

Le moteur à charge stratifiée, Un moyen de réduction des NO_x

A. Chelghoum¹, M. Kadja², P. Higelin³ et T. Ouksel¹

¹ Institut de Mécanique, Centre Universitaire Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, Algérie

² Laboratoire des Applications Energétiques et Pollution,
Département de Mécanique, Université des Frères Mentouri, Constantine, Algérie

³ Laboratoire de Mécanique et d'Energétique
de l'Ecole Polytechnique, Université d'Orléans, France

(reçu le 4 Novembre 2009 – accepté le 25 Mars 2010)

Résumé - Afin de réduire la quantité d'oxyde d'azote formée dans un moteur à essence, la solution proposée est la combustion stratifiée. Pour cela, le modèle multi zone est utilisé pour l'étude du processus de combustion et la formation de l'oxyde d'azote dans un moteur à allumage commandé. Il commence par l'utilisation de l'approche de Wiebe pour décrire le processus de dégagement de chaleur durant la phase de combustion. L'utilisation d'un schéma d'équilibre chimique pour le système C – H – O – N est nécessaire pour le calculer de la concentration des espèces dans les gaz d'échappement. Ainsi, les résultats théoriques des deux types de moteurs (à charge homogène et à charge stratifiée) issus de ce modèle sont comparés avec ceux mesurés.

Abstract – In order to reduce the quantity of oxide of nitrogen formed in a motor to gas, the proposed solution is the stratified combustion. For it the models multi zone is used for the survey of the combustion process and the formation of the nitrogen oxide in a motor to ordered ignition. He/it starts with the use of the approach of Wiebe to describe the process of heat clearing during the phase of combustion. The use of a chemical balance diagram for the system C – H – O – N is necessary to calculate it of the concentration of the species in the gases of exhaust. So the theoretical results of the two types of motors (to homogeneous load and to stratified load) descended of this model are compared with those measured.

Mots clés: Moteur - Allumage commandé à charge stratifiée - Oxyde d'azote - Modèle multi zones.

1. INTRODUCTION

La préoccupation des chercheurs dans le domaine des moteurs depuis quelques années est d'arriver à réduire la toxicité des gaz d'échappement des moteurs à un niveau suffisamment bas. La plupart des solutions proposées mènent à admettre un rendement thermique moyen relativement réduit.

Il est donc logique de penser si on pouvait trouver une solution qui serait plus acceptable que celles qui sont actuellement connues, aussi bien du point de vue de la dépense d'énergie que de l'élimination des composés toxiques dans les gaz d'échappement dans les moteurs à combustion interne.

La solution proposée est le moteur à charge stratifiée dont la phase de combustion se produit en deux étapes différentes. L'une de petit volume, ne dépassant pas le quart du volume de la chambre de combustion (préchambre), comporte un mélange très riche de coefficient d'excès d'air local $\alpha_1 \ll 1$, tandis que l'autre occupant le reste de la

chambre de combustion (chambre principale), comporte un mélange très pauvre formé d'air et des gaz brûlés de la première combustion de coefficient d'excès d'air local $\alpha_2 \gg 1$, [1].

2. STRATIFICATION

Ce moteur est caractérisé par le taux de stratification de la charge, qui est défini par le rapport du volume V_{mr} du mélange riche au volume total V_{mm} du mélange moteur:

$$a = \frac{V_{mr}}{V_{mm}} \quad (1)$$

Ce coefficient atteint sa valeur maximale quand:

$$V_{mr} = (V_{mr})_{\max}$$

$$\text{Où } (V_{mr})_{\max} = N_{mr} \frac{RT}{P} \text{ et } (V_{mm}) = N_{mm} \frac{RT}{P}$$

Les nombres de moles du mélange riche et du mélange moteur sont appréciés par:

$$N_{mr} = \left(\alpha_1 L_0 + \frac{1}{M_c} \right) (1 + \gamma_r) \quad [\text{kmole/kgcomb}]$$

$$N_{mm} = \left(\alpha L_0 + \frac{1}{M_c} \right) (1 + \gamma_r) \quad [\text{kmole/kgcomb}]$$

α : Coefficient d'excès d'air total et L_0 : Quantité d'air théoriquement nécessaire

$$\text{Il vient que: } a_{\max} = \frac{\alpha_1 L_0 + 1/M_c}{\alpha L_0 + 1/M_c} \quad (2)$$

Le principe de conservation de la masse nous permet d'évaluer α_2 en fonction de α_1 :

$$\alpha_2 = \frac{a_{\max} \cdot \alpha - a \cdot \alpha_1}{a_{\max} - a} \quad (3)$$

Les fractions massiques du combustible brûlées au cours de ces deux étapes sont données par le système suivant:

$$\begin{cases} X_{1e} + X_{2e} = 1 \\ (\alpha_1 l_0 + 1)X_{1e} + (\alpha_2 l_0 + 1)X_{2e} = \alpha l_0 + 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_{1e} = \frac{\alpha_2 - \alpha}{\alpha_2 - \alpha_1} \\ X_{2e} = 1 - X_{1e} \end{cases} \quad (4)$$

La pression instantanée au cours du processus de combustion est déterminée à partir de l'équation:

$$\frac{dP}{d\tau} + \gamma \times \frac{f'(\alpha)}{f(\alpha)} \times P = \frac{(\gamma - 1)}{f(\alpha)} \times \left(\frac{\delta q_{dég}}{d\alpha} - \frac{\delta q_{per}}{d\alpha} \right) \quad (5)$$

La fraction massique brûlée du carburant est exprimée par la loi de Wiebe [2, 3].

$$x = 1 - \exp \left[-6.908 \times \left(\frac{\phi}{\phi_z} \right)^{m+1} \right] \quad (6)$$

ϕ_z est la durée de la combustion, elle caractérise l'aspect quantitatif de la dynamique de combustion, et m le facteur de forme de combustion, caractérisant l'aspect qualitatif.

