Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 100 (1974)
Heft: 1: SIA spécial, no 1, 1974

Artikel: Pollution de l'air par les moteurs à combustion
Autor: Corbat, Jean-Pierre
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-72088

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Pollution de l'air par les moteurs à combustion[1]

par JEAN-PIERRE CORBAT, ingénieur EPFZ/SIA, chargé de cours à l'EPFL

1. Introduction

Le problème de l'accroissement de la population

La *croissance irrésistible de la population* et la recherche d'un niveau de vie toujours plus élevé n'ont pas pour seules conséquences *l'industrialisation et le développement de la science*, mais aussi une demande mondiale en énergie qui augmente d'une façon exponentielle depuis le début du siècle (fig. 1).

La combustion : la plus grande source d'énergie et de pollution de l'air

Il est incontestable que la plus grande partie des besoins énergétiques mondiaux est couverte par la *combustion* (1970 : 94 %). Les énergies hydraulique et nucléaire n'y jouent qu'un rôle secondaire (fig. 2).

Toute combustion engendre des réactions chimiques connues. Il y a consommation d'oxygène et formation de gaz brûlés ; ces derniers contiennent, dans certaines conditions, des *éléments nocifs*. Si la pollution de l'air qui en résulte dépasse la cote admissible, aussi bien dans l'espace que dans le temps, elle représente une importante menace pour les hommes, les animaux et les plantes. Ces limites sont atteintes, voire dépassées, dans différents centres économiques ayant des *conditions climatiques particulières*. Haagen-Smit [1] [2] a montré, pour la première fois en 1952, que la formation du *smog* sur Los Angeles est due aux gaz brûlés.

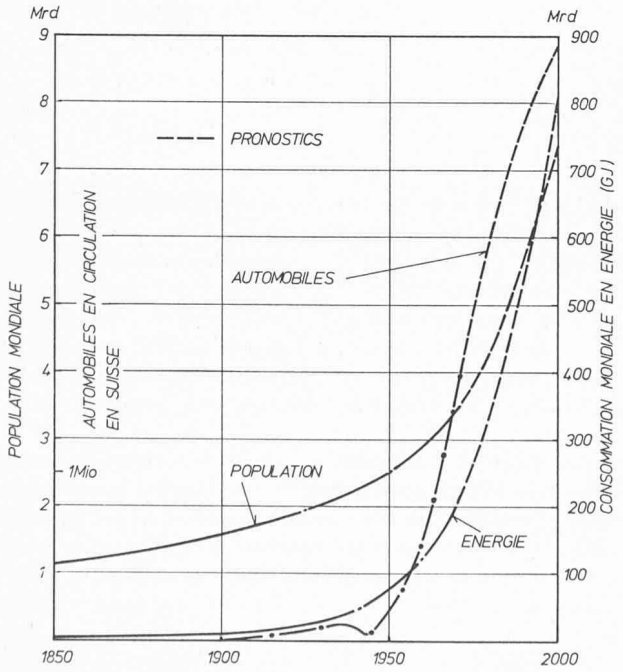


Fig. 1. — Croissance de la population et de la consommation mondiale d'énergie, nombre des automobiles en circulation en Suisse.

Une modification de l'environnement suivant une loi exponentielle sur notre planète nous conduira inéluctablement vers une catastrophe. Il faut être conscient du fait que, pour empêcher qu'une telle situation ne se produise, nous devons mettre en jeu des forces du même ordre de grandeur que celles qui sont en train de provoquer le bouleversement de l'équilibre naturel. Le fait que, selon différentes estimations, les réserves en combustibles fossiles vont s'épuiser vers la fin du siècle prochain à cause d'une exploitation toujours plus intensive, n'est qu'une maigre consolation. Il ne reste qu'à espérer que, d'ici là, une autre source d'énergie propre sera trouvée. La réduction en cendres, en l'espace de deux siècles, de toutes les réserves de combustibles fossiles de la terre, formées pendant des milliards d'années, ne peut pas se produire sans laisser de traces.

Le moteur à combustion : l'une des plus importantes inventions de l'humanité

Il est à peine imaginable que le progrès technique eût pu avoir lieu sans l'intervention des *moteurs à combustion* permettant la transformation de l'énergie thermique en travail mécanique. Nous profitons aujourd'hui de sa large diffusion et il ne faut par conséquent pas s'étonner que la majeure partie des matières nocives provient justement de cette machine servant au *transport* sur terre, sur mer et dans les airs.

[1] Texte complété de la conférence tenue à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, le 11 décembre 1972, dans le cadre d'un cours de perfectionnement sur « Les bases scientifiques de la protection de l'air ».

[2] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

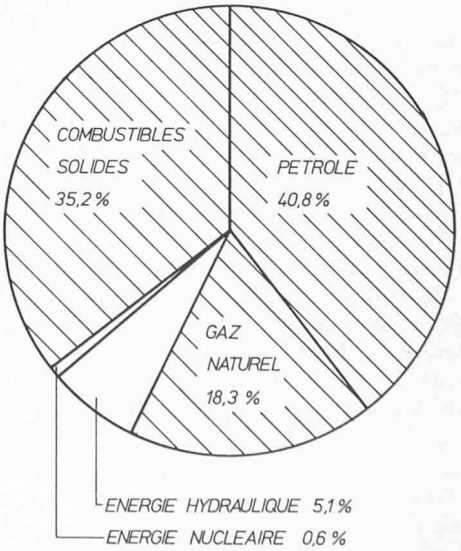


Fig. 2. — Sources d'énergie dans le monde.

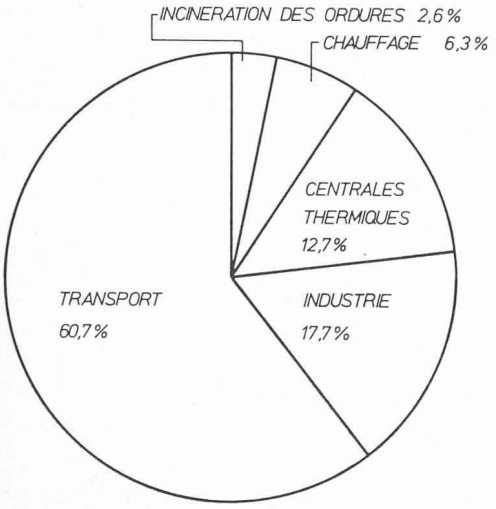


Fig. 3. — Répartition massique des gaz nocifs émis par différentes sources de pollution liées à la combustion.

L'importance relative des diverses sources de pollution due à la combustion diffère selon les régions. La figure 3 montre cette situation aux USA en 1966 (National Research Council).

Cette statistique ne fournit cependant que peu de renseignements sur la toxicité de certains gaz d'échappement ; par ailleurs, on ne connaît aucun critère d'évaluation de la toxicité d'un mélange de gaz nocifs. Si l'on déduit la part de ces gaz nocifs qui peut être résorbée par l'environnement, ce qui est discutable, et que l'on considère l'émission massique relative, la statistique s'améliore en faveur du moteur à combustion (fig. 4).

Il est clair que, dès le début, on suppose que *le moteur à combustion est l'une des sources de pollution parmi les plus importantes*. La pollution de l'air est peut-être le problème le plus complexe auquel sont confrontés les constructeurs de moteurs et plus particulièrement de moteurs Otto. L'accroissement toujours plus grand du nombre des véhicules particuliers (fig. 1) fait que l'automobile devient l'ennemi le plus sérieux de l'environnement.

Le but du présent article est de donner une vue d'ensemble du problème des gaz d'échappement des moteurs à combustion, ainsi que des solutions qui peuvent y être envisagées. Du fait que, d'une part, le problème est complexe et qu'il a plusieurs aspects, et que, d'autre part, nos connaissances sur les gaz d'échappement progressent, cet article n'a pas la prétention d'être complet.

2. Les bases de la combustion

Les combustibles

Les combustibles employés pour les moteurs à combustion sont, selon la provenance du pétrole et le but d'utilisation, d'une composition très variée. Ils sont un mélange d'*hydrocarbures* ; ainsi, l'essence se compose d'environ 400 différents groupes d'hydrocarbures, tandis que le gas oil en a environ 200. A part ces groupes, d'autres substances, en partie non inflammables, sont contenues dans ces combustibles. On trouve, en particulier, du *soufre* dans les combustibles Diesel, des additifs antidétonnants à base de *plomb* dans l'essence (tétraéthyle de plomb de 0,5 à 0,6 g par litre). Les combustibles gazeux des moteurs à combustion sont consommés sous forme de *gaz naturel* (mélange de méthane (CH_4) et d'éthane (C_2H_6)), de propane (C_3H_8) et de butane (C_4H_{10}).

Le gaz naturel peut aussi contenir de grandes quantités de gaz carbonique CO_2 et d'azote N_2. Les autres gaz sont rarement utilisés pour les moteurs.

Le tableau suivant donne un aperçu de la composition et des propriétés des plus importants combustibles liquides pour moteurs (fig. 5).

En examinant attentivement l'emploi des combustibles, on constate que le mazout est de loin le plus utilisé, mais seule une petite partie en est consommée par les gros moteurs Diesel, alors que l'essence l'est presque entièrement par les moteurs. Sa combustion dans les moteurs Otto produit des gaz d'échappement particulièrement nocifs.

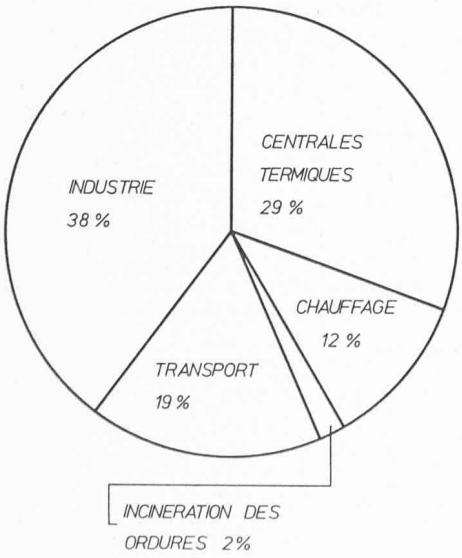


Fig. 4. — Emission massique relative aux différents pollueurs d'air rapportée à la limite admissible.

Combustible	Composition %						Densité kg/m³	Viscosité		Pouvoir calorifique MJ/kg
	C	H_2	S	O_2	N_2	Cendres		SR I à 100°F	c St à 20°C	
Essence *	85,7+ 84,2	14,3+ 15,8	0	0	0	0	750	3	0,75	46,5-43,5
Gas oil	85,6	13,4	0,6	0,1	0,3	0	830	36	4,3	42,6
Mazout	85,4	11,8	1,8	0,3	0,7	0,01	930	450	112	41,2
Fuel oil	83,8	11,3	3,6	0,4	0,9	0,03	950	1000	250	39,8
Residual fuel	85,1	10,9	2,4	0,5	1,0	0,06	960	10 000	2300	39,8

* + 0,6 gPb/litre

Fig. 5. — Propriétés des combustibles liquides.

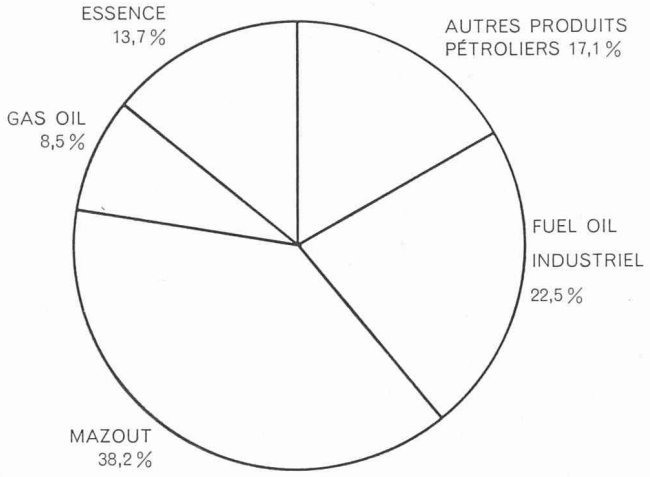


Fig. 6. — Répartition des produits pétroliers liquides.

Le gas oil est principalement utilisé pour les petits moteurs Diesel. La figure 6 donne une idée valable de la situation en Allemagne fédérale.

Gaz carbonique et vapeur d'eau : produits de la combustion complète

Si l'on dispose d'assez d'air (composé en première approximation de 21 % O_2 et 79 % N_2), la combustion d'un hydrocarbure pur a lieu selon les réactions exothermiques suivantes :

$$C + O_2 + \frac{79}{21} N_2 \rightarrow CO_2 + \frac{79}{21} N_2$$

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 + \frac{79}{2 \cdot 21} N_2 \rightarrow H_2O + \frac{79}{2 \cdot 21} N_2 \qquad (1)$$

Cela donne naissance à des gaz d'échappement contenant du *gaz carbonique* (CO_2) et de la *vapeur d'eau* (H_2O). L'eau formée par la combustion ne doit pas être considérée comme source de pollution, car, de toute façon, l'eau existe en grande quantité sur la terre et la vie sans elle n'est pas possible. Le gaz carbonique n'est pas toxique, mais il n'est pas entièrement absorbé par le processus de photosynthèse et sa concentration dans l'atmosphère augmente sans cesse.

Les matières polluantes d'une combustion réelle

Les conditions réelles de la combustion s'éloignent fortement de celles, idéales, décrites ci-dessus. Cela est dû aux faits suivants :

— Les conditions optimales de combustion ne sont guère atteintes, de ce fait la combustion sera incomplète, d'où la production de *monoxyde de carbone* (CO), d'*hydrocarbures imbrûlés* (HC) et de *suie* (C).

— L'azote de l'air peut également entrer en réaction chimique avec l'oxygène, ce qui donnera lieu aux *oxydes d'azote* (NO, NO_2, N_2O_2, etc).

— Le combustible ne se compose pas seulement d'hydrocarbures, mais il contient aussi d'autres composants (soufre, azote, cendres...) ainsi que des additifs dont les éléments se retrouvent dans les gaz d'échappement, ce qui donne lieu au *bioxyde de soufre* (SO_2), aux *cendres*, aux *oxydes de plomb*, etc.

Voici les émissions de certains éléments polluants en 1968 aux Etats-Unis [2] (fig. 7).

