

# Méthode de suivis et d'analyse de fronts de flammes de végétation par caméras visibles : détermination de la vitesse de propagation et de la puissance dégagée par le front de flamme

Alexis Marchand, Anthony Collin, Pascal Boulet, Zoubir Acem

## ► To cite this version:

Alexis Marchand, Anthony Collin, Pascal Boulet, Zoubir Acem. Méthode de suivis et d'analyse de fronts de flammes de végétation par caméras visibles : détermination de la vitesse de propagation et de la puissance dégagée par le front de flamme. Congrès Français de Thermique SFT 2014, Société Française Thermique, Jun 2014, Lyon, France. hal-01447032

**HAL Id: hal-01447032**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01447032>**

Submitted on 26 Jan 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Méthode de suivis et d'analyse de fronts de flammes de végétation par caméras visibles : détermination de la vitesse de propagation et de la puissance dégagée par le front de flamme

Alexis MARCHAND, Anthony COLLIN, Pascal BOULET et Zoubir ACEM

LEMTA, Université de Lorraine, CNRS

2 Avenue de la forêt de Haye TSA 60604 - 54518 Vandœuvre-lès-Nancy - France

**Résumé** - Cette communication s'intéresse au développement et à la validation d'une métrologie de suivi de fronts de flammes par caméras visibles pour des feux de végétation réalisés à l'échelle du laboratoire. Pour des feux de cette taille ou pour des feux réels, il semble être très complexe de déployer une métrologie dite "classique" associant des thermocouples et des flux-mètres pour définir les caractéristiques de l'incendie (vitesse de propagation et surface) compte tenu des échelles d'espace concernées. L'utilisation de caméras visibles apparaît alors comme une solution envisageable. En effet, l'analyse des images, couplée à un algorithme de traitement d'images (DLT) rend possible la reconstruction du front de flammes avant au cours du temps. Ces informations permettent d'estimer en post-traitement la vitesse de propagation de la zone en feu et donc d'avoir accès à la puissance dégagée par l'incendie. Cette communication propose de valider cette nouvelle métrologie en comparant les résultats obtenus avec ceux mesurés par thermocouples ou photo-résistances et de développer une première base de données expérimentales sur des feux à l'échelle du laboratoire permettant une prochaine inter-comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par le code numérique de propagation de feux développé au LEMTA.

## Nomenclature

$B_n$	Matrice des niveaux de gris de l'image $n$	$\rho$	Charge du combustible, [kg/m <sup>2</sup> ]
$C_{p_{sec}}$	Capacité calorifique de la végétation sèche, [kJ/kg/K]	$\tau_r$	Pourcentage de résidus après combustion, [-]
$\bar{v}_{cai}$	Vitesse moyenne mesurée par la caméra $i$ , [cm/s]	$HR$	Humidité relative, [-]
$\bar{v}_{ch}$	Vitesse moyenne mesurée au chronomètre, [cm/s]	$HR_i$	Humidité relative du capteur $i$ , [-]
$\bar{v}_p$	Vitesse moyenne mesurée par les photo-résistances, [cm/s]	$T_i$	Température du capteur $i$ , [°C]
$\bar{v}_t$	Vitesse moyenne mesurée par les thermocouples K, [cm/s]	$l$	Largeur du lit de combustible, [m]
$P_{CI}$	Pouvoir calorifique inférieur, [kJ/kg]	$L_i$	Longueur du front de flammes obtenue avec la caméra $i$ , [m]
$P_{CS}$	Pouvoir calorifique supérieur, [kJ/kg]	$I_i$	Intensité du front de flammes obtenue avec la caméra $i$ , [kW/m]
$v$	Vitesse de propagation, [cm/s]	$P_i$	Puissance du front de flammes obtenue avec la caméra $i$ , [kW]

