HAL
open science

Diagnostics non intrusifs couplés des champs dynamiques et scalaires de flammes d'incendie naturel en propagation

Frédéric Morandini, Silvani Xavier, David Honoré, Guillaume Boutin, Arnaud Susset

To cite this version:

Frédéric Morandini, Silvani Xavier, David Honoré, Guillaume Boutin, Arnaud Susset. Diagnostics non intrusifs couplés des champs dynamiques et scalaires de flammes d'incendie naturel en propagation. 13ième Congrès Francophone de Techniques Laser, 2012, Rouen, France. pp.7. hal-00905646

HAL Id: hal-00905646

https://hal.science/hal-00905646

Submitted on 20 Nov 2013

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.

Diagnostics non intrusifs couplés des champs dynamiques et scalaires de flammes d'incendie naturel en propagation

Frédéric MORANDINI[1], Xavier SILVANI[1], David HONORE[2], Guillaume BOUTIN[2], et Arnaud SUSSET[3]

[1] Lab. Sciences Pour l'Environnement - UMR 6134 CNRS et Université de Corse, 20250 Corte

[2] CORIA – UMR 6614 CNRS, Université de Rouen et INSA de Rouen, 76821 Saint Etienne du Rouvray

[3] R&D Vision 64, rue Bourdignon / Lot 13 94100 Saint Maur des Fossés

1 Introduction

L'étude des incendies naturels comme science de l'Ingénieur a pour ambition de caractériser le mode et l'amplitude des transferts de chaleur d'un incendie de végétation vers ses cibles matérielles ou humaines. Il est aujourd'hui reconnu et accepté que le rayonnement de la chaleur d'une part et la convection thermique au voisinage de la flamme d'autre part, constituent les modes de transfert de chaleur du feu vers la végétation imbrulée. Ceux-ci se manifestent avec une prédominance de l'un sur l'autre selon les conditions de propagation que sont la pente de la surface végétale par rapport à la verticale et le vent soufflant en amont du front de flamme [1].

D'un coté, les développements métrologiques relatifs au rayonnement thermique d'un feu font l'objet d'une activité soutenue : la source du rayonnement comme ces cibles voient leurs propriétés spectrales largement étudiées dans la dernière décennie, de l'échelle du laboratoire à l'échelle du terrain [2],[3]. En revanche, d'un autre côté, la convection de la chaleur ne peut pas être caractérisée lors d'expérience à petite comme à grande échelle [4]. Ceci provient d'abord de l'absence de moyens de calibration pour mesurer des vitesses en un point dans l'environnement d'une flamme de combustible végétal. Les moyens existants proposent essentiellement une mesure différentielle du flux convectif, obtenu en soustrayant en un point la mesure du flux de chaleur rayonnée de la mesure du flux total de chaleur. La sensibilité de ces instruments intrusifs aux conditions locales de l'écoulement n'étant pas connue, nous avons essayé depuis quelques années de fournir un protocole expérimental de référence pour étudier leurs propriétés.

Or, dans le cas d'un incendie naturel, les propriétés de l'écoulement sont à dépendance d'échelle, puisque celles-ci relèvent d'un régime turbulent réactif. Tout protocole expérimental visant à calibrer des instruments de mesure intrusifs doit donc proposer l'accès grand champ à la dynamique de l'écoulement réactif. Récemment, nous avons montré la faisabilité de la Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) grand champ (2 m x 1.5 m) appliquée à un incendie naturel en extérieur (50 m²) [5]. Les difficultés à ensemencer l'écoulement réactif du fait de la forte variabilité de l'aérologie locale du feu hors laboratoire nous a incité à conduire des expériences en laboratoire, donc sans vent, pour éprouver l'emploi couplé de deux diagnostics optiques : la PIV et l'imagerie par chimiluminescence OH* d'un feu naturel. Afin de provoquer la bascule radiatif-convectif des modes de transfert de la chaleur du feu vers ces cibles, nous avons étudié ce couplage pour deux pentes (0 et 30°) de la litière végétale où le feu se propage. Pour la pente 0°, on s'attend à un régime de propagation piloté par le rayonnement thermique qui procède d'un front de flamme vertical, pratiquement bidimensionnel, dont les flammes sont gouvernées par la flottabilité. Dans cette situation, la contribution de la convection de la chaleur aux transferts thermiques feux-végétation est identifiée qualitativement comme marginale sans qu'elle puisse pour autant être convenablement quantifiée. A 30°, la contribution longitudinale du rayonnement - dans la direction parallèle au plan de la litière - diminue au profit de la convection de la chaleur,