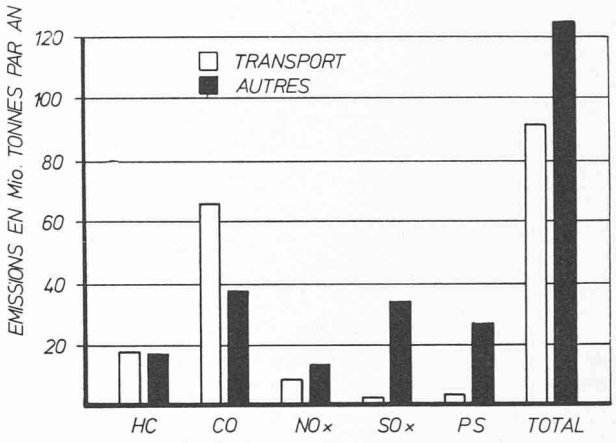


Fig. 7. — Emissions massiques des polluants aux USA en 1968 (HEW).

Le principal facteur influençant la combustion, et par conséquent l'émission des matières polluantes, est le *coefficient d'air* de la combustion qui est défini comme suit :

$$\lambda_v = \frac{\dot{m}_L/\dot{m}_B}{(\dot{m}_L/\dot{m}_B)_{st}} \qquad (2)$$

définition dans laquelle $\dot{m}_L/\dot{m}_B$ désigne le rapport air-combustible dans le cas de la combustion effective, tandis que $(\dot{m}_L/\dot{m}_B)_{st}$ désigne le rapport dans le cas de la *combustion stoïchiométrique* (c'est-à-dire que la quantité d'air permet une combustion théorique complète de la quantité de carburant). Dans les cas courants, pour les combustibles liquides utilisés, le rapport stoïchiométrique air/combustible est de 14 à 15 kg air/kg combustible.

Pour un mélange riche, c'est-à-dire lorsque la combustion a lieu avec un manque d'air, le coefficient d'air est inférieur à 1, tandis que, pour un mélange pauvre, le coefficient d'air est supérieur à 1.

Moteur Otto — Moteur Diesel

C'est le coefficient d'air qui différencie essentiellement le moteur Otto du moteur Diesel.

Dans le *moteur Diesel*, il y a *auto-allumage* du mélange formé par l'air aspiré et par le combustible injecté, au point mort haut, grâce à une température de fin de compression élevée, tandis que, dans les *moteurs Otto*, l'*allumage* est déclenché par étincelles. Pour les moteurs Diesel, l'*excès d'air est nécessaire*, car la répartition du combustible dans la chambre de combustion n'est jamais homogène et, de ce fait, on doit disposer d'une réserve d'air, afin de garantir une combustion sans fumée. Selon le système d'injection et de combustion, les moteurs Diesel ont, à pleine charge, un coefficient d'air de 1,4 à 1,8. L'excès d'air est encore plus grand à charge partielle, puisqu'il y a un *réglage du combustible* dans le moteur Diesel. (La quantité d'air rapportée à la course reste approximativement cons-

tante.) Par opposition, le moteur Otto exige un mélange dont la mise à feu n'est possible que dans le voisinage du mélange stoïchiométrique. Soit un léger excès de combustible (mélange riche), soit un certain excès d'air est admissible, selon que le moteur est réglé pour une puissance maximale ou une consommation minimale. Le réglage de la puissance du moteur Otto s'effectue par *le calibrage des quantités d'air et de combustible* (papillon et carburateur). Cette différence importante entre les moteurs Diesel et Otto explique que les moteurs Otto aient une *puissance spécifique élevée* (puissance rapportée à la cylindrée) et que les moteurs Diesel aient des avantages significatifs du point de vue *économique* et *écologique*.

3. Les effets de certains composants des gaz de combustion sur l'homme et l'environnement [3]

Le gaz carbonique CO_2

Ce n'est pas une matière polluante, mais l'on suppose cependant que l'augmentation constante de la concentration en CO_2 de l'atmosphère entraîne des *modifications climatiques*.

Le monoxyde de carbone CO

L'hémoglobine amène l'oxygène des poumons jusqu'aux différentes cellules du corps et évacue vers les poumons le bioxyde de carbone formé dans ces mêmes cellules. L'affinité de l'hémoglobine avec le CO est environ 200 fois supérieure à celle de l'oxygène, ce qui entraîne une saturation rapide du sang même pour une concentration en CO relativement faible, d'où *asphyxie*. Un homme qui séjourne dans une atmosphère contenant du CO subit d'abord, pendant quelques heures, une augmentation de la partie carboxy-hémoglobine, c'est-à-dire la partie de l'hémoglobine qui porte du CO, pour finalement parvenir à un état d'équilibre correspondant à la teneur en CO (figure 8, [2]).

L'intoxication par le CO dépend aussi bien du temps d'exposition que du degré de concentration.

Les concentrations maximales tolérées sur un lieu de travail sont pour le CO :

Allemagne (valeurs moyennes)	8 ppm	pendant	24 h.
	16 ppm	»	8 h.
	40 ppm	»	1 h.
USA	9 ppm	»	8 h.
	35 ppm	»	1 h.

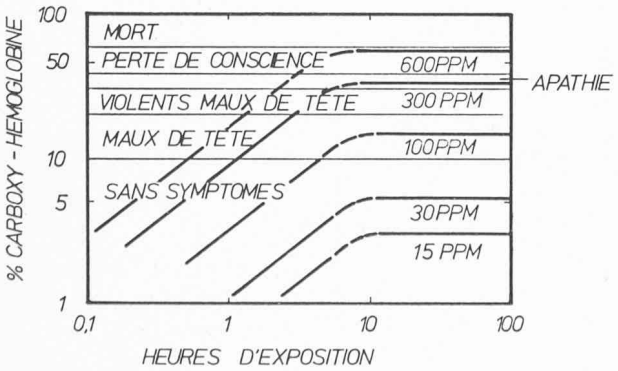


Fig. 8. — Toxicité du CO.

Hydrocarbures HC

Dans cette catégorie, on trouve toute la diversité des hydrocarbures imbrûlés ou partiellement brûlés, comme les hydrocarbures polycycliques, le phénol, l'aldéhyde, le benzopyrène, les acides carboniques, etc. Ils prennent part à la formation du *smog*. Ils sont partiellement non polluants mais responsables de l'*odeur* des gaz d'échappement (aldéhyde). Quelques hydrocarbures sont *cancérigènes*, principalement le benzopyrène. Aux Etats-Unis ainsi qu'en Allemagne, on a pu constater, sur les plantes et les cultures, des dégâts provoqués par l'éthylène, qui est d'ailleurs pratiquement dépourvu de toxicité pour l'homme et l'animal.

Oxydes d'azote NO_x

L'hémoglobine ne présente pas seulement une affinité élevée pour le monoxyde de carbone, mais aussi pour l'oxyde d'azote. Son action polluante s'explique par le fait qu'avec l'humidité, il forme de l'*acide nitrique* (H_2NO_3) fortement dilué, lequel *irrite les yeux* et, à longue échéance, peut provoquer un *œdème pulmonaire*. Les oxydes d'azote et les hydrocarbures imbrûlés sont responsables de la formation du *smog* [1].

La concentration en oxydes d'azote tolérée sur un lieu de travail est controversée ; on trouve des valeurs moyennes de 1 à 25 ppm pour un intervalle de temps de 8 heures.

Le bioxyde de soufre SO_2

Le bioxyde de soufre forme avec l'humidité (humidité de l'air, l'eau condensée dans les gaz, humidité des muqueuses) l'*acide sulfureux* (H_2SO_3), lequel *irrite les muqueuses* des voies respiratoires ou restreint l'activité des cellules vibrantes qui assurent un auto-nettoyage des poumons. Par la suite, le bioxyde de soufre entraîne une *stérose des voies respiratoires* (rétrécissement), d'où une respiration plus difficile et toux. La concentration maximale sur un lieu de travail est de 5 ppm pour un intervalle de temps supérieur à 8 heures. Une partie du bioxyde de soufre se lie avec d'autres déchets contenus dans l'air et forme des sulfates solides.

Les particules solides

Habituellement, la majeure partie des émissions solides sont des particules de suie et de sulfate. Ces particules sont gênantes. Elles *salissent* les surfaces exposées, elles servent aussi de noyaux de condensation et contribuent, en tant qu'aérosol, à *perturber l'atmosphère*. La majorité de ces particules se dépose sur le sol au bout d'un certain temps. Les particules de suie qui parviennent aux poumons par respiration provoquent de l'*asthme*, des *bronchites chroniques* et de l'*emphysème*.

Le *plomb* est connu en tant qu'*élément toxique*. Il semble que la concentration en plomb de notre environnement augmente. La plus grande partie de cette augmentation est due aux produits de décomposition du tétraéthyle de plomb (alkyles de plomb). Le plomb permet de produire à bon marché une essence qui présente d'excellentes qualités antidédonnantes nécessaires aux moteurs modernes. De plus, le plomb évite l'usure des sièges de soupape. *L'action toxique du plomb* ingurgité avec la nourriture, aussi bien par l'homme que par l'animal, *est controversée* [4] ; en tout cas, son utilisation est mise en cause. La dimension et la portée de ce problème ne sont pas encore déterminées.

4. De la formation des composés polluants

Les polluants (hydrocarbures, CO et NO_x) peuvent apparaître à différents endroits dans le moteur. A part les cylindres où a lieu la combustion, il y a évaporation et *fuites de combustible* du système d'alimentation, ainsi qu'*échappement des gaz du carter*, qui proviennent de l'inétanchéité des segments de piston. On peut éliminer complètement ces sources de pollution supplémentaires, d'une part en construisant de manière appropriée le système d'alimentation en éliminant les fuites, d'autre part en réintroduisant les gaz du carter dans les tubulures de l'admission (recyclage). En conséquence, les explications ci-dessous ne traitent que des problèmes créés par les gaz d'échappement.

Le monoxyde de carbone

Normalement, l'apparition du monoxyde de carbone pendant la combustion est la conséquence d'un *manque d'oxygène*, soit généralisé dans toute la masse contenue dans le cylindre, soit aussi localisé dans une partie de cette masse. Théoriquement, la concentration peut être déterminée grâce à l'équation d'équilibre du gaz à l'eau.

$$H_2 + CO_2 \rightleftharpoons H_2O + CO \qquad (3)$$

Aux plus hautes températures de combustion (2000-2500° K, à pleine charge du moteur), on constate la formation d'une quantité importante de CO et ceci même lorsqu'il y a excès d'oxygène. Cependant, dans ce cas, avant que les gaz ne quittent le cylindre, ils sont détendus par le mouvement du piston, ce qui entraîne un abaissement de leur température jusqu'au moment où se produit l'échappement ; cette température dite d'échappement est d'environ 700 à 900° K. Ce phénomène favorise la réaction d'oxydation du CO en CO_2. Toutefois, cette oxydation ne suit pas la loi de formation fournie par l'équation d'équilibre du fait de la lenteur du processus et du laps de temps relativement court pendant lequel il peut s'accomplir. La figure 9 (de [5]) montre le déroulement de la réaction en fonction du temps écoulé après que la température de pointe a été atteinte dans le moteur Otto.

En revanche, dans le cas où il y a un excédent de combustible, on constate la formation de quantités très significatives de monoxyde de carbone, ce qui représente aussi une perte importante d'énergie. La figure 10 illustre l'influence du coefficient d'air sur la formation du CO. Les mesures [6] montrent que, pour les raisons mentionnées ci-dessus (figure 9), les valeurs réelles de la concentration doivent se situer entre celles correspondant aux conditions d'équilibre à la température de pointe du cycle et celles correspondant aux conditions d'équilibre à la température d'échappement.

Toutes les machines à combustion fonctionnant avec un *excès d'air*, en particulier, le moteur Diesel et la turbine à gaz, sont donc favorisées en ce qui concerne la formation de CO, tandis que les moteurs Otto, qui fonctionnent avec un mélange plus ou moins stoïchiométrique, produisent forcément du monoxyde de carbone.

Hydrocarbures

C'est surtout au voisinage des parois de la chambre de combustion que le combustible n'est pas complètement brûlé. En voici les deux raisons :

— Au voisinage de la paroi, l'échange de chaleur est très intensif avec l'extérieur froid ; ceci entraîne le refroidissement du mélange air-combustible, d'où extinction de la flamme *(flame quenching)*.

— La composition hétérogène du mélange air-combustible entraine une *propagation défectueuse* de la réaction qui peut aboutir à l'extinction de la flamme.

Des examens approfondis, effectués sur le moteur Otto [7], montrent que c'est aux alentours des conditions stoïchiométriques que les zones du « flame quenching » sont les plus réduites. De plus, une combustion partielle des hydrocarbures encore imbrûlés pendant la course d'expansion, réduit la concentration en HC à l'échappement, surtout en cas d'excès d'air. On atteint les concentrations minimales d'hydrocarbures imbrûlés lorsqu'il y a un *faible excès d'air*, ce qui coïncide avec le régime le plus économique du moteur. Une émission d'hydrocarbures signifie, tout comme la production de CO, une perte d'énergie. L'émission d'hydrocarbures du moteur Otto a, approximativement, l'allure suivante en fonction du coefficient d'air (fig. 11, [8]).

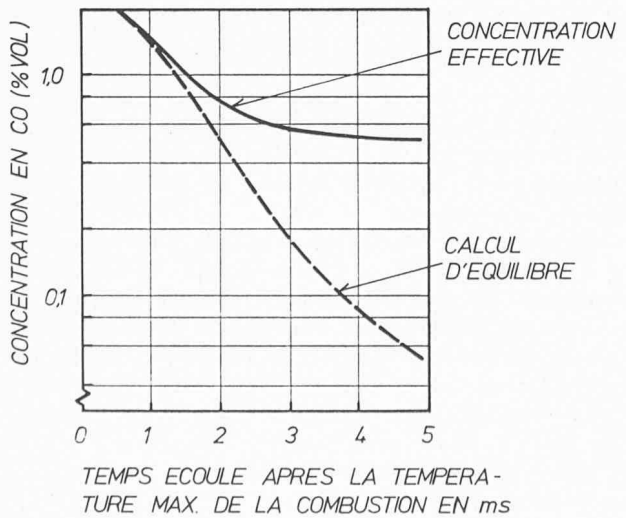


Fig. 9. — Evolution de la formation du CO lors de la combustion et de la détente.

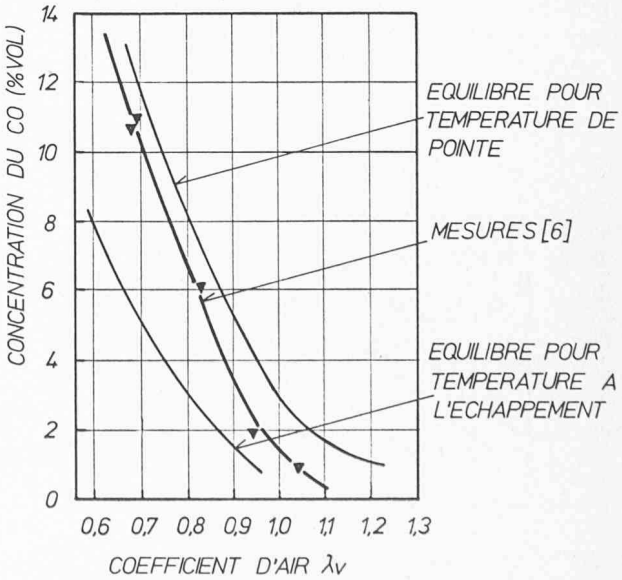


Fig. 10. — Influence du coefficient d'air sur la concentration du CO dans les gaz d'échappement du moteur à essence.

