

Détermination du taux de pyrolyse stationnaire le long d'une plaque de PMMA

Yannick PIZZO^{1-2*}, Jean-Louis CONSALVI², Philippe QUERRE¹, Mickael COUTIN¹, Laurent AUDOUIN¹, Bernard PORTERIE², Jose-Luis TORERO³

¹ IRSN, DPAM, Cadarache, 13108 Saint Paul lez Durance, France

² IUSTI/ UMR CNRS 6595, 5 rue E. Fermi, 13453 Marseille Cedex 13, France

³ BRE/Edinburgh, The University of Edinburgh, Edinburgh, EH9 3JL, UK

*Corresponding Author : Yannick PIZZO Tel (33) 491 106 935; Fax: (33) 491 106 969; email: yannick.pizzo@polytech.univ-mrs.fr ou yannick.pizzo@irsn.fr

Résumé - Cet article porte sur l'étude théorique, expérimentale et numérique du débit massique surfacique de pyrolyse à l'état stationnaire le long d'une plaque plane verticale de PMMA. La technique de mesure est basée sur la détermination à chaque instant de la position de la surface de régression du combustible. Une analyse théorique basée sur les hypothèses de couche limite laminaire réactive et un modèle numérique bidimensionnel reposant sur la résolution des équations complètes de Navier-Stokes sont utilisés. L'étude des débits massiques surfaciques de combustible permet de mettre en évidence des effets tridimensionnels qui se manifestent pour des largeurs de plaque inférieures à 5 cm. Enfin, la validité de la solution des équations issues de la théorie de la couche limite réactive est étudiée.

Nomenclature

B	Nombre de transfert de masse
C_p	Chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
f	Fonction de courant auto-similaire
g	accélération gravitationnelle, $m.s^{-2}$
Gr_x	Nombre de Grashof
J	Fonction de couplage
L_v	Chaleur latente de vaporisation, $J.kg^{-1}$
\dot{m}''	Débit massique surfacique de pyrolyse, $kg.m^{-2}.s^{-1}$
Q_p	Chaleur de combustion par unité massique d'oxygène consommée, $J.kg^{-1}$
Pr	Nombre de Prandtl
\dot{q}''	Densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$
t	Temps, s
T	Température, K
x	Distance à partir du bord d'attaque, m
y	Coordonnée normale à la surface de la plaque combustible, m
Y	Fraction massique
W	Masse molaire, $kg.mol^{-1}$

Lettres grecques

χ_r	Fraction rayonnée de la chaleur de combustion
δ	Déplacement de la surface de régression par rapport à sa position initiale, m
ν	Viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
ρ	Densité, $kg.m^{-3}$

Indices et exposants

$cond$	conduction dans le matériau
fl	Flamme
o, o_2	Oxygène
pyr	Pyrolyse
rf	Rayonnement de la flamme sur la surface combustible
rr	Re-rayonnement de la surface vers la flamme
s	Solide
w	Paroi
∞	Ambiant

Acronymes

LBL	Couche limite laminaire
-------	-------------------------

1. Introduction

Dans le domaine de la sécurité incendie, le débit massique surfacique de pyrolyse, ou taux de pyrolyse d'un matériau combustible soumis à un feu est un paramètre essentiel dans l'évaluation de la puissance du feu et donc de ses conséquences directes ou indirectes sur l'environnement. La présente étude est consacrée à la détermination expérimentale, analytique et numérique du taux de pyrolyse dans une configuration verticale.