[1] Correspondant : silvani@univ-corse.fr

[2] Correspondant : david.honore@coria.fr

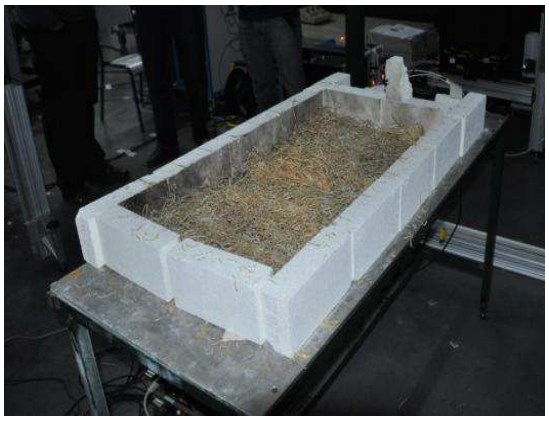
[3] Correspondant : arnaud.susset@rd-vision.com

dont l'augmentation en amplitude est suspectée du fait d'un scénario favorisant l'entrainement amont d'air frais dans le front de flamme. Mais à ce jour, aucune preuve expérimentale de ce régime convectif n'a été produite.

Dans ce but, la présente étude propose de mesurer en laboratoire le champ de vitesse 2D vertical dans le plan médian d'une litière de frisure de pin 12/100 d'un demi-mètre carré et d'obtenir simultanément une image des zones de réaction par imagerie de chimiluminescence OH* perpendiculairement à la propagation du feu. L'incendie se propage après un allumage en ligne dans deux configurations de pente et sans vent extérieur. Pour ces deux cas, le but est de caractériser la géométrie des zones de réaction et le champ aérodynamique autour des flammes, de suivre leurs évolutions au cours de la propagation du feu, et également, grâce au couplage des deux techniques, trouver des éventuelles corrélations entre structures de flammes et champs de vitesse instantanés. En effet même si la mesure PIV est effectuée dans un plan alors que l'imagerie de flamme est intégrée sur la ligne de visée, il a déjà été montré l'intérêt de ce type de couplage pour l'étude de l'interaction entre aérodynamique et zones de réaction sur une flamme turbulente de brûleur Bluff-Body [6].

2 Protocole expérimental

Le dispositif expérimental est un plateau rectangulaire composé d'une sole en fibres réfractaires et délimité par des briques réfractaires. A l'intérieur de celui-ci, un lit de frisure de pin est disposé de façon homogène sur une surface de 83 x 44 cm² (Figure 1). Afin d'obtenir des expériences comparables, les brisures de pins sont pesées avant chaque expérience. La charge végétale est de 400 g/m², uniforme pour des conditions d'hygrométrie de 8% en moyenne pour les végétaux concernés. Celle-ci varie d'environ 1 % entre ses valeurs extrêmes. Le feu est ensuite allumé à une extrémité de la table sur toute sa largeur. Un des objectifs de cette étude est de comparer deux régimes de flammes différents : un feu généré sur un plan horizontal et un feu généré sur un plan incliné. Dans ce cas, l'ensemble du dispositif expérimental est incliné d'un angle de 30°.



