

Chapitre 04 : Formation de polluants

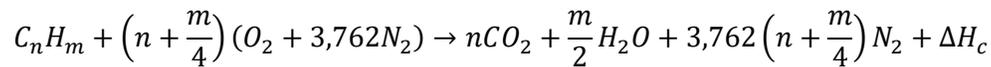
4.1 Introduction

Ce chapitre explore les émissions indésirables générées lors du processus de combustion dans les moteurs thermiques et surtout ceux de propulsion de véhicules. Ces émissions polluent l'environnement et contribuent au réchauffement climatique, aux pluies acides, au smog urbain, aux odeurs et aux problèmes respiratoires et autres problèmes de santé.

Les principales causes de ces émissions sont :

- ✓ la combustion non stœchiométrique (combustion incomplète) ;
- ✓ la dissociation de l'azote ;
- ✓ les impuretés dans le carburant et l'air.

Dans le cas de la combustion complète d'un hydrocarbure de formule brute C_nH_m , la réaction à la stœchiométrie (c.-à-d. $\alpha = 1$), s'écrit :



Les processus par lesquels les polluants se forment dans le cylindre d'un moteur SI sont illustrés sur la figure 1. Cette figure montre la chambre de combustion pendant quatre phases différentes du cycle de fonctionnement du moteur : compression, combustion, détente et échappement.

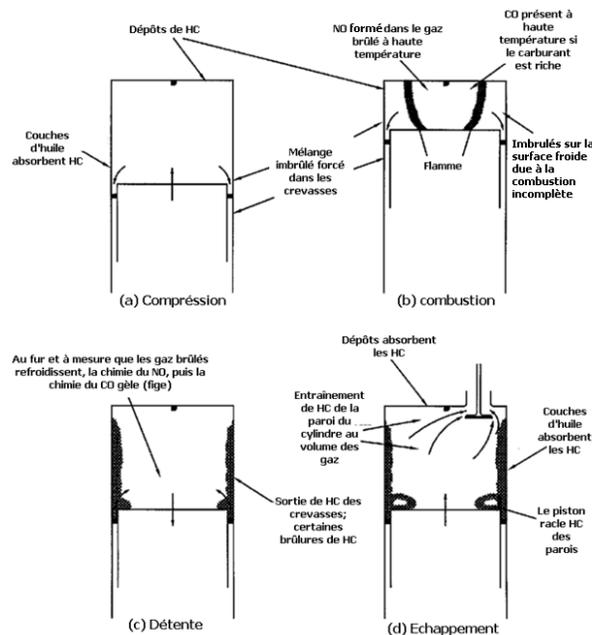


Fig. 1 : Résumé des mécanismes de formation de polluants (HC, CO et NO) dans le moteur SI

Les principaux polluants préoccupants sont : le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures imbrûlés (HC), les oxydes d'azote (NOx), le soufre et les particules solides de carbone. La figure 2 montre les émissions des véhicules automobiles qui sont considérées comme des polluants et la base sur laquelle elles sont considérées comme des polluants.

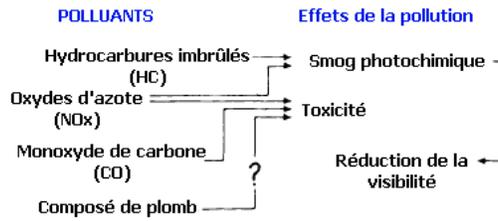


Fig. 2 : Les polluants et leurs effets nocifs.

L'une des variables les plus importantes pour déterminer les émissions des moteurs SI est le rapport (Fuel/Air), FA ou la richesse. La figure 3 montre comment les émissions d'échappement de NO, de CO et de HC varient avec ce paramètre. Cette figure montre que des mélanges plus pauvres produisent des émissions plus faibles jusqu'à ce que la qualité de la combustion devienne mauvaise.

