

Conception optimale de moteurs à gaz favorables à l'environnement

ENET
9658648-2

CHRISTIAN NELLEN



CH. NELLEN

1. But

Le but du projet «moteur à gaz» ou «Swiss Motor» conduit au laboratoire des moteurs à combustion de l'EPF Zürich est la démonstration d'un moteur à combustion interne fonctionnant au gaz naturel pour l'utilisation stationnaire en cogénération (couplage chaleur-force) et respectant les conditions suivantes:

- émissions de NO_x fortement réduites par rapport au stand actuel de la technique et respect des valeurs limites d'émissions selon les normes fédérales avec une marge de 30 %
- haut niveau de puissance
- haut rendement effectif pour des coûts d'acquisition et d'entretien minimaux du système
- consommations de carburant et d'huile réduites

Pour cela, il est nécessaire de développer de nouvelles technologies: formation et conditionnement optimaux du mélange (haut taux de recirculation des gaz d'échappement EGR et procédé Miller),

Les moteurs fonctionnant au gaz naturel permettent de combiner un faible taux d'émissions avec un haut niveau de puissance et de rendement du moteur. Des progrès dans le développement des moteurs à gaz sont cependant indispensables pour satisfaire à des normes d'émissions futures. Les moteurs à allumage commandé (soit avec mélange pauvre, soit avec mélange stoechiométrique et catalyse trifonctionnelle) promettent de pouvoir respecter les normes d'émissions les plus sévères (notamment oxydes d'azote NO_x). Des travaux en cours au laboratoire pour les moteurs à combustion de l'ETH Zürich ont pour but, d'étudier le potentiel de différents concepts de combustion pour les moteurs à gaz en ce qui concerne le taux d'émissions, la puissance et le rendement du moteur.

Optimale Konzeption umweltschonender Gasmotoren

Erdgasbefeuerte Verbrennungsmotoren bieten die Möglichkeit, niedrige Schadstoffemissionswerte mit hoher Leistungsdichte und gutem Wirkungsgrad zu verbinden. Weitere Fortschritte in der Entwicklung von Gasmotoren sind jedoch unerlässlich, wenn zukünftige Emissionsvorschriften unterschritten werden sollen. Im Hinblick auf das Erreichen niedrigster Schadstoffemissionen (insbesondere NO_x) zeigt sich der Otto-Gasmotor, bei dem sowohl Mager- als auch $[\lambda_w = 1]$ -Konzept mit Dreiwegekatalysator angewendet werden kann, als vielversprechend. Am Laboratorium für Verbrennungsmotoren der ETH Zürich wird zur Zeit das Potential verschiedener Verbrennungskonzepte beim Otto-Gasmotor hinsichtlich Schadstoffemissionen, Leistungsdichte und Wirkungsgrad näher untersucht.

Optimized environmentally-friendly design of gas engines

Natural gas fuelled combustion engines have the potential to combine low exhaust gas emissions with high power output and good efficiency. In order to meet future stringent emission standards however, further research and development work for gas engines has to be done. With regard to lowest emission levels (especially NO_x), premixed combustion of gaseous fuels (lean-burn or stoichiometric operation with a three-way-catalyst) seems to be very promising. Research work is carried out at the I. C. Engines and Combustion Laboratory at ETH, in order to investigate several concepts for premixed combustion in terms of emissions, power output and efficiency.

combiné avec un système optimal d'allumage.

Une phase préliminaire de simulation par calculs, dans laquelle furent évalués de façon détaillée les potentiels de différents concepts de combustion en ce

qui concerne les émissions nocives, le rendement et le taux de puissance [1], a également permis de cibler le développement du moteur sur le banc d'essai et de diminuer les coûts dus à son utilisation.

Valeurs d'émissions données en mg/m ³ pour 5% O ₂	NO _x	CO
Opair 97: puissance calorifique supérieure à 100 kW		
- Carburants gazeux suivants: biogaz d'origine agricole, gaz d'épuration, gaz de décharge sous certaines conditions	400	650
- Autres carburants (dont gaz naturel)	250	650
Canton de Zürich: toutes puissances		
- Carburants gazeux suivants: biogaz d'origine agricole, gaz d'épuration, gaz de décharge sous certaines conditions	400	650
- Autres carburants (dont gaz naturel)	80 ^{a)}	650
Ville de Zürich: toutes puissances	50	650

^{a)} 250 mg/m³ en discussion actuellement

Tab. 1 Valeurs d'émissions selon les normes suisses pour moteurs stationnaires. Les oxydes d'azote sont exprimés en dioxyde d'azote NO₂. Les valeurs d'émissions se rapportent au volume des effluents gazeux dans des conditions standard (0°C, 1013 mbar) et après déduction de l'humidité.