2. Configuration de l'étude et dispositif expérimental

La présente étude porte sur la phase stationnaire de combustion d'une plaque plane verticale de PolyméthylMéthacrylate (PMMA) de 30cm de haut et de 3 cm d'épaisseur. Sa largeur varie entre 2,5 cm et 20 cm. Un système vidéo composé de trois caméras CCD permet de viser latéralement le combustible (Cf. fig. 1). Ce système vidéo permet de localiser l'interface combustible/gaz matérialisée par la limite de formation des bulles dans le matériau transparent. La face arrière de la plaque est éclairée par une lumière froide de sorte à accentuer le contraste optique entre la phase solide et la phase gazeuse [1]. La position de l'interface $\delta(x,t)$ est ensuite déterminée par le biais d'un traitement d'images spécifique basé sur la notion de niveau de gris seuil. Le débit massique surfacique de pyrolyse est alors obtenu à l'aide de la relation suivante :

$$\dot{m}''(x,t) = \rho_s \frac{d\delta}{dt} \approx \rho_s \frac{\delta(x,t + \Delta t) - \delta(x,t)}{\Delta t} \quad (1)$$

Où Δt est la différence entre deux instants.

3. Analyse théorique

En faisant les hypothèses de couches limite laminaire, de flamme mince, de nombre de Lewis égal à l'unité, et en négligeant la conduction dans le solide et le flux radiatif net à la surface du matériau [2]-[6], les équations de conservation de quantité de mouvement, d'énergie et d'espèces s'écrivent :

$$\begin{cases} f''' + 3ff'' - 2f'^2 = \begin{cases} -[1 + (1-J)B/\tau], \eta \leq \eta_{fl} \\ -[(1+r+B/\tau)J/r], \eta \geq \eta_{fl} \end{cases} \\ J'' + 3Pr f J' = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Avec les conditions aux limites :

$$\begin{aligned} f'(0) = 0, \quad f(0) = BJ'(0)/3Pr \quad \text{and} \quad J(0) = 1 \\ f'(\infty) = 0 \quad \text{and} \quad J(\infty) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Avec $\eta = (Gr_x^{1/4} / x\sqrt{2}) \int_0^y \frac{\rho}{\rho_\infty} dy$, $\tau = h_w / L_v$, $r = Y_{O_2\infty} v_f W_f / Y_{fw} v_{O_2} W_{O_2}$, et

$$Gr_x = \frac{gx^3(T_{pyr} - T_\infty)}{v_\infty^2 T_\infty} \text{ et } B = \frac{(1 - \chi_r) Y_{o\infty} Q_p - C_p (T_{pyr} - T_\infty)}{L_v}$$

B est le nombre de transfert de masse [7].

4. Simulations Numériques

Le modèle numérique bidimensionnel repose sur la résolution des équations complètes de Navier-Stokes associées à des modèles de fermeture concernant la turbulence, la combustion, la formation des suies et le rayonnement [10]. La pyrolyse est considérée comme un changement de phase.

5. Résultats et discussion

La figure 2 montre les débits massiques surfaciques de pyrolyse obtenus expérimentalement. Les résultats expérimentaux de Orloff et al. [8][9] sont également représentés sur cette figure. Les résultats montrent que les débits massiques surfaciques pour des plaques dont la largeur est supérieure à 2,5 cm sont confondus. Les effets tridimensionnels apparaissent de manière significative pour les plaques de 2,5 cm de large qui présentent des débits de pyrolyse plus faibles.

Pour les largeurs de plaques supérieures ou égales à 5 cm les débits massiques surfaciques de pyrolyse se superposent et peuvent être divisés en 4 parties : jusqu'à 4 cm au dessus du bord d'attaque, ils présentent un plateau ou augmentent très légèrement avec x. Ce comportement résulte de la formation d'une vallée près du bord d'attaque. Entre x = 4 cm et x = 10 cm, les débits massiques décroissent avec x, ce qui est à relier directement à l'augmentation de l'épaisseur de la couche limite. Dans cette partie les débits massiques surfaciques de pyrolyse présentent une pente en $x^{-0,35}$ (Cf. fig. 3) en bon accord avec ce que prédit la théorie LBL ($x^{-0,25}$).

Ces deux premières régions correspondent à la partie laminaire de l'écoulement. A x=10 cm les débits massiques surfaciques de pyrolyse présentent un changement de comportement correctement restitué par le modèle numérique (Cf. fig. 3). Ceci marque la fin de la partie laminaire de l'écoulement. Dans cette zone, le débit massique surfacique obtenu par la LBL théorie [5] [10] présente un bon accord avec les résultats expérimentaux et numériques.