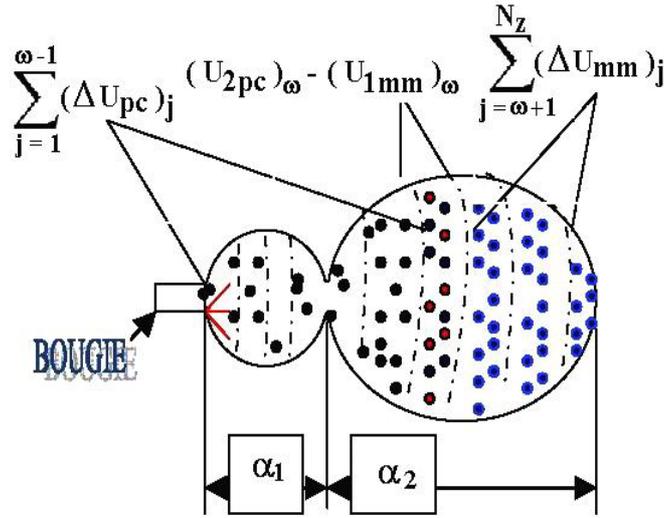


Fig. 1: Décomposition de la chambre de combustion en multi zones

L'application du principe de conservation d'énergie appliquée à la zone ω entre le début et la fin de sa combustion sous la forme développée donne:

$$\Delta Q_{\omega} = (U_{2pc})_{\omega} - (U_{1mm})_{\omega} + \sum_{j=1}^{\omega-1} (\Delta U_{pc})_j + \sum_{j=\omega+1}^{N_z} (\Delta U_{mm})_j - \Delta W_{\omega}$$

$$\Delta Q_{\omega} = \sum_{i=1}^{12} n_i \cdot C_{v,i} \Big|_0^{(t_{2pc})_{\omega}} \cdot (t_{2pc})_{\omega} \cdot \Delta x_{\omega} - (U_{1mm})_{\omega} + \sum_{j=1}^{\omega-1} (\Delta U_{pc})_j + \sum_{j=\omega+1}^{N_z} (\Delta U_{mm})_j - \Delta W_{\omega}$$

En remplaçant les capacités calorifiques molaires moyennes $C_{v,i}$, des 12 espèces des produits de combustion par leurs expressions, l'équation d'énergie devient:

$$\begin{aligned} \Delta x_{\omega} \cdot (t_{2pc})_{\omega} \cdot \sum_{i=1}^{12} \left[n_i \cdot (a_i + b_i \cdot (t_{2pc})_{\omega}) \right] &= (U_{1mm})_{\omega} \\ &- \sum_{j=1}^{\omega-1} (\Delta U_{pc})_j - \sum_{j=\omega+1}^{N_z} (\Delta U_{mm})_j + \Delta W_{\omega} + \Delta Q_{\omega} \\ (t_{2pc})_{\omega} \times \sum_{i=1}^{12} n_i \cdot a_i + (t_{2pc})_{\omega}^2 \times \sum_{i=1}^{12} n_i \cdot b_i &= \\ \frac{1}{\Delta x_{\omega}} \times \left\{ (U_{1mm})_{\omega} - \sum_{j=1}^{\omega-1} (\Delta U_{pc})_j - \sum_{j=\omega+1}^{N_z} (\Delta U_{mm})_j + \Delta W_{\omega} + \Delta Q_{\omega} \right\} \end{aligned}$$

On pose:

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^{12} n_i \cdot a_i = n_{CO_2} \cdot a_{CO_2} + n_{CO} \cdot a_{CO} + n_{H_2O} \cdot a_{H_2O} \\ &+ n_{H_2} \cdot a_{H_2} + n_{OH} \cdot a_{OH} + n_{O_2} \cdot a_{O_2} + n_{O} \cdot a_{O} + n_{NO} \cdot a_{NO} \\ &+ n_{N_2} \cdot a_{N_2} + n_{H} \cdot a_{H} + n_{N} \cdot a_{N} + n_{N_2O} \cdot a_{N_2O} \\ B &= \sum_{i=1}^{12} n_i \cdot b_i = + n_{CO} \cdot b_{CO} + n_{H_2O} \cdot b_{H_2O} + n_{H_2} \cdot b_{H_2} \\ &+ n_{OH} \cdot b_{OH} + n_{O_2} \cdot b_{O_2} + n_{O} \cdot b_{O} + n_{NO} \cdot b_{NO} \\ &+ n_{N_2} \cdot b_{N_2} + n_{H} \cdot b_{H} + n_{N} \cdot b_{N} + n_{N_2O} \cdot b_{N_2O} \\ C &= \frac{1}{\Delta x_{\omega}} \cdot \left\{ (U_{1mm})_{\omega} - \sum_{j=1}^{\omega-1} (\Delta U_{pc})_j - \sum_{j=\omega+1}^{N_z} (\Delta U_{mm})_j + \Delta W_{\omega} + \Delta Q_{\omega} \right\} \end{aligned}$$

Alors on obtient la forme de l'équation d'énergie:

$$B \cdot (t_{2pc})_{\omega}^2 + A \cdot (t_{2pc})_{\omega} - C = 0$$

La température locale des produits de combustion dans la zone ω juste au moment de sa combustion, $(t_{2pc})_{\omega}$ est la solution positive.

$$\begin{cases} (t_{2pc})_{\omega} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B.C}}{2B} & [^{\circ}\text{C}] \\ (T_{2pc})_{\omega} = (t_{2pc})_{\omega} + 273 & [\text{K}] \end{cases}$$

3. CINETIQUE DE FORMATION DES NO_x

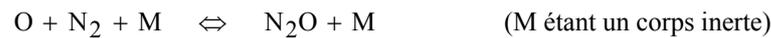
Le mécanisme de formation de NO le plus dominant, est celui, de Zeldovich. Le schéma proposé se compose des deux réactions suivantes [4, 11] qui décrivent la formation du NO à partir de l'azote de l'air.



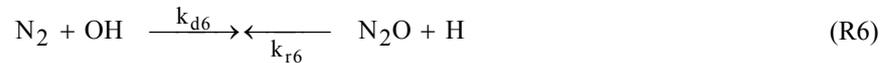
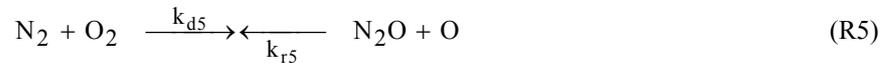
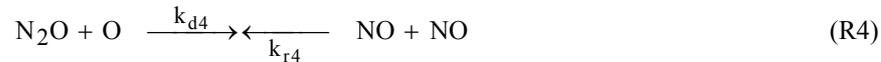
Dans les mélanges autres que pauvres, une troisième réaction introduite [3, 5, 9, 10], suite à des mesures d'évolutions de concentration de NO dans une chambre de combustion de moteur à allumage commandé.