Type	Liebherr G 926
Nombre de cylindres, disposition	6 en ligne
Alésage	122 mm
Course	142 mm
Cylindrée	9,96 dm ³
Régime de rotation	1500 t/min
Puissance actuelle	150 kW
Pression moyenne effective (pme) correspondante	12 bar

Tab. 2 Caractéristiques du moteur à gaz

2. Valeurs limites d'émissions pour moteurs stationnaires

Le projet a été motivé, par ordre de l'industrie, en raison des normes imposées en Suisse sur les émissions nocives, particulièrement celles de NO_x

qui restent actuellement les plus sévères sur le plan international (tab.1). Ces normes sont dictées par l'Ordonnance sur la Protection de l'air Opair 1997. Pour certaines régions des normes d'émissions de NO_x encore plus strictes sont à respecter, comme par exemple à Zurich (50 mg/m³).

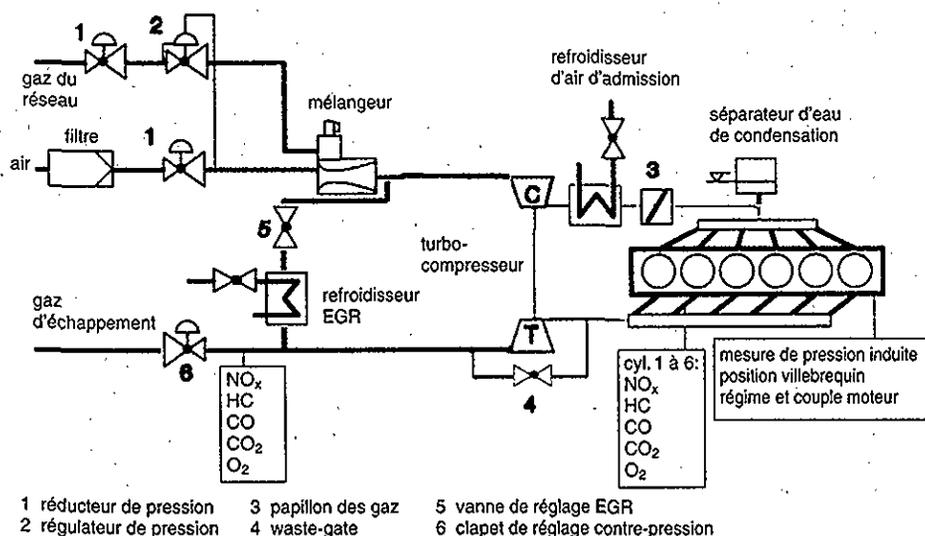


Fig. 1 Schéma du stand d'essai avec le moteur à gaz suralimenté. Le mélange air-gaz naturel-gaz recirculé passe à travers le compresseur, ce qui assure une bonne homogénéisation du mélange.

Les valeurs d'émissions, exprimées en mg/m³, se rapportent à une teneur en oxygène des effluents gazeux de 5 pour-cent (%vol). Les émissions d'hydrocarbures imbrûlés (HC) ne sont pas limitées.

3. Moteur à gaz

Le projet est basé sur l'étude d'un moteur diesel transformé pour fonctionner au gaz naturel. Le système d'injection diesel a été remplacé par un système d'allumage électrique et par un système de préparation du mélange externe au moteur (mélangeur). Le taux de compression volumétrique a été réduit (de 17, 2 à 12) par l'utilisation de pistons avec une géométrie de chambre de combustion différente. Les sièges de soupapes, les soupapes et les chemises de cylindres ont été remplacés par des pièces en matériaux plus résistants. Les caractéristiques principales du moteur sont représentées au tableau 2.

4. Stand d'essais

Le stand d'essai, loué périodiquement pour les campagnes de mesures, se trouve à l'EMPA (Laboratoire Fédéral d'essai des matériaux et de recherche) de Dübendorf. L'infrastructure a été adaptée aux besoins du projet, particulièrement par l'équipement d'une arrivée d'alimentation en gaz naturel depuis le réseau principal de la ville. Le stand d'essai se compose d'un banc d'essai équipé d'un moteur asynchrone (frein), une cabine où sont disposés les éléments de commande et de contrôle, une installation de prélèvement et d'analyse des gaz d'échappement, différents instruments de mesures et d'acquisition ainsi que diverses unités de conditionnement de l'air et des fluides du moteur. A cela a été ajouté un système de mesure de la pression induite dans les cylindres du moteur. Un schéma simplifié de l'installation est représenté à la figure 1.

