

3.8 CONTRÔLE DES MOTEURS ET DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS

3.8.1 ÉMISSIONS DE POLLUANTS : MÉCANISMES EN JEU

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. Dans cette partie, nous nous intéresserons principalement aux moteurs à essence, et donnerons ensuite quelques indications sur les moteurs diesel.

Pour les **véhicules à essence**, les principaux polluants sont :

- le monoxyde de carbone CO (environ 1 %) ;
- les hydrocarbures imbrûlés HC (0,1 à 0,3 %) ;
- les oxydes d'azote NOx (0,1 à 0,3 %).

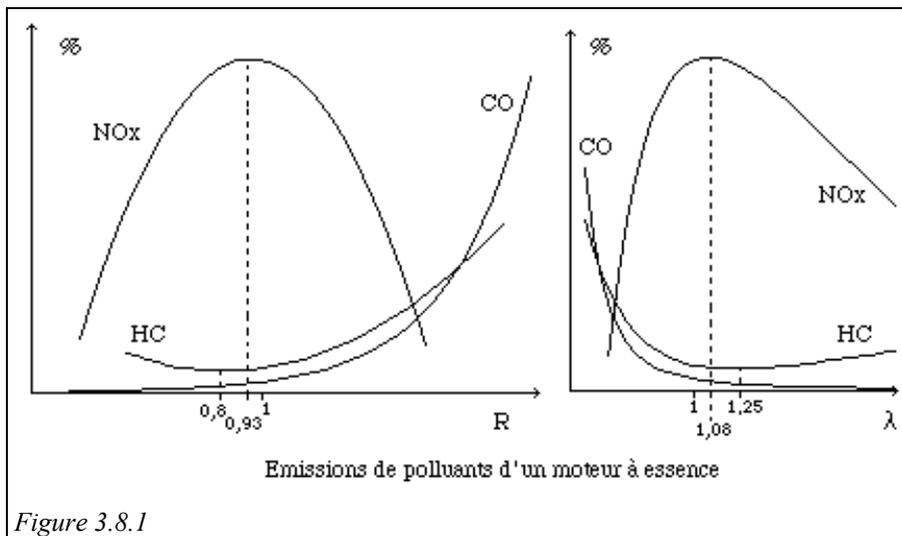


Figure 3.8.1

Ces trois polluants sont nuisibles pour la santé, et les deux derniers interviennent dans les phénomènes des pluies acides. La détermination précise des quantités de polluants émises ne peut être approchée qu'à partir de l'application de la loi d'action de masse étudiée section 4.6.1.4 du tome 1, avec prise en compte de la cinétique de combustion, mais la précision des calculs reste limitée du fait que les hypothèses retenues ne sont que très approximativement vérifiées dans un cylindre de moteur. Les études montrent cependant que la richesse et son inverse le facteur d'air λ ont une influence sensible sur les émissions des divers polluants, comme indiqué sur la figure 3.8.1.

Les émissions de monoxyde de carbone croissent avec la richesse, surtout dès que sa valeur dépasse 0,93, qui correspond par ailleurs au maximum des émissions d'oxydes d'azote. La teneur en hydrocarbures imbrûlés passe quant à elle par un minimum pour un mélange assez pauvre ($R = 0,8$) et croît assez sensiblement avec la richesse lorsque celle-ci dépasse 1.

En fonction du facteur d'air, les évolutions suivent bien évidemment des lois inverses.

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 dans l'atmosphère. C'est la voie retenue depuis plusieurs années aux Etats-Unis et au Japon, et, depuis plus récemment pour certaines voitures en Europe. 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.

De plus, pour être efficaces, les pots catalytiques proscrirent l'utilisation de carburants plombés. Les catalyseurs sont en effet "empoisonnés" par le plomb (ainsi que par le phosphore). Comme par ailleurs le plomb est par lui-même un polluant aux effets néfastes sur la santé, on a cherché à mettre au point des carburants sans plomb. Comme cet élément avait été introduit pour augmenter le pouvoir antidétonant des essences, il a fallu compenser la baisse d'indice d'octane lié à l'abandon des additifs au plomb par d'autres traitements. Pour ce faire, les raffineurs ont dû renforcer les traitements en raffinerie, car les additions de composés oxygénés organiques (éthanol par exemple) sont limitées du fait de la nécessité de vaporiser le combustible (cf. section 3.4.3.1). La solution passe donc par un raffinage plus poussé des essences, qui correspond à un surcoût de fabrication variant de quelques centimes par litre pour le supercarburant sans plomb (MON 85/RON 95) à environ 10 c/l pour le supercarburant sans plomb à haut indice d'octane (MON 88/RON 98).

3.8.2 OPTIMISATION DE LA COMBUSTION

En vue de réduire les émissions de polluants et d'optimiser l'utilisation du carburant, il est nécessaire de contrôler du mieux possible la combustion. Ceci est possible d'une part en optimisant la conception des moteurs, d'autre part en améliorant les systèmes de carburation, et enfin en maîtrisant mieux les conditions d'allumage.