Une autre voie de formation de NO a été mise en compte par Lavoie *et al.* [3] en 1970. Il s'agit d'un processus où l'origine de NO est le N₂O qui peut provenir d'une réaction de combustion de la forme:



L'origine de N₂O est l'une des réactions suivantes:



Des mesures par spectroscopie d'absorption ont montré que, dans le cas où l'oxyde d'azote NO n'est produit que par le mécanisme thermique, sa formation peut être très bien prédite à partir des réactions (R1) et (R2) [6].

Cependant, Heywood *et al.* [7] montrent que la réaction (R3) reste aussi importante pour mieux prédire les concentrations de NO.

Eyzat et Guibert [8] affirment que la réaction ci-dessous contribue aussi à la formation de NO.



4. INFLUENCE DES DIFFERENTES REACTIONS SUR LA FORMATION DES OXYDES D'AZOTE

Cette étude s'effectue sur la base du mécanisme de Zeldovich, et à chaque fois on le complète par l'addition d'une réaction, tout en inscrivant son influence sur la quantité d'oxyde d'azote formée.

Seize cycles moteurs ont été ainsi calculés, huit pour un de mélange pauvre (de coefficient d'excès d'air $\alpha = 1.17$) et huit pour un mélange riche (de coefficient d'excès d'air $\alpha = 0.85$).

Les résultats de calcul sont inscrits dans le tableau ci-après et représentées par les courbes des figures (Fig. 2 et Fig. 3).

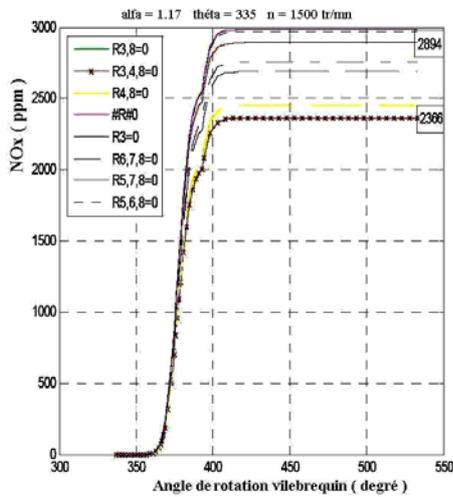


Fig. 2: Variation des NOx en fonction de l'angle de rotation (mélange gaz pauvre)

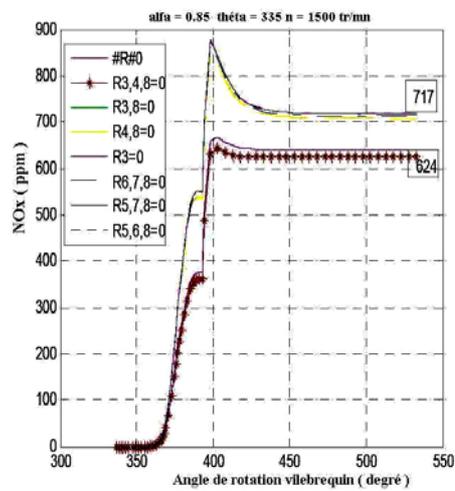


Fig. 3: Variation des NOx en fonction de l'angle de rotation (mélange gaz riche)

Tableau: Conditions de calcul relatif à l'équation (8)

N°	Conditions de calcul				NO _x	
	Relatifs à l'équation (8)				$\alpha = 1.17$	$\alpha = 0.85$
1	R1#0	R3=0	R8=0	R4=0	2366	624
2	R2#0	R3#0	R8=0	R4=0	2451	707
3	R5#0	R3=0	R8=0	R4=0	2894	641
4	R6#0	R3=0	R8#0	R4#0	2894	641

5	R7#0	R3#0	R8#0	R4#0	2985	717
6	R1#0	R5#0	R6=0	R7=0	2755	712
7	R2#0	R5=0	R6#0	R7#0	2690	716
8	R3#0	R5=0	R6=0	R7#0	2971	717
	R4#0					
	R8=0					

Des figures (courbes en étoiles) et du tableau (première ligne), il est clair que le mécanisme de Zeldovich est la cause principale de la formation des NO_x, la concentration finale est de 624 ppm pour le cas riche et est de 2366 ppm pour le cas pauvre.

La troisième et la quatrième ligne du tableau montrent que la huitième réaction n'a aucune influence sur la formation des NO_x pour les deux cas.

La contribution de la réaction 3 est plus importante dans un mélange riche que dans un mélange pauvre, elle est respectivement $\frac{707 - 624}{624} \cdot 100\% = 13\%$ et $\frac{2451 - 2366}{2306} \cdot 100\% = 3.5\%$.

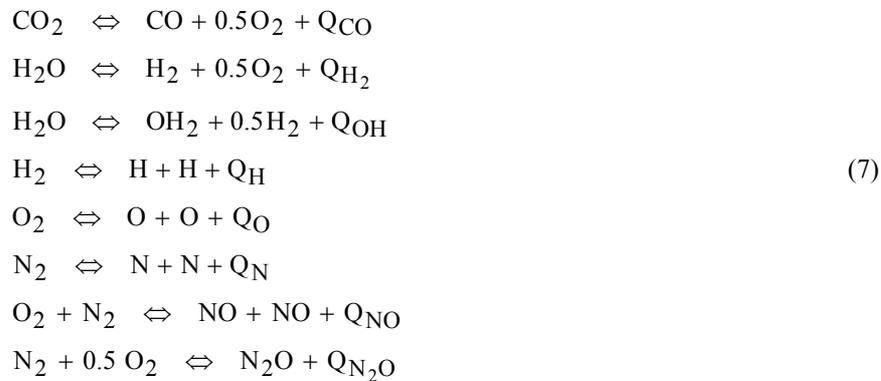
Par contre la quatrième réaction contribue plus fortement à la formation des NO_x dans un mélange pauvre que dans un mélange riche (lignes 3, 4 et 5 du tableau); elle est respectivement de 22 % et 2.7 %.