5. Concepts et optimisation

5.1 Calculs thermodynamiques et simulations

Déroulement

La phase de simulation du projet [1] s'est déroulée selon les étapes suivantes:

- évaluation, par variation systématique de paramètres, des potentiels de fonctionnements en *mélange pauvre* (rapport d'air de combustion $\lambda > 1$) et en *mélange stœchiométrique avec recirculation des gaz d'échappement* ($\lambda = 1$ et EGR) pour ce qui est de la pression moyenne effective et du rendement effectif. Les limites d'opération sont données principalement par la charge mécanique (pression maximale dans le cylindre), la charge thermique, la limite de cliquetis et les températures des gaz d'échappement
- calcul des émissions de NO_x à l'aide de la cinétique de réaction chimique détaillée pour les modes d'opération choisis
- travaux de simulation en vue de l'optimisation de la structure de l'écoulement et des turbulences dans la chambre de combustion, choix d'une géométrie de chambre de combustion appropriée et préparation pour la phase expérimentale

Résultats

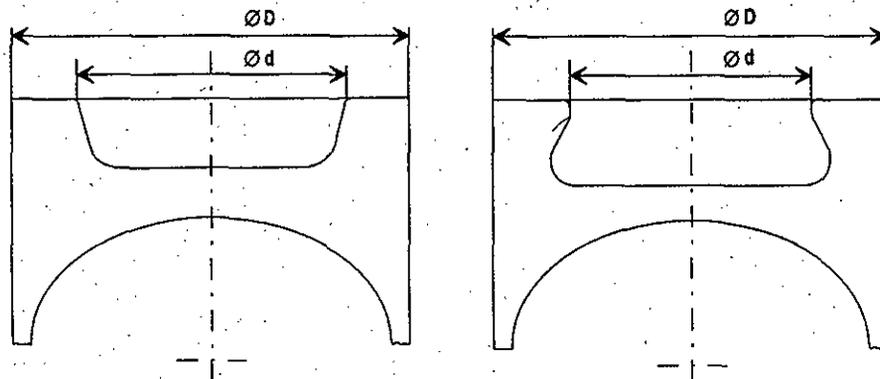
Les calculs de simulation effectués pour ce moteur ont donné les conclusions suivantes:

Pour un fonctionnement en *mélange pauvre* ($\lambda > 1$) ou en *mélange stœchiométrique avec recirculation des gaz d'échappement* ($\lambda = 1$ et EGR), des pressions moyennes effectives de 13 à 14 bar pour des rendements de 36 à 37% sont atteignables. Ces valeurs pourraient encore être augmentées à 15 bar, respectivement 38% par un repoussement de la limite de cliquetis (influence sur la structure d'écoulement) ainsi que par l'élévation de la limite de charge thermique (mesures constructives).

Le concept *mélange stœchiométrique et recirculation des gaz d'échappement* promet une haute densité de puissance et un *bon rendement du moteur*. Par rapport au fonctionnement en *mélange pauvre*, il présente un avantage supplémentaire, soit le meilleur traitement catalytique possible de part les températures des gaz d'échappement encore favorables (en vue des restrictions probables dans le futur des normes sur les émissions). C'est précisément ce dernier concept qui a été choisi pour la suite du projet.

5.2 Recirculation des gaz d'échappement (EGR)

Elle permet d'approcher le comportement du moteur à *mélange pauvre*: par dilution du mélange frais avec les gaz



A gauche: piston de base; $d/D = 78\%$, part de surface d'écrasement = 39 %
A droite: piston optimisé; $d/D = 60\%$, part de surface d'écrasement = 64 %

Fig. 2 Esquisses des pistons du moteur à gaz

inertes la charge thermique ainsi que les émissions d'oxydes d'azote sont diminuées. De plus, la limite de cliquetis est repoussée et une augmentation éventuelle du taux de compression est possible. De par la capacité supérieure de suralimentation, et donc de la pression moyenne effective supérieure atteignable, le *rendement effectif* du moteur est amélioré. A cause de l'influence négative de la recirculation sur la combustion (la vitesse de combustion diminue), il est nécessaire de travailler sur la formation du mélange ainsi que sur le système d'allumage.