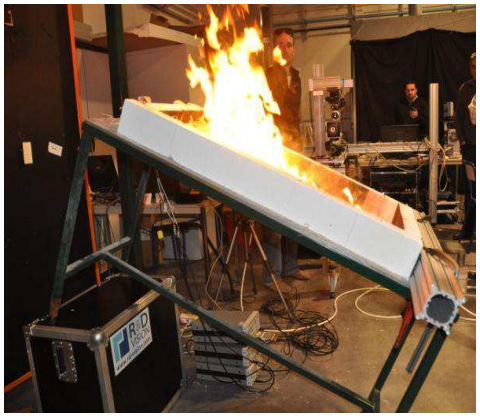


Figure 1 – Dispositif expérimental à plat et en pente

Trois caméras sont utilisées pour caractériser l'écoulement avec trois techniques de mesure distinctes : une caméra pour la PIV (Particle Image Velocimetry), une caméra CCD classique pour la visualisation directe visible et une caméra ICCD pour la chimiluminescence OH*. La caméra pour la PIV est une caméra Hamamatsu C9300-024 avec une résolution de 2048 x 2048 pixels et une dynamique de 12 bits. Elle est équipée d'un objectif Nikon 50mm, d'un filtre passe-bande 532nm d'une largeur de 3nm, et d'un obturateur à cristaux liquides pour limiter le rayonnement de la flamme [7-8]. La caméra est synchronisée avec l'obturateur pour qu'il soit ouvert au minimum (tps ???) (NDXav :Peut on ne preciser que < 100 µs ou faut il préciser chaque set up s'il y en a plusieurs?) pendant la prise du couple d'images PIV. Cette caméra est également synchronisée à une fréquence de 5Hz avec un laser bi-pulse Nd-YAG d'énergie 2 x 250 mJ/pulse opérant à une longueur d'onde de 532nm (7ns par pulse). En sortie de laser, un ensemble de lentilles convergente sphérique et divergente cylindrique réalise un plan de lumière d'une hauteur de 700 mm sur une longueur de 1 m avec une épaisseur d'environ 5 mm. L'acquisition des images de

chimiluminescence OH* est réalisée via une caméra ICCD Roper Princeton Instruments IMAX2 (512 x 512 pixels – 16 bits) équipée d'un objectif UV Goyo 20 mm f/2.8 et d'un filtre interférentiel 308 +/- 10 nm (de transmittivité maximale de 50 %). Ceci permet de s'affranchir du rayonnement thermique de suies ou de parois à haute température [9]. Le gain d'intensification est conservé maximal pour toutes les expériences. La porte d'intensification est synchronisée avec les tirs laser pour démarrer juste après ou au moment du 2nd tir laser. Sa durée varie de 0.5 à 2 ms. Aucun signal de diffusion des particules ou de réflexion laser sur le banc expérimental n'est recueilli même si l'acquisition est faite pendant le tir laser.

La caméra pour la visualisation est une caméra Guppy couleur F080C-IRF avec une résolution de 1032x778px². Elle est équipée d'un objectif SONY 16mm. Elle n'est pas synchronisée avec les autres matériels et fonctionne à une cadence de 21 images par seconde et un temps d'exposition variant entre 1 et 2ms. Grâce à ce temps long, nous avons des images de flammes avec des tirs lasers ce qui permet lors du dépouillement de recaler les séquences de visualisation et celles de PIV.

Cet ensemble de caméras est positionné à environ 2,3m sur une structure indépendante de la table face à la plus grande dimension du rectangle délimitant le feu. Il est donc lui aussi calé à 30° pour les expériences de feu incliné. Le laser est positionné de côté pour générer une nappe laser verticale dans la dimension longitudinale à l'écoulement. La calibration est réalisée avec une mire positionnée dans le plan laser. Le champ observé pour la PIV est de 710x710mm².

L'ensemencement de l'air ambiant entourant la flamme avec des particules d'oxyde de zirconium est réalisé à l'aide d'un ensemenceur cyclonique et de l'air comprimé comme gaz porteur. Pendant l'expérience l'air ensemencé est dirigé dans l'environnement de la flamme tout en restant éloigné. Sa vitesse en sortie d'ensemenceur est suffisamment faible pour ne pas perturber la propagation du feu. En contrepartie, l'ensemencement n'est pas homogène dans l'ensemble du plan laser pendant toute la séquence d'acquisition synchrone d'images correspondant à la propagation du feu sur la longueur du lit de végétal (Figure 3).

