

Etude et Analyse de la Combustion Turbulente dans un Moteur Alimenté en Gaz Naturel

F. Harouadi et S. Boulahrouz*

Institut de Génie Mécanique, Centre Universitaire de Guelma, B.P 401, Guelma 24000

Institut des Sciences fondamentales, Centre Universitaire de Skikda, 21 000 Skikda

Résumé - *L'analyse aérodynamique de la combustion turbulente dans un moteur alimenté en gaz naturel, dépend fortement des caractéristiques de la turbulence et celles des flammes laminaires. La structure de la flamme turbulente à haut régime de fonctionnement du moteur est située entre la flamme plissée pour un mélange relativement riche, et celui de flammelettes avec formation de poches de gaz frais pour un mélange pauvre. Cette structure déchiquetée du front de flamme révèle le caractère instable de la combustion en mélange pauvre, et suggère une forte interaction entre la turbulence et la combustion dans les moteurs alimentés en gaz naturel.*

Abstract - *The aerodynamic analysis of the turbulent combustion inside the engine fuelled by natural gas, depend on the turbulence characteristics and the laminar flammes. The turbulent flamme structure at high regime of the engine is locateted between the plissed flamme for the rich mixture and the corruguated flamme with unburned gas for the lean mixture of air-natural gas. The corruguated flamme reveals the instability of the reaction with the lean mixture, and suggests a strong interaction between the turbulence and the combustion process in the engine fuelled by air- natural gas mixture.*

Mots clés : Moteurs à gaz - Combustion turbulente - Modélisation de la combustion.

1. INTRODUCTION

Dans la discussion courante concernant la pollution de l'air et l'économie de l'énergie, les moteurs à gaz naturel occupent une bonne position, due à la structure moléculaire du gaz naturel, les gaz d'échappement de ces moteurs contient de faibles quantités de suies, et environ 25% de moins de CO_2 en comparaison avec un moteur diesel du même rendement thermique. L'émission du NO_x et des hydrocarbures imbrûlés constitués principalement du méthane qui possède une faible réactivité dans la formation de l'ozone, et de l'autre part un pouvoir de contribution à l'effet de serre assez grands, peut être réduite en utilisant les catalyseurs d'oxydation.

L'utilisation des mélanges pauvres en gaz naturel comme carburants constitue une alternative avantageuse afin de réduire l'émission des polluants, augmenter le rendement thermique, et réduire au maximum la charge thermique supportée par les organes du moteur. Le principal inconvénient des mélange pauvre en gaz naturel est l'instabilité de la combustion, interprétée par des valeurs importantes du coefficient de variation de la pression effective moyenne indiquée.

Notre étude consiste a modéliser la flamme turbulente dans un moteur à allumage commandé alimenté en gaz naturel afin de déterminer la structure de la flamme et les caractéristiques de la turbulence en mélange pauvre. Le but du travail est de comprendre l'interaction entre la

turbulence et la combustion et d'expliquer les sources et les causes majeures d'instabilités du moteur.

On a basé cette étude semi-expérimentale sur des mesures menées sur un moteur diesel à 6 cylindres suralimenté et refroidi d'origine, transformé en moteur à allumage commandé, doté d'une chaîne de mesure et d'acquisition de données. Sur le plan théorique on a adopté certains modèles pour la détermination de certaines grandeurs comme : l'intensité de la turbulence, l'échelle intégrale, et les propriétés thermodynamiques des gaz dans le cylindre moteur pendant la phase de combustion.

2. DONNEES EXPERIMENTALES

Notre modèle aérodynamique présenté ici est basé sur des mesures réalisées sur un moteur à allumage commandé alimenté au gaz naturel comprimé. ce moteur est dérivé d'un Diesel R.V.I de type 062045, dont le taux de compression a été ramené à 12,5, et les culasses modifiées pour recevoir un système d'allumage par étincelle électrique. l'utilisation d'une suralimentation adaptée a permis d'obtenir une puissance effective de 185 kw, avec une carburation très pauvre du mélange air-gaz naturel, au voisinage de l'extinction.

