



## Débit de pyrolyse et flux de chaleur à la surface de plaques de PMMA – effet d'échelle

Maxime MENSE<sup>a,b</sup>, Yannick PIZZO<sup>a,b</sup>, Ahmed KACEM<sup>b,c</sup>, Christine LALLEMAND<sup>d</sup>, Gilles PARENT<sup>e</sup>, Pascal BOULET<sup>e</sup>, Jean-Claude LORAUD<sup>a</sup>, Bernard PORTERIE<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453 Marseille, France

<sup>b</sup>ETiC (IRSN/AMU/CNRS), 13453 Marseille, France.

<sup>c</sup>IRSN, DPAM, Cadarache, 13108 Saint-Paul-lez-Durance, France

<sup>d</sup>DGA Techniques Navales, avenue de la Tour Royale, BP 40195, 83050 Toulon cedex, France

<sup>e</sup>Nancy-Université, LEMTA/UMR CNRS 7563, Faculté des Sciences et Technologies, BP 70239, 54506 Vandœuvre, France

[maxime.mense@univ-amu.fr](mailto:maxime.mense@univ-amu.fr), [yannick.pizzo@univ-amu.fr](mailto:yannick.pizzo@univ-amu.fr), [ahmed.kacem@irsrn.fr](mailto:ahmed.kacem@irsrn.fr),  
[christine.lallemmand@intradef.gouv.fr](mailto:christine.lallemmand@intradef.gouv.fr), [pascal.boulet@univ-lorraine.fr](mailto:pascal.boulet@univ-lorraine.fr), [gilles.parent@univ-lorraine.fr](mailto:gilles.parent@univ-lorraine.fr), [jean-claude.loraud@univ-amu.fr](mailto:jean-claude.loraud@univ-amu.fr), [bernard.porterie@univ-amu.fr](mailto:bernard.porterie@univ-amu.fr).

**Résumé :** La présente étude a un double objectif : i) fournir un ensemble de données expérimentales pour la validation des modèles de dégradation de matériaux solides, ici le poly-méthyl-méthacrylate (PMMA) semi-transparent, et ii) proposer un modèle de pyrolyse adapté à ce matériau. Les échantillons considérés sont des plaques carrées de 10, 20 et 40 cm de côté et de 3 cm d'épaisseur, positionnées horizontalement. Un dispositif original utilisant un fluxmètre disposé à la surface de la plaque combustible recouvert ou non d'une pastille de ZnSe transparente au rayonnement infrarouge permet de quantifier les contributions radiatives et convectives au flux total reçu par la surface de l'échantillon. Les résultats obtenus montrent une augmentation du flux total avec la taille de l'échantillon (effet d'échelle) avec une contribution radiative quasi constante. L'application du modèle de pyrolyse utilisant les flux incidents mesurés permet d'obtenir, à l'aide d'un algorithme génétique, un jeu optimal de paramètres cinétiques (*i.e.* facteur pré-exponentiel, énergie d'activation et chaleur latente de pyrolyse) pour la plaque de 20 cm de côté. Ce même jeu de paramètres est ensuite utilisé pour simuler la dégradation des plaques de 10 et 40 cm de côté, conduisant à un très bon accord entre les évolutions temporelles prédites et mesurées de la position de la surface de régression du PMMA. Ce modèle de pyrolyse peut être implémenté dans un outil de simulation de l'incendie afin d'en améliorer le caractère prédictif.

**Mots clés :** pyrolyse, PMMA, modèle, paramètres cinétiques, flux radiatif, flux convectif

## 1. Introduction et contexte

Dans le domaine de la sécurité incendie, la capacité prédictive des outils de simulation est étroitement liée au calcul du couplage entre les phases solide et gazeuse. Le débit de pyrolyse du matériau dépend des flux thermiques qu'il reçoit, mais ces flux sont issus de la flamme qui est alimentée elle-même par les gaz de pyrolyse. Dans ce contexte, de nombreuses études, le plus souvent à l'échelle du laboratoire, s'attachent à mesurer ou estimer les débits massiques surfaciques issus du matériau et les flux mis en jeux lors de sa dégradation. Déjà en 1974 et 1976, Orloff et al. [1,2] s'intéressaient à la répartition des flux thermiques à la surface d'une plaque verticale de PMMA de grandes dimensions, montrant notamment une augmentation du flux total avec la hauteur. Quintiere et al. [3] se sont intéressés au flux émis par une flamme établie le long d'un échantillon de PMMA de 28.4 cm de haut positionné verticalement, obtenant des flux de 21.4 kW/m<sup>2</sup>, mais sous l'influence d'un flux externe. Kulkarni et al. [4] et Brehob et Kulkarni [5] ont mesuré des flux de l'ordre de 35 kW/m<sup>2</sup> pour des échantillons de 120 cm de haut et 30 cm de largeur, positionnés verticalement. Beaulieu et Dembsey [6] ont étudié l'effet de la teneur en oxygène sur la combustion de plaques de PMMA horizontales de 9 cm × 10.2 cm et 3.2 cm d'épaisseur. Ils ont obtenu un flux total de 20±3 kW/m<sup>2</sup>, avec des contributions radiative et convective de 12±3 et 8±3 kW/m<sup>2</sup>. Tsai et Wan [7] ont développé une expérimentation spécifique permettant d'étudier l'influence de parois latérales sur la propagation du feu et sur le flux issu de la flamme. Des échantillons de 6 et 20 mm d'épaisseur ont été utilisés, d'une hauteur de 1 m et présentant des largeurs comprises entre 10 et 90 cm. Cinq ans plus tard, Tsai [8] a poursuivi

