
CHAPITRE IV

SURALIMENTATION DES MCI PAR TURBOCOMPRESSEUR

IV-1. Principe.

Le rendement d'un moteur dépend directement de sa capacité de remplissage des cylindres et de la puissance de l'explosion dans chaque cylindre. Ainsi, on peut se poser la question : comment faire pour augmenter la puissance d'un moteur sans pour autant détériorer sa fiabilité ?

Il existe deux moyens :

- ✓ Augmenter la cylindrée par un réalésage, mais cela a un inconvénient majeur car cela entraîne un gain de poids considérable et une consommation supérieure donc la puissance gagnée a peu d'intérêt puisqu'on gagne en poids et en encombrement.
- ✓ Implanter un turbo : sans toucher à la cylindrée on envoie dans le moteur de l'air comprimé afin d'améliorer le remplissage, car plus on fait pénétrer de mélange gazeux dans le cylindre, plus la quantité d'énergie libérée est importante donc plus on gagne en puissance et en couple.

Puisque l'air est compressible, on comprime l'air admis dans le moteur afin que sa puissance du augmente.

IV-2. Suralimentation par turbocompresseur

Un turbocompresseur comporte trois principaux composants : un compresseur, une turbine reliée au compresseur par un arbre et un ensemble de paliers pour supporter l'arbre.

À ce jour la suralimentation est largement utilisée dans les moteurs à combustion interne. La grande majorité des moteurs Diesel fabriqués aujourd'hui sont équipés d'un turbocompresseur, tandis que les moteurs atmosphériques sont de moins en moins fréquents. Le mot turbocompresseur ou "turbo charger" en anglais, est l'abréviation de "turbo super charger". Le super charger est un compresseur entraîné par le vilebrequin du moteur.

Le turbocompresseur permet d'éviter de prendre de l'énergie au moteur, en étant relié à une turbine alimentée par les gaz d'échappement.

La turbine et le compresseur sont montés sur un arbre en commun. L'énergie cinétique des gaz d'échappement assure la rotation d'une turbine centripète qui entraîne mécaniquement la rotation du compresseur. Dans le cas d'un fonctionnement stable l'énergie fournie par la turbine est égale à l'énergie absorbée par le compresseur.

Dans un moteur suralimenté par un turbocompresseur, la masse volumique de l'air à l'admission est augmentée grâce à la compression et au refroidissement de l'air à travers un échangeur de chaleur placé entre le compresseur et l'admission du moteur. La quantité de l'air à l'admission est réglée par une soupape de décharge (Wastegate).

En l'absence de soupape, la pression d'admission générée par le turbocompresseur varie avec la pression des gaz d'échappement du moteur. La soupape dérive une partie des gaz d'échappement hors de la turbine, pour contrôler la vitesse de rotation de la turbine, qui à son tour contrôle la vitesse de rotation du compresseur. La fonction principale de la soupape de décharge est de régler une pression de suralimentation maximale pour protéger le moteur et le turbocompresseur.

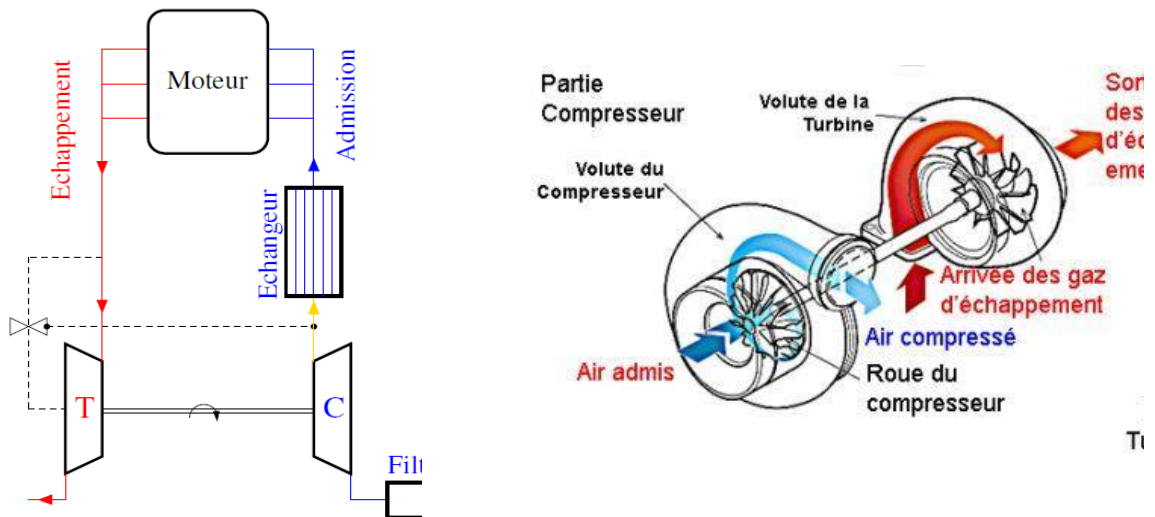


Figure IV.1. Schéma d'installation d'un moteur alimenté par un turbocompresseur.