5.3 Système d'allumage et chambres de combustion

Afin d'obtenir de grands taux de recirculation des gaz d'échappement comme lors d'un fonctionnement en *mélange pauvre*, il est nécessaire de prendre des mesures pour réduire la durée de combustion et stabiliser la phase d'inflammation. Celles-ci peuvent être améliorées par:

- une plus grande *énergie d'allumage* et une décharge de l'étincelle plus longue, provoquant une phase d'inflammation plus stable, encore améliorée par une disposition de la bougie d'allumage dans le domaine central de la chambre de combustion (endroit de faibles vitesses d'écoulement),
- une *chambre de combustion optimisée*, permettant un plus haut niveau de turbulences et une plus courte phase d'inflammation

La conception de la chambre de combustion a été faite, comme déjà cité, par calculs. La simulation a débuté sur le modèle de la chambre de combustion de base (fig. 2 à gauche). Après plusieurs

phases intermédiaires, une nouvelle forme a été réalisée avec le même taux de compression volumétrique: Le bol du piston est plus profond et se referme vers le sommet; la part de surface d'écrasement a été augmentée d'environ 60% (fig. 2 à droite).

5.4 Suralimentation

La perte de puissance, l'augmentation de la consommation et la perte de rendement effectif résultante du moteur lors de la recirculation des gaz d'échappement se laissent compenser par la suralimentation. De plus, l'effet de baisse de puissance engendrée par la perte de quantité d'air admise (part volumique prise par le gaz naturel) est réduit. Le *niveau de turbulences* plus important généré par la suralimentation permet de raccourcir le *décalage d'inflammation* et la durée de combustion. En résumé, la recirculation combinée avec la suralimentation est un moyen efficace de diminuer les émissions de NO_x sans perte de performances.

6. Résultats des essais

6.1 Fonctionnement atmosphérique

Les essais ont tout d'abord été réalisés avec les pistons d'origine en *mélange pauvre* ($\lambda > 1$), puis en *mélange stœchiométrique avec EGR*. Deux nouveaux pistons ont été ensuite testés. Il s'agit:

- du piston développé par le laboratoire des moteurs à combustion (ETH) et
- d'un piston avec chambre de combustion en forme d'étoile (AVL Tri-

Flow) [2], générant un niveau de turbulences encore plus élevé.

Ces deux pistons ont démontré une accélération de la combustion, caractérisée par des valeurs de pressions maximales et pressions moyennes effectives (pme) plus élevées ainsi qu'une réduction des émissions totales d'hydrocarbures imbrûlés THC (fig. 3). La combustion plus rapide provoque une génération de NO_x plus importante (phénomène cependant nettement moins prononcé avec le piston ETH), cependant, elle permet de repousser la limite de fonctionnement du moteur par une meilleure stabilité de fonctionnement (augmentation du coefficient lambda de 0,1 pour le fonctionnement en mélange pauvre) et ainsi de compenser l'augmentation d'oxydes d'azote.

Recirculation des gaz d'échappement (EGR)

Quelques résultats sont représentés à la figure 4: pour le fonctionnement avec $\lambda = 1$, l'augmentation du taux de recirculation des gaz d'échappement permet de diminuer les émissions de NO_x au niveau des normes fédérales. Les comportements des émissions de HC et particulièrement de CO sont synonymes de la détérioration de la combustion. De cette dernière, combinée à la perte de puissance effective (chute de pme de 8 à 6

bar), résulte une perte de rendement effectif. La limite du taux de recirculation se situe aux environs de 23 %.

Combinaison de deux concepts (EGR et $\lambda > 1$)

Au cours des essais, un nouveau concept testé a permis d'obtenir, dans les limites de mode d'opération, des valeurs de rendement effectif supérieures de 2,5% (fig. 5). Ce concept est la combinaison du fonctionnement en mélange pauvre avec la recirculation des gaz d'échappement (EGR et $\lambda > 1$). Pour un taux de recirculation de 20%, la limite d'opération se situe vers un coefficient lambda de 1,27 et permet de réduire les émissions de CO d'un facteur 8 (en comparaison avec EGR = 23% et $\lambda=1$, fig. 4). L'augmentation du rendement effectif, tout comme la diminution des émissions de CO, peuvent s'expliquer par une combustion améliorée lors de la dilution des gaz inertes avec le surplus d'air.