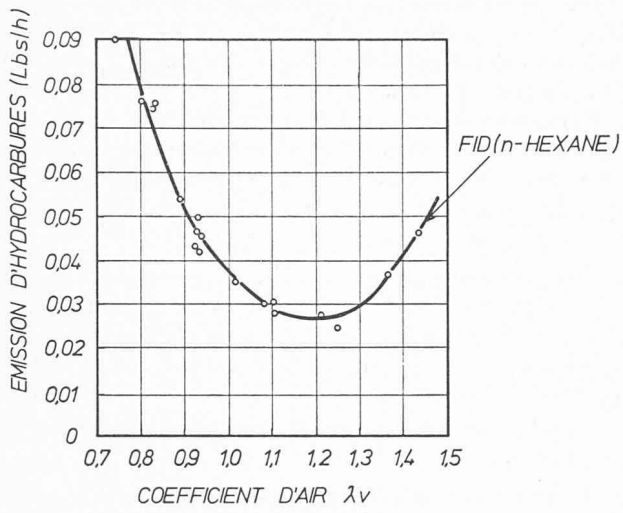


Fig. 11. — Influence du coefficient d'air sur l'émission d'hydrocarbures du moteur à essence. Mesurée avec FID et rapportée à n-hexane.

Dans le cas du moteur Diesel, qui fonctionne seulement avec excès d'air, la pulvérisation insuffisante (« mouillage » du cylindre, grosses gouttes), le brassage insuffisant de l'air et les basses températures, conditions qui sont réunies à charge partielle, favorisent en outre l'émission d'hydrocarbures. Ici également, l'émission de HC augmente avec l'excès d'air.

L'oxyde d'azote

La formation des oxydes d'azote est une conséquence de la *dissociation de l'oxygène et de l'azote* à hautes températures (au-dessus de 1500° K). Voici les réactions qui ont eu lieu :

$$O_2 + N \rightleftharpoons NO + O \qquad (4)$$
$$N_2 + O \rightleftharpoons NO + N$$

L'état d'équilibre est fonction de la température de combustion et du coefficient d'air (concentration d'oxygène). Les équations (4) sont connues sous le nom d'équations de Zeldovich [9] et sont pratiquement déterminantes pour la formation d'oxyde d'azote dans le moteur à combustion interne [10]. Dans ces équations, seul le groupe NO (environ 95 % de l'émission totale de NO_x, le reste étant du NO_2 et des autres oxydes d'azote) présente quelque importance.

Les recherches récentes montrent que, pendant la combustion dans le moteur, le laps de temps disponible pour atteindre l'état d'équilibre chimique nécessaire à la formation du NO, est trop court.

D'après les conditions d'équilibre chimique (4), l'oxyde d'azote devrait, aux températures décroissantes lors de l'expansion des gaz d'échappement, se décomposer à nouveau en N_2 et O_2. Comme cette décomposition, comparée à la réaction de formation du NO, se déroule plus lentement, les oxydes d'azote, une fois formés, restent figés et sont ainsi conservés après l'expansion (courbe de la valeur moyenne, fig. 12). En conséquence, à l'échappement, on rencontre habituellement des concentrations en NO plus élevées que celles calculées d'après l'état d'équilibre pour une température d'échappement donnée.

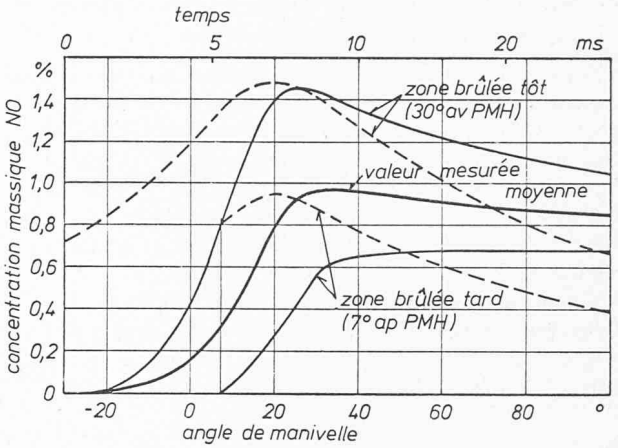


Fig. 12. — Formation des oxydes d'azote.
—— valeurs mesurées
- - - valeurs calculées avec équilibre

La propagation du front de flammes dans le cylindre entraîne une compression supplémentaire du mélange encore imbrûlé (fig. 13), ce qui engendre un nouvel état thermique, d'où nouvelle formation d'oxyde d'azote à d'autres conditions de température.

De ce fait, pratiquement chaque particule dans le cylindre a son propre état thermique qui régit la formation d'oxyde d'azote. On peut se figurer la complexité de la forme géométrique du front de flammes, forme qui, pour le moteur Diesel, est en plus, largement échancrée. Ceci explique pourquoi l'étude de la propagation de ce front de flammes est extrêmement compliquée ; la détermination de la quantité d'oxydes d'azote n'est donc possible qu'à l'aide de modèles mathématiques complexes et de l'ordinateur [10, 11, 12 et 13].

Malgré les différents modes de transformation du mélange, nous trouvons, aussi bien pour le moteur Diesel que pour le moteur Otto, quasiment les mêmes relations que celles données par la théorie mentionnée ci-dessus :

— La formation d'oxyde d'azote sera déterminée principalement dans *la partie chaude du cycle*. Toutes les réalisations ayant pour conséquence des températures maximales élevées engendrent une production élevée d'oxyde d'azote (exemples : préallumage, combustion rapide, taux de compression élevé, suralimentation abondante, moteur chaud, etc.).

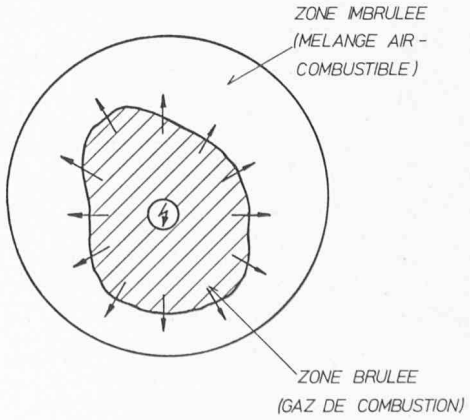


Fig. 13. — Propagation de la combustion.

— Plus la *concentration en oxygène* est élevée, plus la formation d'oxyde d'azote est importante.

A partir de ces deux principaux critères régissant le phénomène, on peut estimer l'influence du coefficient d'air. Pour de faibles coefficients d'air, nous obtenons de hautes températures ; cependant, lorsqu'on raréfie l'oxygène, la formation d'oxyde d'azote est réduite. D'autre part, l'excès d'air réduit les températures maximales, et malgré l'excès d'oxygène, la réaction d'oxydation a lieu de façon réduite seulement.

Conformément à ces constatations, il faut s'attendre à *la formation maximale d'oxyde d'azote dans le domaine du mélange stoïchiométrique*, ce qui est confirmé par différentes mesures [5, 14 et 15] (fig. 14).

Bioxyde de soufre

La combustion du *soufre* contenu dans le combustible engendre le bioxyde de soufre.

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 \qquad (5)$$

Ce polluant peut être éliminé par utilisation d'un combustible ne contenant pas de soufre.

Particules solides

La formation de la suie mise à part, l'émission de particules solides peut être réduite par l'utilisation de combustibles et de lubrifiants adéquats. On peut éliminer les composés d'oxyde de plomb, dans le moteur Otto, par l'emploi d'une essence exempte de cet élément. Par un autre choix d'huile, il est également possible de réduire efficacement les particules métalliques des additifs de l'huile de lubrification (calcium, barium, étain).

Revenons à la formation de la *suie* qui a lieu, avant tout, dans le moteur Diesel. En principe, la *fumée* à l'échappement peut être observée sous trois formes différentes :

— *Fumée noire* qui, du fait d'une combustion incomplète, contient des particules de carbone.

— *Fumée blanche* qui se compose de brouillard de combustible imbrûlé. Il ne faut pas la confondre avec la vapeur d'eau qui, au démarrage, se condense dans les tubulures d'échappement. (La couleur résulte de la grosseur des gouttes.)

— *Fumée bleue* qui provient des huiles de graissage brûlées.

Il existe plusieurs hypothèses quant aux différentes réactions qui entraînent la formation de suie lors d'une combustion dans un moteur Diesel. Aucune d'entre elles n'est à même de décrire ce phénomène chimique compliqué. C'est avant tout, lorsque du combustible sous forme liquide atteint la flamme ou que celle-ci est en contact avec une zone froide, que la suie apparaît (refroidissement de la flamme) [16]. Les réactions sont les suivantes :

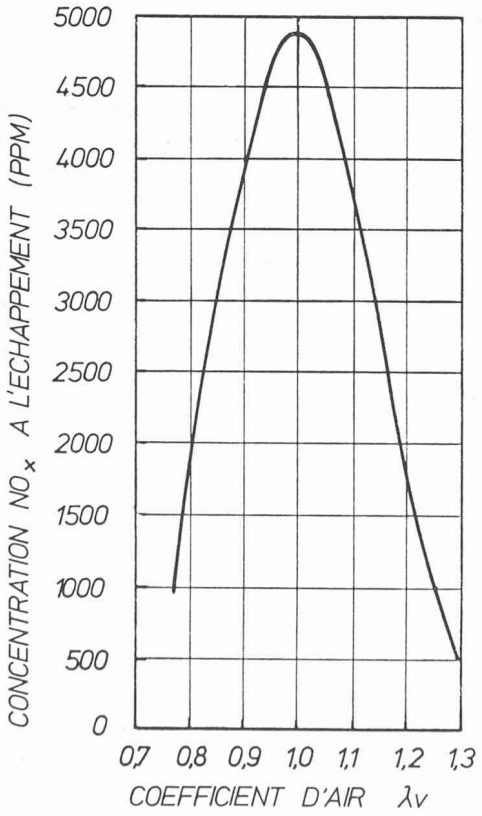
$$\begin{array}{ll} C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2 & \\ C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO & (6) \\ \text{froid} \qquad \text{chaud} & \end{array}$$

Les processus de craquage peuvent également dégager de la fumée. La plus récente théorie sur le mécanisme de formation de la suie se fonde sur les phénomènes de déshydratation et de polymérisation [17].

5. La mesure des matières polluantes

Par mesure des matières polluantes, on entend la détermination de leurs concentrations dans les gaz d'échappement. Du fait que l'émission des matières polluantes dépend essentiellement des conditions de fonctionnement du moteur (ralenti - pleine charge, moteur froid - moteur chaud), nous devons, pour caractériser le comportement

14 a



14 b

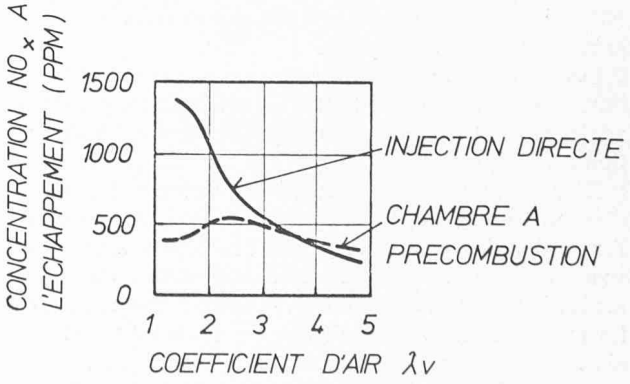


Fig. 14. — Emission d'oxydes d'azote mesurée au moteur en fonction du coefficient d'air.
a) Moteur Otto b) Moteur Diesel

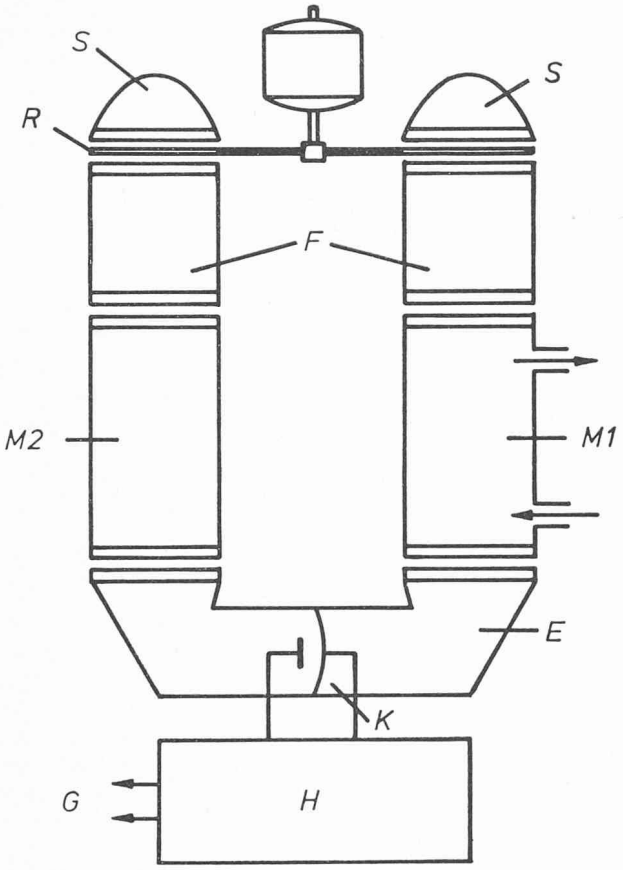


Fig. 15. — Principe de l'analyseur NDIR.