cette étude en réalisant les mêmes mesures avec et sans parois latérales pour des plaques de 1 m de hauteur, 9 mm d'épaisseur avec des largeurs comprises entre 10 à 70 cm. Plus récemment, Gollner et al. [9,10] ont étudié l'effet de l'inclinaison de la surface sur la propagation du feu. Ils ont étudié des échantillons de 10 cm de large, 20 cm de hauteur et 1.27 cm d'épaisseur. Les flux thermiques au-dessus du front de pyrolyse ont été mesurés. Leventon et Stoliarov [11] ont mesuré le flux total issu de la flamme pendant la phase propagative le long d'une plaque de PMMA de 5 cm de large, 15 cm de hauteur et 5 mm d'épaisseur. Ils ont obtenu des flux compris entre 35 et 40 kW/m<sup>2</sup>. Lors d'une étude précédente, nous nous sommes intéressés aux flux de la flamme issue de la combustion stationnaire d'une plaque de PMMA semi-transparent de 20 cm de haut, 10 cm de large et 3 cm d'épaisseur et ce à 2.5, 5, 10 et 20 cm du bord d'attaque [12]. Des flux totaux compris entre 30.9 et 23.4 kW/m<sup>2</sup> ont été observés. Plus récemment, Singh et Gollner [13,14] ont étudié dans un premier temps la possibilité de corréler le débit massique local de pyrolyse au gradient local de température à la paroi, directement corréléable au flux convectif, en utilisant le nombre de transfert de masse et ils ont estimé les flux convectifs autour de 27.4-32.4 kW/m<sup>2</sup> et 13-15 kW/m<sup>2</sup> à 10 et 80 mm du bord d'attaque le long d'une plaque de PMMA en position verticale. Ces études témoignent de la nécessité d'estimer les différentes contributions au flux total incident. On s'attache ici à quantifier ces contributions pour des plaques de PMMA thermiquement épaisses de 10, 20 et 40 cm de côté positionnées horizontalement. Un autre objectif de ce travail est de proposer et valider un modèle de pyrolyse volumique du PMMA basé sur une loi d'Arrhénius d'ordre un dont les paramètres cinétiques (*i.e.* facteur pré-exponentiel, énergie d'activation et chaleur latente de pyrolyse) sont indépendants de l'échelle.

## 2. Dispositif expérimental

Les mesures ont porté sur la combustion de plaques carrées de PMMA semi-transparent de 10, 20 et 40 cm de côté et de 3 cm d'épaisseur, positionnées horizontalement. Une description succincte du dispositif est donnée ci-après. Pour plus de détail, le lecteur peut se référer à [12][12]. Les plaques sont recouvertes d'un masque en métal permettant de délimiter précisément la zone de pyrolyse et sont montées sur un support en aluminium placé sur une balance de précision (0.1g). Les faces latérales de l'échantillon ont été polies afin d'observer par transparence la présence de bulles et donc de suivre l'évolution de la surface de régression. Une camera CCD monochrome est utilisée pour obtenir une vue latérale de l'échantillon avec une résolution de 1392 × 1040 pixels, ce qui conduit à une taille réelle du pixel inférieure à 0.3 mm. La fréquence d'acquisition du système vidéo est fixée à 10 Hz (Figure 1). Un système d'éclairage à lumière froide de la face arrière permet d'augmenter le contraste entre le PMMA vierge et la zone bullée, conduisant à une détermination plus précise de la position de l'interface combustible/gaz. La lumière traverse la plaque avant que la pyrolyse commence et est ensuite diffusée par la zone bullée. Un traitement d'image spécifique a été développé de façon à déterminer systématiquement la position la plus profonde de la zone bullée [12].

L'inflammation des échantillons se fait en 60 s environ sous un flux de 40 kW/m<sup>2</sup> émis par un panneau rayonnant carré de 50 cm de côté et composé de céramiques chauffantes. Dès lors que l'échantillon est enflammé, le panneau radiant est retiré dans le but de ne pas influencer le processus de pyrolyse.