Sur les moteurs nouvelle génération, cette régulation est entièrement gérée par l'électronique de la voiture et est auto-adaptable aux besoins instantanés du conducteur.

La figure suivante représente un schéma de fonctionnement complet du turbo qui inclue "l'intercooler" c'est à dire l'élément qui permet de refroidir les gaz (réchauffés à cause de la vitesse

de rotation et de la compression) qui entrent dans la chambre de combustion afin que la fiabilité et la longévité du moteur soient augmentés.

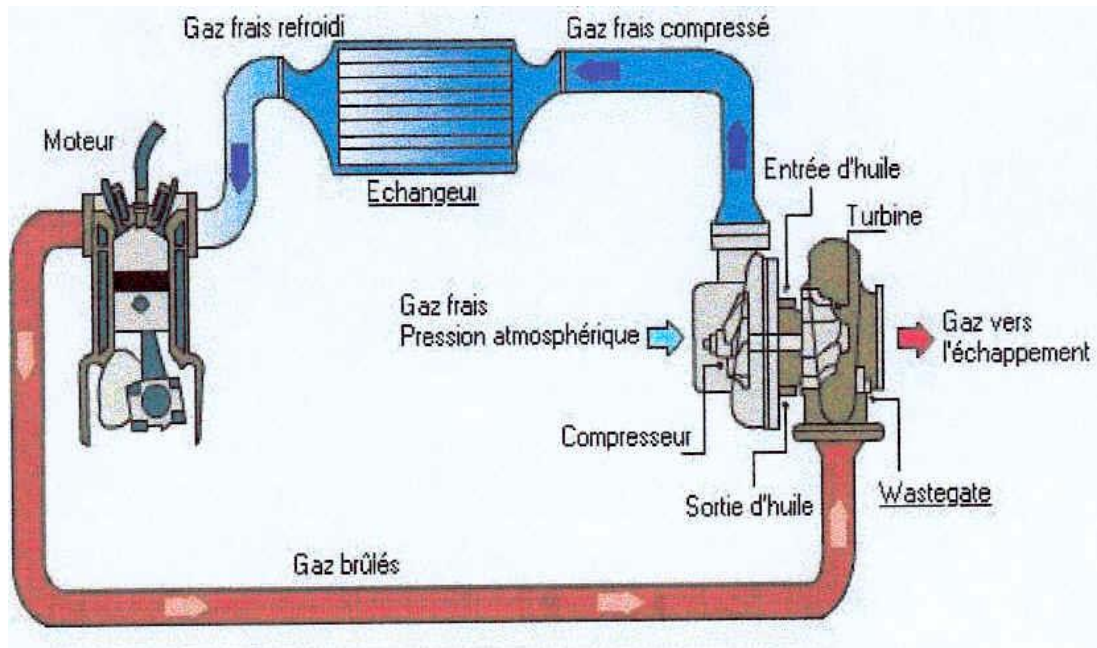


Figure IV.2. Schéma de fonctionnement complet du turbo avec intercooler

Un problème dû à la forte compression des gaz frais est le cliquetis. Désormais ce problème est résolu grâce à la gestion électronique qui surveille en permanence le moteur et détecte le phénomène pour le contrecarrer.

Mais sur les premiers modèles turbocompressés, on assistait dans la chambre de combustion à un pré-allumage spontané précédant l'étincelle de la bougie (le cliquetis).

IV-3. Suralimentation par compresseur

La fonction assurée est strictement la même que celle du turbo. Par contre les moyens diffèrent. Contrairement au turbo qui est entraîné par les gaz d'échappement le compresseur est entraîné mécaniquement par le moteur.

Le compresseur volumétrique utilise la variation du volume d'air pour faire varier la pression de l'air. L'air est emprisonné entre deux roues en spirale. Il est obligé de sortir. La pression fournie dépend donc de l'effort rencontré à la sortie et le débit correspond au régime de rotation. Le temps de réponse, caractéristique principale du turbo est donc nul sur un compresseur.