Le moteur est placé sur un banc d'essais permettant une mise en charge aisée. il est possible de contrôler, et mesurer en permanence les différents paramètres macroscopiques comme : couple ou charge, régime de rotation, richesse du mélange, avance à l'allumage.

Le système de mesure comporte trois types de relevés :

- Mesures lentes (Couple, régime, Température, Pression, débits, ...)
- Mesures rapides (Pression cylindre tous les 0.2 degrés vilebrequin) figure (1)
- Analyse des gaz d'échappements en continu (O₂, CO, CO₂, HC, NO, NO_x)

La campagne d'essais ayant servi comme données expérimentales de notre modèle a été menée en contrôlant principalement les paramètres suivants :

- Régime de 1200 ou 2000 tours/mn
- Couple de 300, ou 900 N.m
- Richesse de 0.62 à 0.72

3. DONNEES THEORIQUES

Afin de déterminer le régime et la structure de la flamme turbulente, ainsi que les caractéristiques de la turbulence et de la combustion par le modèle aérodynamique, nous avons besoins de connaître deux types de données :

- Les caractéristiques thermodynamiques des gaz enfermés dans le cylindre.
- . Les caractéristiques essentielles de la turbulence (intensité de la turbulence, échelle intégrale).

Pour cela nous adoptons en premier un modèle thermodynamique à deux zones de combustion (gaz frais et de gaz brûlés) [1], [2], [3] . Ce modèle donne une meilleure estimation de toutes les caractéristiques thermodynamiques (masses relatives, chaleurs spécifiques, températures, etc.) qui seront utiles pour notre modélisation aérodynamique de la combustion. Pour l'analyse aérodynamique du comportement de la flamme au sein de la chambre de combustion, nous avons élaboré un modèle aérodynamique basé sur des données numérique et

des résultats de la visualisation de la flamme turbulente [4 - 6] qui détermine l'échelle intégrale en fonction des paramètres du mélange frais à l'admission, et de la géométrie de la soupape d'admission. Enfin nous déterminons l'intensité de la turbulence en fonction des vitesses laminaire et turbulente de la flamme (calculées par le modèle aérodynamique) en utilisant la relation linéaire de Damköhler, et l'une des approches théoriques de la combustion turbulente [7, 8].

4. DEVELOPPEMENT DU MODELE AERODYNAMIQUE

4.1. Détermination de la vitesse laminaire de propagation du front de flamme

En régime permanent la température et la composition chimique en chaque point du front de flamme sont constantes dans le temps; il est donc possible d'écrire des équations différentielles indépendantes de la variable temporelle relatives à la température et à chacune des espèces chimiques initiales, finales ou transitoires présentes dans la zone de réaction. A cette effet nous introduisons quelques hypothèses simplificatrices qui sont généralement acceptées :

- Gaz parfait
- Flamme plane
- Flamme isobare
- Flux de diffusion moléculaire donné par la loi de Fick
- Diffusion thermique est négligée par rapport à la diffusion moléculaire
- Flux conductif de chaleur donné par la loi de Fourier
- Effets visqueux négligés
- Flux radiatif négligé

On peut décrire classiquement la propagation d'une flamme sous les hypothèses mentionnées ci-dessus, par le système suivant d'équations différentielles :

$$\frac{1}{u} \left(1 \frac{dT}{dx} \right) - r u C_p \frac{dT}{dx} + w Q = 0$$

$$\frac{1}{u} \left(n D \frac{dY}{dx} \right) - \frac{1}{u} (n_j u) + w m = 0$$

$$P = \text{const}$$

$$r u = r_R u_R = r_p u_p$$

4.1.1. Théorie thermique "diffusionnelles "

La résolution du système d'équations différentielles de température et de concentration étant très complexe, les auteurs ont généralement proposés des approximations qui permettent de trouver une solution approchée. La plupart des théories ont pour cette raison certains points communs et on peut les classer d'après l'équation retenue. Celles qui considèrent l'équation de température complétée par une hypothèse concernant la vitesse de réaction seront désignées par

le terme général de *théories thermiques*. Mais il est également possible de tenter de résoudre l'équation de diffusion pour une espèce chimique privilégiée; les *théories* qui se placent à ce point de vue seront appelées *diffusionnelles*.