## 1. Introduction

Le développement d'un modèle de propagation de feu est l'un des enjeux majeurs dans la lutte des incendies de végétation afin d'aider au mieux l'action des sapeurs-pompiers. La mise au point d'un tel modèle associe des travaux théoriques, pour la mise en équation du modèle [1], et des expérimentations pour calibrer ou valider le code de propagation. Le modèle développé par le LEMTA est pour l'heure à cette dernière étape. La première phase de validation passe par un stade intermédiaire, l'échelle du laboratoire où les conditions extérieures (pente, vent,

charge de combustible, ...) sous lesquelles se propage le feu sont parfaitement maîtrisées. Le LEMTA s'est ainsi doté en juillet 2012 d'une plateforme expérimentale dédiée aux incendies, nommée PROMETHEI. L'objectif des travaux qui sont actuellement menés est de développer une métrologie exclusivement dédiée la propagation des incendies afin de caractériser la vitesse et la morphologie (longueur ou surface) de la zone en feu. Ces feux peuvent être réalisés sur des tables inclinées ( $\pm 30^\circ$ ) de  $12 \text{ m}^2$  ou dans un tunnel à feu de 6 mètres de longueur et de  $9 \text{ m}^2$  de section dans lequel l'écoulement d'air peut atteindre une vitesse maximum de 5 m/s.

La littérature recense de nombreux travaux qui se sont déjà intéressés à l'étude expérimentale de la propagation d'un front de flamme à cette échelle. Parmi ceux-ci, on peut noter les travaux complets de Naville [2] en 1997 qui a étudié la propagation d'un front de flamme de l'échelle du laboratoire à celle du terrain. La diversité des paramètres à contrôler lors des expériences à grandes échelles l'ont obligé à se diriger vers des expériences en tunnel à l'extérieur. Elle a pu mesurer grâce à un peigne de thermocouples (34 thermocouples), la vitesse de propagation et extraire, en se basant sur la formule de Byram [3], l'intensité du front de flamme. De manière parallèle, Catchpole *et al.* [4] a effectué 357 expériences pour différents combustibles dans un tunnel de 12 mètres de longueur et d'une section de  $9 \text{ m}^2$ . Pour chaque expérience, il a mesuré la vitesse de propagation en se basant sur l'utilisation de photo-résistances positionnées tout le long de la table. Ces deux travaux permettent d'extraire une vitesse de propagation moyenne et unique pour chaque expérience.

En 2006, Pastor [5] a filmé la propagation d'un front de flamme sur une table à combustion à l'aide d'une caméra thermique. L'étude s'est appuyée sur un algorithme linéaire (DLT) afin de transposer les coordonnées du front de flamme de l'image (en pixel) vers le plan réel (en mètres). Grâce à cette technique, un champ de température sur le plan réel est reconstruit. En définissant un seuil de température pour localiser le contour du front de flamme, Pastor a pu extraire des vitesses locales de propagation.

Néanmoins, les modèles de propagation devenant de plus en plus sophistiqués, la vitesse du front de flamme n'est plus le seul paramètre à analyser et à valider. Il faut donc avoir accès à d'autres grandeurs. Ainsi, Martinez-de-Dios [6] a utilisé des caméras thermiques et visibles afin de mesurer la vitesse de propagation, l'angle d'inclinaison, la forme et la largeur du front de flamme. En 2011, Àgueda [7] a effectué des essais de brûlage dans un tunnel à feu. Àgueda se sert de la méthode de Pastor [5] avec des caméras visibles pour déterminer la vitesse de propagation et l'intensité de l'incendie. En 2012, Rossi [8] a utilisé une méthode de stéréovision (utilisation de plusieurs caméras visibles) afin de déterminer la vitesse de propagation, la hauteur, l'angle d'inclinaison et la longueur de la flamme, l'épaisseur et le volume du front.