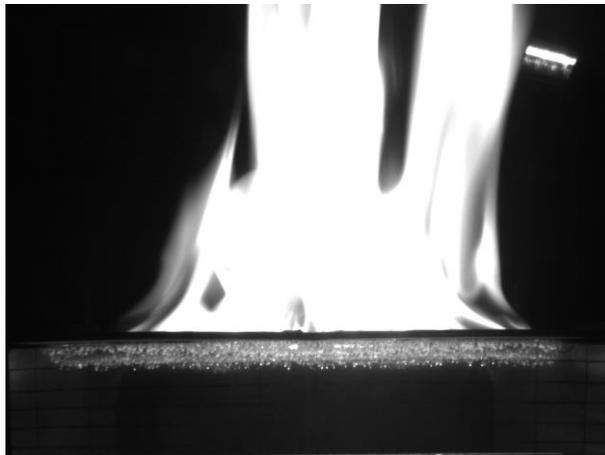
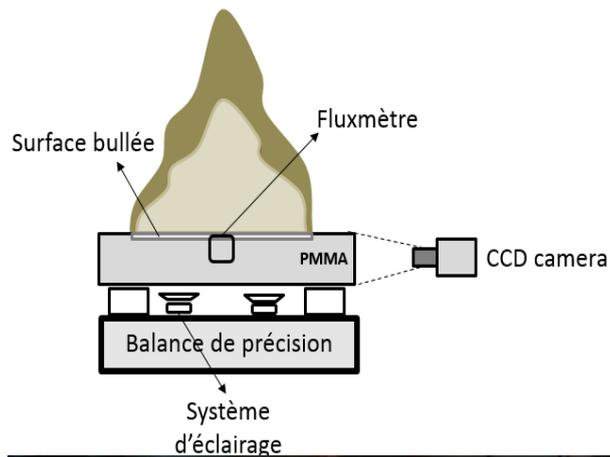


Figure 1 : de haut en bas : schéma du dispositif expérimental, vue générale et vue latérale montrant la zone bullée à l'intérieur de la plaque de PMMA.

Comme Beaulieu et Dembsey en 2008 [6] et plus récemment par Pizzo et al. [12], un fluxmètre refroidi (ici de la marque Medtherm) a été inséré à la surface de la plaque combustible pour la mesure du flux total incident. La mesure du flux radiatif seul est plus délicate. Dans le présent travail, une technique originale a été utilisée. Elle consiste à associer au fluxmètre total refroidi une pastille de ZnSe (Zinc-Sélénium). Cette technique permet, moyennant certaines corrections, de mesurer la contribution radiative et d'en déduire ensuite la contribution convective. Comme on le voit sur la Figure 2, le fluxmètre total refroidi est enchâssé dans un orifice parfaitement ajusté prévu à cet effet au centre de l'échantillon. La partie sensible du fluxmètre affleure la surface de la plaque combustible ce qui permet au capteur, compte tenu de son angle de vue supérieur à  $160^\circ$ , de mesurer la presque totalité du flux provenant de la flamme.

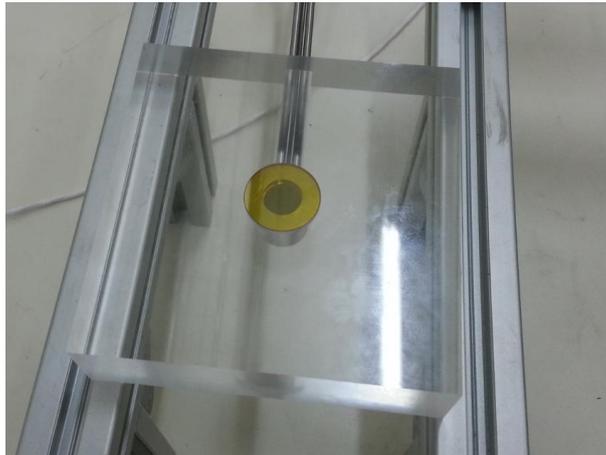
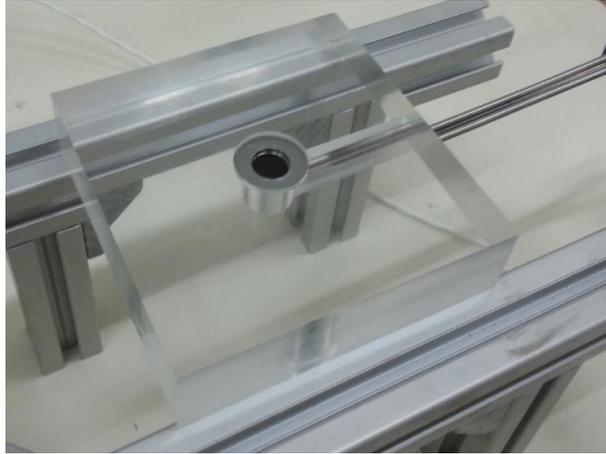


Figure 2 : Plaque de PMMA intégrant le fluxmètre total refroidi sans et avec la pastille ZnSe.

La pastille ZnSe (Zinc-Sélénium) a la propriété de transmettre 65% du flux radiatif incident et d'en réfléchir 35 %, sans rien absorber. Quand le capteur de flux total est équipé de la pastille ZnSe, il est totalement protégé du flux convectif issu de la flamme, et ne mesure par conséquent qu'un flux radiatif, représentant 65% du flux radiatif incident provenant de la flamme.

### 3. Résultats expérimentaux

Comme il a déjà été observé dans [12,15,16], 600 s après l'inflammation, la régression de la plaque de combustible se fait à vitesse constante, ce qui indique que la combustion est stationnaire. C'est lors de cette phase que l'ensemble des mesures est réalisé.