Nous venons de voir que la température locale était déterminée par la relation suivante

$$\frac{d}{dx} \left(l \frac{dT}{dx} \right) - r C_p u \frac{dT}{dx} + w Q = 0 \quad (1)$$

Si la conductivité garde une valeur sensiblement constante dans le domaine de température considéré l'équation (1) se simplifie et l'on a donc :

$$l \frac{d^2 T}{dx^2} - r C_p u \frac{dT}{dx} + w Q = 0 \quad (2)$$

Il est commode d'écrire cette relation en coordonnées réduites q et X comme :

$$q = \frac{T - T_I}{T_c - T_I} \quad \text{Etant la température réduite}$$

$$X = \frac{x}{e_0} \quad \text{Etant la distance réduite}$$

On a alors :

$$\frac{d^2 q}{dX^2} - \frac{r C_p u e_0}{l} \frac{dq}{dX} + \frac{Q w e_0}{l (T_c - T_I)} = 0 \quad (3)$$

Donc l'équation (3) est une équation adimensionnelle.

Le coefficient sans dimension du deuxième terme est le nombre de Péclet P_e :

$$P_e = \frac{r C_p u e_0}{l}$$

Le troisième terme $f(w)$ être explicité par exemple si l'on exprime les concentrations en fractions molaires, et on peut considérer que :

$$(Y_{BI} - Y_{BF})(Q_B / m) = C_p (T_K - T_I)$$

On a alors :

$$f(w) = \frac{r Q_B u_B e_0^2}{m l (T_c - T_I)} = \frac{T_K - T_I}{T_c - T_I} \frac{r u C_p e_0}{l} \frac{e_0 w_B}{u_B (Y_{BI} - Y_{BF})} = q_K \cdot P_e \cdot W$$

Donc $f(w)$ est le produit de trois nombres sans dimensions :

q_K : est un nombre de température, P_e : est le nombre de Péclet, W : est un nombre cinétique, Q_B : désigne la chaleur de la réaction et T_K : désigne la température adiabatique de combustion. L'équation [3] devient donc :

$$\frac{d^2 q}{dX^2} - P_e \frac{dq}{dX} + q_K \cdot P_e \cdot W = 0 \quad (4)$$

Du fait que la vitesse laminaire apparaît comme une valeur propre de l'équation différentielle, il est donc inutile de résoudre entièrement cette dernière, pour cette raison U correspond dans de nombreuses théories à une relation très simple entre les coefficients de l'équation réduite. Etant donné que le nombre de Péclet P_e et le nombre cinétique sont les seuls à contenir la vitesse laminaire, la solution de l'équation thermique réduite s'écrira suivant les cas :

$$\begin{aligned} P_e &= f(\mathbf{q}) \\ f'(P_e, w) &= \mathbf{q} \\ w &= f''(\mathbf{q}) \end{aligned}$$

4.1.2. Théorie thermique de Mallard-Le Chatelier

Les premières théories thermiques reviennent à supposer que le nombre cinétique w est constant ou nul ; le nombre de Péclet P_e est alors le seul à contenir u et la vitesse laminaire est déterminée par une relation de type $P_e = f(\mathbf{q})$. l'une des théories de ce type est de Mallard-Le Chatelier. Ces auteurs ont basé leur théorie sur les suppositions suivantes

- La réaction chimique commence lorsque le mélange est porté à une température égale à sa température d'inflammation T_{INF} .
- Le flux de chaleur qui correspond à l'élévation température initiale T_I à la température d'inflammation T_{INF} , était du à la conduction thermique à partir de la zone de réaction est égal à de la température du mélange de la forme

$$I(T_f - T_{INF}) / e_0 .$$

On obtenait ainsi une relation du type :

$$r C_p u (T_{INF} - T_I) = I \frac{(T_f - T_{INF})}{e_0}$$

soit :

$$P_e = \frac{T_f - T_{INF}}{T_{INF} - T_I} = \frac{T_f - T_I}{T_{INF} - T_I} - 1$$