Entre x = 10 cm et x = 18 cm les débits massiques sont relativement constants, ce qui correspond à la zone de transition laminaire/turbulent. A partir de x = 18cm, les débits massiques surfaciques augmentent très légèrement avec x, ce qui est en accord avec les observations de Orloff et al. [8][9]. Cet accroissement est dû à une augmentation des flux radiatifs et convectifs à la paroi [10] (Cf. fig. 4).

Les débits massiques surfaciques de pyrolyse résultent du bilan énergétique à la surface du matériau combustible. La figure 4 montre les flux total, convectif et radiatif à la surface du matériau combustible et conductif dans le matériau le long de la plaque combustible obtenu par le modèle numérique. Le flux convectif obtenu par la théorie de la couche limite laminaire réactive est également représenté sur la figure 4. Dans la partie laminaire, les flux convectifs simulés ($x^{-0,27}$) et issus de la théorie LBL présentent une décroissance en bon accord. Le flux

total simulé décroît en $x^{-0.35}$. Les différences de pentes entre les débits massiques surfaciques issus de la théorie LBL (-0.25) et ceux simulés et expérimentaux (-0.35) peuvent être attribués aux contributions non négligeables des flux rayonnés à la surface du matériau et conduit à travers celui-ci (Cf. fig. 4). Dans la partie turbulente de l'écoulement ($x > 18\text{cm}$), l'accroissement du débit massique de pyrolyse est lié à une augmentation des flux radiatifs et convectifs à la paroi [10] (Cf. fig. 4).

6. Conclusion

Ce travail présente une étude théorique, expérimentale et numérique détaillée du débit massique surfacique de pyrolyse à l'état stationnaire le long d'une plaque plane de PMMA en position verticale et soumise au feu. Les résultats expérimentaux montrent que les effets tridimensionnels peuvent être négligés pour des plaques dont les largeurs sont supérieures ou égales à 5 cm. Dans la partie laminaire de l'écoulement ($x < 0,1\text{ m}$) les résultats expérimentaux et numériques présentent une décroissance du débit massique surfacique en $x^{-0,35}$ en bon accord avec ce que prévoit la théorie LBL (décroissance en $x^{-0,25}$). Les résultats numériques suggèrent que la différence réside par la non prise en compte dans la théorie de la couche limite des flux radiatifs et conductifs au niveau de l'interface combustible / gaz. Ces flux ne peuvent vraisemblablement pas être négligés.

Références

- [1] Pizzo, Y., Consalvi, J.L., Querre, P., Coutin, M., Audouin, A., Porterie, B. and J.L. Torero (2007) Steady State Burning Rate of Vertically-Oriented PMMA Slabs – Part I: Experiments, Submitted.
- [2] Kim J. S., De Ris J., and William Kroesser F., "Laminar Free-Convective Burning of Fuel Surfaces", Proc. Combust. Instit., 12, 252.
- [3] Kosdon, F.J., Williams, F.A. & Buman, C., "Combustion of Vertical Cellulosic Cylinders in Air", Twelfth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Penn., pp. 252-264, 1968.
- [4] Annamalai, K. & Sibulkin, M., "Flame Spread Over Combustible Surfaces for Laminar Flow Systems – Part I: Excess Fuel and Heat Flux", Combustion Science and Technology, Vol. 19, pp. 167-183, 1979.
- [5] Pagni, P.J. & Shih, T.M., "Excess Pyrolyzate", Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Penn., pp. 1329-1343, 1976.
- [6] Annamalai K., Sibulkin M., "Flame Spread Over Combustible Surfaces for Laminar Flow Systems, Part II : Flame Heights and Fire Spread Rates", Combustion Science and Technology, 1979, Vol. 19, pp. 185-193.
- [7] Spalding D.B., "The Combustion of Liquid Fuel", Fuel 30:6-121, 1951.
- [8] Orloff L., De Ris J., Markstein G. H., "Upward Turbulent Fire Spread and Burning of Fuel Surface". 15th Symposium (int.) on Combustion, The Combustion Institute, 1974. p. 183-92.
- [9] Orloff L., Ashok T Mokac, Alpert R. L., "Burning of Large-Scale Vertical Surfaces", Proc. Combust. Instit., 15, 183.
- [10] Consalvi, J.L., Pizzo, Y., Kaiss, A., Porterie, B. and J.L. Torero (2007) Steady State Burning Rate of Vertically-Oriented PMMA Slabs – Part II: Theoretical and Numerical Analysis, Submitted.