#### 3.1 Flux thermiques à la surface de la plaque combustible

Les évolutions temporelles, pour une phase stationnaire de 150 s, des flux radiatifs et totaux reçus par les plaques de 10, 20 et 40 cm de côté sont présentées sur la Figure 3. On observe que les flux de chaleur totaux et radiatifs augmentent avec la taille des échantillons.

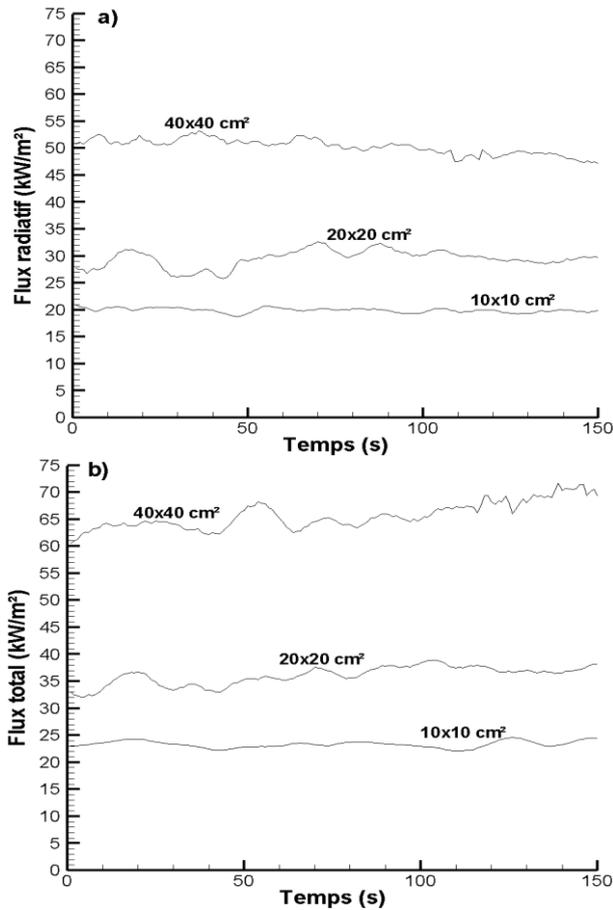


Figure 3 : Evolutions temporelles des flux radiatifs (a) et totaux (b) à la surface des plaques de 10, 20 et 40 cm de côté.

Le flux radiatif est de 20 kW/m<sup>2</sup> pour une plaque de 10 cm de côté, alors que le flux total est de 24 kW/m<sup>2</sup>, donnant un flux convectif de 4kW/m<sup>2</sup>. Ces valeurs sont à rapprocher de celles obtenues par Beaulieu and Dembsey [6] pour une plaque de PMMA noir 10 cm de diamètre, avec des flux radiatif et total de 12 ± 3 et 20 ± 3 kW/m<sup>2</sup>.

Pour la plaque de 40 cm de côté, la part radiative est de 50 kW/m<sup>2</sup> pour un flux total de 65 kW/m<sup>2</sup>.

L'ensemble des données est résumé dans le tableau 1.

Tableau 1 : Flux radiatifs et totaux reçus par des plaques de 10, 20 et 40 cm de côté. Le flux convectif est obtenu par différence entre le flux total et le flux radiatif.

Dimension de l'échantillon (côté en cm)	$q''_{rad}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$q''_{tot}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$q''_{conv}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$q''_{rad}/q''_{tot}$ (-)
10	20	24	4	0.83
20	30	37	7	0.81
40	50	65	15	0.77

Un résultat notable est que, pour les trois tailles d'échantillon, le rapport entre le flux radiatif et le flux total est quasiment constant.

### 3.2 Débit massique de pyrolyse

Les débits massiques surfaciques de pyrolyse sont obtenus par dérivation temporelle des évolutions des pertes de masses mesurées par la balance. La Figure 4 montre les débits surfaciques de pyrolyse pour les différentes tailles d'échantillon. On constate d'une part l'augmentation du débit surfacique de pyrolyse avec la taille de l'échantillon et, d'autre part, pour une taille donnée, une augmentation du débit au cours du temps. Des plaques de plus grandes tailles génèrent de plus grandes flammes et donc des flux thermiques incidents plus importants. En ce qui concerne l'augmentation du débit avec le temps, celle-ci peut être attribuée à l'accroissement de la surface

réelle de pyrolyse en cours d'essai, intégrant notamment des effets de bord [15]. La mesure de la surface de pyrolyse au cours du temps permettrait d'accéder au débit massique.

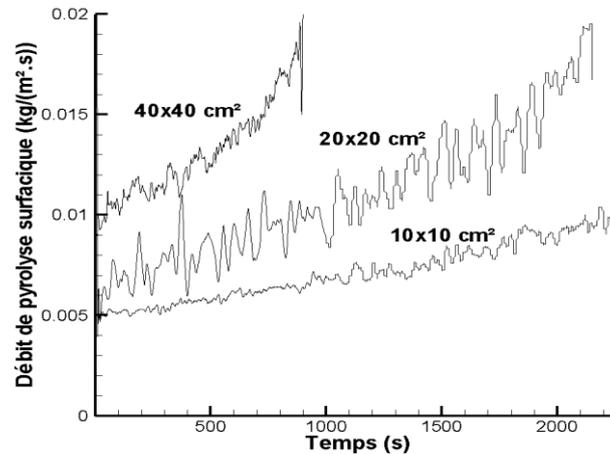


Figure 4 : Evolutions temporelles des débits de pyrolyse surfaciques pour les trois tailles d'échantillon.