Dans cette communication, nous nous intéressons à la mise en place d'un dispositif de suivi de front par caméras visibles ayant pour objectif de quantifier pour une expérience donnée la vitesse de propagation, la longueur du front et la puissance dégagée par l'incendie, ce qui constitue l'originalité de notre travail. Habituellement, cette puissance est estimée à l'aide soit d'un cône calorimètre [9] ou soit d'une balance de pesée [10]. Cependant, en raison de la taille de nos installations, nous proposons ici de déterminer la puissance dégagée par l'incendie de manière différente, en analysant les positions des fronts de flammes au cours du temps. De plus, cette approche possède la particularité de ne pas être intrusive vis à vis de nos expérimentations.

La présente communication est divisée comme suit : la section 2 détaille la métrologie que nous avons déployée utilisant des caméras visibles. La section 3 présente les autres méthodes (chronomètres, thermocouples et photo-résistances) que nous avons mises en place pour valider et comparer notre approche. Le dispositif expérimental PROMETHEI est décrit dans la section

4. La section 5 discute des résultats ainsi obtenus. Enfin, la section 6 dresse une conclusion sur ces premiers travaux et aborde quelques perspectives futures.

## 2. Détection d'un front de flamme par caméra visibles

**Algorithme de détection de mouvements** - Lors d'une expérience, des images du front de flammes sont acquises au cours du temps (Cf. Figure 1a). Cette acquisition se fait via 4 caméras Le165MP de chez Lumenera de résolution  $1376 \times 1032$  alimentées par câbles Ethernet. Pour déterminer la position réelle du contour de flammes, un algorithme de traitement d'images a été développé, inspiré des travaux réalisés par Ko *et al.* [11] et Son and Chi [12]. La première étape consiste à créer une nouvelle image  $\text{Diff}_n[i, j]$  (Cf. Figure 1b) en appliquant la méthode de différence d'images entre trois instants consécutifs ( $B_{n-1}$ ,  $B_n$  et  $B_{n+1}$ ) basée sur l'algorithme suivant,

$$\text{Diff}_n [i, j] = \begin{cases} 255, & \text{si } |B_{n+1}[i, j] - B_n[i, j]| \leq \frac{t}{256} \\ 255, & \text{si } |B_n[i, j] - B_{n-1}[i, j]| \leq \frac{t}{256} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

$A_n[i, j]$  correspond au pixel  $(i, j)$  de la  $n$ ième image de A.  $t$  est un paramètre de seuillage, fixé ici à 3. Ensuite, la procédure d'Otsu [12] est appliquée et permet d'effectuer un seuillage par pondération des valeurs des niveaux de gris. Nous obtenons alors l'image  $\text{Ostu}_n [i, j]$  (Cf. Figure 1c). La dernière étape consiste en une comparaison des deux images précédemment obtenues à l'aide de l'algorithme suivant,

$$\text{Front}_n [i, j] = \begin{cases} 255, & \text{si } \text{Diff}_n [i, j] = \text{Ostu}_n [i, j] \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

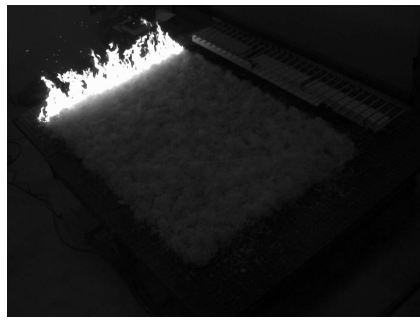
Nous obtenons alors l'image représentée sur la Figure 1d. À partir de cette image, une recherche du volume contiguë de flammes est réalisée comme le présente la Figure 1e. Enfin, deux balayages, l'un vertical et l'autre horizontal sont appliqués afin de détecter la partie avant du front de flammes (Cf. figure 1f).

**Reconstitution du front par DLT** - Une fois les positions du front de flammes avant localisées, il est nécessaire de déterminer les coordonnées de ces points dans l'espace réel. Le plan filmé étant incliné par rapport au plan de la caméra, une transposition des coordonnées (en pixel) obtenues sur les images et des coordonnées réelles (en mètre) est nécessaire. La méthode Direct Linear Transformation [5] permet de déterminer la position réelle de n'importe quel point sur l'image à partir de la connaissance exacte de 4 points dits de référence.