3.8.2.1 Optimisation de la conception des moteurs

La conception des moteurs a une influence sensible sur leurs performances et sur les émissions de polluants : le rendement est une fonction croissante du taux de compression volumétrique, mais il en va de même des émissions de NO_x, étant donné qu'elles dépendent directement de la température dans la chambre de combustion. La géométrie de celle-ci influence fortement la formation des imbrûlés, aussi s'oriente-t-on vers des chambres compactes à surface réduite. La position et le nombre des bougies ou des soupapes jouent un rôle non négligeable sur la qualité de l'allumage et sur les pertes de charge et la turbulence dans la chambre. Les tubulures d'admission, bien dimensionnées, peuvent permettre une suralimentation naturelle favorable pour les performances.

3.8.2.2 Évolution des systèmes de carburation

Les essais réalisés sur les moteurs à essence ont permis de montrer qu'ils développent une puissance maximale pour un léger défaut d'air ($R \approx 1,15$ ou $\lambda \approx 0,85$), et que leur rendement maximal est obtenu avec un léger excédent d'air ($R \approx 0,8$ ou $\lambda \approx 1,2$). Par ailleurs, le meilleur ralenti est obtenu pour les conditions stœchiométriques ($R = \lambda = 1$), et un manque d'air de 15 à 25 % ($R \approx 1,25$ ou $\lambda \approx 0,8$) s'avère favorable pour de bonnes reprises.

Il en résulte qu'il n'existe pas de valeur optimale de la richesse ou du facteur d'air qui permette de satisfaire à toutes les exigences des usagers. En pratique, des valeurs proches de l'unité, à 10 % près sont donc généralement retenues. 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.

Jusqu'à récemment, les systèmes de carburation les plus répandus étaient les carburateurs. On assiste cependant désormais à une évolution nette en faveur des 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, 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 les diverses difficultés que nous avons évoquées lors de l'étude sur les carburateurs section 3.4.3.1 : apport de carburant pour les reprises, démarrage à froid, tenue du ralenti.

On verra plus loin que les systèmes de dépollution les plus performants (pots catalytiques multifonctionnels "trois voies") demandent que le facteur d'air soit maintenu dans une plage très étroite autour de l'unité, ce que seuls les systèmes d'injection sont capables d'assurer.

3.8.2.3 Adaptation de l'allumage

Toutefois, la meilleure carburation ne suffit pas à garantir une combustion parfaite : il est aussi nécessaire d'adapter le mieux possible le point d'allumage à l'état de charge et au régime du moteur.

Nous avons vu section 3.4.2 que, compte tenu des délais de propagation de la combustion dans la chambre, il est nécessaire d'une part de créer de la turbulence, et d'autre part de provoquer l'allumage avant que le piston n'atteigne le point mort haut PMH, l'avance à l'allumage étant caractérisée par l'angle que fait le vilebrequin par rapport à sa position au PMH.

Il est en effet fondamental que l'allumage soit effectué à un moment bien précis, qui varie avec la charge et le régime du moteur. Si l'étincelle jaillit trop tôt, il y a risque de détonation, la température en fin de compression étant trop élevée. Si elle tarde, la combustion ne commence que quand le piston redescend, et le cycle est fortement tronqué. Dans les deux cas, le rendement et la puissance du moteur chutent, et de nombreux désordres peuvent apparaître, dont, en cas d'allumage prématuré, le cliquetis, rapidement fatal pour le moteur (figure 3.8.2). On caractérise l'avance à l'allumage par l'angle que fait le vilebrequin par rapport à sa position au PMH.

On peut en première approximation considérer que les délais de combustion varient peu avec la charge et le régime du moteur, pour un mélange de richesse donnée. En fait, si la conception de la chambre favorise efficacement la turbulence, ces délais diminuent lorsque le régime augmente, mais cette variation reste faible comparativement à celle de la vitesse de rotation du vilebrequin.

Il est donc nécessaire d'adapter en permanence l'avance à l'allumage en fonction de la charge et du régime du moteur.

3.8.2.4 Contrôle du moteur

Jusqu'à ces dernières années, le variateur d'avance mécanique était le seul dispositif permettant de moduler l'avance en fonction de l'état du moteur. Ces variateurs mécaniques utilisaient un système de masselottes s'écartant progressivement de la tige de l'allumeur sous l'action de la force centrifuge, en fonction du régime du moteur. Une correction supplémentaire était apportée par une capsule à dépression reliée au collecteur d'admission, et commandée par des prélèvements de la pression de part et d'autre du papillon.

Ces variateurs mécaniques, quoique déjà très efficaces, ne pouvaient générer que des courbes de correction d'avance de forme simple, du type de celle présentée sur la partie droite de l'illustration de la figure 3.8.4. Ils étaient donc incapables de prendre en considération des réglages plus fins de l'allumage, notamment en vue de réduire les émissions de polluants.

En effet, la composition des gaz d'échappement, et en particulier de la concentration en NOx et en imbrûlés, peut être sensiblement influencée par l'angle d'avance à l'allumage, comme le montrent les courbes de la figure 3.8.3.