La Figure 5 représente la coupe médiane d'un échantillon de 10 cm de côté après 2200 s de combustion. On constate que le creusement de la plaque est moins prononcé sur les bords de l'échantillon et que la surface de pyrolyse à cet instant est supérieure à la surface initiale. La projection de cette surface dans le plan de symétrie est supérieure d'environ 20%.



Figure 5 : Coupe d'un échantillon de 10 cm de côté après combustion.

La Figure 6 représente les évolutions temporelles de la position de l'interface combustible/gaz au centre de l'échantillon pour les plaques de 10, 20 et 40 cm de côté. Le comportement linéaire, quel que soit la dimension de l'échantillon, montre que la régression se fait à vitesse constante, traduisant un processus de combustion stationnaire [1,12]. Ainsi, pour une plaque de 10 cm de côté, la vitesse de régression est de l'ordre de 0.00583 mm/s et peut atteindre 0.0109 mm/s pour la plaque de 40 cm de côté. Cette grandeur directement mesurable est capitale puisqu'elle est proportionnelle au débit massique surfacique de pyrolyse par l'intermédiaire de la masse volumique de la phase condensée :

$$\dot{m}'' = \rho \dot{s}(t)$$

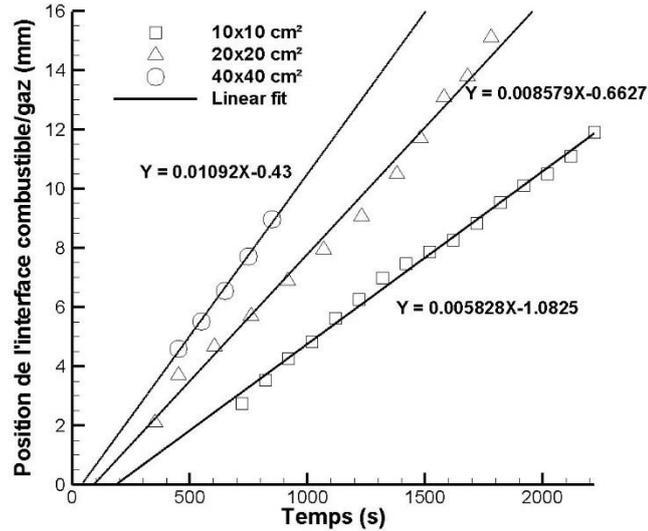


Figure 6 : Evolutions temporelles de la position de l'interface combustible / gaz pour les trois tailles d'échantillon.

## 4. Modélisation

### 4.1 Modèle de dégradation

Le problème physique, indiquant l'ensemble des flux impliqués à la surface du combustible, est schématisé sur la Figure 7.

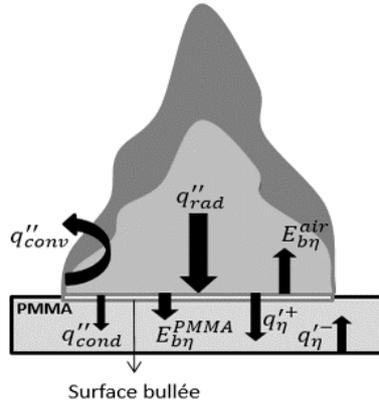


Figure 7 : Problème physique

La plaque de PMMA, positionnée horizontalement, est exposée à des flux radiatif et convectif provenant de la flamme. On suppose ici que la surface exposée est recouverte de suies. Elle émet comme un corps noir dans le PMMA ( $E''_{b\eta}^{PMMA}$ ) et vers l'extérieur ( $E''_{b\eta}^{air}$ ). A l'intérieur du matériau, les flux mis en jeu sont le flux conductif,  $q''_{cond}$ , les demi-flux radiatifs dans le sens des  $x$  positifs et négatifs,  $q''_{\eta^+}$  et  $q''_{\eta^-}$ . L'indice  $\eta$  représente le nombre d'onde et traduit le caractère spectral du rayonnement. Compte tenu des grandes variations du coefficient d'absorption en fonction du nombre d'onde, une résolution très fine, à 7768 bandes spectrales, a été utilisée [12]. L'indice de réfraction, quant à lui, est pris constant et égal à 1,5.