La contribution des réactions 5, 6 et 7 est plus importante pour le cas pauvre que pour le cas riche (lignes 6, 7 et 8 du tableau).

5. MODE DE CALCUL

On suppose que dans le système considéré, le processus de combustion est terminé, l'équilibre chimique est établi. Donc, la loi de conservation de masse, la loi d'action de masse et la loi de Dalton déterminent complètement le système.

Après l'achèvement du processus de combustion, l'équilibre chimique entre les composants donne:



Les constantes d'équilibre de ces réactions sont données par:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \left(\frac{n_2 \cdot \sqrt{n_7}}{n_2} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{P}{n_t} \right)^{-0.5} & K_2 &= \frac{n_4 \cdot \sqrt{n_7}}{n_3} \cdot \left(\frac{P}{n_t} \right)^{-0.5} \\
 K_3 &= \frac{n_6 \cdot \sqrt{n_4}}{n_3} \cdot \left(\frac{P}{n_t} \right)^{-0.5} & K_4 &= \frac{n_5}{\sqrt{n_4}} \cdot \left(\frac{P}{n_t} \right)^{-0.5} \\
 K_5 &= \frac{n_8}{\sqrt{n_7}} \cdot \left(\frac{P}{n_t} \right)^{0.5} & K_6 &= \frac{n_9}{\sqrt{n_7 \cdot n_{10}}} \\
 K_7 &= \frac{n_{11}}{\sqrt{n_{10}}} \cdot \left(\frac{P}{n_t} \right)^{0.5} & K_8 &= \frac{n_{12}}{n_{10} \sqrt{n_7}} \cdot \left(\frac{P}{n_t} \right)^{-0.5}
 \end{aligned}$$

Où K_i - Constante d'équilibre de la réaction i et $n_t = \sum_{i=1}^{12} n_i$

$$K_1(T) = 3.4447 \times 10^{-7} \times T^{0.6885} \times \exp(289322 / RT)$$

$$K_2(T) = 24.142 \times 10^{-3} \times T^{0.2421} \times \exp(247410 / RT)$$

$$K_3(T) = 15.088 \times 10^{-4} \times T^{0.1118} \times \exp(288568 / RT)$$

$$K_4(T) = 13.1792 \times T^{0.4056} \times \exp(-218561 / RT)$$

$$K_5(T) = 156.6265 \times T^{0.2126} \times \exp(-249964 / RT)$$

$$K_6(T) = 6.0469 \times T^{0.0322} \times \exp(-91235 / RT)$$

$$K_7(T) = 79.8151 \times T^{0.2920} \times \exp(-475224 / RT)$$

$$K_8(T) = 3.7681 \times 10^{-6} \times T^{0.6125} \times \exp(-78339 / RT)$$

La quantité des NO_x formée est donnée par la résolution numérique de l'équation

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2(1-\beta^2) \cdot \left[\frac{R_{1e}}{\beta \cdot \frac{R_{1e}}{(R_{2e}+R_{3e})} + 1} + \frac{R_{4e}}{\frac{R_{4e}}{R_{5e}+R_{6e}+R_{7e}} + 1} + R_{8e} \right] \cdot \frac{N_s RT}{P} \quad (8)$$

où: P et T sont respectivement la pression et la température absolues, N_s le nombre total de moles des produits de la combustion, $[\text{NO}]$ le nombre de moles d'oxyde

d'azote, β le rapport entre la concentration réelle et équilibrée de l'oxyde d'azote et R_{ie} la vitesse de la réaction i à l'équilibre.

6. INFLUENCE DE L'AVANCE A L'ALLUMAGE

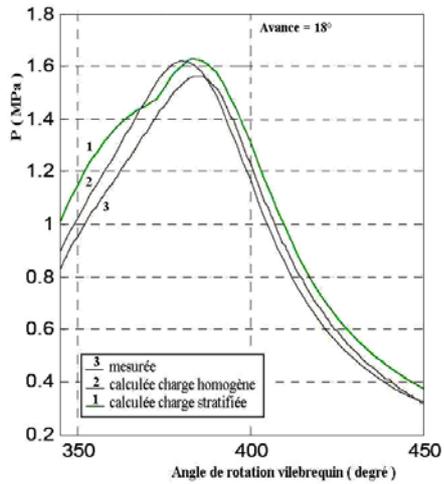


Fig. 4: Pression calculée pour les deux types de moteurs et celle mesurée, taux de stratification de 15 %, excès d'air de 1.17, $N = 1500$ tr/min

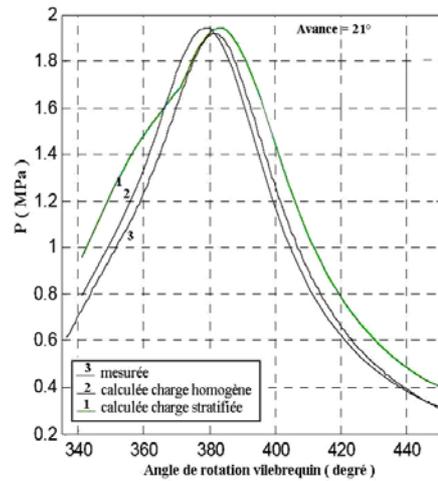


Fig. 5: Pression calculée pour les deux types de moteurs et celle mesurée, taux de stratification de 15 %, excès d'air de 1.17, $N = 1500$ tr/min

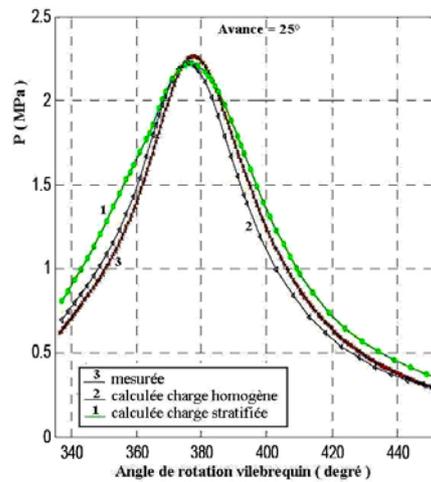


Fig. 6: Pression calculée pour les deux types de moteurs et celle mesurée, taux de stratification de 15 %, excès d'air de 1.17, $N = 1500$ tr/min