Voici une vue en coupe du compresseur :



Figure IV.4. schéma de compresseur volumétrique

Le principal inconvénient de ce système de suralimentation est qu'il absorbe environ une dizaine de chevaux est qu'il fait considérablement monter la consommation. Ce qui explique pourquoi ce système ne peut pas être monté sur des petits moteurs. Jaguar est un grand utilisateur de cette technologie car il dispose de gros moteurs ne craignant pas une surconsommation. Jaguar arrive, grâce à cette technologie, à faire passer la puissance d'un V8 4.0 de 294 à 375 ch.

IV-4. Cartographies de turbocompresseurs

IV-4-1. Performances d'un turbocompresseur.

Dans les conditions les plus courantes, 7 variables physiques indépendantes sont susceptibles d'affecter les performances d'une turbomachine : une dimension caractéristique (par exemple le diamètre de la roue D), la vitesse de rotation N , le débit massique de fluide \dot{m} , les états thermodynamiques à l'aspiration et au refoulement (pressions d'arrêt P_a et P_r , et enthalpies totales h_a et h_r).

Parmi ces 7 variables, interviennent 3 unités fondamentales (Masse, Longueur, Temps). L'application du théorème de Vaschy-Buckingham (*Ce théorème établit que si une équation physique met en jeu n variables physiques, celles-ci dépendant de k unités fondamentales, alors il existe une équation équivalente mettant en jeu $n-k$ variables sans dimension construites à partir des variables originelles*) permet de réduire à $7 - 3 = 4$ le nombre de variables adimensionnelles caractéristiques du fonctionnement de la machine.

Les variables les plus couramment choisies sont :

1) un nombre de Mach relatif à la vitesse débitante C_f :

$$(M_a)_c = \frac{C_f}{C_s} \quad (IV.1)$$

Avec
$$C_f = \frac{\dot{m}V_a}{A} = \frac{4\dot{m}V_a}{\pi D^2} = \frac{4\dot{m}rT_a}{\pi D^2 P_a} \quad (IV.2)$$

et C_s est la vitesse du son dans le fluide $C_s = \sqrt{\gamma r T_a}$ en assimilant le fluide à un gaz parfait

$$(M_a)_c = \frac{4\dot{m}\sqrt{rT_a}}{\pi D^2 P_a \sqrt{\gamma}} \quad (\text{IV.3})$$

2) un nombre de Mach relatif à la roue

$$(M_a)_u = \frac{U}{C_s} \quad (\text{IV.3})$$

Avec

$$U = \frac{\pi DN}{60} \quad (\text{IV.4})$$

$$(M_a)_u = \frac{\pi DN}{60\sqrt{\gamma r T_a}} \quad (\text{IV.5})$$

3) Le rapport des pressions d'arrêt d'entrée et de sortie $\frac{P_r}{P_a}$

4) L'efficacité isentropique de l'étage $\eta_s = \frac{(h_r)_s - h_a}{h_r - h_a}$ pour un compresseur

ou $\eta_s = \frac{h_r - h_a}{(h_r)_s - h_a}$ pour une turbine

Lorsqu'on fixe le choix d'une machine et d'un fluide particulier, les nombres adimensionnels $(M_a)_c$ et $(M_a)_u$ deviennent proportionnels à des variables réduites d'expressions plus simples :

$(M_a)_c$ sera proportionnel à $\frac{\dot{m}\sqrt{T_a}}{P_a}$ qu'on appelle débit massique corrigé, et

$(M_a)_u$ sera proportionnel à $\frac{N}{\sqrt{T_a}}$ qu'on appelle vitesse de rotation corrigée

D'autres grandeurs adimensionnelles sont aussi couramment employées par les constructeurs : le facteur de débit ϕ et le facteur d'enthalpie ψ , ou encore les deux coefficients de Rateau μ et δ .

IV-4-1-1. Le facteur de débit φ

Il est naturel de s'intéresser aux deux nombres de Mach représentatifs des écoulements dans les machines, $(Ma)_c$ et $(Ma)_u$. Le rapport de ces deux grandeurs, indépendant des propriétés du fluide, conditionne la forme du triangle des vitesses, et correspond à une première grandeur adimensionnelle : le facteur de débit φ qui permet d'assurer la similitude cinématique sur la totalité des limites des écoulements.

$$\varphi = \frac{(Ma)_c}{(Ma)_u} = \frac{4\dot{m}\sqrt{rT_a}}{\pi D^2 P_a \sqrt{\gamma}} \times \frac{60\sqrt{\gamma r T_a}}{\pi DN}$$

$$\varphi = \frac{(Ma)_c}{(Ma)_u} = \frac{C_f}{U} = \frac{240\dot{V}_a}{\pi^2 ND^3} = \frac{240}{\pi} \delta \quad (\text{IV.6})$$