Sous forme condensée on obtient, en choisissant la température d'inflammation comme température caractéristique T_C :

$$P_e = \mathbf{q}_f - 1$$

On remarque que la solution de l'équation différentielle est de la forme

$$P_e = f(\mathbf{q}),$$

et la vitesse laminaire est donnée par :

$$u = I \frac{(T_f - T_{INF})}{e_0} \frac{1}{r C_p (T_{INF} - T_I)}$$

4.2. Détermination de la vitesse turbulente de propagation du front de flamme

Entre la vitesse de combustion df_B/dt et la vitesse turbulente u_T , il existe la relation suivante qui exprime le débit massique du mélange frais au travers le front de flamme :

$$M_T \cdot \frac{df_B}{dt} = M_F \cdot S_{FL} \cdot U_T$$

Ce qui donne :

$$U_T = \frac{M_T \cdot \frac{df_B}{dt}}{M_F \cdot S_{FL}}$$

avec : M_T : Masse totale enfermée par cylindre et par cycle, f_b : Fraction brûlée
 S_{FL} : Surface de la flamme

4.3. Détermination de l'intensité de la turbulence

plusieurs approches théoriques de la modélisation de la combustion turbulente donnent l'intensité de la turbulence en fonction des vitesses laminaire et turbulente de la flamme, parmi ces approche on a adopté la relation linéaire suivante de Damcöhler [8] :

$$u' = U_L + U_T$$

4.4. Détermination de l'échelle intégrale de la turbulence

Les modèles les plus connus de la détermination des paramètres de la turbulence dans les moteurs sont ceux qui relies ces paramètres aux conditions d'admission du mélange frais dans le cylindre moteur, pour notre modèle on utilise la formulation empirique de Borgnakkes [3] donnant l'échelle intégrale en fonction de la densité du mélange frais au début et au cours de la combustion par la relation :

$$L_I = L_0 \cdot \left(\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}_0}\right)^{1/3}$$

L_0 échelle intégrale au début de la combustion, donné en fonction de la hauteur du volume mort h par :

$$L_0 = 0.22h$$

\mathbf{r}, \mathbf{r}_0 : densité du mélange frais au début et pendant la phase de combustion