6.2 Moteur suralimenté

Dans un premier temps et selon les exigences de l'industrie, la pression moyenne effective (pme) a été augmentée à 12 bar, correspondant ainsi à une puissance de 150 kW. Pour le fonctionnement en *mélange stœchiométrique* avec EGR (fig. 6) et par rapport au

fonctionnement atmosphérique (fig. 4), le comportement plus stable des émissions de CO en fonction du taux de recirculation témoigne de l'influence positive de la suralimentation: l'augmentation du *niveau de turbulences* entraîne une amélioration de la combustion (augmentation de sa vitesse) et une meilleure stabilité de fonctionnement. Dans les limites de la recirculation, les émissions de CO sont réduites d'un facteur 10 et le rendement effectif est supérieur de 2%. Pour le concept EGR = 20% et $\lambda > 1$ (fig. 7), un *rendement* de plus de 37% pour des valeurs d'émissions de NO_x proches des normes de l'Opair est atteint. La chute du rendement effectif correspond à celle de la pression moyenne effective, le compresseur ne pouvant plus fournir un rapport de pression suffisant dans sa configuration actuelle. Une adaptation du turbocompresseur est nécessaire en vue de maintenir de fonctionner du moteur. La limite de fonctionnement est donnée pour un rapport d'air de 1,25.