Ce facteur φ est proportionnel à une autre grandeur adimensionnelle très utilisée : le deuxième coefficient de Rateau $\delta = \frac{\dot{V}_a}{\pi ND^3}$

IV-4-1-2. Le facteur d'enthalpie Ψ

Les turbomachines ont pour fonction, soit de détendre un fluide pour produire de l'énergie, soit de fournir de l'énergie à un fluide. Les écoulements étant proches de l'adiabatique, du fait des faibles surfaces d'échange et des vitesses importantes, il est logique de prendre comme énergie de référence le travail de détente ou de compression isentropique $|\Delta h_s|$.

$$|\Delta h_s| = m C_p (T_r - T_a) \quad (\text{IV.7})$$

Avec $C_p - C_v = mR$; $\frac{C_p}{C_v} = \gamma$; $PV = nRT$ et $T_r P_r^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_a P_a^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$

On aura $|\Delta h_s| = \frac{1}{\gamma-1} P_a V_a \left| \left(\left(\frac{P_r}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right| \quad (\text{IV.8})$

Le rapport de cette énergie de référence à une énergie cinétique bien choisie constitue une grandeur adimensionnelle intéressante. Une première idée consiste à mettre en évidence dans cette formule la vitesse du son C_s . On obtient :

$$\frac{|\Delta h_s|}{1/2 C_s^2} = \frac{2}{\gamma-1} \left| \left(\left(\frac{P_r}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right| = \Omega \quad (\text{IV.9})$$

Mais on prend en général cette énergie cinétique égale à $1/2 U^2$, correspondant à l'énergie cinétique maximale dans le rotor. On définit ainsi le facteur d'enthalpie ψ , égal au double du premier coefficient de Rateau μ .

$$\Psi = \frac{|\Delta h_s|}{1/2 C_s^2} = 2\mu = \frac{\Omega}{(M_a)_u^2} \quad (\text{IV.10})$$

IV-4-2. Présentation générale des performances d'une machine

Dans la pratique, on présente le plus souvent les performances d'une machine sous la forme de courbes caractéristiques (ou cartographies) $\frac{P_r}{P_a} = f(\dot{m}_c)$ pour des valeurs constantes de la vitesse de rotation corrigée N_c :

$\frac{P_r}{P_a}$ est le rapport des pressions d'arrêt d'entrée et de sortie

Pour les turbocompresseurs, c'est le débit massique corrigé \dot{m}_c ou le facteur de débit ϕ qui est utilisé en abscisse. En ordonnée, on reporte d'une part le rapport de pression P_r/P_a ou le facteur d'enthalpie ψ ou Ω , et d'autre part le rendement isentropique. La vitesse de rotation corrigée est encore reprise en paramètre. La figure IV.5 nous montre une cartographie de compresseur du turbo T3 trim 60 de Garrett. En abscisse, on trouve le débit traversant le turbo en livre/minute, et en ordonné se trouve le rapport entre la pression sortie compresseur et l'entrée.

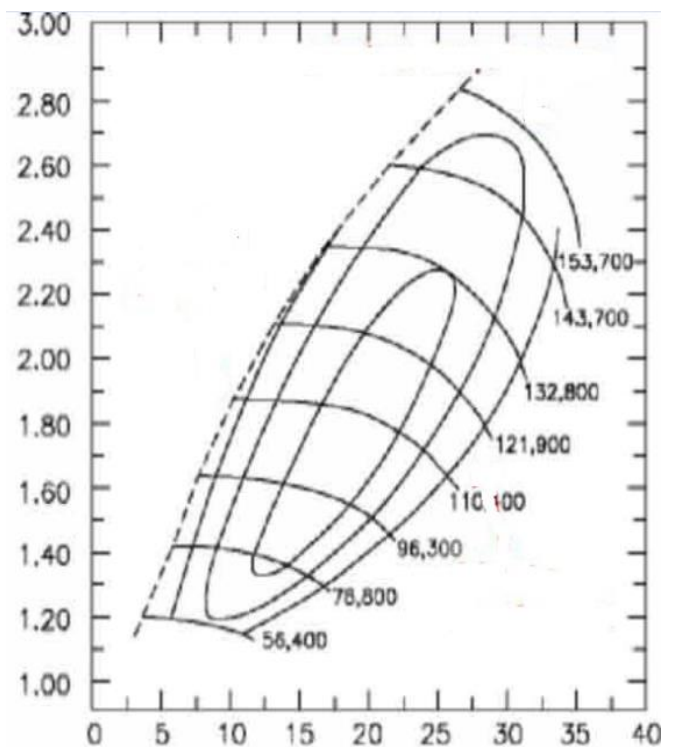


Figure IV.5. Cartographie de compresseur du turbo T3 trim 60

Les représentations de la cartographie d'un tel turbocompresseur dans les autres repères s'obtiennent par simple changement de variable en utilisant les formules précédentes. La représentation dans un repère (ψ, ϕ) de ces caractéristiques conduirait à la figure IV.6.