Remerciements

Cette étude a été financée par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire et Electricité de France.

Figures

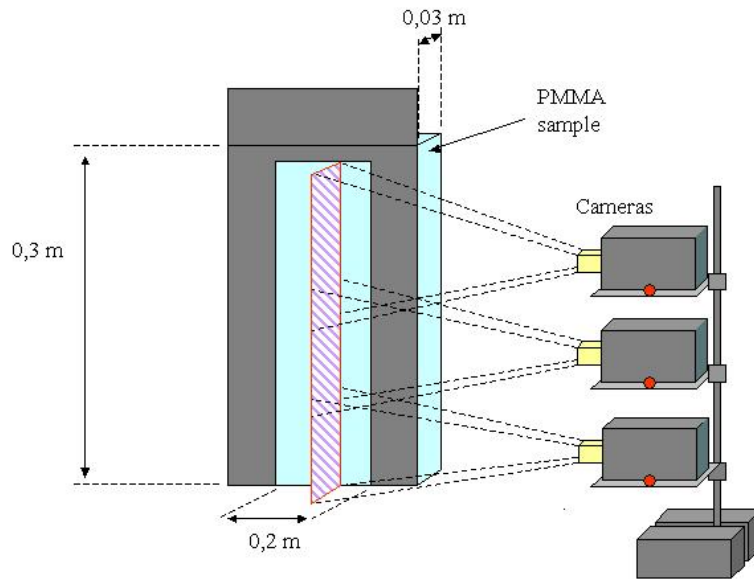


Figure 1: Dispositif expérimental et instrumentation.