Le rapport Air-Fuel (AF) et le rapport Fuel-Air (FA) sont exprimés par:

$$AF = \frac{m_a}{m_f} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{n_a \dot{M}_a}{n_f \dot{M}_f}$$

$$FA = \frac{m_f}{m_a} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{n_f \dot{M}_f}{n_a \dot{M}_a}$$

\dot{M} : Débit molaire ; [mole/s]

Le rapport d'équivalence ou la richesse, Φ , est défini comme le rapport réel du Fuel-Air au Fuel-Air stœchiométrique:

$$\Phi = \frac{(FA)_{stio}}{(FA)_{réel}} \Rightarrow \begin{cases} \Phi > 1 & \text{mélange riche} \\ \Phi < 1 & \text{mélange pauvre} \\ \Phi = 1 & \text{mélange parfait ou stœchiométrique} \end{cases}$$

Le coefficient d'excès d'air (λ) :

$$\lambda = \frac{1}{\Phi} = \frac{(AF)_{stio}}{(AF)_{réel}} \Rightarrow \begin{cases} \lambda > 1 & \text{mélange pauvre} \\ \lambda < 1 & \text{mélange riche} \\ \lambda = 1 & \text{mélange parfait ou stœchiométrique} \end{cases}$$

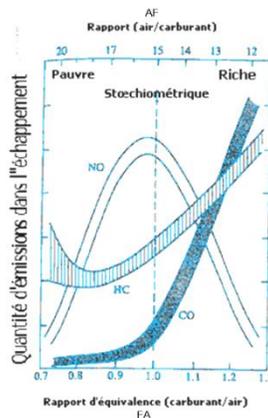


Fig. 3 :Variation de la concentration de HC, CO et NO dans l'échappement d'un moteur SI

4-2 Monoxyde de Carbone

Le monoxyde de carbone (CO) résulte de l'oxydation incomplète du carburant en dioxyde de carbone (manque d'air). La formation de monoxyde de carbone augmente fortement avec la diminution du rapport air-fuel, car il n'y a pas assez d'oxygène disponible pour oxyder complètement le mélange.

La transition vers un fonctionnement riche en carburant lors des démarrages à froid est responsable aussi des émissions de CO des moteurs thermiques.

Le CO est non seulement considéré comme une émission indésirable, mais il représente également une perte d'énergie chimique qui n'a pas été pleinement utilisée dans le moteur. En principe, la concentration de monoxyde de carbone contenue dans les produits d'échappement doit correspondre à un état d'équilibre chimique représenté par l'équation eau-gaz :



Le CO se forme en grandes quantités dans les premières parties du processus de combustion (haute température), et à mesure que les produits se refroidissent, une oxydation du CO en CO₂ se produit.

4-3 Hydrocarbures imbrûlés

Contrairement au monoxyde de carbone ou à l'oxyde nitrique, les hydrocarbures ne sont pas des substances que l'on s'attend à trouver dans les gaz de combustion à haute température. L'apparition d'hydrocarbures imbrûlés à l'échappement d'un processus de combustion doit être associée à l'existence d'une hétérogénéité de température ou de mélange à un certain point du système et non à la partie homogène du système.

4.3.1 Causes des émissions de HC

4.3.1.1 Rapport air-fuel (AF) non stœchiométrique: La figure 3 montre qu'un rapport air- fuel riche en carburant n'a pas suffisamment d'oxygène pour réagir avec tout le carbone et l'hydrogène, et les émissions de HC et de CO augmentent. Les émissions de HC augmentent également avec des mélanges très pauvres en raison d'une mauvaise combustion. C'est particulièrement vrai au démarrage du moteur, lorsque le mélange air- fuel est volontairement rendu très riche. L'extrême d'une mauvaise combustion pour un cycle est un raté d'allumage total.

4.3.1.2 Combustion incomplète : Même lorsque le carburant et l'air entrant dans un moteur sont au mélange stœchiométrique idéal, une combustion parfaite ne se produit pas et une partie du HC se retrouve dans l'échappement. Il y a plusieurs causes à cela :

- Certaines particules de carburant ne trouvent pas d'oxygène avec lequel réagir ;
- L'extinction de la flamme au niveau des parois laisse un petit volume de mélange air-carburant n'ayant pas réagi ;
- Une autre cause de l'extinction de la flamme, est la détente qui se produit pendant la combustion et la course de détente. Lorsque le piston s'éloigne du PMH, la détente des gaz abaisse à la fois la température et la pression à l'intérieur du cylindre. Cela ralentit la combustion et éteint la flamme quelque part tard dans la course de détente. Cela laisse certaines particules de carburant sans réaction ;
- Un résidu d'échappement élevé entraîne une mauvaise combustion et une plus grande probabilité d'extinction par détente. Cela se produit dans des conditions de faible charge.