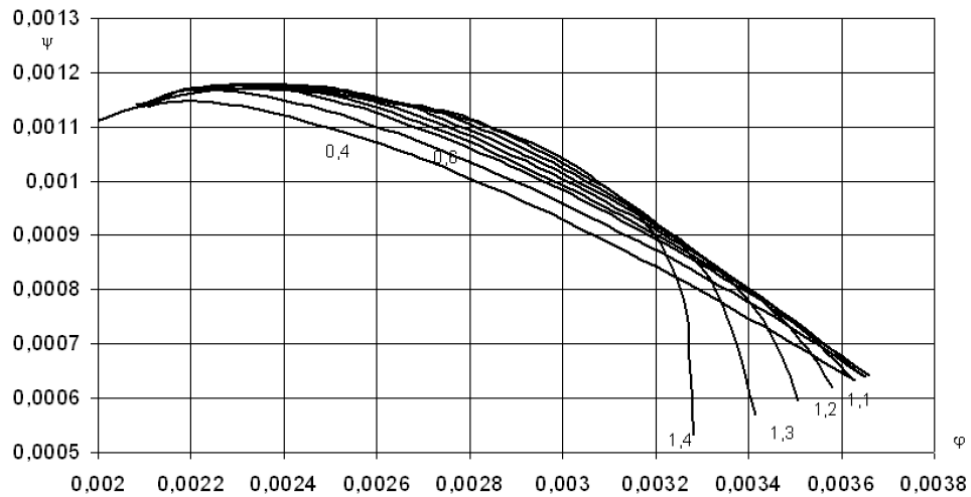


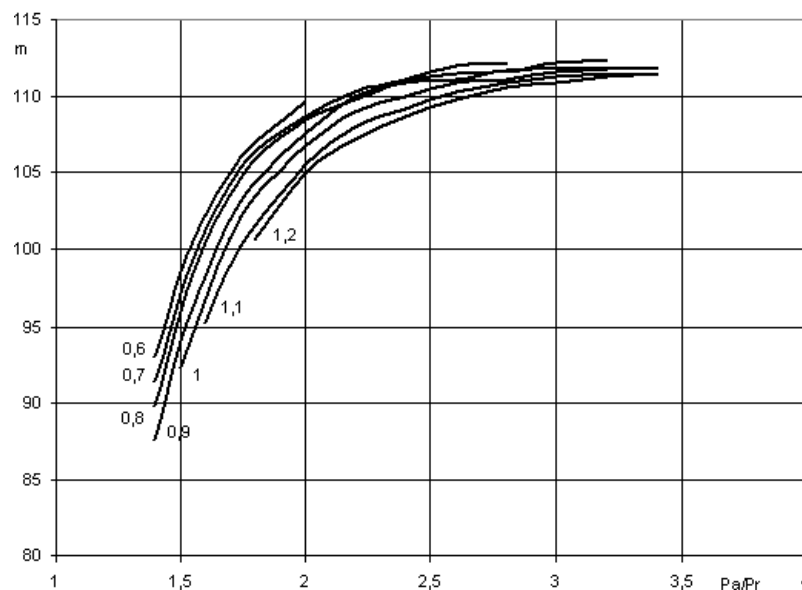
Figure IV.6. Caractéristiques dans le repère (ψ, ϕ)

IV-5. Cartographies de turbines

Dans le cas d'une turbine, bien qu'il soit aussi possible de retenir le même repère que pour les turbocompresseurs, c'est généralement le rapport de pression qui est utilisé en abscisse. En ordonnée, on trouve le débit massique corrigé ou l'efficacité isentropique de la machine.

Le paramètre des courbes est encore la vitesse de rotation corrigée, mais elle ne joue ici qu'un rôle secondaire : ce n'est que lorsqu'on veut très fortement réduire le rapport de pression ou la vitesse de rotation que les performances tendent à se dégrader. Cette souplesse tient à la stabilité d'écoulement dans les aubages liés au gradient de pression qui y règne.

La figure IV.7 donne l'allure des caractéristiques d'une turbine aéronautique bi-étagée, pour différentes vitesses de rotation.