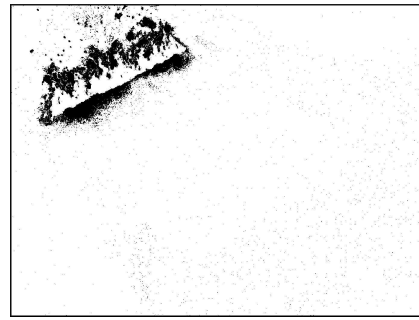
## 3. Les méthodes conventionnelles pour comparaison et validation

**Chronomètre** - Un chronomètre a été confié à un expérimentateur pour mesurer la position du front avant dans le temps. Le principe est de déterminer le temps de passage du point le plus avancé du front de flammes devant des marques placées à équidistance (tous les 10 cm) sur la table à brûler. L'avantage de cette approche est qu'elle est facile et rapide à mettre en place. Cependant, les résultats obtenus ne donnent qu'accès à une vitesse de propagation unique, qui est très dépendante du temps de réaction et de l'appréciation de l'expérimentateur.

**Thermocouples** - Le déploiement d'un peigne de thermocouples est également une méthode courante pour la mesure de la vitesse de propagation [2]. Elle consiste à détecter le pic de température en plusieurs endroits bien connus sur la table à brûler. Plus le nombre de thermocouples est important, plus la précision sur la vitesse sera grande. Cette technique ne donne



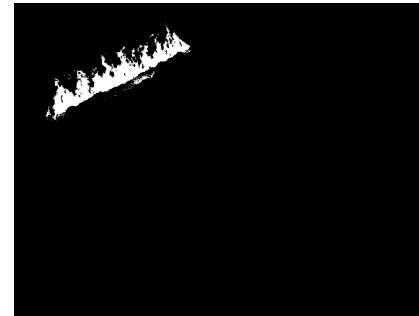
(a) Image originale,  $B_n$  à l'instant  $t$



(b) Image  $Diff_n$



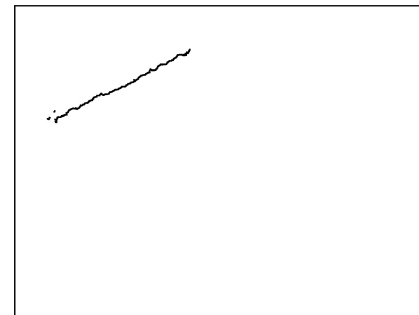
(c) Résultat après seuillage,  $Otsu_n$



(d) Combinaison des images,  $Front_n$



(e) Recherche du volume unique de flammes



(f) Reconstitution du front avant

Figure 1: Procédure de detection de mouvement du front de flammes

accès qu'à une vitesse moyenne de propagation. Lors des essais, nous utiliserons 10 thermocouples de type K gainés de 1 mm.

**Photo-résistances** - Ce procédé a été exploité par Catchpole [4]. Des photo-résistances sont disposées perpendiculairement au sens de propagation du front de flammes. Elles ont la capacité de modifier leur résistance en fonction de la quantité de lumière qu'elles reçoivent. Lorsque le front de flammes passe devant un de ces capteurs, l'intensité lumineuse augmente et un pic de tension aux bornes de la photo-résistance est observé. Connaissant les temps auxquels apparaissent ces pics et les positions relatives de ces capteurs les uns par rapport aux autres, la vitesse de propagation peut alors être extraite. Pour nos essais, nous utiliserons 30 photo-résistances disposées tous les 10 cm.