4.3.1.3 Volumes des crevasses : Pendant la phase de compression et au début du processus de combustion, l'air et le carburant sont comprimés dans le volume de la fente (**crevasse**) de la chambre de combustion à haute pression (Figure 4 et 5). Jusqu'à (3%) du carburant dans la chambre peut être forcé dans ce volume. Pendant la course de détente, la pression dans le cylindre est réduite en dessous de la pression de volume de la crevasse, et un soufflage inverse se produit. Cependant, à ce moment, la réaction de flamme est éteinte et des particules de carburant n'ayant pas réagi, restent dans l'échappement.

L'emplacement de la bougie d'allumage par rapport à la fente de segment de compression supérieur affectera la quantité de HC dans les gaz d'échappement du moteur. Plus la bougie est éloignée de la fente annulaire, plus le HC dans l'échappement est important. Jusqu'à (80%) de toutes les émissions de HC peuvent provenir de cette source. Une fraction massique maximale de la charge HC sera stockée dans ce volume selon la relation :

$$x_s = \frac{m_c}{m_o} = \frac{V_c * T_o * P_{max}}{V_o * T_c * P_o}$$

Où m , V , T et P représentent respectivement la masse, le volume, la température et la pression, les indices c et o indiquent les conditions de crevasse et de charge à l'admission, et max se réfère à la pression maximale. Le stockage maximal se produit à la pression de pointe.

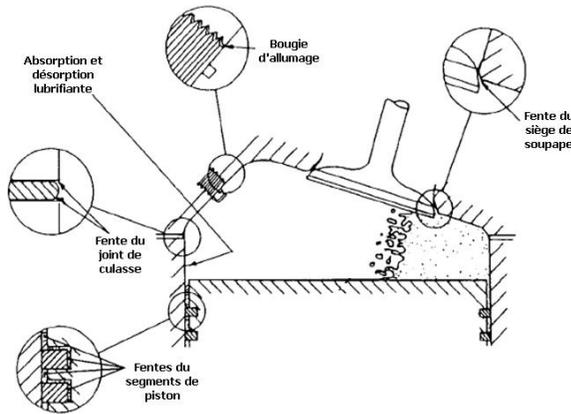


Fig. 4 : Localisation des volumes de crevasses dans la chambre de combustion du moteur où le mélange carburant-air circule à l'intérieur et échappe à la combustion.

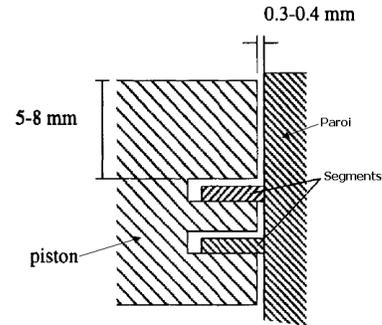


Fig. 5: Croquis des dimensions typiques des crevasses

4.3.1.5 Fuite au-delà de la soupape d'échappement : une partie de mélange d'air-carburant est forcée dans le volume de la crevasse autour des bords de la soupape d'échappement et entre la soupape et le siège de soupape. Lorsque la soupape d'échappement s'ouvre, l'air-carburant qui se trouve encore dans ce volume de **crevasse** est transporté dans le collecteur d'échappement.

4.3.1.6 Chevauchement des soupapes : Pendant le chevauchement des soupapes, les soupapes d'échappement et d'admission sont ouvertes, créant un chemin où l'admission air-carburant peut s'écouler directement dans l'échappement. Un moteur bien conçu minimise ce débit, mais une petite quantité peut se produire. La pire condition pour cela est au ralenti et à basse vitesse, lorsque le temps réel de chevauchement est le plus grand.

4.3.1.7 Huile sur les parois de la chambre de combustion : Une très fine couche d'huile est déposée sur les parois du cylindre d'un moteur pour assurer la lubrification entre les parois et le piston en mouvement. Pendant les phases d'admission et de compression, l'air entrant et le carburant entrent en contact avec ce film d'huile, qui absorbe et dégage les particules de gaz, en fonction de la pression du gaz.