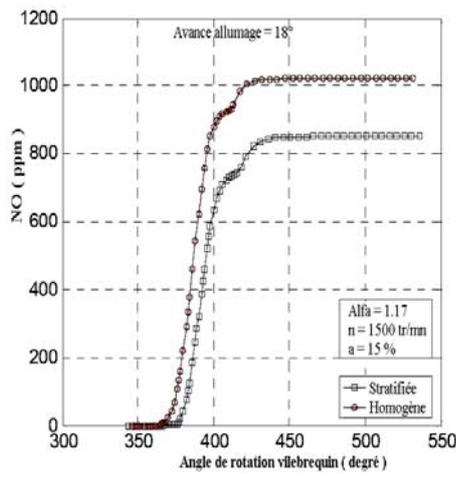


Fig. 7: Concentration des oxydes d'azote pour les deux types de moteur

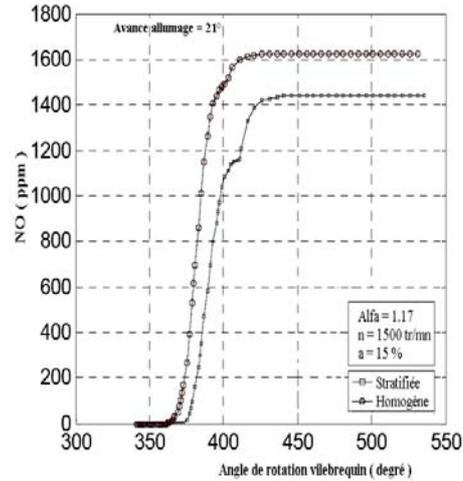


Fig. 8: Concentration des oxydes d'azote pour les deux types de moteur

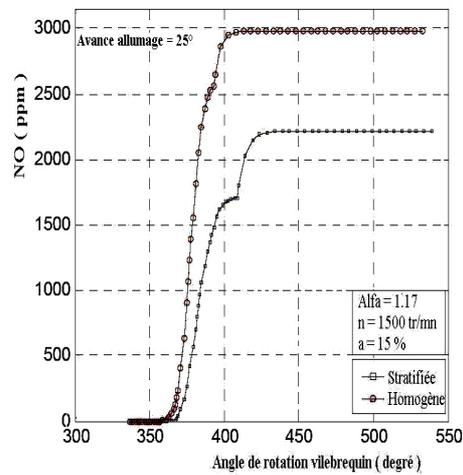


Fig. 9: Concentration des oxydes d'azote pour les deux types de moteur

Table 2: Résultats d'essai réalisés au L.M.E. (Polytechnique d'Orléans)

N (tr/min)	1500	1500	1500
Avance (°)	18	21	25
Pmax (MPa)	1.598	1.949	2.304
NOx (ppm)	1276	1873	3703
Excès d'air	1.17	1.17	1.17

On remarque, d'après les trois premières courbes de pressions et du tableau des résultats expérimentaux correspondant aux avances à l'allumage (18°, 21° et 25°), que

les trois pressions (charge homogène, charge stratifiée et P_{max} du moteur d'essai) sont approximativement égales. On constate aussi que la pression maximale augmente avec l'augmentation de l'avance à l'allumage. Ce qui confirme l'importance et la fiabilité du modèle appliqué.

En ce qui concerne la concentration d'oxyde d'azote, il est bien clair qu'elle est proportionnelle à l'angle d'avance à l'allumage, elle est de l'ordre de 1000, 1600 et 3000 ppm respectivement pour les avances de 18°, 21° et 25° pour un moteur à charge homogène et presque de même pour le moteur d'essai.

Les courbes des NO_x montrent la réduction dans les trois cas pour le moteur à charge stratifiée, elle est de l'ordre de 800, 1400 et 2400 ppm.