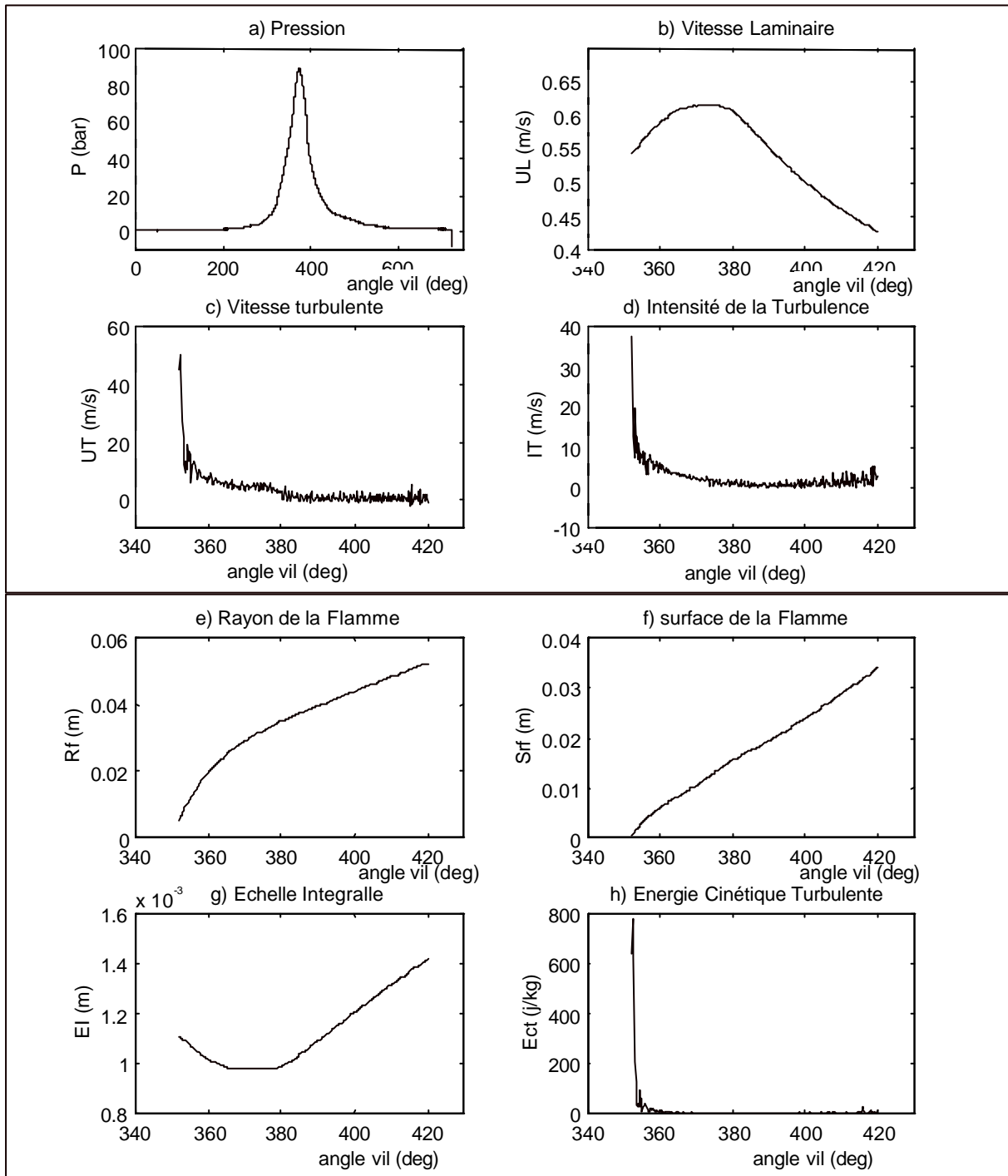


Fig 1. Vitesses de flamme et caractéristiques de la turbulence
 (régime = 2000 tr/mn, richesse = 0.7, couple = 900 N.m)

5. INTERPRETATIONS DES RESULTATS

L'analyse aérodynamique prenant en considération les propriétés des écoulements turbulents dans le moteur à gaz naturel, des flammes laminaire et turbulente a conduit aux interprétations suivantes :

- Pour le mélange relativement riche en gaz naturel, la vitesse laminaire est plus importante comparativement au mélange pauvre, elle augmente rapidement pour les 25 premiers degrés vilebrequin de la phase de combustion (à partir de l'allumage). Elle atteint une valeur de 62 cm/s correspondant à la pression maximale du cycle, puis elle diminue jusqu'à une valeur de 20cm/s à la fin de combustion suite à la détente des gaz. (figure 1b).
- Pour le mélange pauvre, la vitesse laminaire maximale est remarquablement inférieure par rapport au mélange riche (34cm/s seulement au lieu de 62cm pour un mélange riche). En effet, la vitesse laminaire dépend fortement de la richesse du mélange air-gaz naturel (figure 2b).
- La combustion a un caractère turbulent dès sa naissance, elle atteint des vitesses turbulentes très importantes pendant la période de début de combustion, environ 50m/s pour le mélange riche et 40m/s pour le mélange pauvre, mais elle décroît rapidement durant la phase de combustion (figure 1c et 2c).
- La turbulence dans la chambre de combustion du moteur indiquée par son intensité suit la même variation que celle de la vitesse turbulente. Elle subsiste et garde des valeurs importantes même pour le cas du mélange pauvre, mais elle est nettement élevée pour le mélange riche (figure 1d et figure 2d).
- La croissance de la flamme décrite par la surface et le rayon, est presque identique pour les deux mélanges (riche et pauvre) (figure 1e ,1f et figure 2e , 2f).
- Pour une vitesse du moteur de 2000 tr/mn, le régime de la flamme d'un mélange pauvre est de type flammelettes avec un front de flamme complètement déchiqueté, comprenant des péninsules et des poches de gaz frais (figure 3)