L'augmentation de la consommation d'huile contribue à une augmentation des émissions de HC de trois manières :

- un volume de crevasse supplémentaire,
- une absorption-désorption supplémentaire du carburant dans le film d'huile plus épais sur les parois des cylindres,
- plus d'huile brûlée dans le processus de combustion.

La quantité maximale de composant de carburant (i) par unité de volume d'huile qui peut être stockée de cette manière, peut être estimée comme étant la valeur d'équilibre. Pour un mélange dilué, la quantité peut être approximée comme suit:

$$n_i = n_o X_i p / H_i$$

Où n représente le nombre de moles par unité de volume, et les indices i et o les composants du carburant et l'huile de lubrification, X_i est la fraction molaire du composant du carburant dans la phase gazeuse adjacente à l'huile, p est la pression totale instantanée, et H_i est la constante de Henry.

$$X_i = \frac{N_i}{N_{tot}} = \frac{(\dot{m}_i/M_i)}{(\dot{m}_{tot}/M_{air})}$$

N_i : La quantité de matière du polluant (nombre de moles);

N_{tot} : La quantité de matière totale (nombre de moles);

4-4 Formation des aromatiques

Les composés aromatiques sont les principaux composés organiques volatils "COV" (54-75)% des émissions émises par un moteur Diesel. Ces composés proviennent de la combustion incomplète des hydrocarbures entrant dans la composition des carburants. Les composés les plus abondants sont les 2-éthyltoluène, 3-éthyltoluène et 4-éthyltoluène et les m-Xylène, p-Xylène. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés organiques présentant au moins deux noyaux benzéniques. La plupart de ces composés sont dangereux pour la santé, certains sont même cancérigènes. Les HAP les plus volatils tels que le naphthalène, l'acénaphthylène, l'acénaphtène et le fluorène sont présents dans la phase gazeuse tandis que les autres, les plus lourds sont principalement adsorbés par les particules.

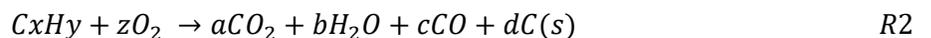
4-5 Formation des suies

Les particules sont des solides fins (poussière ou suie) ou des particules liquides (brouillard) en suspension dans l'air et qui sont individuellement invisibles à l'œil nu. Les particules solides sont généralement constituées de carbone ou d'un matériau de base minérale qui absorbe différents types de substances. En général, dans les moteurs à allumage commandé fonctionnant avec un mélange relativement homogène, les particules en phase gazeuse ne sont observables que si des mélanges extrêmement riches sont utilisés. Le temps disponible pour la formation de particules solides de suie à partir d'une fraction du combustible est de l'ordre de quelques millisecondes.

Les particules de phase solide dispersées par aérosol résultantes dans un gaz peuvent être caractérisées par le nombre de particules de suie par unité de volume, la taille des particules (diamètre moyen d) et la quantité totale de phase condensée (souvent exprimée en fraction volumique de suie, F_v , le volume de suie/volume total).

$$F_v = \frac{\pi}{6} N d^3$$

Les particules de suie sont des grappes de sphères de carbone solide, sont générées dans la chambre de combustion dans les zones riches en carburant où il n'y a pas assez d'oxygène pour convertir tout le carbone en CO_2 :



4-6 Formation des NO_x

Les gaz d'échappement d'un moteur peuvent contenir jusqu'à 2000 ppm d'oxydes d'azote. Le **NO** est pertinent dans les moteurs à allumage par étincelle fonctionnant dans des conditions approximativement stœchiométriques, tandis que le **NO₂** n'est présent en quantités substantielles que dans les moteurs à allumage par compression.

La concentration la plus élevée se forme autour de la bougie, là où se produisent les températures les plus élevées. Puis qu'ils ont généralement des taux de compression plus élevés et des températures et pressions plus élevées, les moteurs CI avec chambres de combustion divisées et injection indirecte ont tendance à générer des niveaux plus élevés de NO_x . Les NO_x libérés réagissent dans l'atmosphère pour former de l'ozone **O₃** et constituent l'une des principales causes du **smog photochimique**. Le **NO** se forme dans les gaz brûlés chauds pendant la combustion. La vitesse de formation est lente, par rapport au processus de combustion global, et les vitesses augmentent de façon exponentielle avec les températures des gaz brûlés.



Moindre contribution provient de la formation de **NO** au front de la flamme par réaction du radical **CH** avec **N₂**.