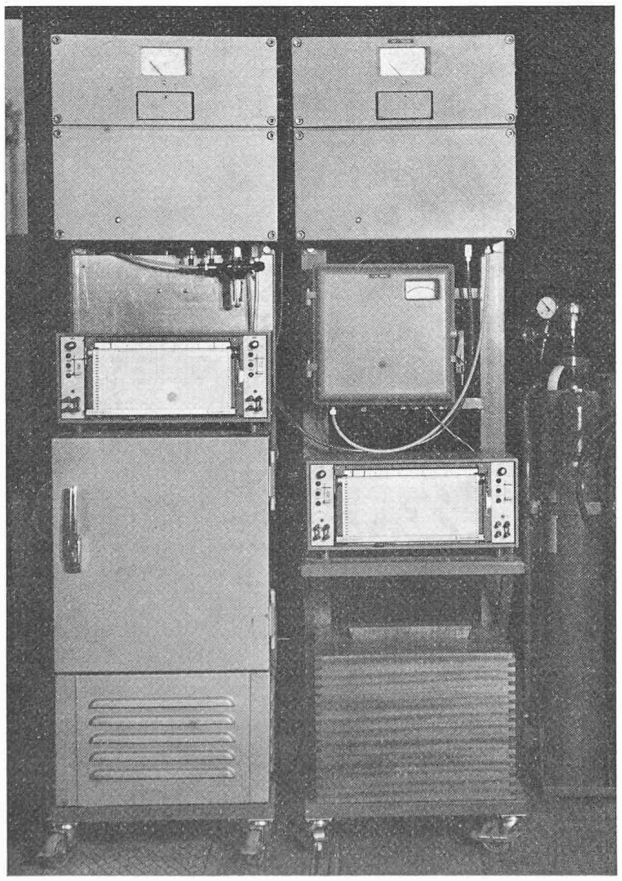


Fig. 16. — Analyseur NDIR (H & B).

géneral des gaz d'échappement d'un moteur et pour comparer les résultats avec ceux d'autres moteurs, nous en tenir à une *méthode de mesure étalonnée* ainsi qu'à des *conditions de mesures équivalentes*. Dans ce chapitre, nous allons discuter des principales méthodes de mesure et nous garderons pour un chapitre ultérieur les programmes du cycle de conduite stipulés par la loi, programmes se basant sur des considérations d'ordre statistique et technique.

Les différentes méthodes de chimie et de physique peuvent être appliquées pour l'analyse des gaz :

— absorption (appareil d'Orsat) ;
— analyse spectroscopique (NDIR, NDUV) ;
— mesure de la conductibilité électrique (FID) ;
— chimiluminescence ;
— chromatographie ;
— spectrographie de masse ;
— filtrage (Bosch, Bacharch, Saurer) ;
— photométrie.

Certaines de ces méthodes peuvent être utilisées pour tous les composants que contiennent les gaz, tandis que d'autres ne sont valables que pour certains d'entre eux. Voici une description des appareils de mesure les plus utilisés pour l'analyse des gaz d'échappement des moteurs.

Analyseurs spectroscopiques [18]

Leur principe est la mesure du *pouvoir d'absorption* des rayons ultraviolets et infrarouges par le gaz. Ce pouvoir d'absorption étant proportionnel à la concentration des composants qui y sont contenus.

Dans l'*analyseur dispersant*, seule une étroite bande de fréquence du spectre est utilisée ; on la fixe en fonction du gaz à examiner. De tels appareils sont peu maniables et ne sont pas utilisés pour l'analyse des gaz d'échappement.

Dans les analyseurs à rayons infrarouges non dispersants (NDIR, fig. 15 et 16) deux sources *S* de rayons infrarouges émettent deux faisceaux parallèles ayant deux trajets bien distincts. Un disque tournant *R* percé de trous permet de « tronçonner » simultanément ces deux faisceaux en paquets de rayons. Ces deux suites de paquets traversent ensuite chacune son propre filtre *F*. Ces filtres sont interchangeables et ne laissent passer qu'un spectre de longueur d'onde bien déterminé et préalablement choisi en fonction de la composante des gaz d'échappement à analyser. Le premier faisceau traverse ensuite une chambre dite de référence

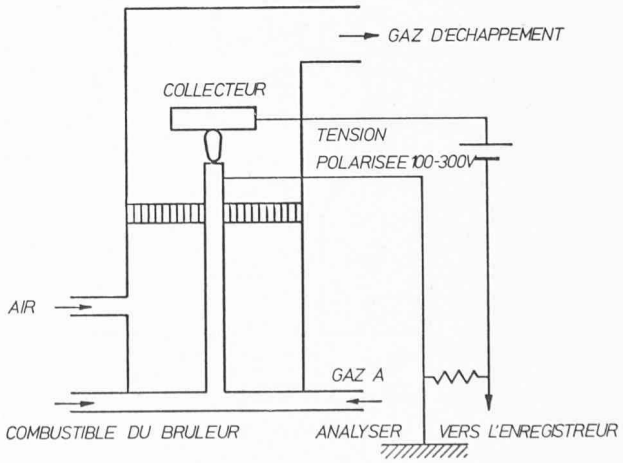


Fig. 17. — Schéma du principe FID.

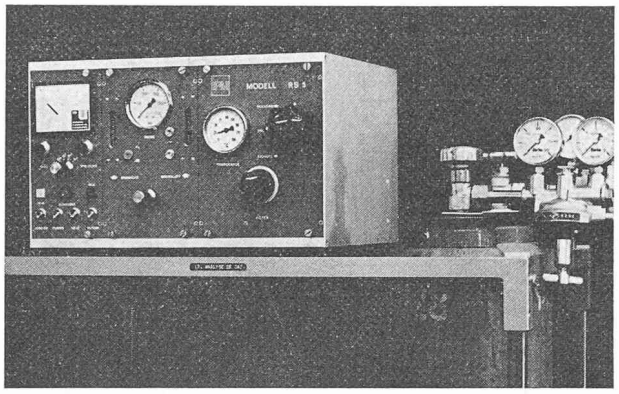


Fig. 18. — Analyseur FID (IPM).

M2 contenant un gaz exempt de la composante à analyser alors que le second faisceau, lui, traverse une chambre dite d'analyse *M1* où circulent les gaz d'échappement. Enfin, chaque faisceau pénètre dans un des compartiments du détecteur *E*, compartiments séparés l'un de l'autre par une membrane métallique élastique et remplis du même gaz. Suivant l'absorption des rayons dans la chambre d'analyse, le gaz contenu dans chaque compartiment subit un échauffement inégal, d'où pression inégale et déformation de la membrane élastique, ce qui fait varier la capacité d'un condensateur *K*.

Cet appareil est principalement utilisé pour la détermination quantitative du CO, CO_2 et du NO_x et cela en raison du grand pouvoir d'absorption des rayons infrarouges qui caractérise ces trois gaz. Les mesures effectuées avec cet appareil ont une précision située dans une plage inférieure à 5 % pour des mesures de concentration allant jusqu'à quelques ppm.

L'analyseur non dispersant à rayons ultraviolets (NDUV), qui sert à la détermination des oxydes d'azote, se base sur un principe de fonctionnement analogue.

Le détecteur à ionisation des flammes (FID) (fig. 17 et 19) [18]

La flamme air-hydrogène contient une quantité négligeable d'ions ; mais lorsque le mélange air-hydrogène contient en plus un composé organique tel qu'un hydrocarbure, on constate alors dans la flamme la présence d'une grande quantité d'*ions*. En appliquant une tension polarisée entre l'orifice de sortie de cette flamme et un collecteur situé au sommet de cette flamme, on peut ainsi capter les ions, ce qui engendre un courant de faible intensité que l'on mesure à l'aide d'un ampèremètre à haute sensibilité. Or, l'intensité de ce courant est proportionnelle à la quantité d'ions présents, c'est-à-dire à la quantité d'hydrocarbure.

L'indication du FID pour un hydrocarbure de composition connue est, en général, proportionnelle au nombre d'atomes de carbone ayant passé à travers la flamme pendant un intervalle de temps donné. Par conséquent, pour un débit constant de gaz d'analyse, le FID donne une valeur pour l'hexane (C_6H_{14}) double de celle du propane (C_3H_8). Cependant, les hydrocarbures émis par les moteurs sont d'une complexité de composition telle que leur mesure doit être rapportée à un hydrocarbure étalon (souvent l'hexane normal ou le propane) qui sert aussi à étalonner l'appareil.

Comme la vitesse d'amenée de l'échantillon influence directement la mesure, on doit veiller à ce que la vitesse d'arrivée des gaz soit toujours la même.

Les appareils FID ne sont utilisables qu'exclusivement pour la *mesure globale des hydrocarbures* imbrûlés ou par-

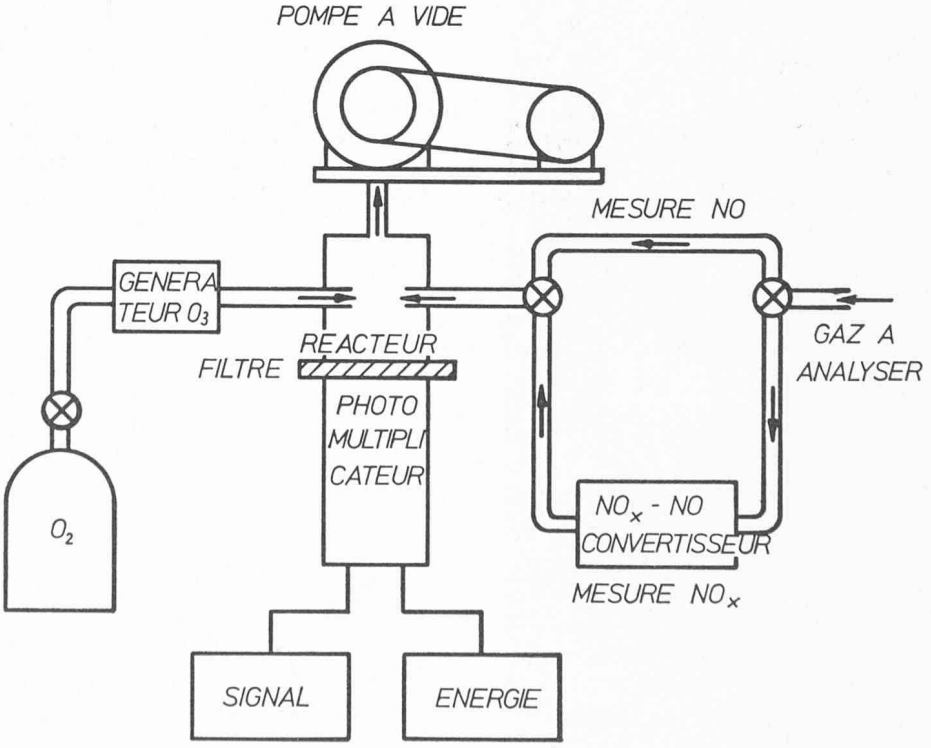


Fig. 19. — Schéma du principe des analyseurs fonctionnant selon le principe de la chimiluminescence.

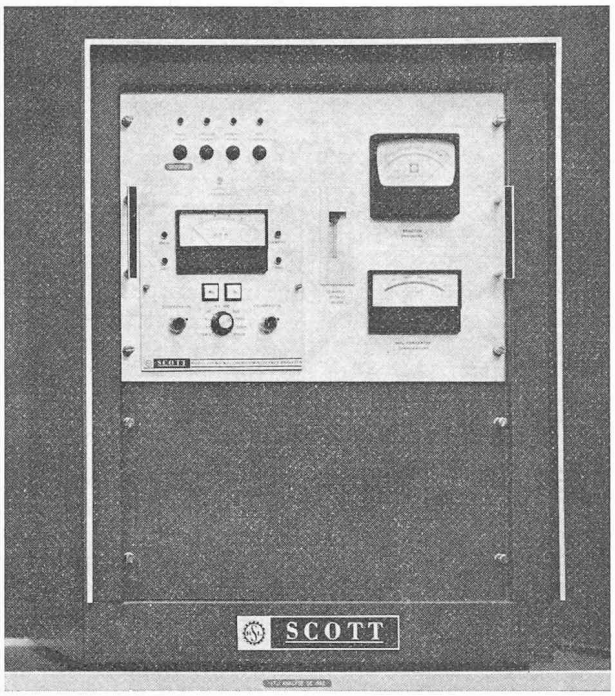


Fig. 20. — Analyseur NO-NO_x (Scott).

tiellement brûlés ; CO, CO_2, NO_x, H_2O et N_2 n'ont aucune influence. Cet appareil permet d'effectuer une mesure rapide et continue des gaz d'échappement même pour une teneur en hydrocarbures inférieure à 1 ppm. Dans le cas des moteurs Diesel, l'échantillon des gaz d'échappement doit être maintenu à une température comprise entre 150° C et 200° C, afin d'éviter une combustion ultérieure ou une condensation des hydrocarbures peu volatils.

Appareils à chimiluminescence [18]

Ces appareils (fig. 19 et 20) permettent d'effectuer une mesure continue du NO, NO_2 et O_3. Leur fonctionnement se base sur le principe de la *chimiluminescence* dans le domaine du spectre des rouges et des infrarouges ; il résulte de la réaction entre NO et O_3 :

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 + h\nu \qquad (7)$$

Par la mesure de l'émission lumineuse qui en résulte, on peut déterminer la concentration en oxyde d'azote jusqu'à 0,2 ppm (valeur minimale) et cela avec une précision d'au moins 5 %.

Chromatographie

Cette méthode permet l'identification et la mesure quantitative de *chaque composant* du mélange gazeux. Elle n'est pas concevable pour une mesure continue, car la détermination quantitative et l'identification de tous les composants demandent un temps plus long. De tels appareils sont, dans la plupart des cas, utilisés en laboratoire [19].

Spectromètre de masse

Cet appareil fonctionne comme suit : les gaz à examiner sont amenés de façon continue, à travers un tube capillaire, dans un réservoir dont on a évacué l'air. Les molécules préalablement ionisées sont accélérées dans un champ magnétique et déviées selon leur masse, de sorte que seuls les ions du composant à déterminer atteignent le collecteur. Au collecteur le signal donne une information sur la concentration de ce composant. Cet appareil aussi n'est utilisé qu'en laboratoire [19].

Mesure de la fumée

A part les procédés simples tels que ceux de Bacharach, Bosch et Saurer qui consistent, soit à mesurer au moyen d'une cellule photoélectrique, soit en comparant avec une échelle de tons gris un papier-filtre préalablement traversé par une quantité déterminée de gaz d'échappement, il existe également de nouveaux systèmes qui permettent une mesure partiellement continue. Le B-P Smokemètre Hartridge, le système Solartron UTAC-Schlumberger ainsi que le système AGIP-MSA mesurent à l'aide d'une cellule photo-électrique directement la transparence des gaz d'échappement, tandis que le Tyndallmètre Bosch, qui exploite l'effet Tyndall, mesure la lumière réfléchie perpendiculairement à la direction d'éclairage.

La mesure de la fumée, bien qu'elle soit le mode d'analyse des gaz d'échappement le plus ancien, est très controversée [20]. D'une part la vapeur d'eau et le brouillard d'huile et, d'autre part l'emplacement de la prise de l'échantillon, ont une influence déterminante sur les mesures. Par ailleurs, les résultats fournis par l'une ou l'autre des méthodes sont difficiles à apprécier à leur juste valeur, ce qui rend très complexe la comparaison et par là même l'établissement d'une valeur limite légale.