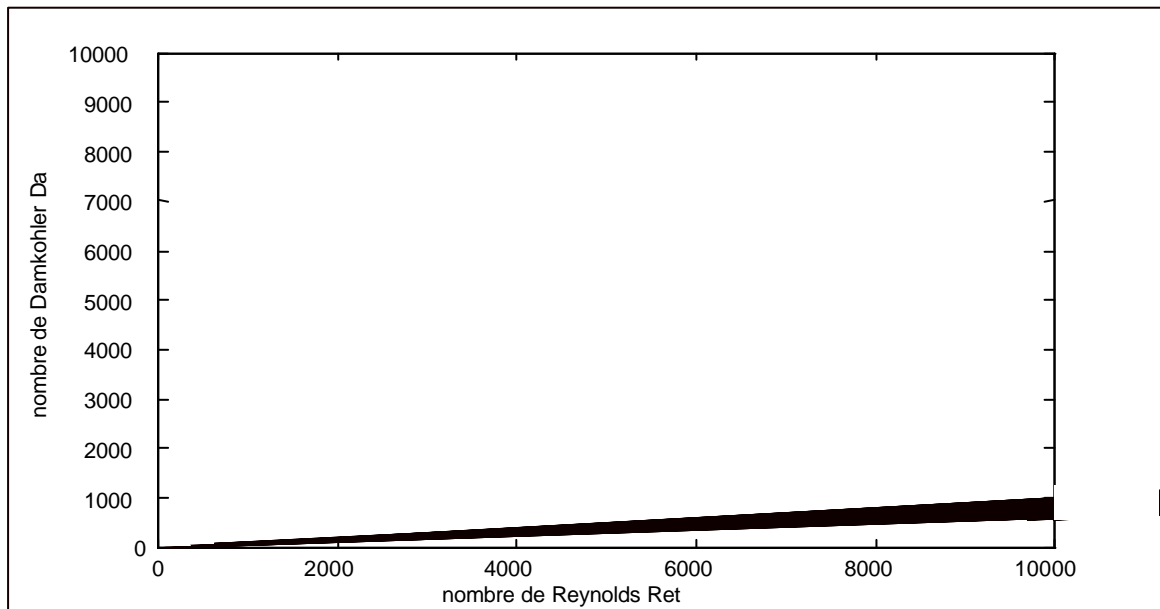


Fig 3: Régime de la flamme turbulente en mélange pauvre
(Régime = 2000 tr/mn, Richesse=0.6, Couple=300 N.m)