7. Conclusions et suite du projet

Comme les résultats des tests l'ont montré, la recirculation des gaz d'échappe-

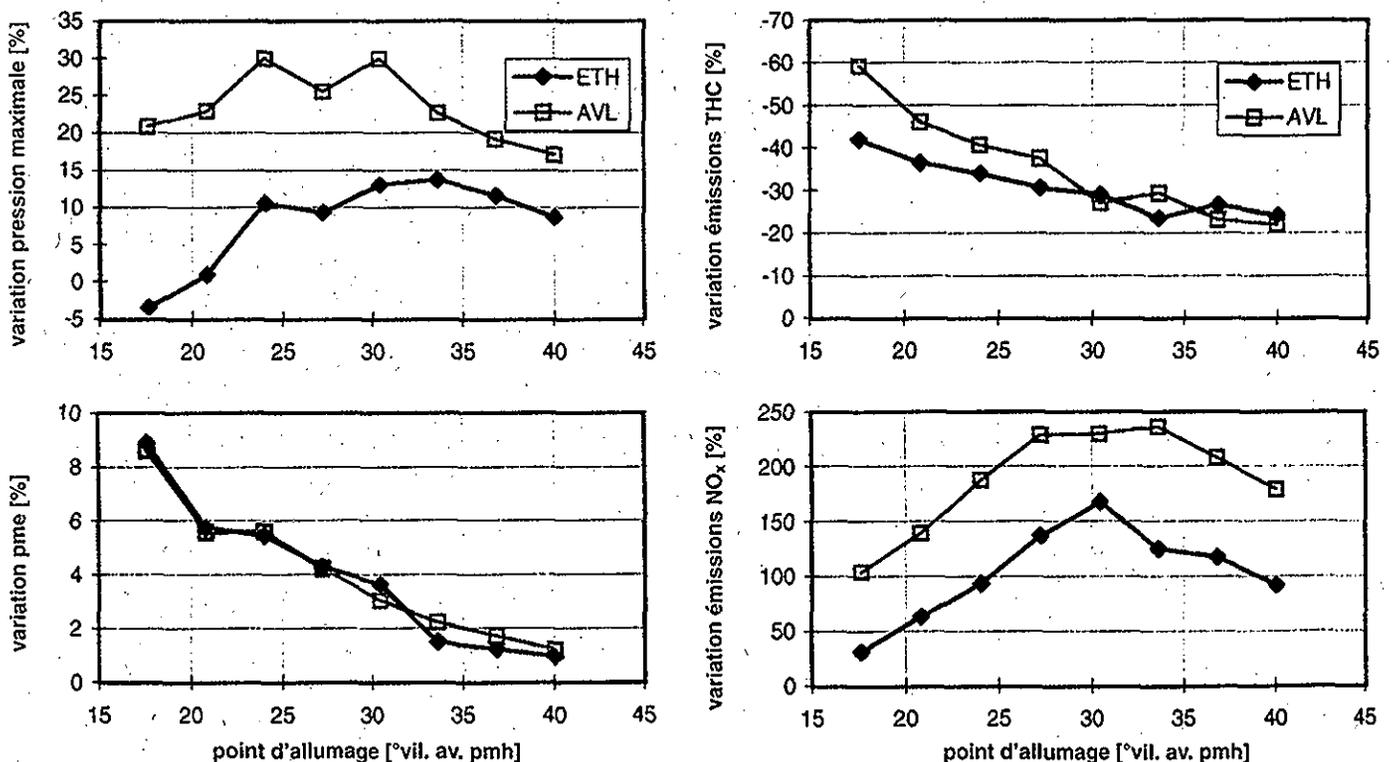


Fig. 3 Comparaisons entre les pistons ETH et AVL par rapport au piston de base pour un coefficient d'air lambda de 1,6; variation de la pression moyenne effective, de la pression maximale, des émissions de THC et de NO_x en fonction du point d'allumage.

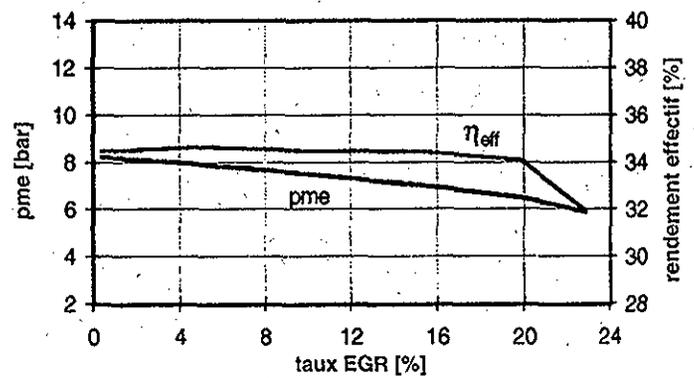
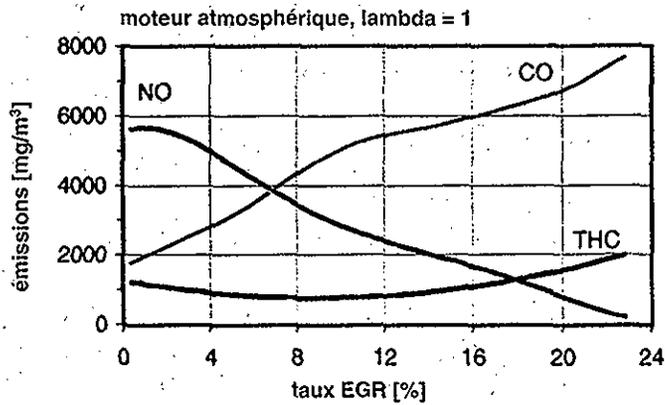


Fig. 4 Moteur atmosphérique; émissions de CO, HC et NO_x ainsi que pression moyenne effective et rendement en fonction du taux de recirculation des gaz d'échappement.

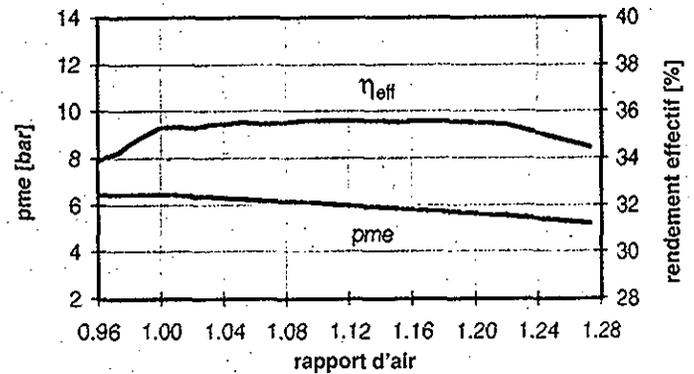
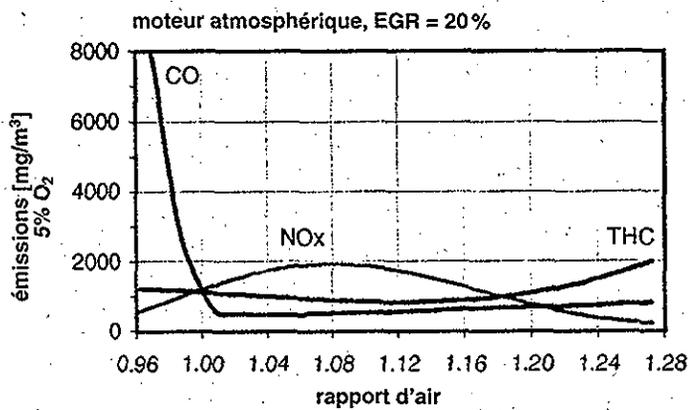


Fig. 5 Moteur atmosphérique; émissions de CO, HC et NO_x ainsi que pression moyenne effective et rendement en fonction du rapport d'air λ , pour un taux de recirculation EGR de 20%.