6. Prescriptions légales

C'est aux Etats-Unis tout d'abord, qu'on a abordé le problème des gaz d'échappement et pris des mesures énergiques. Les lois établies à cet effet ne limitent pas seulement la valeur des composés polluants tolérés pour les véhicules Diesel et à essence mais, en même temps, fixent le *déroulement du programme de test* des gaz d'échappement et prescrivent la *méthode de mesure* ainsi que la *préparation* des gaz d'échappement à examiner. En Europe, ce n'est que plus tard qu'on a abordé le problème et en raison de la situation politique compliquée qui y règne, la législation actuellement en vigueur dans quelques pays, ne fixe que la concentration maximum en CO tolérée dans les gaz d'échappement, concentration mesurée au ralenti. En ce qui concerne les moteurs stationnaires et marins, il n'existe pas de législation.

Valeurs tolérées d'émission

La figure 21 donne un aperçu des normes en vigueur pour l'automobile et celles qui le seront dans un proche avenir quant à la composition des gaz d'échappement, les méthodes de mesure et les cycles à employer pour l'examen du respect des dites normes [21]. Celles qui sont présentées dans la figure 21 s'appliquent à l'Amérique du Nord, l'Europe (CEE) et la Suisse. Etant donné qu'il a fallu déployer de gros efforts pour demeurer dans les normes actuellement en vigueur, il semble qu'il sera difficile de respecter les prescriptions sur les gaz d'échappement aux USA, en l'an 1975. Les doutes exprimés par les experts le confirment.

Concernant la teneur *en plomb* maximale admissible de l'essence, aucune entente n'a encore été trouvée, car le passage à une essence pauvre en plomb nécessite avant tout des entreprises productrices d'importantes transformations de leurs installations de production. Pour conserver l'effi-

Pays	An	Poids	HC	Méthode	CO	Méthode	NO_x	Méthode	Cycle
USA Essence g/mile	1971	<2700 kg	2,2	NDIR	23,0	NDIR	—	—	Cycle California mesure continue
	1972	»	3,5	FID	39,0	»	3,0	chimi-lum	Cycle US-Fédéral méthode de dilution
	1973	»	3,4	»	39,0	»	3,0	»	»
	1974	»	3,4	»	39,0	»	3,0	»	»
	1975	»	0,41	»	3,4	»	0,4	»	»
	1976	»	0,41	»	3,4	»	0,4	»	»
USA Diesel g/CVh	dès 1973	>2700 kg	3,0	FID	7,5	NDIR	12,5	NDIR	Cycle US-Fédéral Diesel mesure continue
Europe CEE g/test	dès 1971	≦750 kg *	8,0	NDIR	100	NDIR	—	—	Cycle européen analyse totale
	dès 1971	1250... 1470 kg	10,1	NDIR »	152	NDIR »	—	—	»
	dès 1971	>2150 kg	12,8	NDIR	220	NDIR	—	—	»
Suisse	dès 1972				<4,5%				au ralenti

* 9 catégories de poids

Fig. 21. — Emissions admissibles et méthodes de mesure des gaz d'échappement prescrites aux USA, en Europe et en Suisse.

cacité des réacteurs catalytiques, l'essence doit être nécessairement très pauvre en plomb ; c'est ce fait qui a poussé certaines raffineries à mettre sur le marché un produit contenant moins de plomb. D'ici à 1975, il faut compter, du moins aux USA, avec une réduction du contenu en plomb jusqu'à 0,13 g/litre (aujourd'hui 0,8 g/litre, en Suisse 0,6 g/litre, à partir de 1974: 0,4 g/litre) [4, 22]. Par l'enrichissement en aromates de cette essence détonnante, il est possible d'obtenir presque les mêmes caractéristiques que celles de l'essence contenant beaucoup de plomb. De ce fait, l'émission d'aromates augmente, cependant leur caractère inoffensif n'a pas été prouvé ; cette façon d'améliorer l'essence semble donc être très douteuse.

Cycles et méthodes de test

Les programmes test ont été établis de façon à couvrir tout le spectre des compositions des gaz d'échappement du véhicule et de façon à reproduire au mieux, sur le banc d'essai, les conditions de marche. Un premier programme, connu sous le nom de *Cycle California* (fig. 22) a été élaboré en Californie et finalement adopté pour l'ensemble des Etats-Unis. En voici la description : il débute, le moteur étant froid, et est répété sept fois, chaque phase comportant sept régimes de marche différents durant au total 137 secondes, ce qui nous donne un temps de 959 secondes pour l'ensemble du test.

La résistance du véhicule à l'avancement est simulée de façon continue. Le législateur a clairement fixé les prescriptions concernant les mesures quantitatives des émissions, effectuées à l'aide de l'ordinateur.

Un autre test qui correspond mieux à une situation réelle est entré en vigueur aux USA depuis 1972. Celui-ci n'est pas répété (fig. 23), son aspect correspond à peu près au trajet de la banlieue jusqu'au centre de la ville de Los Angeles (1371 s).

L'application de ce *cycle US-Fédéral* est obligatoire dès 1972 pour la mise en circulation des voitures neuves dont le poids est inférieur à 2700 kg (6000 lbs). Voici la description de l'installation pour l'analyse des gaz d'échappement : une première pompe à débit constant est fixée à l'extrémité d'un tuyau sur lequel vient se greffer la tubulure d'échappement du moteur à tester. Cette pompe aspire simultanément de l'air et les gaz d'échappement. Légèrement en amont de cette première pompe, on prélève, au moyen d'une seconde pompe à débit constant, une petite

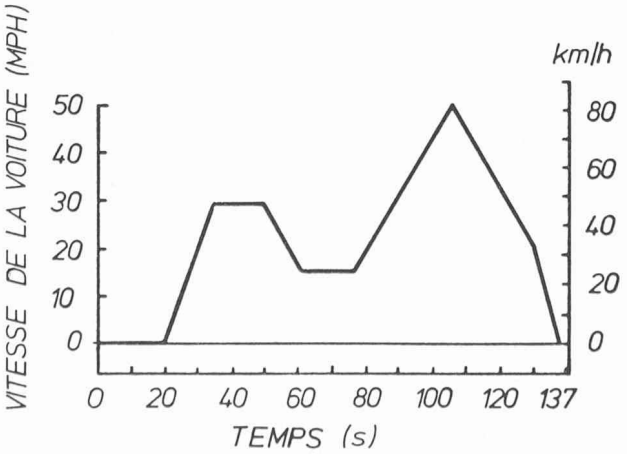


Fig. 22. — Cycle California (à répéter 7 fois).

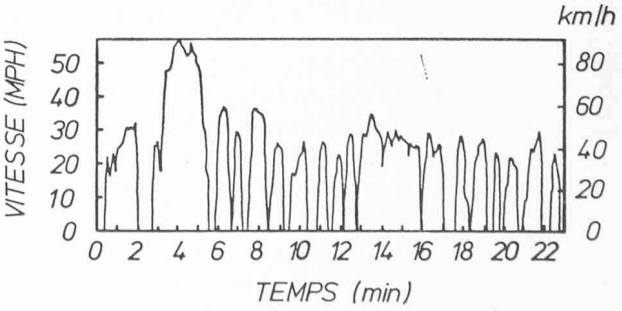


Fig. 23. — Cycle US-Fédéral (CVS).

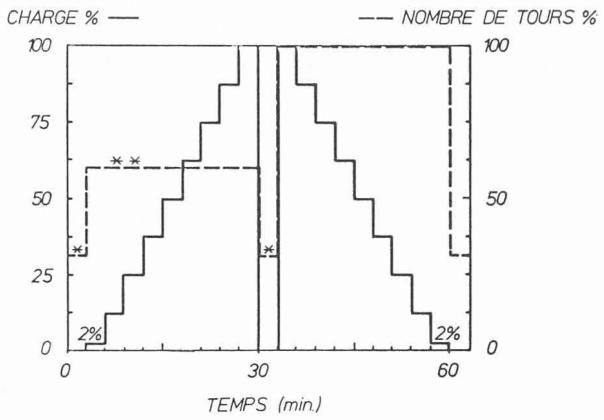


Fig. 24. — Cycle US-Fédéral (Diesel).
* Ralenti.
** 60 % du régime nominal ou le régime du couple maximum s'il est supérieur aux 60 %.

partie du mélange air-gaz d'échappement qui s'écoule ensuite dans un sac de plastique (CVS = Constant Volume Sampling) dont le contenu est analysé à la fin du test [24].

Ce n'est qu'aux USA qu'il existe un test pour les véhicules à essence dont le poids dépasse 2700 kg.

La façon de tester ces véhicules s'écarte fortement des deux méthodes précitées. Vu la rareté de ce type de véhicule en Europe, nous nous abstiendrons d'en parler.

Depuis 1972, en Californie et dès 1973 pour l'ensemble des USA, les poids lourds à moteur Diesel doivent remplir certaines normes fixes. Le programme envisagé à cet effet provient du programme californien de 1972 (*Cycle fédéral Diesel* [21]).

Le *cycle européen* pour véhicules à essence débute, le moteur étant froid, et est à réitérer quatre fois (fig. 25, durée totale 13 mn). Il a été établi par la ECE (Economic Commission for Europe) et ressemble fort à l'ancien programme californien. Les gaz d'échappement passent dans un sac en plastique afin de permettre l'analyse de la teneur en g/cycle des composants polluants [26]. Les teneurs tolérées des polluants sont fixées en fonction du poids du véhicule (fig. 21).

Le *Japon et la Suède* ont leurs propres prescriptions concernant la composition des gaz d'échappement ainsi que les méthodes et programmes de test à appliquer.

Les émissions mesurées à l'aide d'une méthode de test ne peuvent être comparées théoriquement avec celles mesurées avec une autre méthode. Une conversion n'est possible qu'en faisant des essais comparatifs sur le banc d'essai.

7. Mesures tendant à diminuer l'émission de matières polluantes

Pour combattre les effets polluants des gaz d'échappement des moteurs, on recourt aux trois moyens suivants :

— *Dispositions restreignant l'utilisation* des moteurs.
— *Dispositions d'ordre technique* diminuant les émissions.
— *Dispositions se rapportant aux combustibles* de façon à ce que les gaz d'échappement résultants soient propres.

En considérant les statistiques de la figure 1 concernant la population du globe ainsi que le nombre d'automobiles, par exemple de la Suisse (l'évolution dans les autres pays industrialisés est la même), l'on s'aperçoit que *seule la combinaison* des trois types de dispositions décrites ci-dessus peut apporter une solution valable à long terme. Une réduction des émissions des gaz d'échappement résultant d'une amélioration des moteurs du point de vue technique serait d'ailleurs, dans un temps relativement court, réduite à néant vu l'augmentation exponentielle de la population et du nombre d'automobiles.

A part les problèmes techniques, il faut aussi trouver une solution au *problème de politique d'urbanisation* ainsi qu'au *problème social*. Peu à peu, l'utilisation des transports publics plus économiques et moins polluants et l'*abandon des moyens de transport individuels* deviennent des nécessités de plus en plus pressantes. La qualité et densité du réseau routier n'incitent cependant pas à l'emploi des transports publics, ce qui aboutira, à brève échéance, à une saturation de ce même réseau. Une importante amélioration de la qualité de l'air dans les centres économiques et les agglomérations n'est seulement possible qu'en éloignant de ceux-ci les grandes voies de communication interurbaines empruntées par les moyens de transport individuels et en réduisant simultanément la nécessité de se déplacer, par une *infrastructure* appropriée de nos villes.

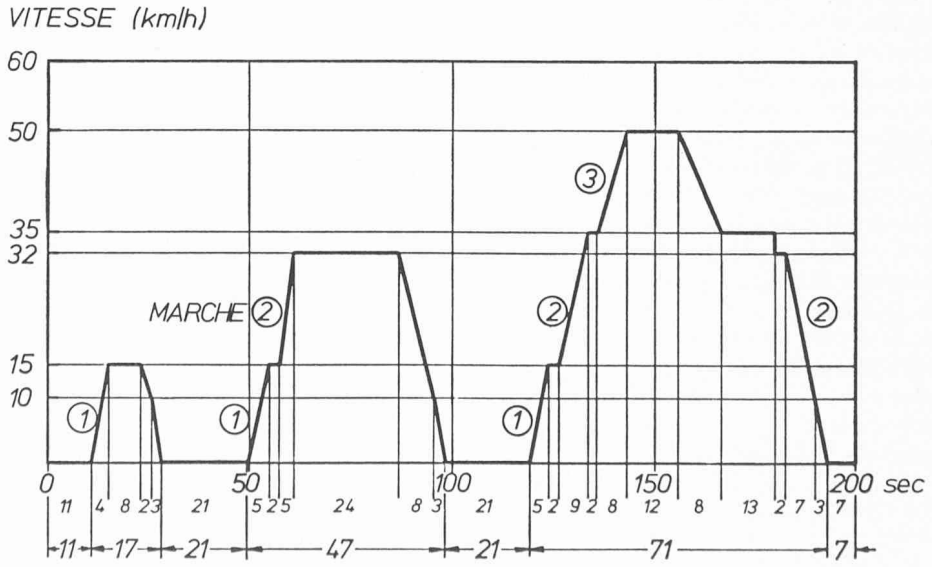


Fig. 25. — Cycle européen (ECE, à parcourir quatre fois par épreuve).

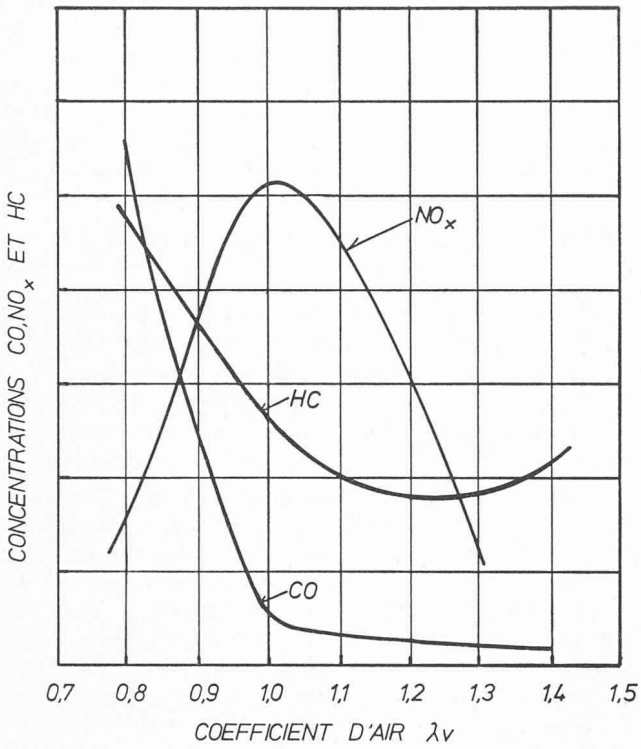


Fig. 26. — Emission caractéristique du moteur à essence.