L'équation de la chaleur monodimensionnelle dans le solide, pour  $s(t) \leq x \leq L$ , peut être écrite comme,

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q'''_{ch} + q'''_{rad} \quad (1)$$

où  $q'''_{ch}$  et  $q'''_{rad}$  sont les termes sources chimique et radiatif,  $s(t)$  est la position de l'interface solide/gaz à l'instant  $t$ ,  $L$  est l'épaisseur initiale de la plaque,  $T(x, t)$  est la température du solide à la position  $x$  et à l'instant  $t$  et  $\lambda$  est la conductivité thermique du PMMA. Dans le cas d'un matériau semi-transparent non-gris, la divergence du flux radiatif est définie par :

$$q_{rad}''' = - \int_0^\infty \vec{\nabla} \cdot \vec{q}'_\eta d\eta \quad (2)$$

La dégradation thermique est gouvernée par une loi d'Arrhénius qui dépend de la température locale instantanée. Le terme source chimique et le taux de pyrolyse s'écrivent, donc, de la façon suivante :

$$q_{ch}''' = H_p \frac{\partial \rho}{\partial t} = -H_p \rho_0 A e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} \quad (3)$$

et

$$\dot{m}'' = \int_{s(t)}^L -\frac{\partial \rho}{\partial t} dx \quad (4)$$

Pour un matériau absorbant, émetteur et non-diffusif, le rayonnement au sein du solide est calculé à l'aide de l'approximation de Schuster-Schwarzschild (méthode S2 non symétrique) [17]. La divergence du flux radiatif s'écrit, donc, comme suit,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{q}'_\eta = \frac{dq_\eta'^+}{dx} - \frac{dq_\eta'^-}{dx} \quad (5)$$

où  $q_\eta'^+$  et  $q_\eta'^-$  sont solutions des équations différentielles ordinaires suivantes :

$$+\frac{dq_\eta'^+}{dx} = 2\kappa_\eta (E_{b\eta}^{PMMA} - q_\eta'^+) \quad (6)$$

$$-\frac{dq_\eta'^-}{dx} = 2\kappa_\eta (E_{b\eta}^{PMMA} - q_\eta'^-) \quad (7)$$

$\kappa_\eta$  est le coefficient d'absorption spectral [12].

Pour le PMMA d'indice de réfraction  $n$ , on a

$$E_{b\eta}^{PMMA}(T) = \frac{C_1 \eta^3}{n^2 (e^{C_2 \eta / nT} - 1)} \quad (8)$$

avec  $C_1 = 3.7419 \times 10^{-16}$  W.m<sup>2</sup> et  $C_2 = 0.01438769$  m.K [17].

L'équation (1) devient

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_{ch}''' + \int_0^\infty [2\kappa_\eta (q_\eta'^+ + q_\eta'^-) - 4\kappa_\eta E_{b\eta}^{PMMA}(T)] d\eta \quad (9)$$

Afin de calculer les deux demi-flux  $q_\eta'^+$  et  $q_\eta'^-$ , les équations (6) et (7) sont intégrées par rapport à  $x$  en utilisant les conditions aux limites  $q_\eta'^+(s)$  et  $q_\eta'^-(L)$ , conduisant à

$$q_\eta'^+(x) = q_\eta'^+(s) e^{-2\kappa_\eta(x-s)} + 2\kappa_\eta e^{-2\kappa_\eta x} \int_s^x E_{b\eta}^{PMMA}(T) e^{2\kappa_\eta x^*} dx^* \quad (10)$$

$$q_\eta'^-(x) = q_\eta'^-(L) e^{+2\kappa_\eta(x-L)} + 2\kappa_\eta e^{+2\kappa_\eta x} \int_x^L E_{b\eta}^{PMMA}(T) e^{-2\kappa_\eta x^*} dx^* \quad (11)$$

Les conditions initiales et aux limites associées à l'équation (9) sont :

- $T(x, 0) = T_0$
- $-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(s, t) = q_{rad}'' + q_{conv}'' + \int_0^\infty [q_\eta'^-(s) - E_{b\eta}^{PMMA}(T_s) - E_{b\eta}^{air}(T_s)] d\eta$
- $\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(L, t) = h_{L,conv}(T_\infty - T_L) + \int_0^\infty [\varepsilon E_{b\eta}^{PMMA}(T_L) - \varepsilon q_\eta'^+(L)] d\eta$

avec

$$q_\eta'^+(s) = E_{b\eta}^{PMMA}(T_s)$$

$$E_{b\eta}^{air}(T_s) = \frac{C_1 \eta^3}{e^{C_2 \eta / T_s} - 1}$$

$$q_\eta'^-(L) = \varepsilon E_{b\eta}^{PMMA}(T_L) + (1 - \varepsilon) q_\eta'^+(L)$$

où  $T_L = T(L, t)$ ,  $T_s = T(s, t)$ ,  $\varepsilon$  est l'émissivité de la face inférieure, et  $T_\infty$  la température ambiante. Les données d'entrées du modèle sont résumées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Données d'entrée du modèle numérique.

Grandeurs	Plaque de 10×10cm <sup>2</sup>	Plaque de 20×20cm <sup>2</sup>	Plaque de 40×40cm <sup>2</sup>
$q''_{conv}$ (W.m <sup>-2</sup> )	4	7	15
$q''_{rad}$ (W.m <sup>-2</sup> )	20	30	50
$h_{L,conv}$ (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	3		
$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	1150		
$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0.185		
$c_p$ (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\left\{ \begin{array}{l} 1400 + 8.33 \times (T - 293), \quad T \leq 403K \\ 2400, \quad T > 403K \end{array} \right.$		

#### 4.2. Paramètres du modèle

Un algorithme génétique [18,19] (AG) est utilisé pour déterminer les paramètres du modèle que sont le coefficient pré-exponentiel et l'énergie d'activation de la loi d'Arrhénius d'ordre un et la chaleur latente de pyrolyse. L'AG s'inspire des lois de la sélection naturelle (génération, classement, mutation, croisement, sélection) et permet d'obtenir, au moyen d'une fonction d'ajustement, un jeu de paramètres donnant le meilleur accord entre les évolutions mesurées et prédites de la position de l'interface au cours du temps.