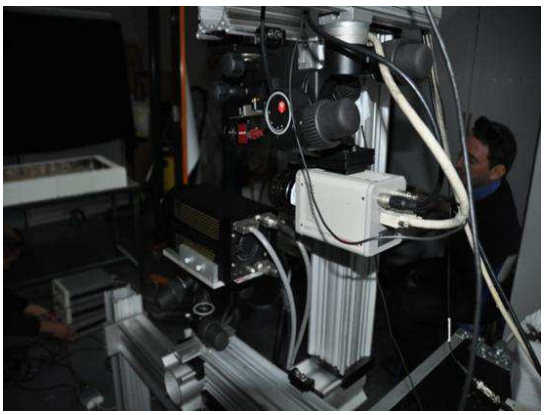


Figure 2 – Montage à trois caméras

Figure 3 – Exemples de réalisation (gauche : pente 0° - droite : pente 30°)

3 Résultats

3.1 Géométrie et cinématique du front de flamme en propagation

Une première caractérisation de la structure de la flamme et de son évolution lors de sa propagation sur un pan horizontal a été réalisée par imagerie de chimiluminescence OH* en vue de face. Pour cela, la caméra est positionnée face à la largeur du lit de frisures de pin qui est alors allumé de l'autre côté. Pour chaque séquence d'images correspondant à une expérience de propagation, on a alors un front quasiment horizontal qui se propage vers la caméra. Le suivi de la géométrie de ce front de flamme lors de la propagation est obtenue par binarisation des images instantanées OH* (Figure 4). On détermine alors les coordonnées du contour inférieur (on peut préciser (meme entre nous simplement) ? C'est quoi le contour intérieur ?) et on calcule les valeurs médiane, moyenne et écart-type des ordonnées pixel sur toute sa largeur. La Figure 4 présente l'évolution de ces valeurs pour une expérience. On voit que - quand l'allumage est suffisamment rapide pour être homogène sur toute la largeur du lit - le contour du front est quasiment horizontal pendant toute la séquence. On a donc une configuration de feu à plat en moyenne bidimensionnelle. Ce qui va faciliter l'analyse des mesures simultanées des champs de vitesse par PIV dans un plan et des images de flamme intégrées sur la profondeur de champ. On note également une très bonne répétabilité d'une séquence à l'autre de la propagation du feu sur le banc expérimental de laboratoire.

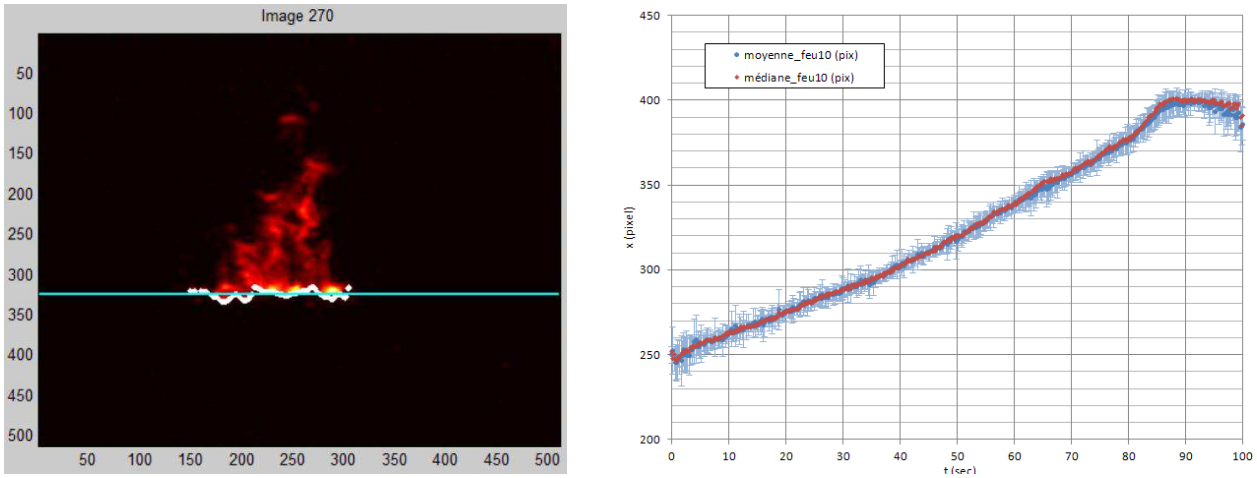


Figure 4 – Exemple d'image OH vue de face et évolutions temporelles de la médiane, la moyenne et de l'écart-type des positions du front de flamme inférieur*