Courbe de pression dans la chambre de combustion pour différents point d'allumage.

- 1 allumage Z_a à l'instant correct,
- 2 allumage Z_b prématuré (combustion détonante),
- 3 allumage Z_c tardif.

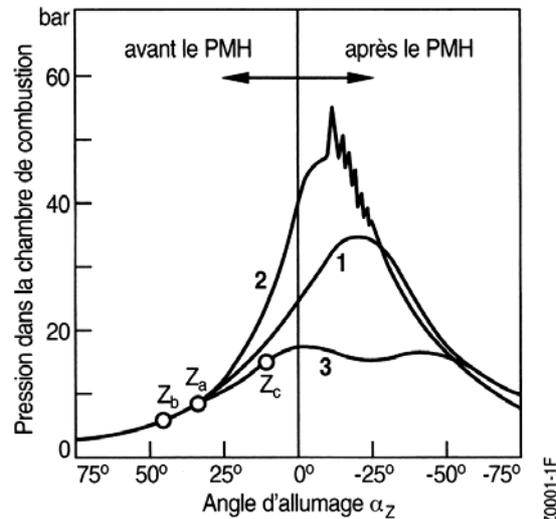


Figure 3.8.2 : Extrait de Cahiers Techniques Bosch

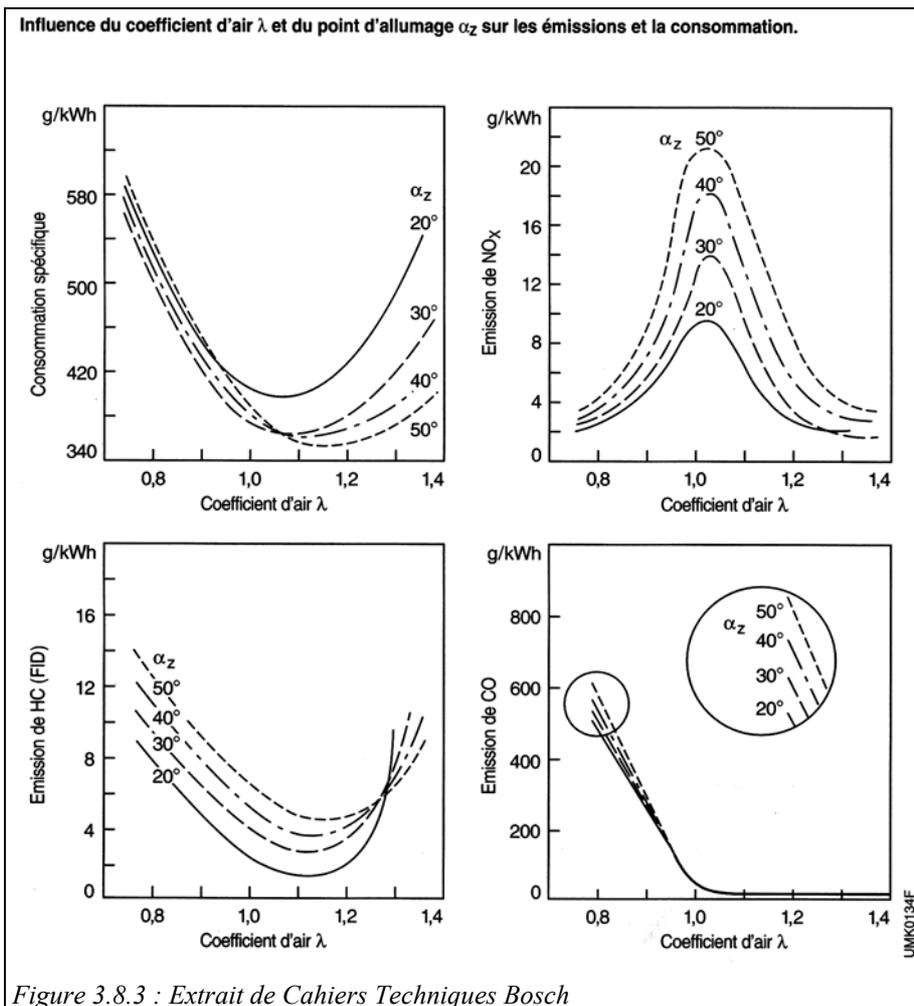


Figure 3.8.3 : Extrait de Cahiers Techniques Bosch

On constate ainsi que l'angle d'avance optimal augmente avec le facteur d'air λ , du fait de l'accroissement du retard d'inflammation avec la dilution du carburant. La concentration en NOx augmente, comme le montre l'équation (4.6.38) du tome 1, lorsque $[O_2]$ augmente et que la température est élevée, puis elle chute, pour λ élevé, lorsque la température diminue.