Nous ne nous attarderons cependant pas sur cet aspect du problème, mais plutôt sur son aspect technique.

La bonne formation et composition du mélange

Le mécanisme de formation des matières polluantes (chapitre 4), nous a permis de montrer l'influence prépondérante du rapport air-combustible sur leur concentration dans les gaz d'échappement (voir fig. 26).

En considérant ce diagramme, nous voyons que le comportement caractéristique du moteur à essence présente *deux plages particulières* pour lesquelles la somme des émissions de matières polluantes est minimale. Tandis que le comportement optimal (en fonction de l'émission de polluants) dans le cas d'un mélange riche (ce qui entraîne une consommation élevée de combustible) correspond à peu près à celui donnant la plus haute puissance spécifique du moteur, le fonctionnement optimal dans le cas d'un mélange pauvre entraîne une consommation modeste, mais la puissance spécifique du moteur est alors réduite ; par ailleurs, il peut arriver, dans des conditions extrêmes, que le moteur ne tourne plus rond. C'est pour ces raisons que l'on préfère un mélange riche à un mélange pauvre ; à cela vient s'ajouter que le traitement ultérieur des gaz d'échappement est plus favorable dans le cas d'un mélange riche.

Dans le cas du *moteur Diesel*, où en plus des autres polluants, s'ajoute la fumée, le rapport combustible-air optimal se situe plus à droite dans le domaine d'excès d'air. En raison du principe même du moteur Diesel où l'on varie la quantité de combustible, celui-ci fonctionnera, selon la charge, avec des rapports d'air différents.

Dans le cas du *moteur à essence*, un réglage convenable du rapport air-combustible permet d'améliorer la qualité des gaz d'échappement. Cependant, l'on se heurte à une limite due au comportement inverse des concentrations des différents composés polluants. Le mode de la préparation du mélange est moins important que la *bonne vaporisation du combustible et l'homogénéité du mélange* ainsi que sa *répartition régulière* dans les différents cylindres du moteur. Ces effets-là sont d'une importance décisive, surtout pour l'émission des hydrocarbures.

Les conditions de marche critiques sont : le ralenti, les régimes variables, surtout lorsque le moteur est froid ou qu'il est entraîné par un couple exercé depuis l'extérieur (inertie du volant, descente). Ces conditions sont d'ailleurs reproduites dans les cycles-test.

Cycles moteur choisis

De nombreux facteurs influencent le cycle du moteur, c'est-à-dire les phénomènes ayant lieu dans le moteur. On peut citer : les *conditions d'aspiration*, le *taux de compression*, le *début de l'injection* ou le *moment de l'allumage* avant que le point mort haut ait été atteint, le *système de combustion* (avec ou sans tourbillon, préchambre), la *caractéristique de l'injection*, le *rapport d'air*, le *rapport surface-volume* de la *chambre de combustion* ainsi que la *charge* et le *nombre de tours*. Les effets de ces divers phénomènes sur l'émission des gaz d'échappement sont décrits qualitativement sur la figure 27.

On constate que toutes les dispositions qui engendrent de *hautes températures de combustion*, c'est-à-dire qui améliorent le rendement et la puissance spécifique (suralimentation, rapport de compression élevé, coefficient d'air au voisinage de 1), ont pour conséquence une *production d'oxyde d'azote plus élevée*. Alors que l'on n'a guère la possibilité d'influencer la production du CO à part la suralimentation, toutes les dispositions qui favorisent un bon *mélange combustible-air* et de *minces quench zones* (haute température à l'entrée du cylindre, suralimentation, tourbillonnement de l'air, préchambre de combustion) réduisent les *émissions des hydrocarbures*.

D'autres modifications du cycle moteur influent favorablement la composition des gaz d'échappement. On citera notamment : le recyclage des gaz d'échappement, remplissage stratifié du cylindre, l'injection d'eau et de combustible supplémentaire à l'air aspiré dans le cas du moteur Diesel (connu sous le nom de « fumigation »).

Mesures	CO	HC	NO_x	Fumée Diesel	Rendement	Puissance spécifique
Température d'aspiration élevée	→	↘	↗	→	↘	↘
Etranglement de l'air d'admission	↗	→	↘	↗	↘	↘
Taux de compression élevé	→	↗	↗	→	↗	↗
Suralimentation élevée (sans refroidisseur d'air)	↘	↘	↗	→	↗	↗
Suralimentation élevée (avec refroidisseur d'air)	↘	↘	→	→	↗	↗
Allumage retardé Injection retardée	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Tourbillon, combustion rapide*	→	↘	→	↘	↗	↗
Coefficient d'air tendant vers 1	↗	→	↗	↗	→	↗
Rapport surface/volume élevé	→	↗	↘	↗	↘	↗
Charge élevée	→	↘	↗	↗	↗	↗
Régime élevé	→	→	→	↘	↘	↗

*début de combustion pour rendement optimal

Fig. 27. — Paramètres importants du cycle moteur influençant l'émission spécifique en matières polluantes.

Le *recyclage des gaz d'échappement* [28, 29] (Exhaust Gas Recirculation = EGR), consiste à mélanger des gaz d'échappement à la charge aspirée. Les gaz inertes (CO_2, N_2, H_2O) recyclés se trouvent également échauffés par la combustion et par conséquent abaissent considérablement la température maximale et diminuent, en plus, la concentration en oxygène, de sorte que la *formation des oxydes d'azote est fortement réduite*.

Pour garantir un fonctionnement du moteur sans ratés, on doit enrichir le mélange aspiré, ce qui, naturellement, augmente l'émission d'oxyde de carbone et hydrocarbures et implique une consommation plus élevée de combustible. Il faut encore empêcher que la perte de puissance du moteur due au recyclage des gaz d'échappement ne soit trop grande. Il est, par conséquent, nécessaire que de telles installations de recyclage ainsi que leur commande soient soigneusement adaptées au moteur. Un important croisement des soupapes peut également agir dans le même sens que le recyclage des gaz d'échappement [30].

Avec le *remplissage stratifié* du cylindre, on a déjà essayé d'atteindre avec le moteur Otto des rendements voisins de ceux du moteur Diesel. Ce principe a été appliqué aux *moteurs polycarburants* (moteurs hybrides) et récemment il s'est révélé avantageux quant à la composition des gaz d'échappement [31]. Le principe est d'assurer un mélange air-combustible inflammable seulement au voisinage de la bougie d'allumage, tandis que le reste du cylindre est rempli avec de l'air pur ou avec un mélange pauvre. Grâce à ce procédé, il est également possible de faire fonctionner le moteur Otto sans réglage par étranglement à charge partielle. Vu l'important excès d'air disponible, l'*émission de* CO *est fortement réduite*, tandis que celles d'hydrocarbure et d'oxyde d'azote sont faiblement influencées. Le problème est d'assurer le remplissage stratifié pour tous les régimes du moteur, ce qui reste problématique.

Une solution très élégante vient d'être présentée avant l'impression de ce texte. Dans son moteur CVCC (Compound Vortex Controlled Combustion, voir MTZ 34 (1973) N° 4, p. 130), la maison Honda utilise une troisième soupape commandée aussi par l'arbre à cames pour l'entrée du mélange enrichi dans la chambre de combustion primaire.

Le reste de la chambre de combustion est rempli d'un mélange très pauvre au moyen de la soupape d'admission traditionnelle.

Il est connu depuis longtemps que l'humidité élevée de l'air réduit la température de la combustion et augmente sa vitesse. *En mélangeant de l'eau* à la masse aspirée [32], on réussit *ainsi à diminuer l'émission de* NO_x. Quand on injecte autant d'eau que de combustible, l'émission des NO_x se réduit d'environ 50 %. L'influence sur l'émission de CO est également favorable, mais par contre l'émission d'hydrocarbures imbrûlés augmente. Dans le cas du moteur Diesel, l'injection directe d'eau améliore son comportement au point de vue fumée, mais par contre les émissions de NO_x et d'hydrocarbures augmentent [32].

Par *fumigation* on entend l'opération qui consiste à mélanger à l'air aspiré par le moteur Diesel un combustible supplémentaire comme le méthane ou le propane, ce qui influence légèrement les émissions. Notons que cette influence n'est pas toujours positive.

Purification des gaz d'échappement

Le traitement des gaz d'échappement a pour but de transformer les matières polluantes (hydrocarbures, CO, NO_x) en composés de gaz d'échappement non polluants (N_2, O_2 H_2O). Voici les réactions qui permettent cette transformation :

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 \quad \text{(Oxydation)} \tag{7}$$

$$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right) O_2 \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2} H_2O \quad \text{(Oxydation)} \tag{8}$$

ou

$$2NO + 2CO \rightarrow N_2 + 2CO_2 \quad \text{(Réduction)} \tag{9}$$

Le déroulement de ces réactions suppose que pendant le peu de temps à disposition l'on ait, cependant, un *niveau de température suffisamment haut* ou (et) un *catalyseur*. C'est pourquoi l'on parle de *postcombustion thermique ou catalytique* des gaz d'échappement [33]. Selon le réglage du moteur, on distingue (entre) un fonctionnement pauvre ou riche du réacteur.

Dans les *réacteurs thermiques* (fig. 28, [34]), seuls les *composés oxydables* (hydrocarbures, CO, équations (7) et (8)) peuvent être éliminés ; pour empêcher la formation d'oxydes d'azote, il faut agir sur le fonctionnement du moteur (formation du mélange, basses températures de pointe). Les avantages et inconvénients des conditions de fonctionnement « pauvre » et « riche » de cette postcombustion thermique dans les réacteurs sont résumés dans la figure 29.

Les températures de fonctionnement étant très élevées (700-1000° C), seuls les matériaux résistant aux hautes

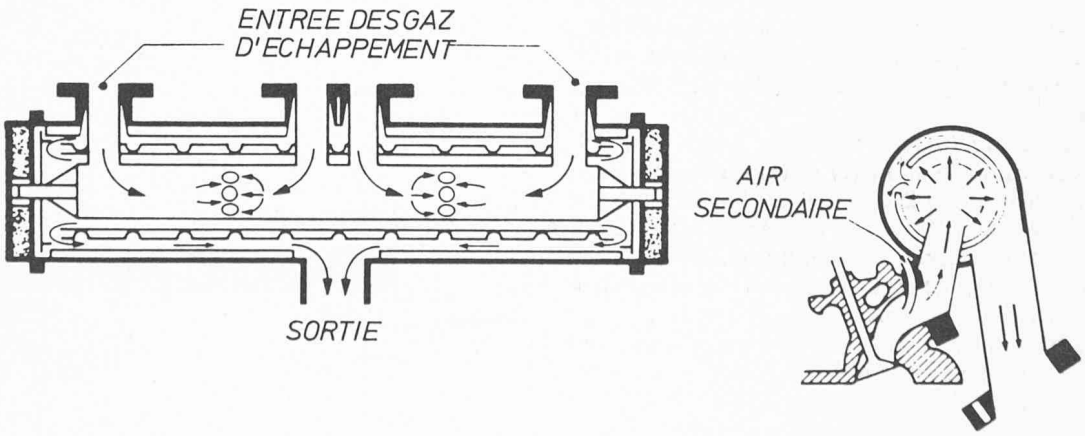


Fig. 28. — Réacteur thermique d'après Cantwell [34].

	Conditions riches	Conditions pauvres
Coefficient d'air λ_v	0,8-0,9	1,1-1,2
Fonctionnement	Pompe auxiliaire à air secondaire	Oxygène déjà contenu dans les gaz d'échappement (réacteur de grandes dimensions)
Températures de service Elles sont maintenues par	min 700-800° C, max 1000° C Postcombustion des composantes H_2 (1-3 %), HC, CO (3-6 %) Allumage retardé	Température d'échappement élevée du moteur lui-même Allumage retardé
Comportement en service	Temps d'échauffage court Tolérances λ_v larges	Temps d'échauffage long Danger de l'extinction Tolérances λ_v étroites
Réglage	Protection de surtempérature (encas de bougie défectueuse)	aucun
Entretien	aucun	Tolérances λ_v étroites demandent un soin particulier concernant le réglage correct du mélange
Rendement	Consommation élevée (+10 +30 %)	Aucune influence sur le rendement du moteur
Combinaison avec recyclage (EGR)	Possible	Impossible
Efficacité	Oxydation presque complète de HC, CO Concentration de NO_x faible	Oxydation des HC partiellement insuffisante Concentration de NO_x un peu plus élevée

Fig. 29. — Comparaison des qualités des réacteurs thermiques fonctionnant avec excès de combustible par rapport à ceux qui travaillent avec un excès d'air.

températures peuvent être envisagés. Afin d'éviter trop de pertes par rayonnement, les réacteurs sont isolés thermiquement. Les basses températures des gaz d'échappement des moteurs Diesel ne permettent pas le fonctionnement des réacteurs thermiques.

La simplicité de l'entretien, l'efficacité et la robustesse ainsi qu'un prix d'achat presque identique donnent aux installations fonctionnant à régime riche une position privilégiée par rapport aux installations fonctionnant à régime pauvre, en dépit d'un rendement plus modeste. Il faut cependant mentionner qu'un tel fonctionnement transforme inutilement d'immenses quantités d'énergie en chaleur, ce qui, vu les réserves limitées de pétrole, représente aussi un *gaspillage* et de plus augmente considérablement l'émission de chaleur *(pollution thermique)*. La quantité de gaz d'échappement augmente aussi, de sorte que le gain dû au réacteur riche est réduit d'autant.

Espérons qu'en Europe au moins, la raison et la prévoyance primeront sur la précipitation. La législation orientera ainsi la recherche vers des solutions techniques raisonnables, compatibles avec l'évolution de la situation écologique. Ces quelques considérations sont également valables pour les réacteurs catalytiques ou tout autre dispositif tendant à la purification des gaz d'échappement, car ils ont tous pour conséquence une diminution du rendement du moteur.

Les *réacteurs catalytiques* entraînent aussi bien une *oxydation* selon les équations (7) et (8) qu'une *réduction* chimique des matières polluantes selon l'équation (9). Du fait que le catalyseur d'oxydation peut assumer les mêmes fonctions que le réacteur thermique, il peut aussi, par son mode de fonctionnement en tant que catalyseur de réduction, éliminer les oxydes d'azote.