Dans des études antérieures sur des configurations similaires - feu à plat ou en pente sans vent incident [4] - on observe que la pente modifie la topologie du front de flamme en même temps qu'elle augmente fortement la vitesse de propagation du feu. Ceci est effectivement reproduit sur notre banc expérimental. Pour le cas à l'horizontale, on observe principalement une flamme plutôt verticale qui se propage sur toute la longueur du lit pendant un temps de l'ordre de 90" à 100". Pour le cas à 30°, la flamme est très inclinée sur le lit de combustible et la durée de l'expérience est fortement réduite (de l'ordre de 30" à 40"). La Figure 5 présente des images instantanées OH* extraites d'une séquence à 0° et d'une séquence à 30°. Pour la configuration horizontale, on observe trois moments distincts pour la structure de la flamme que l'on retrouve sur chaque réalisation. Une première période juste après l'allumage pendant laquelle le front de flamme reste localisé sur la litière de végétal, puis une seconde période – la plus longue – pour laquelle la flamme après s'être verticalisée semble se propager sans changer de forme, et enfin la troisième période correspondant à l'extinction progressive de la flamme quand elle arrive à l'extrémité du banc expérimental. Ca j'enlève on l'a dit plus haut.

t = 25.4" *t = 53.8"* *t = 118.8"*

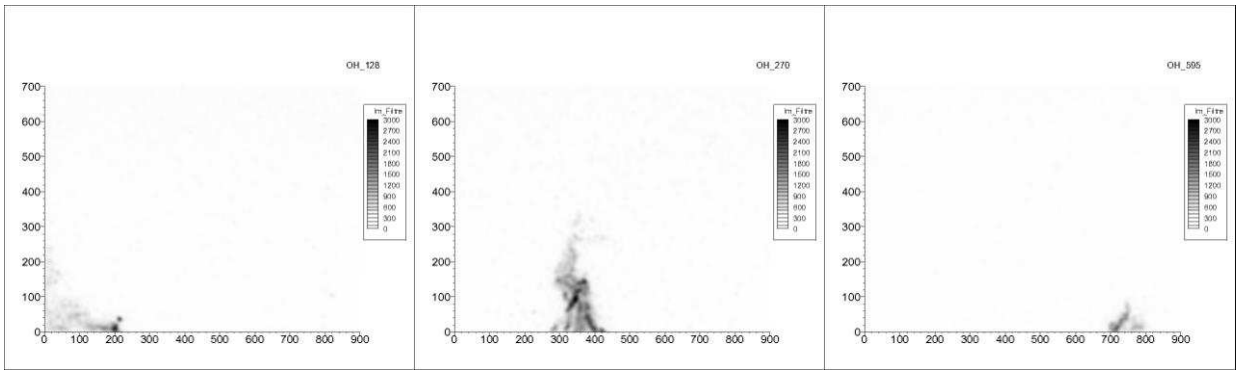


Figure 5 – Exemples d'images instantanées OH (vue de côté) issue d'une séquence*

Afin de quantifier la différence de vitesse de propagation du feu pour les deux configurations de pente, nous avons extrait sur trois profils de ligne correspondant à trois hauteurs y dans la flamme, la position x du barycentre dans la zone de flamme définie par l'image binaire. La Figure 6 présente les évolutions temporelles des positions longitudinales xb des barycentres pour les deux cas de pente. Pour les feux à 0°, on retrouve les 3 étapes caractéristiques de chaque séquence : dans un premier temps, une propagation plutôt de la base de la flamme sur le lit, suivi d'une propagation identique des 3 hauteurs de flamme une