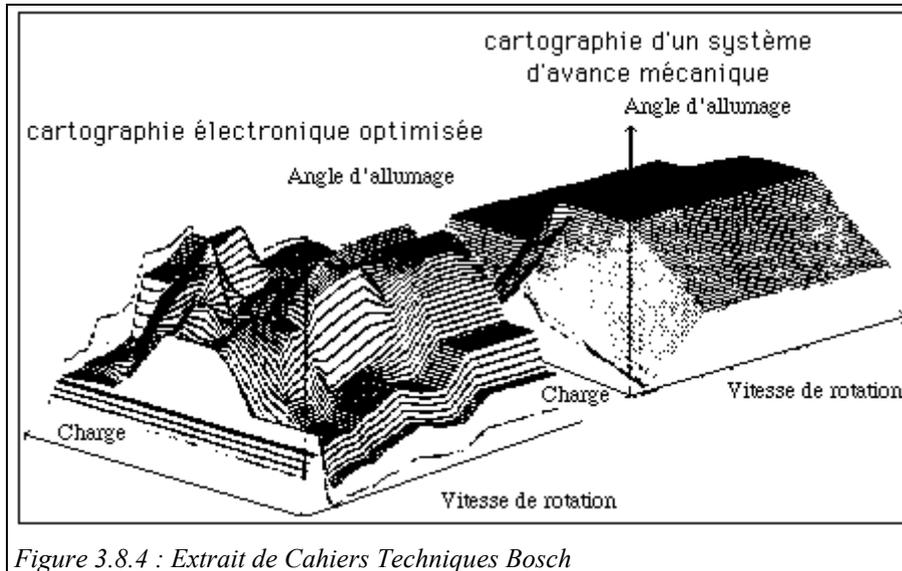
Ces courbes montrent par ailleurs qu'il faut trouver un compromis entre les contraintes d'environnement, qui conduiraient à retenir de faibles avances à l'allumage, et la consommation spécifique, pour qui des valeurs un peu plus élevées sont préférables.

Pour maîtriser la combustion de manière optimale, il est ainsi nécessaire de régler l'avance à l'allumage en prenant en compte non seulement la charge (plus celle-ci augmente, plus la température des gaz d'échappement s'élève, ce qui permet une postcombustion dans les phases de détente et d'expulsion, avec diminution du CO et des imbrûlés, mais augmentation des NOx) et le régime du moteur (lorsque la vitesse de rotation du moteur croît, les frottements augmentent, ainsi que les

polluants), mais aussi les températures de l'air d'admission, du liquide de refroidissement et des gaz d'échappement, ainsi que la position du papillon.

C'est aujourd'hui possible en recourant à la commande électronique de l'allumage, qui utilise un réseau de caractéristiques appelées cartographies d'allumage, déterminées sur banc d'essais et implantées sur microprocesseur.

La figure 3.8.4 permet de comparer la finesse de cartographie obtenue avec une commande électronique par rapport à celle que fournit un variateur mécanique.



3.8.3 DISPOSITIFS D'ÉPURATION CATALYTIQUE

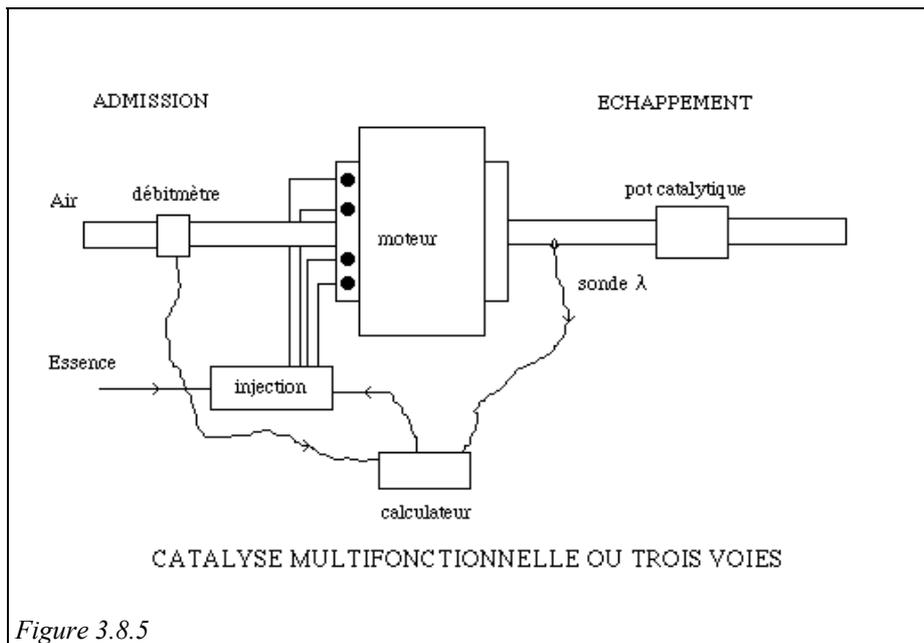
Un dispositif d'épuration catalytique se compose :

- du pot d'échappement catalytique proprement dit ;
- des dispositifs annexes qu'il convient de rajouter à un moteur conventionnel pour assurer le fonctionnement correct de l'épuration (par exemple injection électronique pour les pots trois voies, ou injection d'air supplémentaire pour les pots une voie).