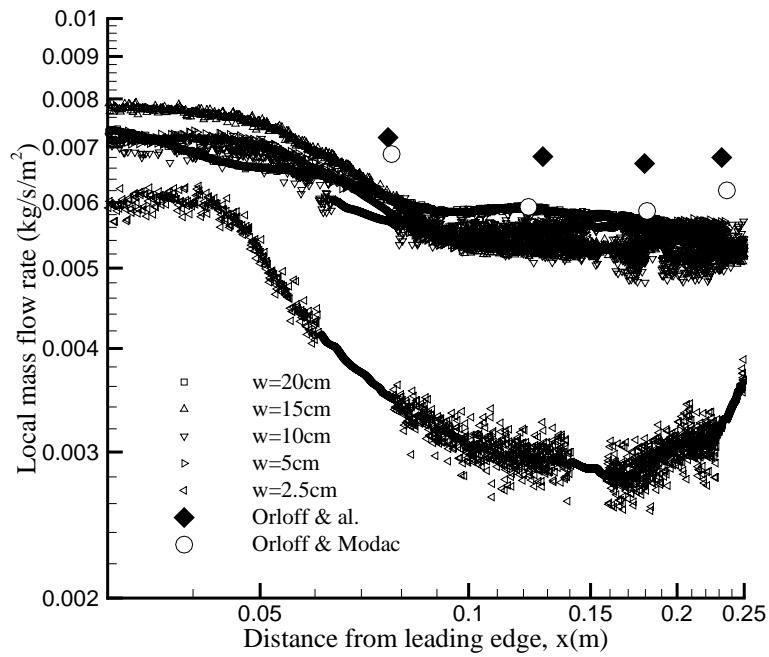


Figure 2: Débits massiques surfaciques de pyrolyse

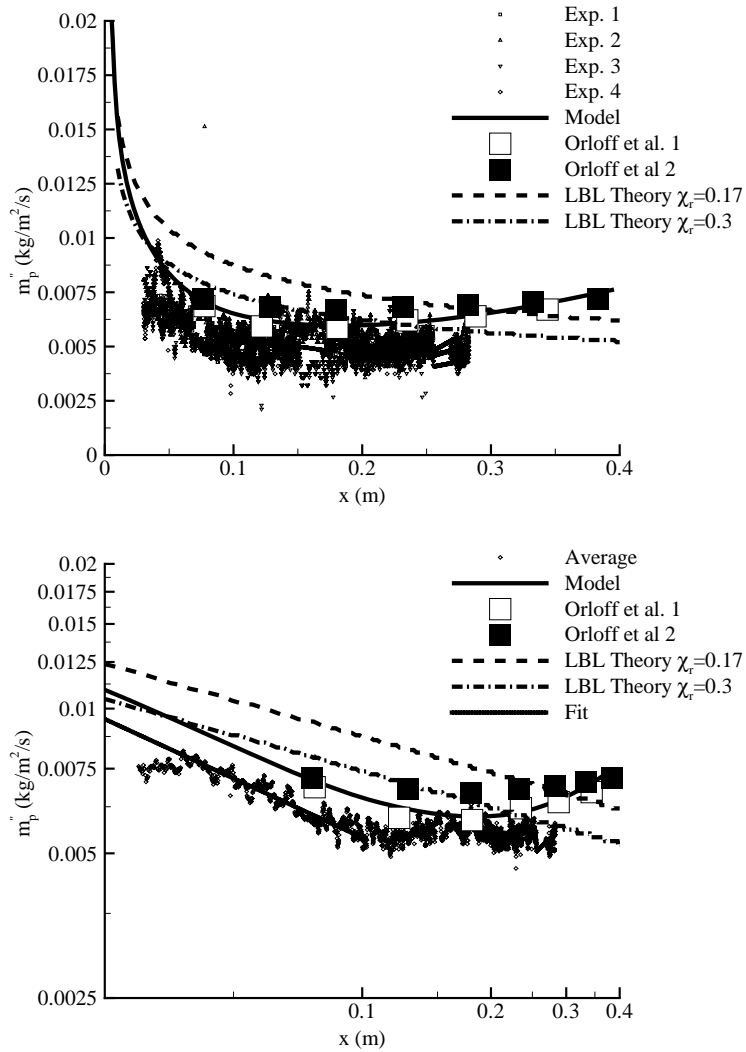


Figure 3: Débits massiques surfaciques de pyrolyse le long de la plaque de PMMA (plaque de 20 cm de large calcul SAFIR 2D)

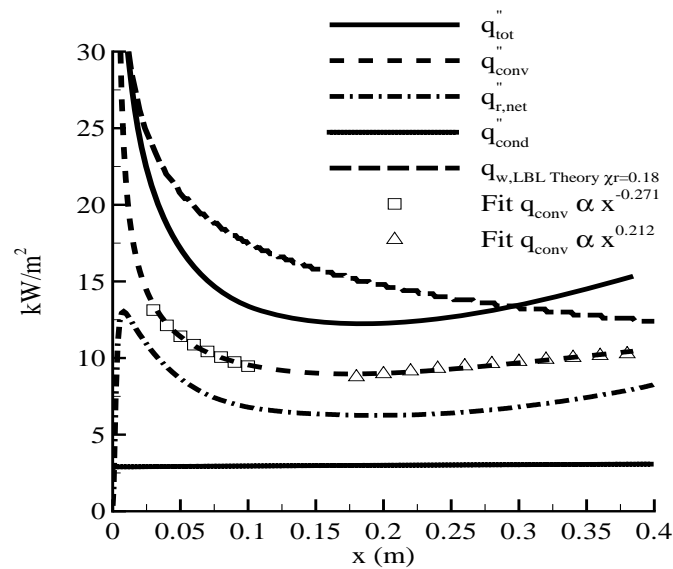


Figure 4: Flux thermiques le long de la plaque de PMMA