Essai	Humidité		Température	
	$HR_1$	$HR_2$	$TR_1$	$TR_2$
#1	73	78	15,4	15,5
#2	74	77	15,3	15,3
#3	71	75	15,3	15,4
#4	66	73	17,2	16,2

Tableau 1: Conditions extérieures

$PCI$	$PCS$	$HR$	$\tau_r$	$Cp_{sec}$
[kW/kg]	[kW/kg]	[-]	[kg/kg]	[kJ/kg/K]
16 180	20 180	12,4	0,27	1 430

Tableau 2: Caractéristiques de la frisure de bois

## 4. Dispositif expérimental

**Descriptif** - Les expériences sont pratiquées sur une table à brûler en acier de 3 m × 4 m. 4 essais de propagation ont été réalisés sur un lit de combustible en frisure de bois d'une dimension de 2 m × 3 m. La charge (masse surfacique) utilisée au cours de ces essais est de 0,5 kg/m<sup>2</sup>. Les 2 caméras sont positionnées aux deux coins avant de la table (en aval du front de flammes). L'ensemble des moyens métrologiques (thermocouples et photo-résistances) est relié à une centrale d'acquisition CompactDAQ de National Instrument.

**Conditions expérimentales** - Lors d'essais antérieurs, il a été constaté une réelle influence de la température et de l'humidité extérieure sur la vitesse de propagation. Afin de garantir une bonne répétabilité des résultats, les expériences ont été réalisées sur une même journée où les conditions environnementales sont restées relativement constantes. Pour chaque essai, plusieurs relevés de température et d'humidité relative au sein de la plateforme PROMETHEI ont été réalisés (Cf. Tableau 1). L'humidité relative moyenne est de 73% avec un écart type de 3,5% et une température moyenne de 15,7°C associé à un écart type de 0,63°C. Ces données montrent que les conditions extérieures ont été quasi-stables durant ces essais.

**Caractéristiques du combustible** - Les caractéristiques de la frisure de bois utilisée comme combustible ont été déterminées par le LERMAB (Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois) d'Épinal. Ces différentes grandeurs sont regroupées dans le Tableau 2.

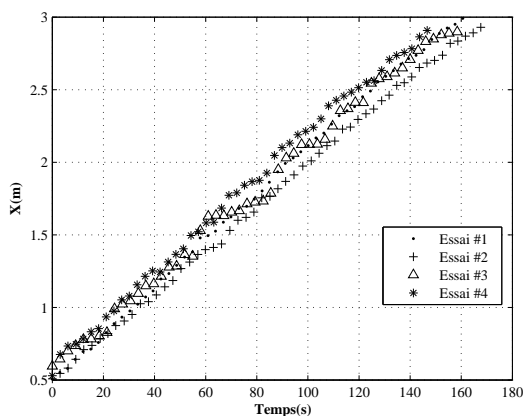


Figure 2: Position selon  $X$  du front de flamme avant en fonction du temps en  $Y=1m$  pour les 4 essais

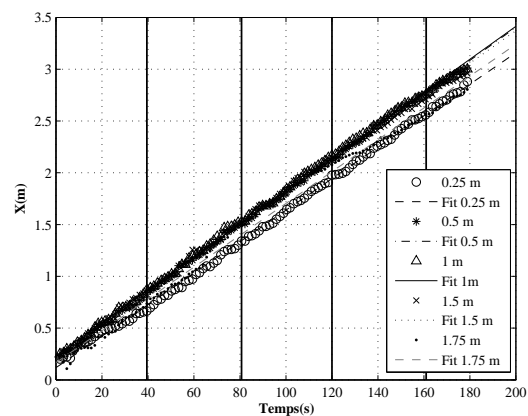


Figure 3: Position selon l'axe  $X$  du front de flamme avant pour différentes positions sur l'axe  $Y$

Essai	$\overline{v_{ca1}}$	$\overline{v_{ca2}}$	$\overline{v_{ch}}$	$\overline{v_p}$	$\overline{v_t}$	$\overline{v_m}$
#1	1,52	1,54	1,51	1,45	1,63	1,53
#2	1,46	1,48	/	1,42	1,51	1,47
#3	1,45	1,47	1,49	1,45	1,50	1,47
#4	1,55	1,57	1,58	1,51	1,59	1,56

Tableau 3: Vitesses de propagation lors des différents essais pour chaque approche [cm/s]