7. INFLUENCE DU TAUX DE STRATIFICATION

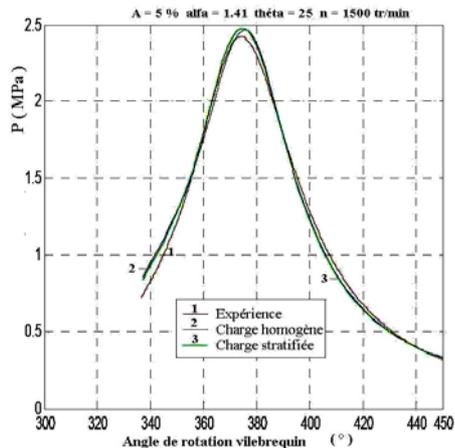


Fig. 10: $P = f(\text{ARV})$ $\alpha_1=1.41$, $A=5$

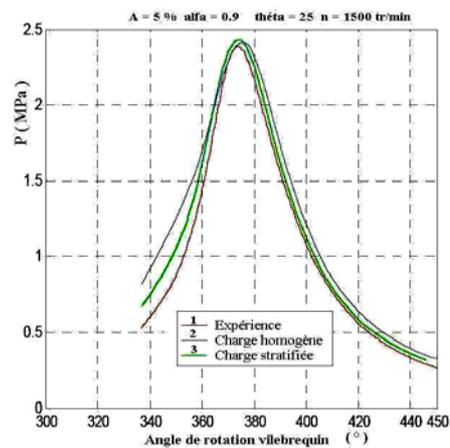


Fig. 11: $P = f(\text{ARV})$ $\alpha_2=0.9$, $A=5$

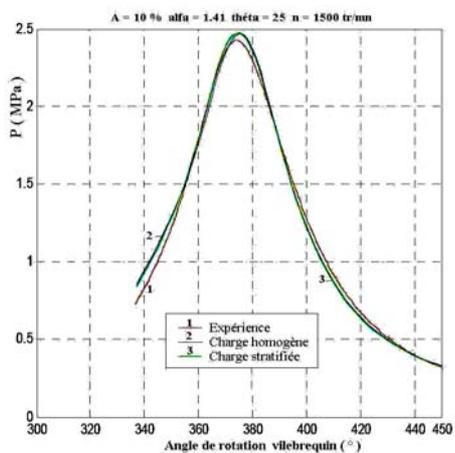


Fig. 12: $P = f(\text{ARV})$ $\alpha_1=1.41$, $A=10$

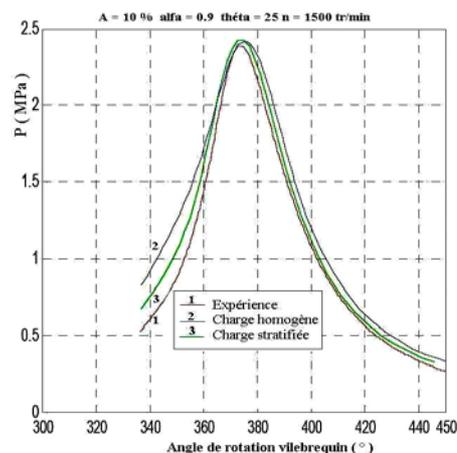
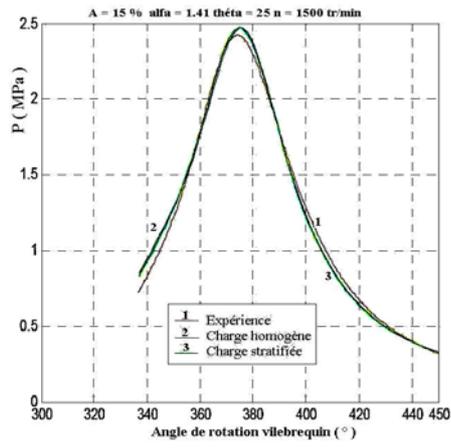
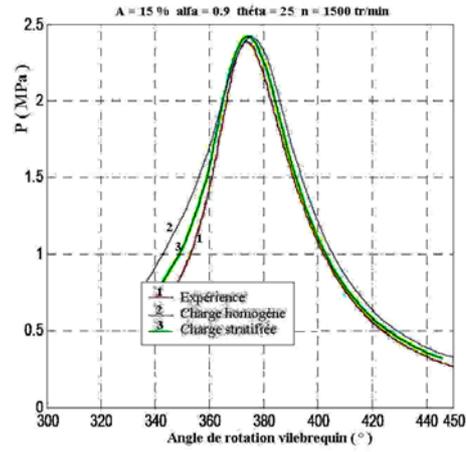
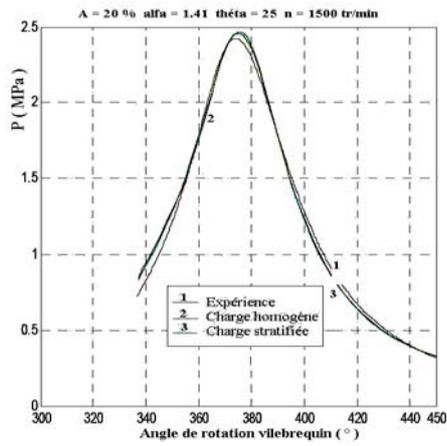
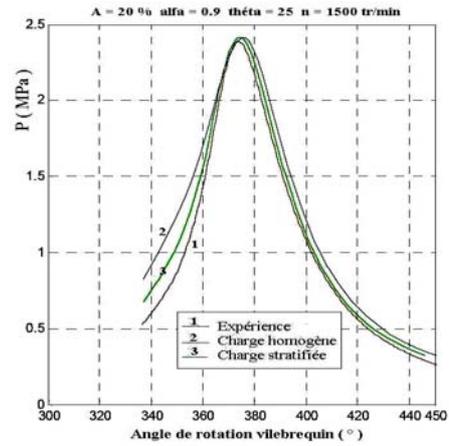
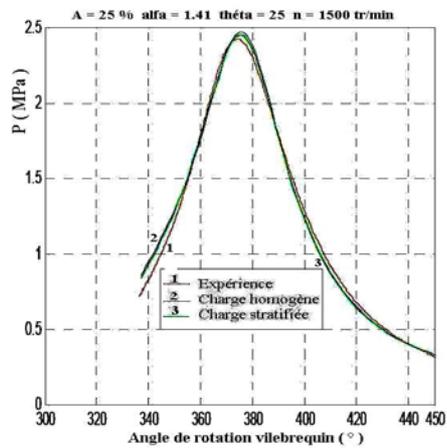
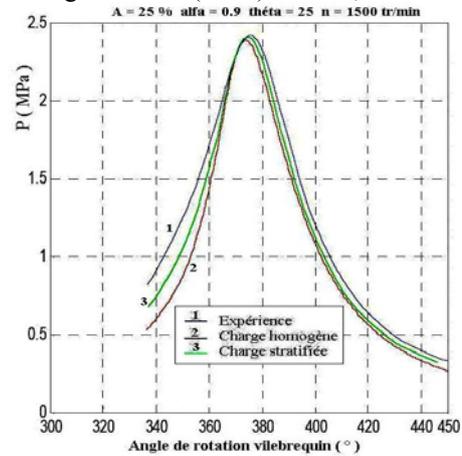


Fig. 13: $P = f(\text{ARV})$ $\alpha_2=0.9$, $A=10$

Fig. 14: $P = f(\text{ARV}) \alpha_1=1.41, A=15$ Fig. 15: $P = f(\text{ARV}) \alpha_2=0.9, A=15$ Fig. 16: $P = f(\text{ARV}) \alpha_1=1.41, A=20$ Fig. 17: $P = f(\text{ARV}) \alpha_2=0.9, A=20$ Fig. 18: $P = f(\text{ARV}) \alpha_1=1.41, A=25$ Fig. 19: $P = f(\text{ARV}) \alpha_2=0.9, A=25$