On distingue aujourd'hui deux techniques :

- la catalyse dite de **simple oxydation** (ou catalyse une voie) qui permet d'agir sur CO et HC ;
- la catalyse dite **multifonctionnelle** ou plus communément trois voies qui permet d'agir sur CO, HC et NOx par des réactions chimiques simultanées d'oxydation et de réduction (figures 3.8.5 et 3.8.6).

Le pot catalytique, de taille voisine de celle d'un pot classique, se place sur la tubulure d'échappement près du moteur pour traiter les gaz encore chauds.



Il contient un catalyseur qui se présente sous forme d'un dépôt de métaux précieux (1 à 3 g par pot) sur un corps poreux monolithique en céramique du type nid d'abeille, afin de développer une grande surface de contact.

Catalyseur trois voies avec sonde à oxygène.

1 sonde à oxygène, 2 monolithe céramique, 3 grille métallique souple, 4 enveloppe double thermo-isolante, 5 revêtement de platine, rhodium, 6 support céramique ou métallique.

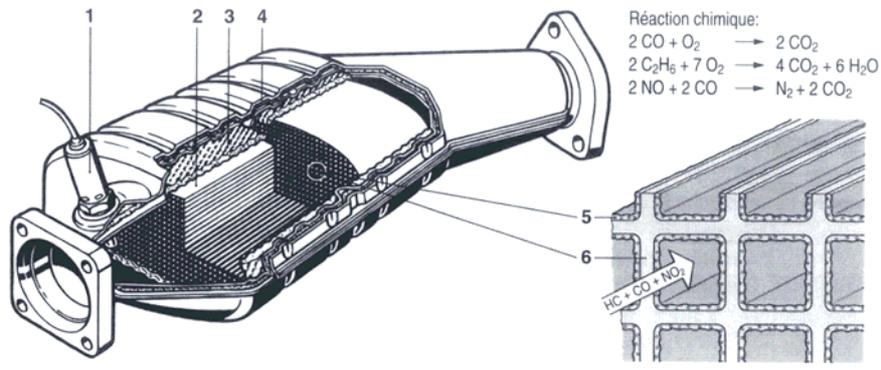


Figure 3.8.6 : Extrait de Cahiers Techniques Bosch

Les pots catalytiques constituent une technique très efficace de dépollution : plus de 90 % d'épuration à l'état neuf lorsque le moteur et le catalyseur sont chauds.

Les catalyseurs à une voie demandent un apport d'oxygène dans les gaz d'échappement, ce qui peut être réalisé par une pompe à air adaptée sur le véhicule. En revanche, cette technique ne nécessite pas de dispositif de carburation ou

d'injection sophistiqué. Étant sans action sur les oxydes d'azote, le catalyseur d'oxydation doit être couplé à un dispositif permettant de réduire ce type de polluant. Ceci est réalisé en recyclant à l'admission une fraction des gaz d'échappement.

Avec les catalyseurs trois voies, il faut assurer en permanence un mélange air-essence parfaitement équilibré, ce qui ne peut aujourd'hui être effectué que par une injection électronique pilotée. En effet, pour que l'on puisse réaliser simultanément l'élimination des trois polluants, la composition des gaz d'échappement doit rester à l'intérieur d'une plage très étroite.

Ceci n'est possible qu'en pilotant l'injection électronique par un capteur (une sonde dite Lambda par référence au facteur d'air) qui dose en permanence la teneur en oxygène des gaz d'échappement.

Cette sonde (figure 3.8.7) est constituée d'un corps en matériau électrolytique solide ZrO_2 (céramique poreuse, permettant la diffusion de l'oxygène).

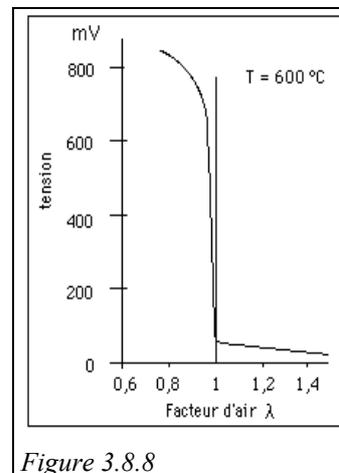
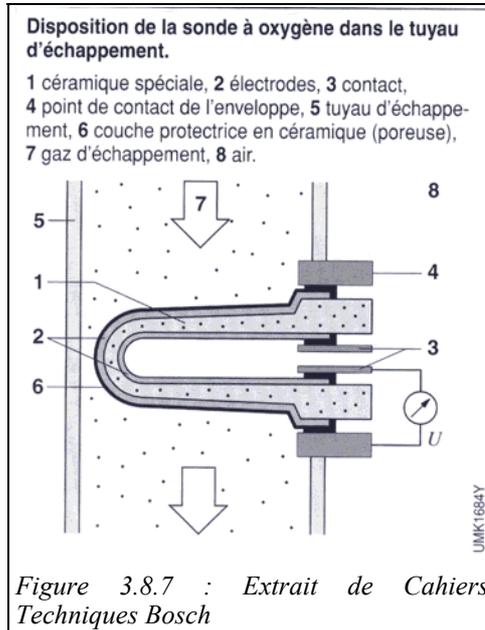
La sonde lambda dite à deux points présente la particularité, comme le montre la figure 3.8.8, d'avoir une caractéristique de tension très raide, permettant de détecter la valeur 1 du facteur d'air λ .