## 5. Résultats

**Répétabilité** - Nous nous sommes dans un premier temps intéressés au problème de répétabilité. Pour cela, nous avons effectué quatre fois le même essai : mêmes dimensions et même charge pour le lit de combustible. Nous avons ensuite identifié la position des fronts de flammes obtenues à partir des images de l'une des caméras située en avant du feu. La Figure 2 montre la position  $X$  du front de flamme en fonction du temps pour la cote  $Y = 1$  m (centre du lit de combustible). Seules les positions identifiées telles que  $X \geq 0,5$  m ont été prises en compte pour éviter la phase instationnaire de la propagation du feu. Nous constatons que pour les 4 essais, l'évolution de la position du front de flammes suit sensiblement la même évolution, gage d'une bonne répétabilité.

**Comparaison des vitesses de propagation** - Les trois autres dispositifs de mesure de la vitesse de propagation ont été employés au cours de ces 4 essais pour évaluer et valider l'approche de suivi du front de flamme par caméras visibles. Pour chaque essai et pour chaque dispositif expérimental, les vitesses de propagation ont été extraites et reportées dans le Tableau 3. En ce qui concerne les mesures obtenues par les caméras visibles, les vitesses de propagation ont été estimées à partir de 5 positions différentes du front ( $Y = 0,25$  m,  $0,5$  m,  $1$  m,  $1,5$  m et  $1,75$  m) et en appliquant une moyenne (Cf. Figure 3). Les valeurs de vitesses de propagation obtenues par les deux caméras montrent un parfait accord, car les écarts moyens sont estimés à  $0,2$  cm/s. Afin de faciliter la comparaison de ces valeurs à celles obtenues par les autres dispositifs de mesures, une vitesse de propagation moyenne,  $\overline{v_m}$ , a été calculée à partir de  $\overline{v_{ch}}$ ,  $\overline{v_p}$  et  $\overline{v_t}$ . Nous constatons que les écarts de mesures entre les différentes approches sont très faibles ce qui conforte l'idée d'utiliser des caméras visibles pour extraire les caractéristiques d'un incendie.

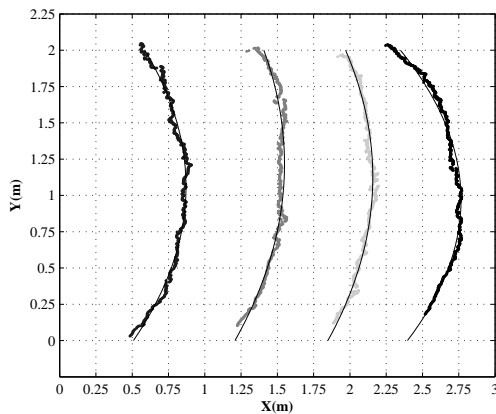


Figure 4: Front de flammes aux instants  $t=39,5s$ ,  $t=80,7s$ ,  $t=120s$  et  $t=161s$

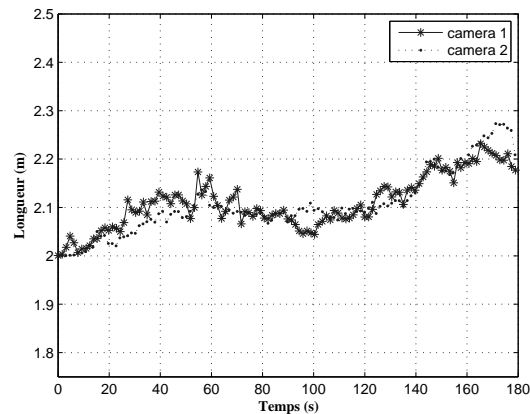


Figure 5: Longueur du front pour l'essai #1 avec les caméras 1 et 2

**Puissance du front de flammes** - L'intérêt d'utiliser des caméras visibles pour estimer les caractéristiques d'un front de flammes est d'obtenir bien plus d'informations que sa vitesse de propagation. Comme nous l'avons présenté précédemment, nous avons également accès à la géométrie du front au cours temps et donc à la puissance de l'incendie. En effet, la puissance est déterminée à partir de l'intensité du front de flammes ( $P = I L$ ,  $I$  l'intensité et  $L$  la longueur du front) qui se calcule via l'expression établie par Byram en 1959 [3],