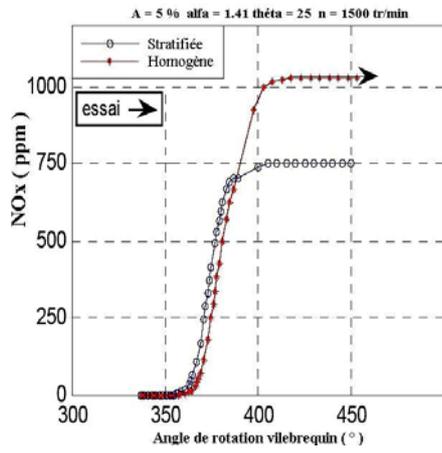


Fig. 20: NO_x = f(ARV), 3 Mot- A 5%

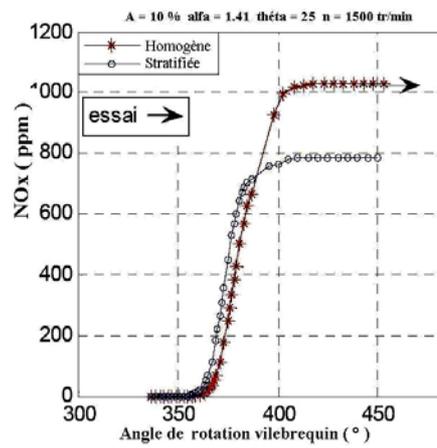


Fig. 21: NO_x = f(ARV), 3 Mot- A 10%

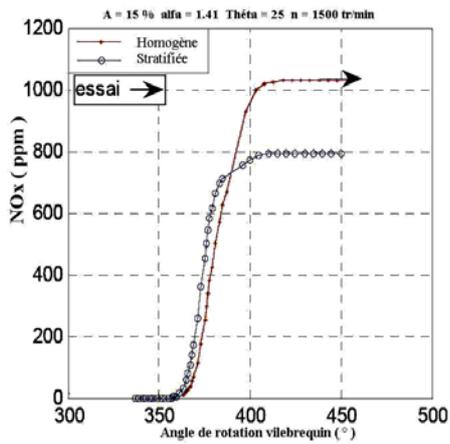


Fig. 22: NO_x = f(ARV), 3 Mot- A 15%

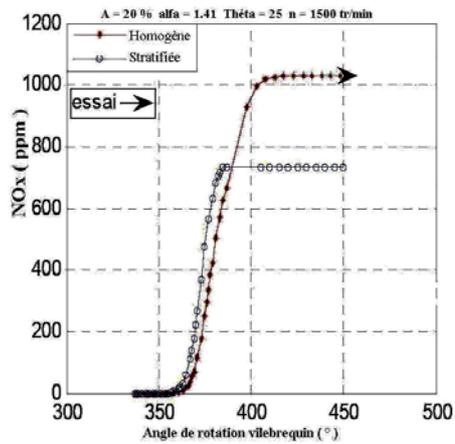


Fig. 23: NO_x = f(ARV), 3 Mot- A 20%

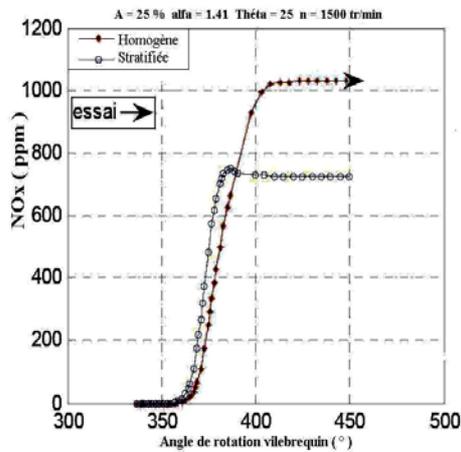


Fig. 24: NO_x = f(ARV), 3 Mot- A 25%

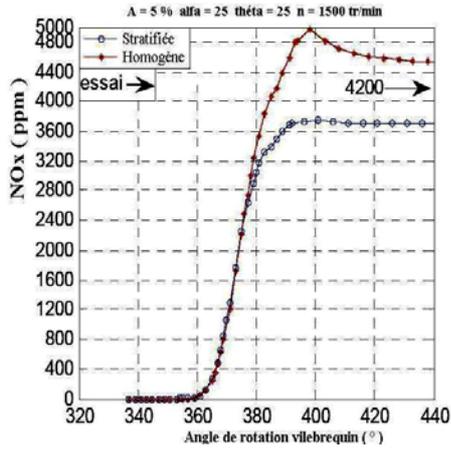


Fig. 25: NOx = f (ARV), 3 Mot- A 5%

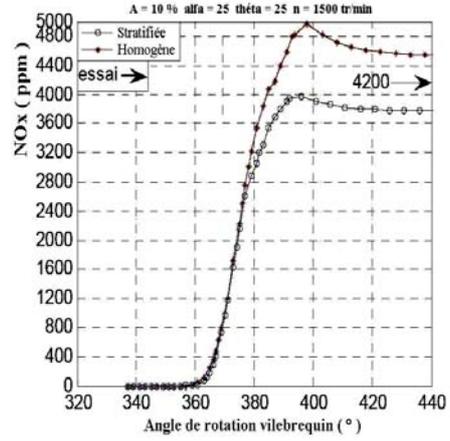


Fig. 26: NOx = f (ARV), 3 Mot- A 10%

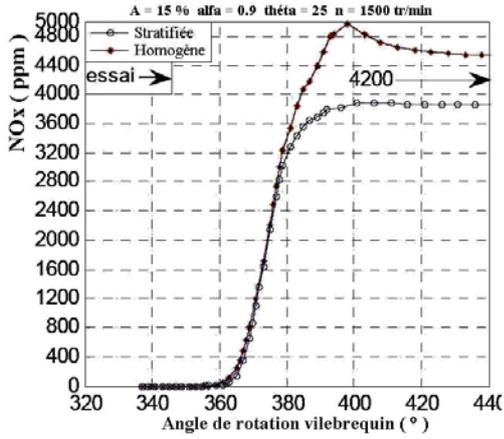


Fig. 27: NOx = f (ARV), 3 Mot- A 15%

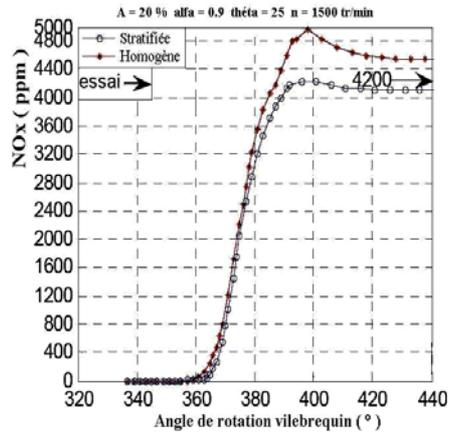


Fig. 28: NOx = f (ARV), 3 Mot- A 20%

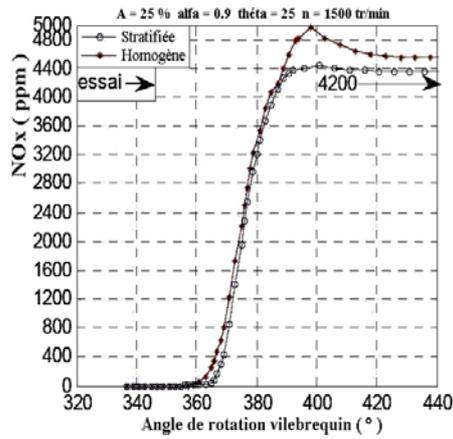


Fig. 29: NOx = f (ARV), 3 Mot- A 25%

Deux cas de mélange ont fait l'objet de cette étude, l'un riche de coefficient d'excès d'air $\alpha_1 = 0.9$, le deuxième pauvre de coefficient d'excès d'air $\alpha_2 = 1.41$. Pour chaque cas, le taux de stratification 'A' a varié de 5 % jusqu'à 25 %, on remarque d'après les dix premières figures, représentant les variations de la pression des trois moteurs respectivement, à charge homogène, à charge stratifiée et d'essai, en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin, que toutes les courbes sont presque superposées. Ce qui confirme la qualité du modèle appliqué.

Concernant les dix dernières figures représentant les deux courbes de la variation des concentrations des NO_x en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin relatives aux moteurs à charge homogène et à charge stratifiée, ainsi que la valeur de la concentration des NO_x dégagée par le moteur d'essai (représentée par une flèche), on remarque, d'une part l'influence du coefficient d'excès d'air (inverse de la richesse) du mélange sur la formation des NO_x, elle est de l'ordre de 4000 ppm pour le cas riche, mais ne dépassant pas les 1030 ppm pour le cas pauvre.

D'autre part, la grande influence du taux de stratification sur la réduction de la quantité des NO_x formée dans un moteur fonctionnant en mélange pauvre (Fig. 20, 21, 22, 23 et 24), elle ne dépasse pas les 800 ppm pour le moteur stratifié et atteint 1030 ppm pour une charge homogène, les calculs montrent qu'au-delà d'un taux de stratification de 15 % la puissance du moteur devient relativement faible; pour un moteur fonctionnant en mélange riche, les courbes des figures 25, 26, 27, 28 et 29 montrent que la concentration des NO_x du moteur stratifié est plus faible que celle du moteur homogène, au-delà d'un taux de 20 % les calculs sont sans importance.

4. CONCLUSION