L'approche proposée consiste à déterminer un jeu de paramètres cinétiques à partir des mesures obtenues sur un seul essai et d'utiliser ce même jeu de paramètres pour les deux autres essais. Le Tableau 3 regroupe les paramètres obtenus par AG. Il est à noter que ces valeurs sont en bon accord avec celles trouvées dans la littérature [6,20,21].

Tableau 3 : Paramètres du modèle obtenus par AG.

Grandeurs	Valeurs
$H_p$ (J.kg <sup>-1</sup> )	$1.16 \times 10^6$
$A$ (s <sup>-1</sup> )	$3.94 \times 10^9$
$E$ (J.mol <sup>-1</sup> )	$1.52 \times 10^5$

La Figure 8 montre les évolutions temporelles de la position de l'interface solide/gaz pour les trois tailles d'échantillon. Comme on pouvait s'y attendre, l'accord obtenu pour la plaque de 20×20 cm<sup>2</sup> est excellent puisque cette configuration a été utilisée pour la détermination du jeu unique de paramètres. L'utilisation de ce dernier pour simuler la pyrolyse d'échantillons de 10 et 40 cm de côté (exposés à des flux variant de 24 à 65 kW/m<sup>2</sup> (Tableau 1)) conduit également à un excellent accord, ce qui laisse à penser que ce jeu de paramètres est quasiment indépendant de l'échelle.

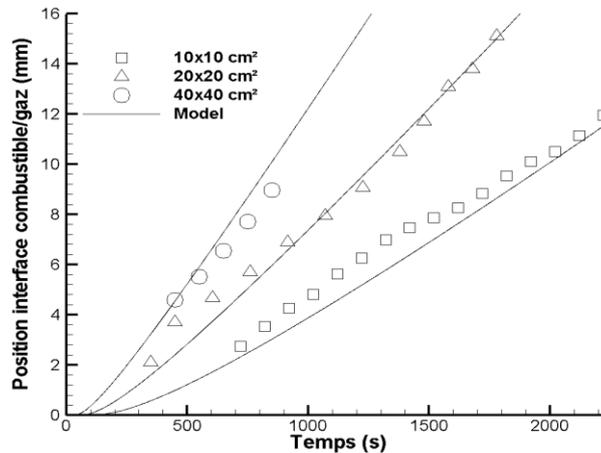


Figure 8 : Evolutions au cours du temps des positions prédites et mesurées de la surface exposée des plaques de PMMA de 10, 20 et 40 cm de côté.

## 5. Conclusion

Une étude expérimentale et numérique de la pyrolyse de plaques de PMMA semi-transparent de différentes tailles, positionnées horizontalement, a été conduite. Une technique de mesure originale basée sur l'utilisation d'un fluxmètre total refroidi associé à une pastille ZnSe a permis d'estimer les contributions radiatives et convectives au flux total incident. Ces contributions augmentent avec la taille de l'échantillon, mais la fraction radiative reste quasiment constante, de l'ordre de 80%. Un modèle de dégradation volumique et spectral adapté aux matériaux semi-transparents, a été présenté. Combiné à un algorithme génétique, il a permis de déterminer un jeu de paramètres cinétiques pour une plaque de 20 cm de côté. L'utilisation de ce même jeu de paramètres pour simuler la dégradation des plaques de 10 et 40 cm de côté a conduit à un très bon accord avec l'expérience. Dans la gamme de flux totaux mesurés dans le présent travail, de 24 à 65 kW/m<sup>2</sup>, ce jeu de paramètres s'avère peu dépendant du flux incident et, par conséquent, de l'échelle considérée. Ce modèle de pyrolyse, avec ses paramètres cinétiques, peut être aisément implémenté dans un code incendie afin de simuler la croissance du feu de façon totalement prédictive.

## Remerciement

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Nationale de la Recherche pour son soutien financier dans le cadre du projet ANR-12-ASRT-0002-01.