$$I = PCS v \rho \quad (3)$$

$PCS$  est le pouvoir combustible supérieur de la végétation testée. Cette relation n'est valable que pour une propagation stationnaire, ce qui est notre cas tant que  $X \geq 0.5$  m (identification de la zone de propagation instationnaire non présentée ici). Grâce aux vitesses de propagation moyennes établies dans le Tableau 3, les intensités des feux des 4 essais sont calculées et reportées dans le Tableau 4. Encore une fois, les données ont été établies pour les deux caméras situées devant le front de flammes. On remarque alors une bonne concordance entre les résultats issus des 2 caméras et l'intensité moyenne d'un feu de charge de  $0,5 \text{ kg/m}^2$  sur une table de 2 m de large est évaluée à  $151,5 \text{ kW/m}$ . Naville [2] avait effectué des expériences similaires de propagation de flammes en considérant le même type de combustible pour une charge de  $0,8 \text{ kg/m}^2$ . Les valeurs d'intensités obtenues étaient alors de l'ordre de  $245 \pm 60 \text{ kW/m}$ . Ces résultats sont plus élevés que ceux que nous avons obtenus car la charge est plus importante. Àgueda [7] a également effectué des essais sur de la frisure de bois. Pour une charge moyenne de  $0,6 \text{ kg/m}^2$ , l'intensité était de  $172 \text{ kW/m}$ . Ces différentes valeurs confortent les mesures que nous avons effectuées.

Afin de calculer la puissance du front de flamme (ou le HRR, Heat Release Rate), il est nécessaire de déterminer la longueur totale du front de flamme, notée  $L$ . Il est observé expérimentalement que le front n'est pas rectiligne mais légèrement parabolique, impliquant que la largeur de front n'est pas égale aux 2 m de largeur du lit de combustible. La largeur du lit est notée, ici,  $l$ . Pour effectuer ce calcul, une représentation du front par un polynôme du 2nd degré du type,  $Y(X) = aX^2 + bX + c$ , est effectuée. La Figure 4 démontre qu'un polynôme d'ordre 2 suffit pour représenter les fronts de flammes. La longueur du front de flamme est alors calculée par la relation,

$$L = \int_C ds = \frac{1}{4a} \left( \text{Argsh}(2al + b) - \text{Argsh}(b) + (2al + b) \sqrt{(2al + b)^2 + 1} - b\sqrt{b^2 + 1} \right) \quad (4)$$

La Figure 5 donne un exemple d'évolution de la longueur du front de flammes au cours du temps pour les caméras 1 et 2. Les valeurs de  $L$  pour les différents essais sont également reportées dans le Tableau 4. Une longueur moyenne de 2,15 m peut-être relevée.

Les puissances dégagées par l'incendie peuvent être estimées à partir des valeurs d'intensités et des longueurs issues du Tableau 4. Encore une fois, les valeurs obtenues via les deux caméras sont en parfait accord, avec un écart maximum de 0,5%. La valeur moyenne de la puissance dégagée,  $P_m$ , peut être estimée à  $327 \text{ kW}$ . L'écart relatif le plus important observé est de 4%.