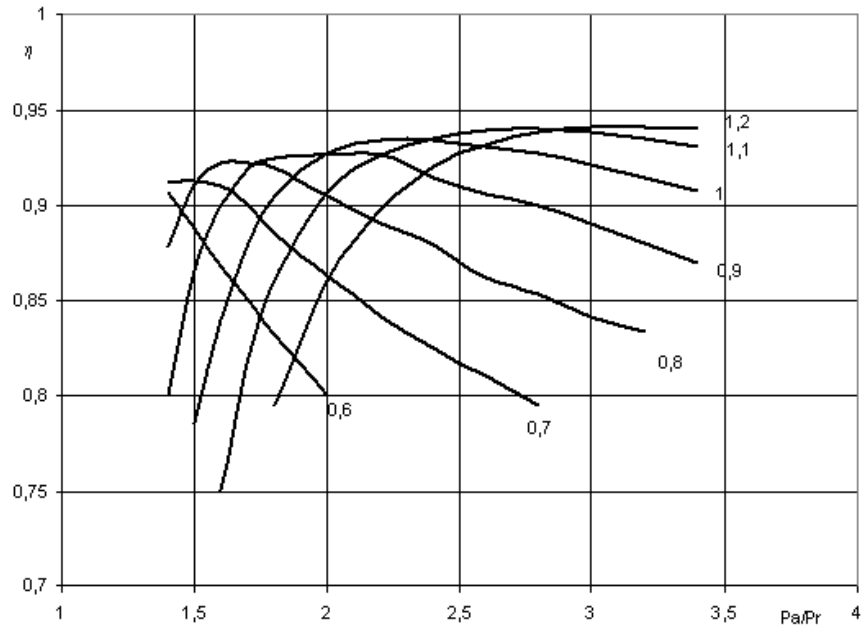


Figure IV.7. Cartographie d'une turbine aéronautique bi-étagée

IV-6 Adaptation moteur – turbo

Le moteur suralimenté par turbocompresseur est vulnérable à basse vitesse de rotation en pleine charge car le faible débit de gaz dans la turbine se traduit par un manque d'énergie et donc une pression d'air trop faible par rapport aux besoins du moteur.

Dans tous les cas de suralimentation d'un moteur de traction routière, on favorisera l'adaptation du turbocompresseur au régime de couple maximal, éventuellement à une vitesse inférieure et à plein couple.

CHAPITRE V

FORMATION DE POLLUANTS

V-1. Introduction

La pollution des moteurs automobiles provient d'une combustion imparfaite. En effet, si la combustion était parfaite, on ne retrouverait dans les gaz d'échappement que de la vapeur d'eau, du gaz carbonique et de l'azote, gaz totalement inoffensifs vis à vis de la pollution atmosphérique et de la santé, sauf pour ce qui concerne l'effet de serre.

Pour réduire les émissions de polluants, on peut :

✓ Limiter la formation de la pollution pendant la combustion. C'est la solution qui avait été retenue jusqu'à une époque récente par les constructeurs européens, qui avaient réussi, depuis le début des années 1970, à réduire d'environ 60 % le volume des émissions spécifiques, en réalisant des économies d'énergie et en optimisant la combustion. Cette solution possède cependant ses limites, car il est impossible, du fait de la dissociation, de réaliser une combustion parfaite.

✓ Détruire la pollution provoquée par la combustion avant de rejeter les gaz d'échappement à l'atmosphère. C'est la voie retenue depuis plusieurs années pour les moteurs à essence. On utilise pour cela un pot catalytique, c'est à-dire un système d'épuration catalysé par des métaux précieux (platine, palladium, rhodium) qui, placé sur la ligne d'échappement, détruit la quasi-totalité des polluants. C'est aujourd'hui la voie la plus efficace, mais elle est coûteuse et a tendance à augmenter de quelques pour-cent (2 à 5) la consommation du moteur.

L'efficacité de la catalyse est mise en évidence par les courbes suivantes, qui montrent, en fonction du facteur d'air λ (λ = inverse de la richesse), les réductions obtenues dans les émissions des divers polluants.