## Nomenclature

$A$	facteur pré-exponentiel, $s^{-1}$		
$c_p$	capacité thermique spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$		
$E$	énergie d'activation, $J.mol^{-1}$		
$E_{bn}$	émission corps noir, $W.m^{-1}$		
$h$	coefficient convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$		
$H_p$	chaleur de pyrolyse, $J.kg^{-1}$		
$L$	épaisseur initiale de la plaque, $m$		
$\dot{m}''$	débit de pyrolyse surfacique, $kg.m^{-2}.s^{-1}$		
$q'$	énergie radiative par unité de temps et par nombre d'onde, $W.m^{-1}$		
$q''$	énergie radiative par unité de temps et par unité d'aire, $W.m^{-2}$		
$q'''$	énergie radiative par unité de temps et par unité de volume, $W.m^{-3}$		
$R$	constante des gaz parfaits, $J.mol^{-1}.K^{-1}$		
$s$	position de la surface ( $s(t=0) = 0$ ), $m$		
$\dot{s}$	vitesse de régression, $m.s^{-1}$		
$t$	temps, $s$		
$T$	température, $K$		
$x$	coordonnée suivant l'épaisseur de la plaque, $m$		
		Symboles grecs	
		$\varepsilon$	émissivité, -
		$\eta$	nombre d'onde, $m^{-1}$
		$\kappa$	coefficient d'absorption, $m^{-1}$
		$\lambda$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
		$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
		Exposant, Indices	
		$b$	corps noir
		$ch$	chimique
		$conv$	convectif
		$ext$	extérieur
		$L$	face arrière du bloc
		$rad$	radiatif
		$s$	surface du bloc de PMMA
		$tot$	total
		$0$	instant initial
		-	sens des x négatifs
		+	sens des x positifs

## Références

- [1] L. Orloff, J. de Ris et G.H. Markstein, Upward turbulent fire spread and burning of fuel surface, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 15, Pages 183-192, 1974.
- [2] L. Orloff, A.T. Modak et R.L. Alpert, Burning of large scale vertical surfaces, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 16, Pages 1345-1354, 1976.
- [3] J. Quintiere, M. Harkleroad et Y. Hasemi, Wall flames and implications for upward flame spread, *Combustion Science and Technology*, Volume 48, Pages 191-222, 1986.
- [4] A. Kulkarni, E. Brehob, S. Manohar et R. Nair, Turbulent upward flame spread on a vertical wall under external radiation, Report # NIST-GCR-94-638, *National Institute of Standards and Technology*, Washington

DC, 1994.

- [5] E.G. Brehob et A.K. Kulkarni, Experimental measurements of upward flame spread on a vertical wall with external radiation, *Fire Safety Journal*, Volume 31, Pages 181-200, 1998.
- [6] P.A. Beaulieu et N A. Dembsey, Effect of oxygen on flame heat flux in horizontal and vertical orientations, *Fire Safety Journal*, Volume 43, Pages 410-428, 2008.
- [7] K.C. Tsai et F.S. Wan, Upward Flame Spread : The Width Effect, *Proceedings of the 8th Symposium IAFSS*, Pages 409-419, 2005.
- [8] K.C. Tsai, Influence of sidewalls on width effects of upward flame spread, *Fire Safety Journal*, Volume 46, Pages 294-304, 2011.
- [9] M.J. Gollner, X. Huang, F. A. Williams et A. S. Rangwala, Buoyancy-enhanced flame spread over continuous surfaces, *7<sup>th</sup> US Combustion Meeting*, 2011.
- [10] M.J. Gollner, X. Huang, J. Cobian, A. S. Rangwala et F. A. Williams, Experimental study of upward flame spread of an inclined fuel surface, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 34, Pages 2531-2538, 2013.
- [11] I.T. Leventon et S.I. Stoliarov, Evolution of flame to surface heat flux during upward flame spread on poly(methyl methacrylate), *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 34, Pages 2523-2530, 2013.
- [12] Y. Pizzo, C. Lallemand, A. Kacem, A. Kaiss, J. Gerardin, Z. Acem, P. Boulet et B. Porterie, Steady and transient pyrolysis of thick clear PMMA slabs, *Combustion and Flame*, Volume 162, Pages 226-236, 2015.
- [13] A.V. Singh et M.J. Gollner, Estimation of local mass burning rates for steady laminar boundary layer diffusion flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 35, Pages 2527-2534, 2015.
- [14] A.V. Singh et M.J. Gollner, A methodology for estimation of local heat fluxes in steady laminar boundary layer diffusion flames, *Combustion and Flame*, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.01.019>
- [15] Y. Pizzo, J.L. Consalvi, P. Querre, M. Coutin, L. Audouin, B. Porterie et J.L. Torero, Experimental observations on the steady-state burning rate of a vertically oriented PMMA slab, *Combustion and Flame*, Volume 152, Pages 451-460, 2008.
- [16] A.K. Kulkarni, Heat loss to the interior of a free burning vertical wall and its influence on estimation of effective heat of gasification, *Combustion Science and Technology*, Volume 73, Pages 493-504, 1990.
- [17] M.F. Modest, Radiative Heat Transfer, *Mc Graw-Hill*, New York, 1993.
- [18] J.H. Holland, Outline for a logical theory of adaptive systems, *Journal of the ACM*, Volume 9, Pages 297-314, 1962.
- [19] D.E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, *Addison-Wesley Publishing Company*, 1989.
- [20] C. Vovelle, J.L. Delfau, M. Reuillon, J. Bransier et N. Laraqui, Experimental and Numerical Study of the Thermal Degradation of PMMA, *Combustion Science and Technology*, Volume 53, Pages 187-201, 1987.
- [21] J. Li et S.I. Stoliarov, Measurement of kinetics and thermodynamics of the thermal degradation for non-charring polymers, *Combustion and Flame*, Volume 160, Pages 1287-1297, 2013.