## 6. Conclusion et perspectives

Un dispositif expérimental de suivi d'un front de flammes par caméras visibles a été mis en place pour la reconstitution géométrique du front avant au cours du temps. Cette approche est basée sur une technique de détection de mouvement associée à une méthode DLT. Une



Essai	$I_1$ [kW/m]	$I_2$ [kW/m]	$L_1$ [m]	$L_2$ [m]	$P_1$ [kW]	$P_2$ [kW]	$P_m$ [kW]
#1	153	155	2,12	2,12	324	329	327
#2	147	149	2,16	2,13	318	317	318
#3	146	148	2,21	2,19	323	324	324
#4	156	158	2,17	2,13	339	337	338

Tableau 4: Longueurs, intensités et puissances du front de flammes lors des 4 essais

étude de répétabilité sur la vitesse de propagation à partir de 4 essais identiques a été effectuée. Parallèlement une comparaison des résultats obtenus par ce nouveau dispositif avec ceux issus de différentes méthodes (chronomètres, thermocouples et photo-résistances) permettent d'apprécier et de valider la précision du dispositif expérimental mis en place.

L'étude s'est aussi focalisée sur la mesure de la puissance dégagée par le front de flammes. L'intensité a été calculée grâce à la formule de Byram en se basant sur la vitesse de propagation en régime stationnaire. En représentant le front de flammes avant à partir d'une parabole, la puissance du feu a été calculée à partir de l'estimation de la longueur du front.

Ce travail constitue alors une première base de données sur des feux de 2 m × 3 m de frisure de bois dans une configuration à plat et sans vent. Elle permettra une prochaine inter-comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par le code numérique de propagation de feux développé au LEMTA.

Les prochains travaux s'intéresseront à la reconstitution du front arrière pour remonter à l'épaisseur du front de flammes dans le temps ainsi qu'au calcul de la puissance du feu en régime instation-

## Références

- [1] A. Collin et F. Anstett-Collin. Analyse de sensibilité appliquée à un modèle de propagation de feux de forêts : Influence de la charge et de l'humidité de la végétation au sol, Congrès Français de Thermique, Le Touquet, 25 au 28 mai 2010.
- [2] L. Naville, Étude expérimentale et modélisation de la propagation d'une flamme sur un combustible poreux : applications aux feux de végétation, *Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille 2*, 1997.
- [3] G. Byram, Combustion of Forest fuels, Chapter 3 in *Forest Fire : control and use*, McGraw-Hill, K.P. Davis, 1959.
- [4] W.R. Catchpole, E.A. Catchpole, B.W. Butler, R.C. Rothermel, G.A. Morris et D. J. Latham, Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel, *Combustion Science and Technology*, vol. 131, pp. 1-37, 1998.
- [5] E. Pastor, A. Àgueda, J. Andrade-Cetto, M. Muñoz, Y. Pérez et E. Planas, Computing the rate of spread of linear flame fronts by thermal image processing, *Fire Safety Journal*, vol. 41, pp. 569-579, 2006.
- [6] J.R. Martinez-de-Dios, J.C. André, J.C. Gonçalves, B.C. Gonçalves, B.C. Arrue, A. Ollero and D.X Viegas, Laboratory Fire Spread Analysis using Visual and Infrared Images, *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 15, pp. 179-186, 2006.
- [7] A. Àgueda, E. Pastor, Y. Pérez, D.X. Viegas et E. Planas, Fire intensity reduction in straw fuel treated with a long-term retardant, *Fire Safety Journal*, vol. 46, pp. 41-47, 2011.
- [8] L. Rossi, T. Molinier, M. Akhloufi, A. Pieri et Y. Tison, Advanced stereovision system for fire spreading study, *Fire Safety Journal*, vol. 60, pp. 64-72, 2013.
- [9] P.J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W.D. Walton, R.L.P. Custer, J.R. Hall et J.M. Watts, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, *National Fire Protection Association*, 2002.
- [10] K. Chetehouna, Contribution à la métrologie des feux de végétation, *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy*, 2002
- [11] B.C. Ko, K.H. Cheong et J.-Y. Nam, Fire detection based on vision sensor and support vector machines, *Fire Safety Journal*, vol. 44, pp. 322-329, 2009.
- [12] H. Son et S. Chi, Moving user segmentation for sports simulator using frame difference and edge detection, *International Journal of Signal Processing Systems*, vol. 1, pp. 89-92, 2013.