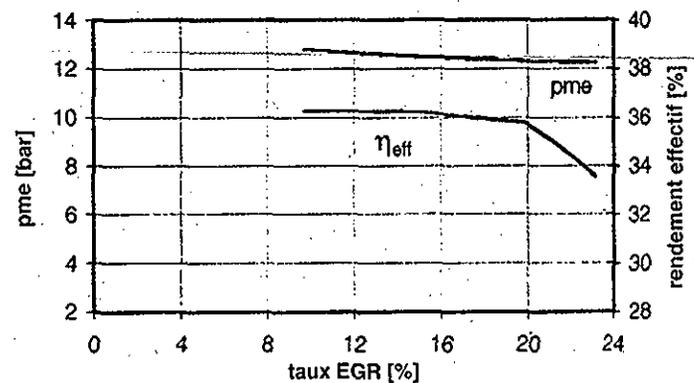
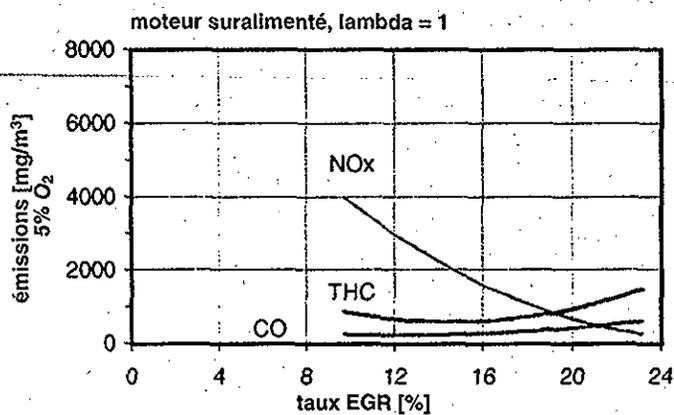


Fig. 6 Moteur suralimenté; émissions de CO, HC et NO_x ainsi que pression moyenne effective et rendement en fonction du taux de recirculation des gaz d'échappement.

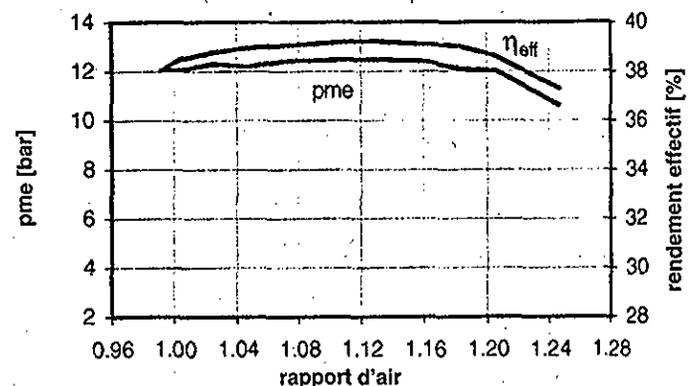
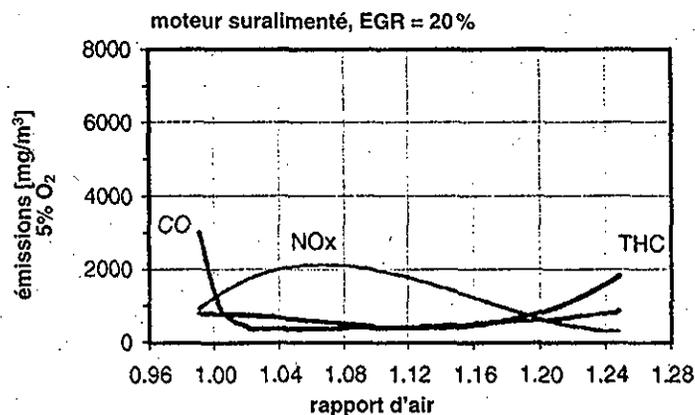


Fig. 7 Moteur suralimenté; émissions de CO, HC et NO_x ainsi que pression moyenne effective et rendement en fonction du rapport d'air λ pour un taux de recirculation EGR de 20%.

ment est un concept prometteur pour satisfaire aux normes de l'OPair. Des recherches supplémentaires sur la combustion sont en cours afin d'atteindre un plus grand taux de recirculation.