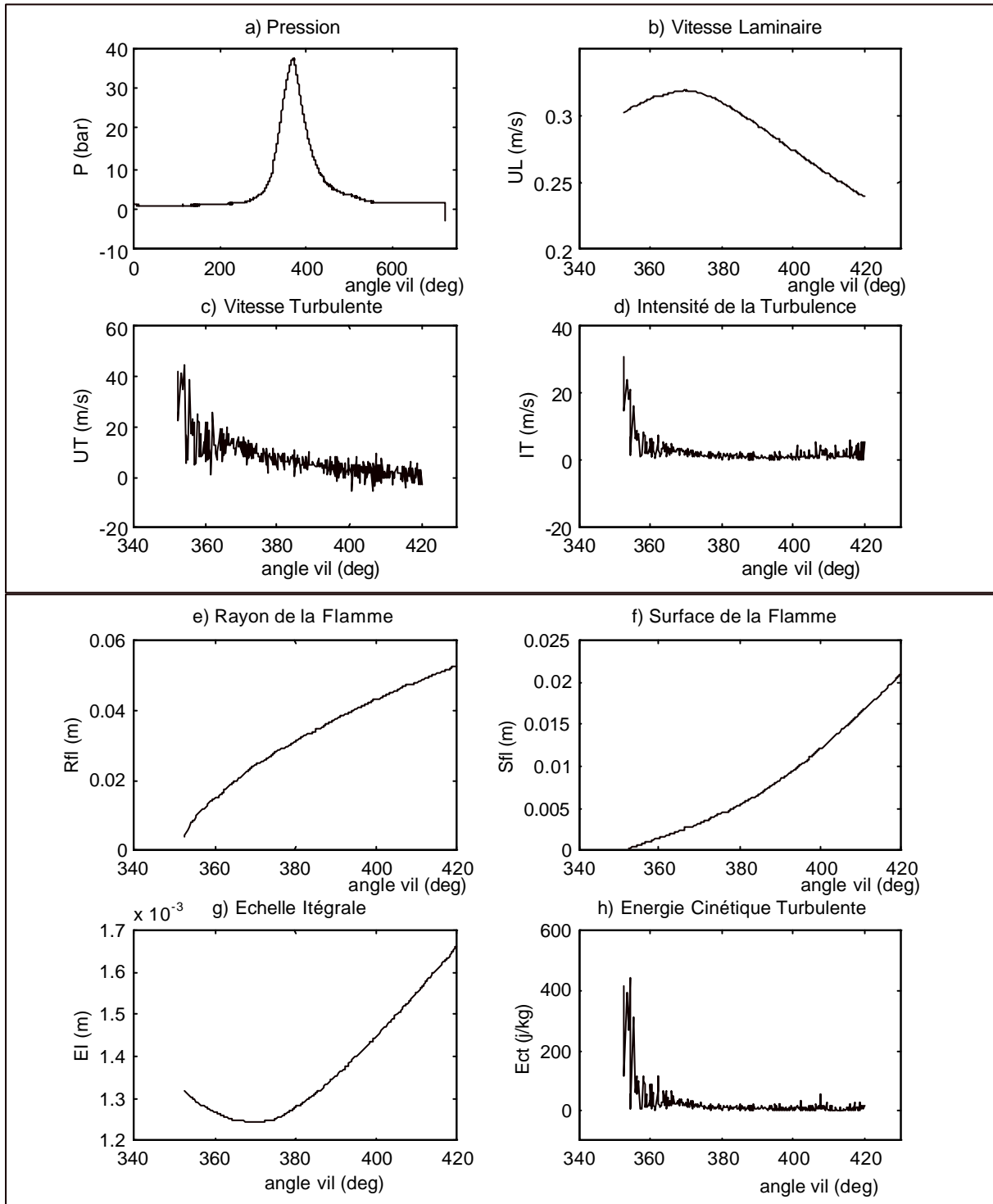


Fig 2. Vitesses de la flamme et Caractéristiques de la turbulence
 (Régime = 2000 tr/mn, Richesse = 0.6, couple = 300 N.m)

- . Pour les mêmes conditions de fonctionnement du moteur avec un mélange riche, la flamme montre un régime de flammes avec un front de flamme plissé, présentant une surface continue déformée par les mouvements des gaz (figure 4).