Plusieurs types de sondes λ sont disponibles : des sondes à deux points, éventuellement chauffées pour mieux contrôler leur température de fonctionnement et mieux réduire les émissions, des sondes dites planaires, obtenues par sérigraphie, pouvant, à l'aide d'un circuit spécial de traitement, délivrer une mesure du facteur d'air continue entre 0,7 et 4, ce qui permet une régulation encore plus fine.

L'efficacité de la catalyse est mise en évidence par les courbes de la figure 3.8.9, qui montrent, en fonction du facteur d'air, les réductions obtenues dans les émissions des divers polluants : on constate que si l'on veut à la fois diminuer les émissions de NO_x et celles de HC et de CO, il faut impérativement que la valeur de λ soit comprise dans une bande très étroite (entre 0,99 et 1 pour une transformation de 90 % des polluants).

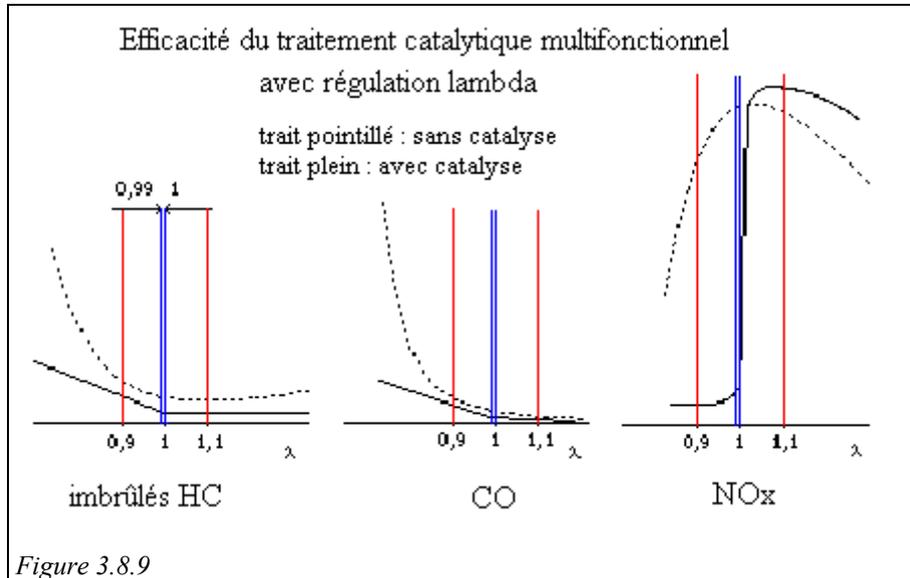
Cela signifie une légère perte de rendement du moteur par rapport à l'optimum (obtenu, nous l'avons vu, pour $\lambda \approx 1,2$).

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 CO_2 et H_2O 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, ce que permet la sonde Lambda du fait de sa caractéristique de tension très abrupte pour $\lambda = 1$.



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.

C'est pour cette raison que 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 du type de ceux que nous avons présentés plus haut.

La régulation Lambda vient compléter la commande par cartographie d'allumage, en lui associant une boucle fermée sur la teneur en oxygène des gaz d'échappement. Il est ainsi possible d'affiner encore les réglages pour faire travailler le moteur en maintenant λ dans la bande [0,99 - 1] désirée. Toutefois, la sonde Lambda ne donne un signal fiable qu'à partir d'une température de 350 °C environ. Au démarrage donc, la régulation Lambda est inopérante et le contrôleur doit opérer en boucle ouverte.

Le coût du seul pot catalytique est d'environ 400 Euros, ce qui représente à peu près la moitié du coût total d'une installation complète incluant l'adaptation du système d'alimentation du moteur (injection, sonde λ).

À titre d'exemple, on trouvera figure 3.8.10 le schéma du dispositif d'injection et de commande de l'allumage électronique "Motronic" de la société Bosch.