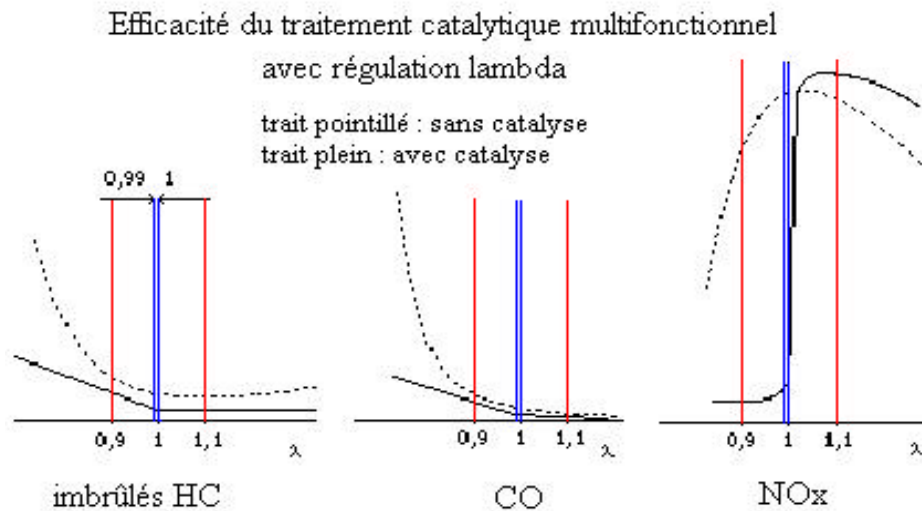


Figure V.1 Efficacité de la catalyse.

On constate que si l'on veut à la fois diminuer les émissions d'oxydes d'azote NO_x, des imbrûlés HC et de monoxyde de carbone CO, il faut impérativement que la valeur du facteur d'air soit comprise dans une bande très étroite (entre 0,99 et 1 pour une transformation de 90 % des polluants). Cela signifie une légère perte de rendement du moteur par rapport à l'optimum (obtenu

pour $\lambda \approx 1,2$) Ceci provient de ce que l'on poursuit deux objectifs a priori contradictoires : d'une part, réduire les oxydes d'azote, ce qui impose de travailler en l'absence d'oxygène, et d'autre part poursuivre l'oxydation en CO₂ et H₂O des imbrûlés et du monoxyde de carbone, ce qui en demande.

Grâce aux catalyseurs, il est possible de mener de front ces différentes opérations, mais à la condition impérative de parfaitement contrôler le dosage en oxygène pour que la combustion soit stœchiométrique, ce que permet l'utilisation d'une sonde dite Lambda placée dans le collecteur d'échappement. Si la valeur de λ diminue en deçà de 0,99 ou dépasse 1, l'efficacité du pot catalytique chute rapidement : 65 % pour $\lambda = 0,98$ ou 1,01, 40 % pour $\lambda = 0,97$ ou 1,02.

Pour arriver à maintenir la richesse dans une plage aussi étroite, il faut pouvoir déterminer avec une précision suffisante la quantité d'air aspirée, et y mélanger la quantité de carburant correspondante. Les travaux des constructeurs ont donc dans un premier temps porté sur l'amélioration des conditions de carburation en fonction de l'état de charge du moteur.

L'utilisation d'un pot catalytique "trois voies" ne peut se justifier qu'avec une régulation extrêmement précise de la carburation et de la combustion, c'est-à-dire avec des dispositifs d'injection et de commande de l'allumage électroniques. La régulation Lambda vient ainsi compléter la commande par cartographie d'allumage, en lui associant une boucle fermée sur la teneur en oxygène des gaz d'échappement, permettant d'affiner encore les réglages pour faire travailler le moteur en maintenant λ dans la bande [0,99 - 1] désirée.

Progressivement, les systèmes de carburation autrefois les plus répandus, qui étaient les carburateurs, ont cédé la place aux systèmes d'injection dans les tubulures d'admission, évolution qui s'explique par les raisons suivantes :

- ✓ L'injection permet un dosage très précis du carburant en fonction de l'état de charge et du régime du moteur, et permet donc de mieux contrôler les émissions de polluants.

- ✓ L'injection peut être réalisée à proximité immédiate des soupapes, limitant ainsi les risques de condensation de carburant sur les tubulures d'admission. De plus, si on utilise un injecteur par cylindre (injection dite multipoints), on est certain d'obtenir une bonne répartition du mélange.

- ✓ En supprimant le carburateur, on peut optimiser les écoulements de l'air dans les collecteurs d'admission, ce qui permet d'obtenir un meilleur coefficient de remplissage, et améliore donc les performances du moteur.

- ✓ Enfin, on résout avec toute la précision requise diverses difficultés comme l'apport de carburant pour les reprises, le démarrage à froid, la tenue du ralenti.

Les systèmes de commande électronique de l'injection ont ainsi permis d'effectuer des gains significatifs en matière de réduction des polluants. Pour aller plus loin, les travaux actuels s'orientent vers un contrôle encore plus poussé de la combustion, à la fois dans les diesel et dans les moteurs à essence, la solution la plus prometteuse paraissant dans les deux cas être l'injection directe.

V-2. Monoxyde de Carbone

Le monoxyde de carbone est un gaz incolore, inodore et insipide (sans goût), il bloque l'alimentation en oxygène du sang, au niveau pulmonaire, provoquant l'asphyxie. Ce gaz est mortel en 30 min à partir d'une concentration de 0,3% ; il peut causer des maux de tête, vertiges ou pertes de connaissances pour des doses plus faibles.