En utilisant le catalyseur de réduction en série avec un catalyseur d'oxydation, on obtient le *catalyseur à double couche* (fig. 30), avec lequel on réussit à *éliminer toutes les matières polluantes*. Comme la réaction de réduction peut également donner naissance à de l'ammoniac

$$2NO + 5H_2 \rightarrow 2NH_3 + 2H_2O \qquad (10$$

$$2NO + 2CO + 3H_2 \rightarrow 2NH_3 + 2CO_2 \qquad (11)$$

il est possible que, lors de la réaction suivante d'oxydation, l'on obtienne à nouveau de l'oxyde d'azote

$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O \qquad (12)$$

Cette formation secondaire de l'oxyde d'azote dépend surtout de la quantité d'hydrogène libre, du type de catalyseur et de la température.

De nos jours, il est surtout question, en raison de leur grande efficacité, de catalyseurs à *métaux précieux*, coûtant cher. Ces métaux précieux coûteux à l'achat sont disposés sous forme d'une couche mince sur le catalyseur (souvent de la céramique poreuse monolithique). Les grandes surfaces obtenues par l'emploi de granulés servant de support ne sont pas indiquées en raison des vibrations mécaniques qui entraînent une grande déperdition de matière par frottement. Malheureusement, l'action du *plomb* contenu dans

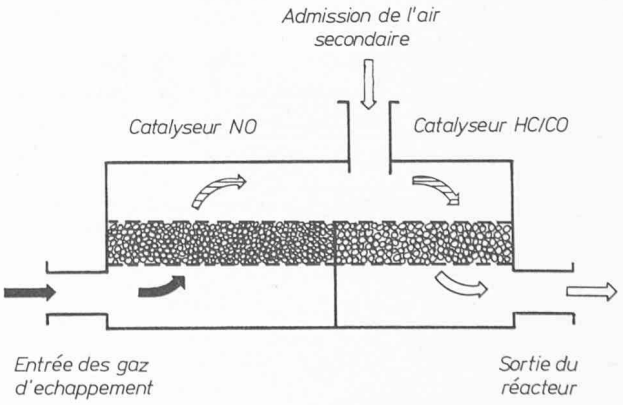


Fig. 30. — Schéma d'un réacteur catalytique à double couche.

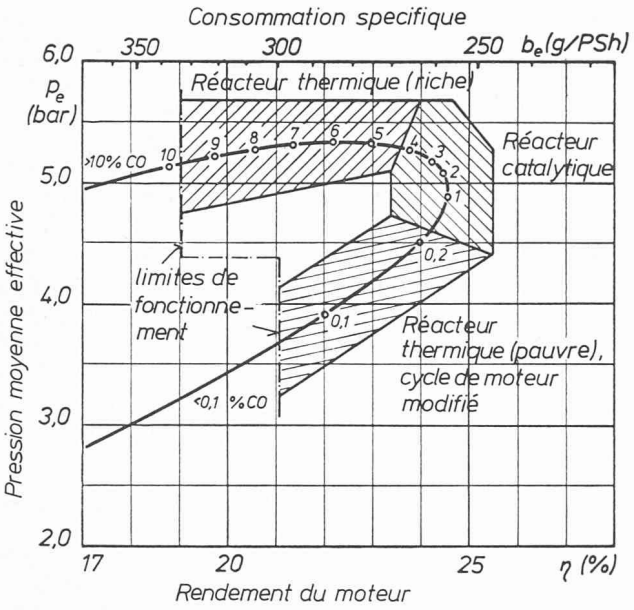


Fig. 31. — Champs d'application des différentes méthodes d'épuration des gaz d'échappement du moteur à essence.

l'essence fait que les catalyseurs à métaux précieux *perdent de leur efficacité*, c'est pourquoi l'existence de ceux-ci est liée à l'utilisation d'*un carburant exempt de plomb*.

A l'inverse du réacteur thermique, le réacteur catalytique peut fonctionner dans le domaine économique du moteur. Toutefois, la contrepression à la sortie des cylindres est légèrement plus élevée à pleine charge.

Le réacteur thermique est à l'origine d'un rendement médiocre dans la plage des mélanges riches (forte consommation de carburant). Par ailleurs, dans la plage des mélanges pauvres, il cause une perte de puissance spécifique (pression moyenne plus basse).

Le traitement catalytique des gaz d'échappement trouve déjà une application en Suisse sur les moteurs Diesel des autobus urbains.

Influence sur l'émission de gaz nocifs au moyen du carburant

Au moyen de la composition chimique du carburant, il est possible d'influencer l'émission de *plomb* et de SO_2. Pour les autres polluants, la modification de la composition du carburant dans certaines limites techniques semble si peu efficace qu'il est difficile de tirer des conclusions définitives, en dépit des essais effectués sur divers moteurs.

A l'aide de quelques *additifs métalliques ou organiques*, la formation de suie, surtout dans le cas des moteurs Diesel, peut être réduite [36, 37]. De même, l'émission de polluants peut être diminuée de façon indirecte en introduisant des additifs dans le carburant qui agissent à la manière des *détergents*. Ainsi certaines parties du moteur restent propres, entre autre le carburateur [38]. Ces additifs ont une fonction analogue aux additifs des huiles de lubrification qui facilitent l'élimination des résidus d'huile carbonisée et de la calamine des pistons.

En remplaçant le carburant classique par des *hydrocarbures liquéfiés* du genre propane ou butane, on peut réduire dans une large mesure l'émission des gaz nocifs. Ces hydrocarbures connus sous l'abréviation LPG (Liquefied Petroleum Gas) sont facilement liquéfiables à la température ambiante et à des pressions moyennes et peuvent être utilisés aussi bien dans les moteurs Otto que dans les moteurs Diesel. Tandis que les moteurs Otto peuvent fonctionner avec le LPG seul, les moteurs Diesel ont besoin d'une quantité minimale de gas-oil, d'une part pour l'allumage du mélange air-LPG et d'autre part pour éviter une combustion incontrôlée du LPG. Enfin, si la transformation d'un véhicule à essence pour le fonctionnement au LPG est relativement aisée, il n'en est pas de même pour les moteurs Diesel qui nécessitent un système de réglage assez complexe.

Des obstacles sérieux s'opposent à l'introduction de l'*hydrogène* qui serait en fait le carburant idéal, mais comme on le sait, sa manipulation est délicate vu le danger d'explosion qu'il présente. A part les oxydes d'azote qui se forment lors de toute combustion à haute température, il n'y aurait pas d'émission de gaz nocifs. L'hydrogène devrait cependant être utilisé comme carburant, lorsque les réserves de combustibles fossiles seront épuisées. L'hydrogène serait obtenu au moyen de l'hydrolyse de l'eau ; le cycle ainsi formé serait très intéressant au point de vue écologique.

$$\rightarrow H_2O \underset{\text{Energie}}{\rightarrow} H_2 + \frac{1}{2} O_2 \underset{\text{Energie}}{\rightarrow} H_2O \qquad (13)$$

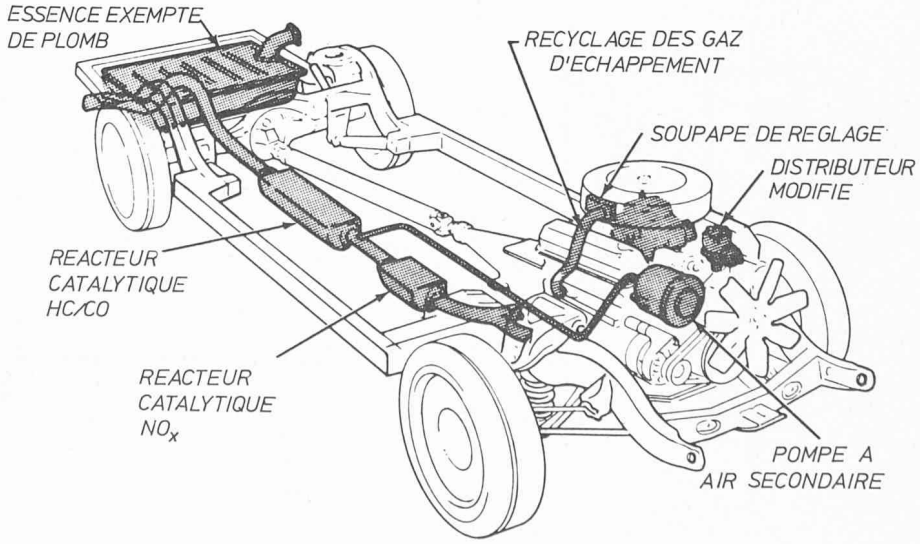


Fig. 32. — Voiture équipée d'un système d'épuration des gaz d'échappement efficace [41].

Comme on peut se l'imaginer, l'énergie nécessaire à l'hydrolyse serait fournie par l'*énergie nucléaire*. Ainsi la survie des techniques aéronautiques serait assurée, car celles-ci, d'après les critères actuels, ne sont réalisables que par des procédés thermiques et de plus exigent un carburant puissant et hautement concentré.

8. Moteurs thermiques de l'avenir

Moteur Otto traditionnel

Le moteur Otto traditionnel sera encore d'actualité pour la propulsion des voitures. Toutefois, un certain nombre de mesures auront été adoptées pour diminuer l'émission de gaz nocifs (fig. 32).

Le moteur possédera alors, par rapport à ses prédécesseurs, un système de mélange air-carburant amélioré (injection ou carburateur), un dispositif d'allumage plus efficace, un système automatique de recyclage des gaz d'échappement (vapeurs du carter incluses) et un épurateur de gaz (catalytique et thermique). Ce moteur fonctionnera avec un carburant sans ou avec très peu de plomb, ce qui entraînera une diminution du taux de compression. La puissance spécifique du moteur diminuera ainsi que son rendement. Au prix d'achat plus élevé s'ajouteront également des frais d'entretien plus grands.

Moteur Wankel

On porte beaucoup d'espoirs sur le moteur Wankel quant à la résolution simple des problèmes des gaz d'échappement. Le déroulement de la combustion étant tout à fait différent, ce moteur est *insensible au cliquetis* et l'absence de soupapes permet un fonctionnement satisfaisant avec du carburant *exempt de plomb*. Le moteur Wankel a un rapport surfaces/volumes plus grand que le moteur classique. L'émission d'hydrocarbures est élevée, mais les températures assez hautes à l'échappement favorisent la post-combustion. De plus, par des modifications relativement simples du moteur, il est possible de satisfaire aux exigences relatives à l'émission de NO_x [42]. Un autre avantage est la *construction compacte* qui laisse plus de liberté lors de la conception de la voiture. Il est fort possible que le moteur Wankel se fasse une place sur le marché des moteurs à essence.

Moteur Diesel

Avec le moteur Diesel, il est possible de répondre aux normes des années 75/76 relatives aux gaz d'échappement sans trop de difficultés et cela en maintenant un rendement relativement élevé. Mais cet avantage comporte des inconvénients dus au poids spécifique élevé, c'est-à-dire la *puissance spécifique petite* et le fonctionnement sans douceur. Il restera encore longtemps le principal système propulsif pour tout véhicule utilitaire, bateau et générateur électrique de secours. Les recherches tendent à diminuer la *suie* des gaz d'échappement et leur *odeur*, ainsi qu'à réduire le taux de NO_x surtout dans le cas des moteurs suralimentés. Enfin, la qualité de ses gaz d'échappement lui garantit d'excellentes perspectives pour l'avenir.

Turbine à gaz

A première vue, la turbine à gaz présente des avantages certains quant à l'émission de polluants. La combustion s'y déroule de façon continue avec des températures de pointe de 1000° C au maximum. Bien que la durée de combustion soit plus longue et la quantité d'air à disposition soit plus grande que dans un moteur et qu'une intervention dans le déroulement de la combustion soit aisée, *la formation des oxydes d'azote* pose de grands problèmes. Le préchauffage de l'air avant l'entrée de la chambre de combustion fait que la température dans la zone primaire de la flamme est très élevée (supérieure à 1500° C) et ainsi crée les conditions idéales pour la formation des NO_x [43]. Actuellement, on essaie de développer dans plusieurs firmes des chambres de combustion qui fonctionnent avec un mélange riche dans la zone primaire et dont les gaz sont refroidis très rapidement dans la zone secondaire. Un traitement des gaz par un réacteur catalytique est exclu du fait de leur grande quantité. *Le rendement d'une turbine à gaz simple est inférieur* à celui d'un moteur Diesel. De plus, elle n'est pas bien adaptée à un régime variable. Le prix d'achat élevé ne justifie son acquisition que pour les cas où une *puissance spécifique élevée* est primordiale et où le rendement ne joue qu'un rôle secondaire.

Le moteur Philips-Stirling

Le principe du moteur Stirling fut découvert au siècle passé, mais Philips ne l'avait utilisé que pour la technique frigorifique. La même maison réussit à mettre au point un

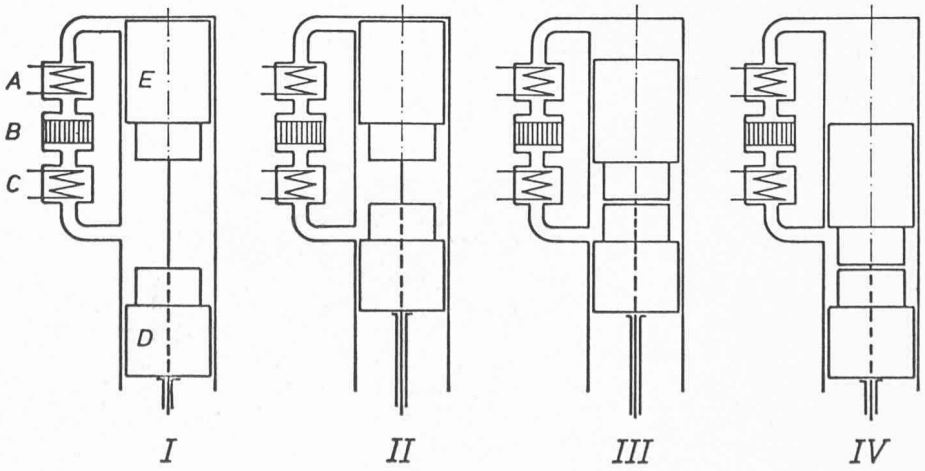


Fig. 33. — Principe du moteur Philips-Stirling.

moteur qui fonctionne suivant ce principe. La première application servit aux usages militaires. La figure 33 décrit le principe du moteur Stirling [44].

A l'état I, le fluide détendu se trouve dans la zone froide. A l'état II, le piston de balayage *E* est au PMH, tandis que le piston de travail *D* a comprimé le fluide froid. Ensuite, le piston de travail reste fixe (état III), tandis que le piston de balayage pousse le fluide à travers le réfrigérateur *C*, puis à travers le régénérateur *B* et réchauffeur *A*, dans la zone chaude. Le fluide réchauffé se détend et repousse le piston de travail et le piston de balayage au PMB (état IV). Ensuite, le piston de balayage pousse le fluide à travers le réchauffeur, le régénérateur et le refroidisseur, dans la zone froide et le cycle recommence.