En plus, la formation de **NO_x** dépend de la pression, du rapport air-fuel et du temps de combustion à l'intérieur du cylindre, les réactions chimiques n'étant pas instantanées.



4.6.1 Effet des différents paramètres sur la formation de **NO_x**

4.6.1.1 Influence de la richesse : La figure 3 montre l'influence de la richesse, rapport (fuel/air) sur les émissions de **NO**. Lorsque le mélange est appauvri, les émissions de **NO** atteignent un pic à $\lambda = 0,9$. Dans les mélanges riches, une décomposition substantielle de **NO** se produit à partir des concentrations maximales présentes lorsque la pression du cylindre est au maximum.

4.6.1.2 Influence du temps d'allumage: La synchronisation des étincelles affecte considérablement les niveaux d'émission de **NO**. L'avancement de la synchronisation de sorte que la combustion se produise plus tôt dans le cycle, augmente la pression du cylindre. Des pressions plus élevées entraînent des températures de gaz brûlé plus élevées, et donc des taux de formation de **NO** plus élevés. Les niveaux d'émission diminuent régulièrement à mesure que l'allumage est retardé.

4.7 Approches de contrôle de la pollution

Théoriquement, les moteurs et les carburants pourraient être développés de telle sorte que très peu d'émissions nocives soient générées, et celles-ci pourraient être évacuées à l'atmosphère sans impact majeur sur l'environnement. Avec la technologie actuelle, cela n'est pas possible et le post-traitement des gaz d'échappement pour réduire les émissions est très important. Deux approches générales pour minimiser les émissions de polluants provenant d'échappement d'un véhicule peuvent être adoptées:

- l'approche préventive qui implique la modification des conditions de combustion pour minimiser la formation de polluants dans la chambre de combustion ;
- l'approche corrective qui implique le traitement des gaz d'échappement pour minimiser les concentrations des polluants qui sortent de la chambre de combustion.

4.7.1 Techniques préventives

Les trois techniques de prévention spécifiques sont:

- la modification de la conception du moteur,
- le changement de fonctionnement du moteur (commandes de débit de carburant),
- le changement des conditions de combustion (réduction de température).

Ces techniques affecteront respectivement les émissions d'**hydrocarbures**, de **monoxyde de carbone** et d'**oxyde nitrique**.

4.7.2 Techniques correctives

Deux techniques sont utilisées pour éliminer les polluants qui sortent de la chambre de combustion:

- l'oxydation thermique dans le collecteur d'échappement
- la conversion catalytique dans le flux d'échappement

La première de ces techniques utilise de l'air supplémentaire pour oxyder les polluants HC et CO, la seconde oxyde HC et CO et réduit les NO polluants.

Emissions spécifiques:

$$(ES)_{NOx} = \dot{m}_{NOx} / \dot{W}_b$$

$$(ES)_{CO} = \dot{m}_{CO} / \dot{W}_b$$

$$(ES)_{HC} = \dot{m}_{HC} / \dot{W}_b$$

$$(ES)_{part} = \dot{m}_{part} / \dot{W}_b$$

\dot{m} : Débit d'émissions [g/h]

\dot{W}_b : Puissance [kW]

Indices d'émissions

$$(EI)_{NOx} = \dot{m}_{NOx} / \dot{m}_f$$

$$(EI)_{CO} = \dot{m}_{CO} / \dot{m}_f$$

$$(EI)_{HC} = \dot{m}_{HC} / \dot{m}_f$$

$$(EI)_{part} = \dot{m}_{part} / \dot{m}_f$$

\dot{m}_f : Débit massique du carburant [kg/sec]

Débit molaire des polluants [moles/s]:

$$\dot{M}_{NOx} = n_{NOx} \dot{M}_f$$

$$\dot{M}_{CO} = n_{CO} \dot{M}_f$$

$$\dot{M}_{HC} = n_{HC} \dot{M}_f$$

$$\dot{M}_{part} = n_{part} \dot{M}_f$$

$$\dot{M}_f = \dot{m}_f / M_f$$

\dot{M}_f : Débit molaire du carburant [kmoles/s]

M_f : Masse molaire du carburant [kg/kmoles]

$$\rho_a = 1.181 \frac{kg}{m^3}$$