fois que celle-ci s'est redressée. L'augmentation de ce déplacement barycentrique cesse enfin quand la flamme arrivé à l'extrémité du lit [t~100 s pour 0° et 40 s pou 30 °]. Pour toutes les séquences à 0°, on observe une évolution linéaire similaire de la position de la flamme verticale, dont la pente est représentative de la vitesse de propagation globale de la flamme (Figure 7). On obtient une vitesse moyenne de 9.7 mm/s pour un écart-type de 1 mm/s. Pour les séquences de pente à 30°, on n'observe plus la distinction initiale entre les 3 barycentres car le début de la flamme est en dehors du champ de la caméra. Avant l'arrivée à l'extrémité du banc expérimental, on retrouve bien l'évolution linéaire de la position de la flamme, avec un décalage entre les 3 barycentres provenant de l'inclinaison de la flamme. Même si les séquences présentent plus de fluctuations, la zone linéaire est toujours suffisamment perceptible pour déterminer aussi une vitesse de propagation (Figure 7). Pour ce cas incliné, la vitesse moyenne est 21.3 mm/s pour un écart-type de 4.5 mm/s. On voit nettement la différence pour les deux cas de pentes avec une vitesse de propagation multipliée par 2.2.

NB : sur la figure 6 gauche, l'unité est (sec) et non (s).NB 2 : a mon avis, ca sert à rien de specifier des decimales sur la vitesse de prop. orsque la rms est de l'ordre de l'unité. 10 mm/s +/- 1 mm/s c'est idem non ? Qu'en pensez vous ?

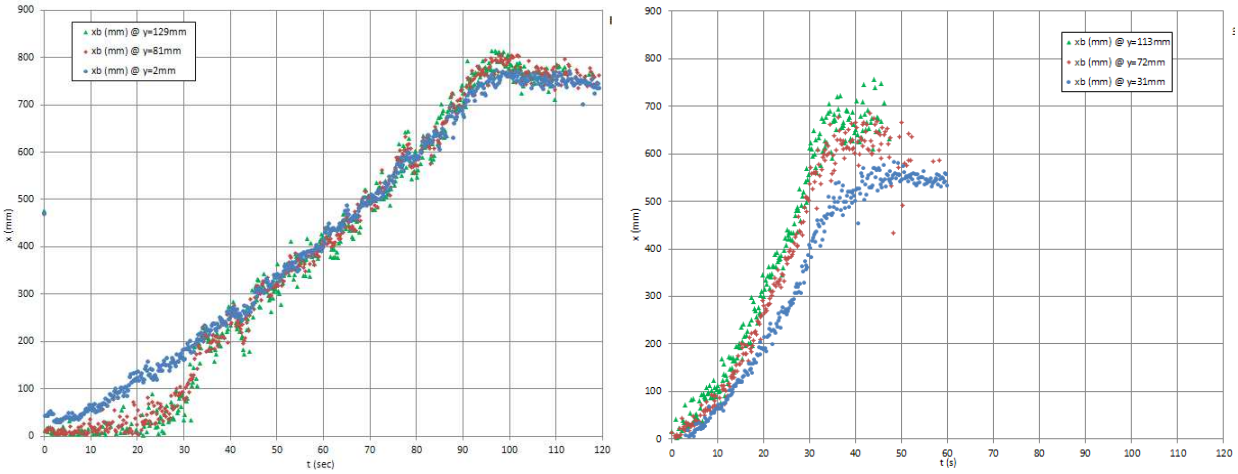


Figure 6 – Evolutions temporelles de la position longitudinale des barycentres à 3 hauteurs dans les flammes (gauche : pente 0° - droite : pente 30°)

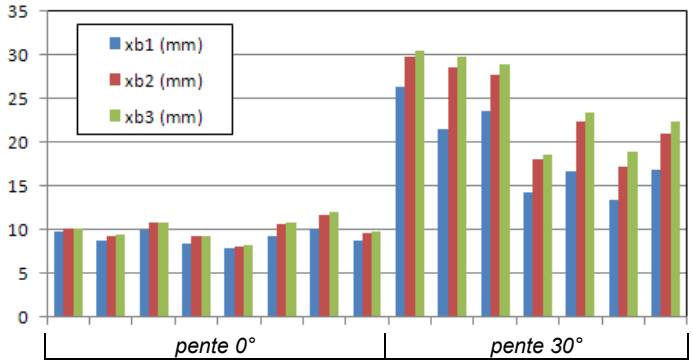


*Figure 7 – Vitesses de propagation du feu issues des séquences d'images OH**

Le même type de résultat est obtenu en appliquant un traitement identique aux séquences d'images de visualisation directe visible obtenues avec la caméra CCD . Ceci montre que l'imagerie visible directe de mise en œuvre plus aisée et à moindre coût que l'imagerie de chimiluminescence peut aussi être utilisée pour le suivi temporel de la propagation de feu.