Le *régénérateur* est la pièce maîtresse de ce moteur, sans laquelle son fonctionnement serait impossible. Comme pour toutes les machines à combustion externe, la chaleur fournie doit être transmise à l'air environnant au moyen d'échangeurs de chaleur, tandis qu'avec les moteurs classiques une grande partie de la chaleur est dissipée dans l'atmosphère avec les gaz d'échappement. Ainsi le cycle du moteur Stirling exige des *échangeurs de chaleur beaucoup plus grands* que ceux qui sont employés d'habitude pour les moteurs. Les volumes morts du réchauffeur, du régénérateur et du refroidisseur ne permettent pas des taux de compression élevés et, par conséquent, le *rendement en souffre*. Il est pourtant possible d'obtenir une *puissance spécifique relativement élevée* en recourant à des pressions de service très hautes.

Grâce à sa combustion externe avec grand excès d'air, le moteur Stirling se contente de *toutes sortes de carburants*, mais évidemment, l'émission de polluants s'en ressent. Les hautes températures nécessaires font que finalement, comme dans les turbines à gaz, il reste surtout à résoudre le problème des NO_x. Les chances d'avenir de cette machine sont difficiles à estimer. Son avantage est d'avoir un fonctionnement doux, mais sa construction compliquée est *d'un prix élevé*. On parle de deux à trois fois le prix d'un moteur traditionnel, et l'on n'est pas encore près de le voir construit en grande série.

Moteur à vapeur

On parle un peu moins des moteurs à vapeur ces temps-ci. Ces machines à cycle fermé et à combustion externe travaillent suivant le *cycle de Rankine* (fig. 34, [45]). L'eau utilisée primitivement dans les machines à vapeur a été remplacée par des *hydrocarbures fluorés* qui ne sont pas corrosifs et qui ne gèlent pas. D'autre part, la surface d'échange de chaleur est grande dans ces machines, surtout dans le condensateur, si bien que leur installation dans des véhicules est difficile. L'absence de boîte à vitesses ne compense que partiellement cet encombrement. Au point de vue émission, les problèmes sont ici identiques à ceux du moteur Stirling.

Pile à combustible

Notre étude des machines thermiques serait incomplète si les piles à combustible n'étaient pas citées. Mais, du fait qu'*elles transforment l'énergie chimique directement en énergie électrique*, sans passer par l'énergie thermique et mécanique, elles n'appartiennent plus au groupe des machines thermiques, bien qu'elles utilisent les mêmes combustibles [46]. C'est pourquoi nous n'insisterons pas davantage sur ce chapitre, d'autant plus que leur poids spécifique très élevé ne permettra certainement pas leur utilisation dans un système propulsif universel.

9. Conclusions

La présente étude nous a montré que, dans un proche avenir, aucune machine thermique ne sera à même de détrôner avantageusement le *moteur à combustion classique*. De plus, on ne connaît aucun système qui, à plus ou moins brève échéance, serait en mesure de transformer le carburant sans émissions nocives, tout en conservant un *rendement acceptable*. C'est pourquoi la technique devra s'efforcer, au cours de ces prochaines années, de diminuer encore ces émissions de polluants du moteur classique, sans toutefois cantonner le rendement dans l'inacceptable. Pour une puissance donnée, il faudra s'efforcer d'atteindre une *émission nocive minimale, sans toutefois gaspiller les réserves de combustibles fossiles*.

Les normes relatives aux gaz d'échappement ont avant tout obligé les fabricants de moteurs d'autos à améliorer leurs produits, ce qui a déjà permis une réduction des polluants d'environ 80 %. Une réduction encore plus importante coûterait très cher et entraînerait de nouveaux problèmes écologiques. C'est pourquoi, même des spécialistes ne faisant pas partie des constructeurs de moteurs s'opposent à des restrictions techniques plus importantes, du moins tant qu'il ne sera pas prouvé de façon concluante que c'est la seule voie pour éviter tous dommages. Et, justement il y a ici une *lacune importante dans l'étude des normes pour la protection de l'environnement*. L'avenir, qui nous confrontera toujours de plus près aux *limites de la nature*, nécessitera une connaissance exacte des réactions dues aux changements antérieurs des *rapports de l'homme avec la nature*.

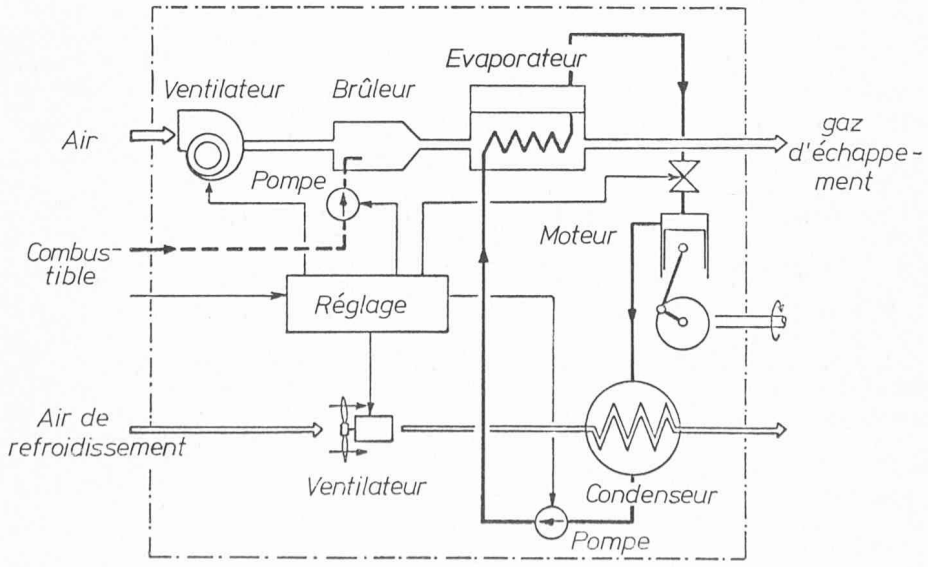


Fig. 34. — Principe du moteur à vapeur.

Il est bien clair que toutes les améliorations techniques ne servent à rien si l'on n'essaie pas d'*endiguer la croissance du trafic privé*, qui est tout de même l'un des plus grands pollueurs. Si cela n'est possible actuellement que par des mesures impopulaires, il semble toutefois qu'avec les frais d'acquisition et d'entretien toujours plus grands, des conditions de circulation toujours plus précaires et le développement de transports collectifs toujours plus efficaces, on arrivera à une saturation. Si *les autres pollueurs* sont également amenés à diminuer leurs émissions de façon identique, la qualité de notre air sera garantie.

L'auteur aimerait, en terminant, remercier le Dr Dedeoglu, le Dr Eberlé et M. Aue de la maison Sulzer de leur aide dans la recherche des documents bibliographiques et pour leurs conseils et indications au cours de nos discussions, ainsi que MM. Yanni, Dobler, Chapuis et P. Hoffmann de leur traduction du manuscrit allemand en français.

Bibliographie

[1] A. J. Haagen — Smit ; *Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog*. Ind. Eng. Chem. 44 (1952) 1342.

[2] P. S. Myers et al., : *The ABCs of Engine Exhaust Emissions* S.A.E. Paper 710481, 1971.

[3] H. W. Schlipköter et E. Dolgner : *Gesundheitsgefährdung durch Verunreinigung der Luft*. Atomwirtschaft, juin 1972.

[4] P. S. I. Barry et G. F. Harrison : *Motor Gasoline, Lead and Air Pollution*. Petroleum Review, Oktober 1972, p. 311-318.

[5] H. K. Newhall : *Kinetics of Engine Generated Nitrogen Oxides and Carbon Monoxide*. Twelfth Symposium on Combustion, The Combustion Institute (1969), p. 603.

[6] T. A. Huls et al. : *Spark Ignition Engine Operation and Design for Minimum Exhaust Emission*. S.A.E., Paper 660405, 1967.

[7] W. A. Daniel : *Flame Quenching at the Walls of an Internal Combustion Engine*. Sixth Symposium on Combustion, The Combustion Institute (1957), p. 886.

[8] M. W. Jackson et al. : *The Influence of Air-Fuel Ratio, Spark Timing and Combustion Chamber Deposits on Exhaust Hydrocarbon Emission*. SAE Paper 486-A.

[9] Y. B. Zeldovich : *The Oxydation of Nitrogen in Combustion Explosions*. Acta phys.-chim. URSS 1946 21, p. 577.

[10] W. E. Bernhardt : *Kinetics of Nitric Oxide Formation in Internal-Combustion Engines*. Air Pollution Control in Transport Engines, Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C149.

[11] E. S. Starkmann : *Spatial and Temporal History of Nitrogen Oxides in the Spark-Ignition Combustion Chamber*. Air Pollution Control in Transport Engines, Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C138.

[12] I. M. Khan : *Prediction of Soot and Nitric Oxide Concentrations in Diesel Engine Exhaust*. Air Pollution Control in Transport Engines, Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C142.

[13] M. K. Eberle : *Simulation der thermodynamischen Prozesse in Benzinmotoren unter besonderer Berücksichtigung der Stickoxydemissionen*. Conférence, EPFZ Kolloquium für Technische Wissenschaften, Zurich 1972.

[14] R. C. Bascon et al. : *Design Factors that affect Diesel Emissions*. SAE Paper 710484, 1971.

[15] R. Pischinger : *Forschungsarbeiten über Abgasentgiftung bei Dieselmotoren*, ATZ 74 (1972) 3.

[16] L. Gross-Gronomski : *Diesel Smoke, Flame Cooling as the Main Cause*. Automobile Engineer 54 (1965) 13, p. 531.

[17] J. C. Street et A. Thomas : *Carbon Formation in Premixed Flames*. Fuel 34 (1955), p. 4.

[18] R. Boog : *Some Instrumentation and Techniques for Measuring Engine Emission*. SAE Paper 710482, 1971.

[19] W. Blum et G. Rinne : *Identifizierung von Kohlenwasserstoffen in Abgasen von Automobilmotoren mit Hilfe einer Kombination Gaschromatograph-Massenspektrometer*. MTZ 33 (1972) 10, p. 403.

[20] A. Scomamiglio : *Considerazioni sulla valutazione opacimetrica della « fumosita » allo scarico dei motori Diesel*. Congresso della Associazione Termotecnica Italiana, L'Aquila, 1971.

[21] J. P. Soltau, R. J. Larbey : *The Sampling and Measurement of Exhaust Emissions from Motor Vehicles*. Air Pollution Control in Transport Engines, Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C143.

[22] T. O. Wagner : *Motor Gasoline and Automotive Air Pollution*. S.A.E. Paper 710485, 1971.

[23] Federal Register 1968, 33 (4 juin), 108.

[24] Federal Register 1970, 35 (10 novembre), 219.

[25] Federal Register 1971, 36 (5 octobre), 193.

[26] Intereurope, E/ECE/324 ; E/ECE/Trans/505 ; Regulation No 15.

[27] H. P. Lenz : *Vergleiche zwischen Vergaser- und Einspritz-Ottomotoren*. Séminaire sur « Gemischbildung, Verbrennung und Abgasprobleme bei Fahrzeugmotoren » à la « Technische Akademie Wuppertal », 28/29 octobre 1971.

[28] H. K. Newhall : *Control of Nitrogen Oxides by Exhaust Recirculation*. A preliminary Theoretical Study, S.A.E. Paper 670495, 1967.

[29] E. Mühlberg : *Abgasrückführung bei Verbrennungskraftmaschinen, insbesondere bei Dieselmotoren*. MTZ 32 (1971) 5, pages 166-172 et 9, pages 327-336.

[30] C. Henault : *The Influence of Valve Overlap on Oxides of Nitrogen Exhaust Emissions*. Air Pollution Control in Transport Engines, Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C148.

[31] J. E. Witzky : *Stratification and Air Pollution, Air Pollution Control in Transport Engines*. Inst. of. Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C136.

[32] E. Valdmanis et D. E. Wulfhurst : *The Effects of Emulsified Fuels and Water Induction on Diesel Combustion*. S.A.E. Paper 700736, 1970.

[33] K. Obländer, J. Abthoff ; *Entwicklungsstand der thermischen und katalytischen Nachverbrennung bei Ottomotoren*. MTZ 33 (1972) Nr. 5, pages 206-213.

[34] E. N. Cantwell et al. : *A Progress Report on the Development of Exhaust Manifold Reactors*. SAE Paper 690139, 1969.

[35] L. Keusch : *Dieselautobus und Umweltschutz*. Automobilrevue, Nr. 46 und 47, 4 et 11 novembre 1971.

[36] C. O. Miller : *Diesel Smoke Suppression by Fuel Additive Treatment*. SAE Paper 670093, 1967.

[37] G. Sprenger et al. : *Über die Wirkung russhemmender Kraftstoffzusätze bei der Verbrennung im Dieselmotor*. MTZ 31 (1970) Nr. 3, pages 102-108.

[38] J. W. Dable et T. J. Sheahan : *The Contribution of Additives to the Elimination of Air Pollution*. Air Pollution Control in Transport Engines, Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C128.

[39] M. Minerbi et M. Brunner : *Betrieb[illegible] Benzinfahrzeugen mit Flüssiggas*. Automobil-Revue, Nr. [illegible], 26 octobre 1972.

[40] D. Lyon et al. : *Controlling Exhaust Emission from a Diesel Engine by LPG Dual Fuelling*, Air Pollution Control in Transport Engines, Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C126.

[41] *A Cooperative Research Program for Automotive Emission Control*. SP 361, IIEC, Society of Automotive Engineers, 1971.

[42] T. Muroki : *Das Abgasverhalten der Kreiskolbenmotoren und Massnahmen gegen die Luftverunreinigung*. MTZ 33 (1972) Nr. 6.

[43] W. Cornelius et R. Wade : *The Formation and Control of Nitric Oxide in a Regenerative Turbine Burner*. SAE Paper 700708, 1970.

[44] R. J. Meijer : *Der Philips-Stirlingmotor*. MTZ 29 (1968), Nr. 7.

[45] P. T. Vickers et al. : *The Design Features of the GM SE-101*. A Vapor-Cycle Powerplant, SAE-Paper 700163, 1970.

[46] H. G. Plust et al. : *Elektrische Energie aus elektrochemischen Brennstoffelementen*. Brown Boveri Mitt. Bd. 49 (1962), Nr. 1/2, p. 3-33.

Adresse de l'auteur ;

J.-P. Corbat, Institut de thermodynamique EPFL
33, av. de Cour, Lausanne