électro conductrice à partir de 300°C env.

Les teneurs en oxygène de l'air sont mesurées des deux côtés des électrodes. La différence variant entre les deux teneurs engendre une tension électrique, de l'ordre de quelques millivolts, au niveau des électrodes.

Les sondes lambda présentent différents modes de fonctionnement :

Les sondes à l'oxyde de titane présentent une résistance variable en fonction de la différence des taux, les sondes au zirconium font varier la tension en fonction de cette différence.

Vu que les sondes au zirconium sont les plus employées, c'est sur elles que porte la suite de ce descriptif. Dans un corps en acier est logé un élément en céramique (électrolyte solide). La partie extérieure du corps en céramique baigne dans les gaz d'échappement, sa partie intérieure baigne dans l'air atmosphérique. La différence de taux mesurée aux extrémités des électrodes provoque une hausse brutale de la tension émise par la sonde.

Ce saut de tension sert à la régulation lambda.

VI.1.3.3. Filtre à particules

VI.1.3.3.1. Définition

Un filtre à particules (ou FAP) est un système de filtration utilisé pour retenir les fines particules, cancérigènes pour l'homme¹, contenues dans les gaz de combustion, particulièrement des cheminées à bois et des moteurs Diesel. À terme, ils devraient aussi équiper tous les systèmes de chauffage au bois pour réduire la pollution de l'air, surtout en zone d'habitat rapproché, les particules fines ayant un effet négatif notamment dans les environs immédiats de la source d'émission.

Ces particules de suie sont essentiellement composées de carbone et ont typiquement une taille comprise entre 10 nm et un micromètre. L'Scherrer indique que « toutes les particules de poussière ne sont pas également dangereuses : les particules de suie émises directement par les moteurs Diesel et les chaudières à bois ne nuisent pas qu'aux poumons mais sont aussi cancérigènes et doivent être éliminées autant que possible. »



Figure VI.13. Filtre à particules installé sur une Peugeot

VI.1.3.3.2. Fonctionnement

Le Combifilter permet l'élimination efficace des particules contenues dans les gaz d'échappement d'un moteur diesel tout en fonctionnant comme silencieux. Les particules de suies séparées du gaz sont retenues et stockées dans un filtre robuste pour être ensuite brûlées à l'aide d'une résistance électrique à la fin d'une journée de travail.

Le Combifilter peut être combiné avec un catalyseur assurant la réduction des gaz polluants tels que le monoxyde de carbone (CO) et les hydrocarbures (HC). Le catalyseur s'incorpore dans le filtre ou s'installe séparément en amont du filtre. Le fonctionnement du catalyseur dépend de la température des gaz d'échappement, et la meilleure réduction des polluants s'obtient à partir de 220°C.

Phase 1

- Filtration : La capture des particules dans le filtre est obtenue par filtration. L'accumulation des particules conduit à la formation d'une couche de suie sur les parois qui, dans un premier temps, améliore l'efficacité de la filtration (presque 100 % en masse des particules peuvent être collectées dans le filtre). Cependant, cette couche poreuse augmente fortement la perte de charge imposée dans le pot d'échappement.

Ceci a tendance à nuire au bon fonctionnement du moteur entraînant notamment une perte de puissance du moteur.

Un nettoyage (ou régénération) du dispositif devient alors indispensable après un millier de kilomètres.

Phase 2

- Régénération : Plusieurs méthodes de régénération ont été envisagées :

la plus classique est basée sur la combustion des suies par une élévation de la température des gaz d'échappement à l'entrée du filtre.

Cette opération nécessite la présence d'une catalyse. Les moteurs Diesel récents (notamment à rampe commune) permettent de contrôler finement la quantité de carburant injectée ainsi que le moment de l'injection : pré-injection, injection principale et post-injection. Cette dernière aide à la régénération du filtre en envoyant une grande quantité de gazole imbrûlé dans le catalyseur où il va s'enflammer, afin d'élever de façon significative la température des gaz d'échappement pour activer l'oxydation des suies piégées dans le filtre.

Certains modèles de filtres, notamment ceux du groupe PSA, nécessitent l'ajout d'un additif catalyseur dans le carburant (typiquement un composé métallo-organique (en) à base de fer ou de cérium appelé cérine) afin d'abaisser la température de combustion des suies contenues dans le filtre pour faciliter la régénération de ce dernier. Le groupe PSA ayant déposé un brevet pour ce procédé de régénération et lancé le premier FAP en 2000 sur la Peugeot 607.

Les autres constructeurs ont étudié d'autres procédés, par introduction de métaux précieux (platine, palladium, etc.) déposés directement dans le pain du filtre. La température de combustion des suies non additivées étant plus élevée, la régénération du filtre est plus difficile, surtout lorsque le véhicule ne circule qu'en ville.

Les FAP sont fragiles ; il est toutefois possible de les nettoyer, soit par additivation par le réservoir, soit en injectant un produit nettoyant dans le FAP. En effet, les biodiesels, c'est-à-dire tous les carburants GO (gazole routier), FOD (fioul domestique), GNR (gazole non routier), contiennent des ajouts d'huiles qui encrassent les systèmes.

La priorité est donc de maintenir son moteur propre en surveillant son système d'injection. Attention toutefois à ne pas utiliser des additifs pétrochimiques mais plutôt des produits « bio » car le remède serait pire que le mal, les produits de combustion dégageant des HAP cancérigène.