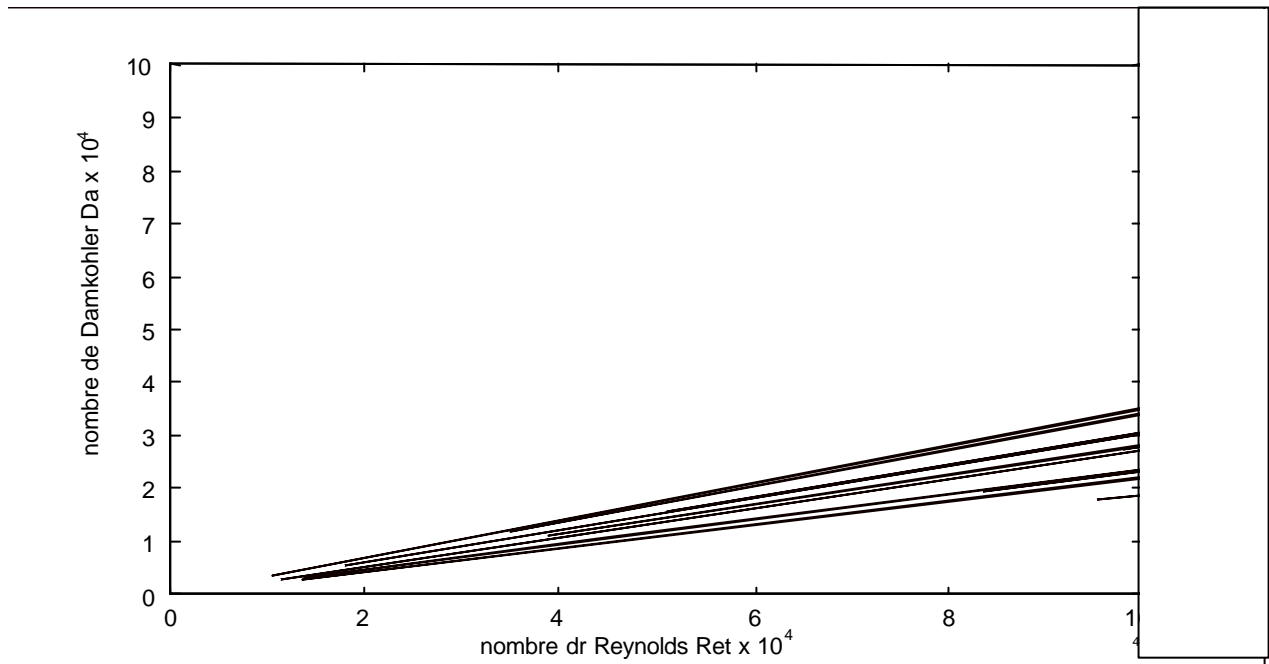


Fig 4: Régime de la flamme turbulente (Régime = 2000 tr/mn,
Richesse = 0.7, Couple = 900 N.m)

6. CONCLUSION

La modélisation aérodynamique de la flamme turbulente dans un moteur alimenté en gaz naturel, pour deux mélanges distincts (un mélange relativement riche, et un mélange pauvre) a montré que :

- Les vitesses laminaire et turbulente de la flamme dépendent fortement du niveau de turbulence (régime moteur) et de la richesse du mélange.
- La structure fine de la flamme turbulente à haut régime pour un mélange pauvre est constituée d'une flamme mince aux contours très déchiquetés et discontinus, cette caractéristique révèle le caractère instable de la combustion en mélange pauvre.
- La structure de la flamme turbulente à haut régime pour un mélange riche est constituée d'une flamme plissée en régime de flammes, sans formation de poches de gaz frais dans le front de flamme.

NOMENCLATURE

l	Conductivité thermique	r	Densité du mélange gazeux
w	Vitesse de combustion	Y	Concentration molaire
Q	Chaleur de réaction	Q_B	Chaleur de la réaction
n	Nombre de moles	P_e	Nombre de Péclet
C_p	Chaleur massique à pression constante	u	Vitesse laminaire
e_0	Nombre de température	W	Nombre cinétique
S_{FL}	Surface de la flamme	f_b	Fraction brûlée
	T_i		Température de référence du mélange initial
	T_c		Température caractéristique de zone de réaction
	q_k		Longueur liée à l'épaisseur du front de flamme
	T_k		Température adiabatique de combustion
	M_T		Masse totale enfermée par cylindre et par cycle

Indices**R** : Réactif**P** : Produit

REFERENCES

- [1] F. Harouadi, *Contribution à l'étude de la cinétique de la combustion turbulente en limite pauvre dans les moteurs alimentés au gaz naturel*, Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille I, France (1993).
- [2] F. Harouadi, N. Ouelaa, G. Searby, "Application du modèle thermodynamique à deux zones pour la reconstitution de la combustion dans les moteurs à gaz naturel". Troisièmes Journées Maghrébines sur la Mécanique 3^{ième} JMM'97, Guelma, 29-30 Avril 1997.
- [3] J. B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, Mcgraw-Hill, New York, 1988.
- [4] T. A. Baritau. , Visualisation de la combustion dans les moteurs à allumage commandé de l'initiation à la propagation, IFP, Reuil almaisson, France (1987).
- [5] F. G. Chmela et P. Kappus, "The new AVL high - turbulence lean - burned mixture gas engine", Seminar on gas engines and Co - generation, London (1993).
- [6] N. Peters, " A turbulent combustion ", Combustion and flamme 68, (1988) 23.
- [7] Ph. Arquès, Inflammation - combustion - pollution, Masson, Paris (1992).
- [8] A. Vantiggelen & Coll, Oxydation et combustion, Technip, Paris (1976).