Le monoxyde de carbone est produit par un **manque d'oxygène** (il se combine avec l'oxygène pour produire du CO_2 ($2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$). Donc il augmente avec la richesse. Dans le cas d'un mélange riche, certains atomes qui constituent la molécule d'hydrocarbure ne trouvent pas de "partenaire oxygène" en nombre suffisant puisque l'air manque, ils ne sont donc pas oxydés complètement et se retrouvent dans les gaz d'échappement sous forme de particules carbonées, d'hydrocarbures imbrûlés (symbole chimique HC) ou de monoxyde de carbone (symbole chimique CO),

V-3. Hydrocarbures imbrûlés : HC

L'essence liquide est constituée d'un mélange d'hydrocarbures (HC) différents. Ceux qui se retrouvent dans les gaz d'échappement sont appelés "imbrûlés", Cette combustion incomplète est typique des moteurs 2-temps dénués de système d'injection (petits scooters, tondeuses, engins de chantier, moteurs de bateau) et, dans une moindre mesure, des moteurs 4-temps.

Certains imbrûlés – tels le benzène C_6H_6 et le toluène C_7H_8 sont très nocifs pour la santé humaine. Ils provoquent des maladies cardiovasculaires et même des crises cardiaques. Ils s'attaquent aussi au matériel génétique (ADN) contenu dans les cellules, augmentant les risques de cancer. Les moteurs de voitures – essence ou diesel – produisent peu d'imbrûlés, grâce au pot catalytique qui en élimine plus de 90%.

Les voitures sont responsables de 58 % des émissions des hydrocarbures imbrûlés dans l'air.

V-4. Formation des aromatiques

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) Sont dangereux pour la santé car cancérigènes, ils sont des hydrocarbures aromatiques constitués de plusieurs cycles benzéniques

Les HAP sont la plupart du temps dans les gaz d'échappement des moteurs à essence ; il s'agit dans ce cas des HAP de masse moléculaire la plus faible qu'on appelle HAP légers.

Parmi les HAP, le benzo(a)pyrène $C_{20}H_{12}$ est le plus dangereux pour la santé, il est émis pratiquement au même taux par un véhicule essence ou Diesel

V-5. Formation des suies

Il s'agit de particules de suie microscopiques, produites en grandes quantités par les moteurs diesel, les feux de cheminée, la fumée de cigarette, la friture, etc. Elles sont généralement abrégées PM10, ce qui signifie "particule de matière (particulate matter, en anglais) de moins de 10 microns de diamètre". Il existe des particules encore plus fines: des PM2.5, des PM1 ou même des PM0.1

Plus une particule est fine, plus elle a la capacité d'être aspirée jusqu'au fond des poumons, où elle restera collée contre la paroi de l'alvéole. Avec pour conséquences une réduction de la capacité respiratoire, et un risque accru de cancer du poumon. Dans le milieu humide de l'alvéole pulmonaire, elles vont se dissoudre et passer dans le sang. C'est pourquoi les poussières fines sont impliquées non seulement dans le cancer du poumon mais aussi dans les crises cardiaques.

Depuis quelques années, l'apparition du filtre à particules permet de réduire le nombre de PM10 rejetées par les moteurs diesel.

V-6. Formation des NO_x

Il s'agit de deux gaz – NO et NO₂ – qui sont souvent réunis sous l'appellation NO_x. Ils sont produits principalement par les moteurs fonctionnant à l'essence et surtout au diesel. Ils ont grosso modo les mêmes propriétés (d'autant plus que le NO se transforme spontanément en NO₂): ils créent un acide dès qu'ils entrent en contact avec de l'eau.

Voilà pourquoi la pollution automobile agresse les voies respiratoires des humains et des animaux, ainsi que les plantes.

V-7. Fonctionnement du catalyseur.

L'introduction du catalyseur a permis de réduire les émissions de de polluants

Les gaz d'échappement traversent les minuscules pores du nid d'abeille qui ressemble fortement à un filtre (le but est qu'un maximum de surface "traitante" soit en contact avec les gaz). Les molécules toxiques sont mises en contact (dans les pores) avec des métaux rares par exemple le platine.

En contact avec ces éléments, la réaction chimique fait que les molécules toxiques des gaz sont transformées en d'autres éléments beaucoup moins dangereux.

- ✓ Le monoxyde de carbone est transformé en dioxyde de carbone
- ✓ Les oxydes d'azote sont transformés en dioxyde de carbone et diazote
- ✓ Les Hydrocarbures sont transformés en eau et dioxyde de carbone