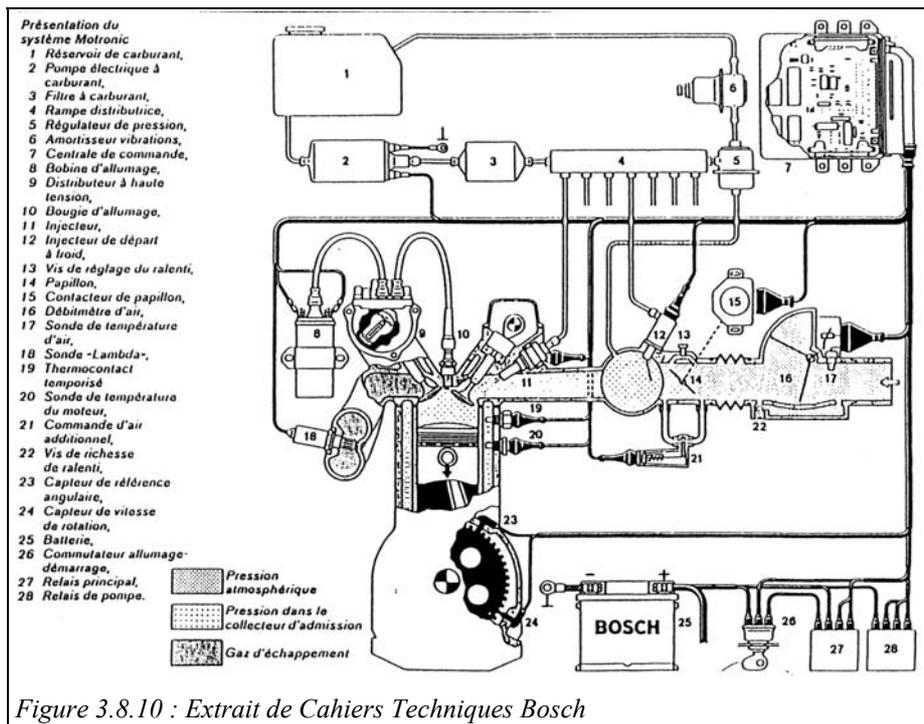


Figure 3.8.10 : Extrait de Cahiers Techniques Bosch

3.8.4 CAS DES MOTEURS DIESEL

Dans un moteur **diesel**, les problèmes de pollution se présentent légèrement différemment. En effet, du fait de l'important excès d'air, la combustion totale est plus facile à réaliser, à condition que les conditions de pénétration du jet de combustible ne favorisent pas la formation de CO et de suies, par suite d'un déficit local en oxygène (la présence de gaz inertes - ou d'excès d'air - réduit les pressions partielles des constituants, et augmente donc le degré de réaction).

En principe, le CO et les suies s'oxydent normalement pendant la phase principale de combustion et même pendant la détente. Il arrive cependant que des conditions défavorables empêchent cette combustion de prendre place, ce qui conduit à une pollution des gaz d'échappement par l'excès de suie, qui forme alors un nuage opaque caractéristique des moteurs diesel mal réglés : on parle d'émission de particules.

3.8.4.1 Émissions de polluants gazeux

Pour le reste, les problèmes de pollution gazeuse se présentent de manière similaire dans les diesel et dans les moteurs à essence. Toutefois, du fait de l'excès d'air, les émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures imbrûlés sont plus réduites, et la plus basse température de combustion limite celles d'oxydes d'azote. Sans post-traitement, ces émissions sont donc un peu plus faibles que dans un moteur à essence. Le problème essentiel est que les pots catalytiques trois voies ne peuvent être utilisés compte tenu de la valeur de lambda. Il se rajoute le problème spécifique du dioxyde de soufre, qui doit être éliminé au niveau du raffinage.

Il faut ici encore faire un compromis entre les performances et les émissions de polluants. C'est notamment le cas lorsque l'on cherche à limiter les oxydes d'azote, dont la formation est favorisée (par rapport aux moteurs à essence) par la présence d'un excès d'air.

La puissance et le rendement maximum sont obtenus en recourant à l'avance à l'injection, c'est-à-dire en injectant le combustible avant que le piston n'atteigne le PMH, pour tenir compte du délai d'inflammation (de l'ordre de 2 millisecondes) et faire en sorte que la combustion se déclenche effectivement à peu près en fin de compression.

En renonçant à cette avance à l'injection, on limite beaucoup les niveaux de pression et de température dans le cylindre pendant la combustion, ce qui permet de réduire sensiblement la formation d'oxydes d'azote,

mais au prix d'une détérioration du rendement et de la puissance.

La figure 3.8.11 donne les allures des évolutions des températures et des pressions pour un moteur de poids lourd réglé :

- dans un premier cas (courbes en traits pleins) avec une légère avance à l'injection, ce qui conduit à une PME de 9,5 bars, une consommation spécifique de 220 g/kWh, et une concentration en NO_x de 1000 ppm ;
- dans un second cas (courbes en tirets) sans avance à l'injection (PME de 8,9 bars, consommation spécifique de 235 g/kWh, concentration en NO_x de 600 ppm).

La réduction des émissions de NO_x est remarquable (40 %), mais elle se fait au prix d'une surconsommation de près de 7 %.

3.8.4.2 Émissions de particules

Les particules émises par les moteurs diesel sont principalement des suies (carbone), et dans une moindre mesure des hydrocarbures et des aérosols provenant du carburant, du lubrifiant ou des sulfates.

Sur le plan chimique, ce sont souvent des aldéhydes dégagant une odeur désagréable et pouvant nuire à la santé humaine du fait de la présence de composés aromatiques. Leur petite taille (diamètre de l'ordre du micron) leur permet de rester en suspension dans l'atmosphère, générant une fumée blanche, bleue ou noire caractéristique des gaz d'échappement d'un moteur diesel mal réglé.