Après avoir effectué le calcul cinétique des gaz, malgré sa forte influence sur la formation des oxydes d'azote, le mécanisme de Zeldovich est insuffisant. La raison qui exige de le compléter par d'autres réactions.

La concentration des NO_x est assez forte dans les zones qui brûlent en premier lieu à cause de leurs températures élevées.

Nous pouvons affirmer que si l'on pouvait réaliser, dans deux parties distinctes d'un même moteur, deux phases de combustion successives dont la première alimentée en mélange très riche de coefficient d'excès d'air local α_1 , et la seconde en mélange suffisamment pauvre formé d'air et des gaz brûlés provenant de la première combustion de coefficient d'excès d'air local α_2 .

On devrait obtenir à la fois une économie de combustible (surtout s'il s'agit d'un carburant de haute qualité) et une réduction considérable des oxydes d'azote au sein des gaz rejetés dans l'atmosphère.

Caractéristiques géométriques du moteur d'essai

Taux de compression	10,1
Alésage	88 mm
Course	82 mm
Cylindrée unitaire	0,498481 litres
Longueur de bielle	138 mm

REFERENCES

- [1] R. Mehdiev, '*Etude de la Combustion dans un Moteur à Charge Stratifiée*', 1982.
- [2] J.J. Wiebe, '*Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren*', VEB- Verlag Technik Berlin, 1970.
- [3] R.R. Raine, C.R. Stone and J. Could, '*Modelling of Nitrite Oxide Formation in Spark Ignition Engines with a Multizone Burned Gas*', Combustion and Flame, Vol. 102, N°3, pp. 241 – 255, 1995.
- [4] A.G. Gaydon and H.G. Wolfhard, '*Flames, Their Structure, Radiation and Temperature*', Chapman and Hall, Londres, 1960.
- [5] B. Lewis and Von Elbe, '*Combustion, Flames and Explosion of Gases*', Document, Bibliothèque Royale, Belgique, 1961.
- [6] F.S. Dainton, '*Chain Reactions*', Revue S.A.E, N°15230, 1956.
- [7] N.N. Semenov, '*Some Problems of Chemical Kinetics and Reactivity*', Editions de Moscou and Princeton University Press, 1958.
- [8] N.N. Semenov, '*Some Problems of Chemical Kinetics Theory of Gases*', Document IFP, N°415236, 1958.
- [9] A.R. Sadiq Al Baghdadi Maher and A.K. Shahad Al Janabi Haroun, '*A Prediction Study of a Spark Ignition Supercharged Hydrogen Engine*', Energy Conversion and Management, Vol. 44, N°20, pp. 3143 – 3150, 2003.
- [10] C.D. Rakopoulos, D.C. Rakopoulos and D.C. Kyritsis, '*Development and validation of a Comprehensive Two-Zone Model for Combustion and Emissions Formation in a Diesel Engine*', International Journal of Energy Research, Vol.27, N°14, pp. 1221 - 1249, 2003.
- [11] F.N. Alasfour, '*NO_x Emission from a Spark ignition Engine using 30 % Iso-butanol-gasoline Blend: Part I- Preheating Inlet Air*', Applied Thermal Engineering, Vol. 18, N°5, pp. 245 - 256, 1998.