Un retard du moment d'allumage permet d'obtenir une réduction supplémentaire des émissions de CO et NO_x au détriment du rendement du moteur. Cependant, un grand potentiel d'optimisation de ce dernier réside dans le choix du rapport d'air λ lors de la recirculation des gaz d'échappement. A cela s'ajoutent les températures des gaz d'échappement recirculés (leur densité influence le travail du compresseur) et du mélange admis par le moteur. Ces deux derniers paramètres dépendent des exigences imposées par le circuit de refroidissement pour la récupération de chaleur. Il faut remarquer qu'en cogénération le rendement global de l'installation est observé, c'est-à-dire l'addition de la puissance à l'arbre moteur avec la puissance calorifique récupérée.

L'optimisation de tous ces paramètres correspond aux recherches effectuées actuellement.

La phase de travail à *court terme* concerne les points suivants:

- optimisation du turbocompresseur
- étude de l'influence de l'utilisation d'un collecteur d'échappement isolé thermiquement
- démonstration du potentiel de réduction des émissions nocives NO_x, CO et THC (hydrocarbures méthane et non méthane) par utilisation d'un catalyseur d'oxydoréduction. Comme déjà mentionné, lors du fonctionnement EGR et $\lambda = 1$, les températures des gaz d'échappement encore favorables permettent un taux de conversion optimal de ces émissions; ceci en fait son principal avantage par rapport aux moteurs fonctionnant en mélange pauvre seulement. L'utilisation d'un catalyseur revient au centre du débat en vue de la tendance toujours plus restrictive des législations sur les émissions. Les applications actuelles dans les régions comme celle de Zurich (mélange stœchiométrique et catalyseur d'oxydoréduction) ne permettent qu'un faible taux de puissance (contraintes thermiques) et un faible rendement effectif.
- procédé Miller: réduction de la température du mélange admis dans

les cylindres par avancement du moment de fermeture des soupapes d'admission (phénomène d'expansion du mélange dans le cylindre). Un abaissement de la température de combustion est provoqué, entraînant ainsi une réduction des oxydes d'azote. Ceci implique une géométrie différente de l'arbre à cames. Vu le temps d'admission total réduit, ce procédé nécessite pour une même quantité de mélange admise une plus haute pression de suralimentation et donc une nouvelle optimisation du turbocompresseur.

Les buts et travaux envisagés à *long terme* sont:

- réduction des émissions d'hydrocarbures imbrûlés
- augmentation de la puissance à 180 kW (pme = 14,5)
- optimisation de la préparation du mélange et de l'allumage
- analyse de l'influence de la composition du gaz naturel sur le fonctionnement du moteur et mise au point d'une régulation adaptative
- application du moteur dans le domaine non-stationnaire

Sources

- [1] Boulouchos, K., Zbioreczyk, A., Inhelder, J., Frouzakis, C. (1997): Optimale Auslegung umweltfreundlicher Gasmotoren mit Hilfe von Simulationswerkzeugen, MTZ 58.
- [2] Chmela, F., Kapus, P. (1994): Das TRI-FLOW-Verbrennungsverfahren für den Magerbetrieb von Gasmotoren, MTZ 55.

Remerciements

Nous remercions tout particulièrement pour leur soutien:

- l'Office fédéral de l'énergie (OFEN)
- le Fond de recherche de l'industrie gazière suisse (FOGA)
- la Société Liebherr Machines Bulle SA
- la Société Dimag AG
- EMPA, Dübendorf, dpt moteurs à combustion

KEYWORDS

Moteurs à gaz - Emissions - rendement

ADRESSE DE L'AUTEUR

Christian Nellen
Ing. dipl. ETS
responsable du projet

Co-auteur:
K. Boulouchos
Dr. sc. techn.
responsable de la recherche
sur la combustion

Ecole polytechnique de Zürich
Institut d'énergétique
Laboratoire des moteurs à combustion,
et de la technique de combustion
Sonneggstr. 3, 8092 Zürich
Tel. 01-632 75 34
Fax 01-632 11 77
E-Mail: nellen@lvv.iet.mavt.ethz.ch