Pour traiter ces particules, la solution la plus efficace aujourd'hui est d'utiliser un filtre à particules qui assure leur séparation des gaz d'échappement, puis leur

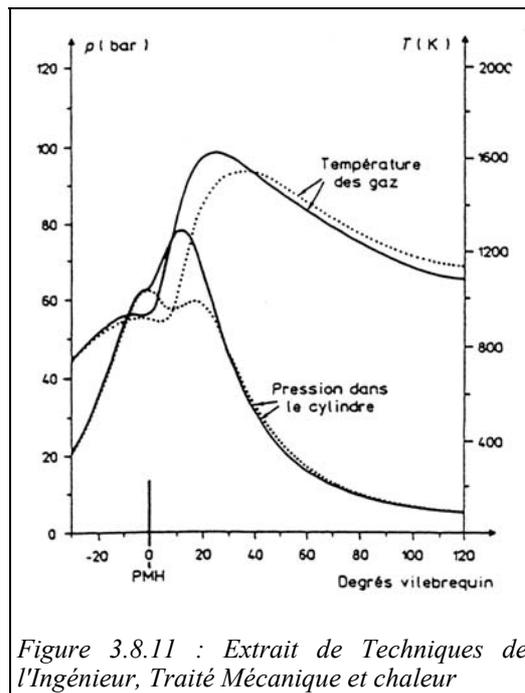


Figure 3.8.11 : Extrait de *Techniques de l'Ingénieur, Traité Mécanique et chaleur*

élimination ultérieure. Il est ainsi possible, du fait de l'excès d'air dans les gaz, de poursuivre l'oxydation du CO, des HC et des particules, mais le traitement des NOx nécessite le recours à un dispositif spécifique. On peut par exemple utiliser le procédé RCS (réduction catalytique sélective), où l'on asperge les gaz d'une solution aqueuse d'urée, qui se transforme en ammoniacque par hydrolyse, et réduit ensuite les oxydes d'azote.

Les filtres à particules sont quant à eux généralement constitués de céramiques extrudées en forme de nids d'abeille, obturées alternativement par des bouchons, pour obliger les gaz à traverser le matériau. L'autonettoyage du filtre est assuré par la combustion des suies, qui prend place si la température dépasse 550 °C. Pour éviter tout risque de colmatage, on ajoute des additifs permettant d'abaisser ce seuil à 200 - 250 °C.

3.9 RÉFÉRENCES

- J. ANDRZEJEWSKY, M. THELLIEZ, *Coefficient de remplissage et taux de gaz résiduels*, Entropie, 1987, n° 134, pp. 95-100.
- BOSCH *Commandes pour moteurs à essence*, Cahiers Techniques, Stuttgart, 1999.
- BOSCH *Commandes pour moteurs diesel*, Cahiers Techniques, Stuttgart, 2000.
- R. CARRERAS, M. QUERA, A. COMAS, A. CALVO, *Maquinas térmicas*, LMTA, ETS d'Enginyeria Industrial, Universitat Politècnica de Catalunya, Terrassa, 2001
- Ch. CLOS *Technologie des moteurs alternatifs à combustion interne*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mécanique et chaleur, B 2800.
- B. GEOFFROY, *Distribution à soupapes*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mécanique et chaleur, B 2805.
- M. GRATADOUR, *Application de la suralimentation aux moteurs*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mécanique et chaleur, B 2 630.
- J.C. GUIBET *Carburants et moteurs*, Publications de l'IFP, Editions Technip, Paris, 1987.
- A. HAUPAIS *Combustion dans les moteurs diesel*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mécanique et chaleur, B 2700.
- J. P. MORANNE, *Refroidissement des moteurs à combustion interne*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mécanique et chaleur, B 2830.
- T. de NEEF, B. MOUILLE, P.A. DESTAILLEUR, *La production d'énergie au moyen de systèmes diesel modernes*, Revue de la Société des Electriciens et des Electroniciens, décembre 1999, Paris.
- A. PAROIS *Suralimentation par turbocompresseur*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, BM 2 631.
- J. RAUCH *Insonorisation et remplissage des moteurs à piston*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mécanique et chaleur, B 369,9.
- B. RAYNAL *Moteurs thermiques et pollution atmosphérique, origine et réduction des polluants*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mécanique et chaleur, B 378,1.
- F. ROUX *Graissage des moteurs thermiques alternatifs*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mécanique et chaleur, B 2750.

-
- M. THELLIEZ, *Analyse énergétique des cycles des moteurs à combustion interne au moyen d'un cycle théorique associé*, Entropie, 1989, n° 148, pp. 41-49.
- M. THELLIEZ, *Analyse des produits de combustion d'un moteur à combustion interne*, VIIe Congreso de Ingeniera Mecanica. Valencia, décembre 1988.
- J. TRAPY *Moteur à allumage commandé*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, BM 2540.