@Coria boys :

A ce stade, je vous encourage à faire assez vite un papier pour Fire Safety Journal ou même dans Meas.Scienc and Tech. L'idée que des diagnostics cinématiques peuvent être fait avec des videos HD « pas chères » est très importante, au cœur de débats ouverts dans la communauté Feu et cela, même s'il conviendra de discuter de la dépendance d'échelle. Bcp de sujets de thèse vont demarrer dans les 3 ans sur ces questions…

La chimiluminescence étant issue de réactions chimiques exothermiques pendant l'oxydation du combustible, le niveau de signal de chimiluminescence est fortement corrélé au dégagement de chaleur local [9]. La Figure 8 présente l'évolution du signal de chimiluminescence total pris à l'intérieur de la zone de flamme définie par l'image binarisée. En comparant les périodes pour laquelle la flamme est verticale pour la pente nulle (de 40" à 90") et quand la flamme inclinée en pente 30 ° est entièrement dans le champ d'imagerie OH* (de 16" à 33") avant qu'elles n'atteignent l'extrémité du lit, on voit que même si elle présente beaucoup plus de fluctuations, la flamme est toujours plus intense – en moyenne deux fois plus - sur le lit incliné à 30° que pour le cas à l'horizontal.

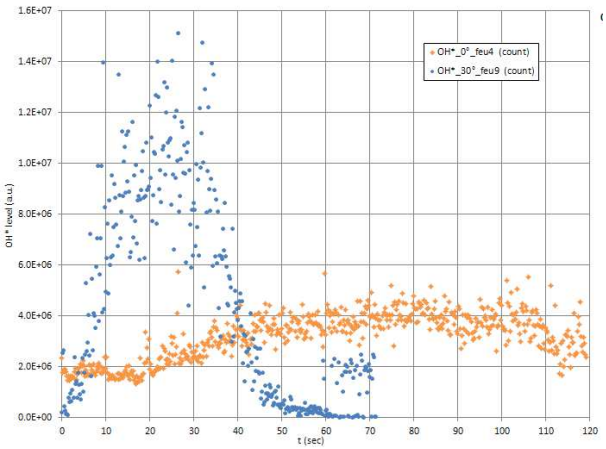


Figure 8 – Evolutions temporelles du signal de chimiluminescence dans la zone de flamme (gauche : pente 0° - droite : pente 30°)

3.2 Corrélations spatio-temporelles entre champs aérodynamiques et structures de flammes

L'ensemble des séquences d'images de particules pour les configurations à plat ou inclinée a été traité avec le logiciel R&D Vision DirectPIV 3.0 [10]. Un calcul d'inter-corrélation des images de particules est effectué avec un algorithme standard une passe (fenêtre d'interrogation de 50x50pixels² et un recouvrement de 60% dans chaque direction). Les champs instantanés sont post-traités avec un filtrage local (filtre itératif avec 10 itérations, un seuil de 75% et une zone de voisinage 7x7) et un filtre global légèrement différent pour les deux configurations : des valeurs limites de -± 2 m/s et ± 5 m/s pour les deux composantes de vitesse Vx et Vy pour le plan incliné et des intervalles de [-2 ; +2] pour Vx et [-2 ; +4] pour Vy pour la configuration horizontale. Une interpolation gaussienne est alors appliquée pour lisser les données et combler le manque d'informations. L'acquisition simultanée des images de particules et de chimiluminescence OH* permet d'associer champ de vitesse et structure instantanée de flamme. La Figure 9 présente des exemples de résultats ainsi obtenus pour le lit de végétal horizontal.

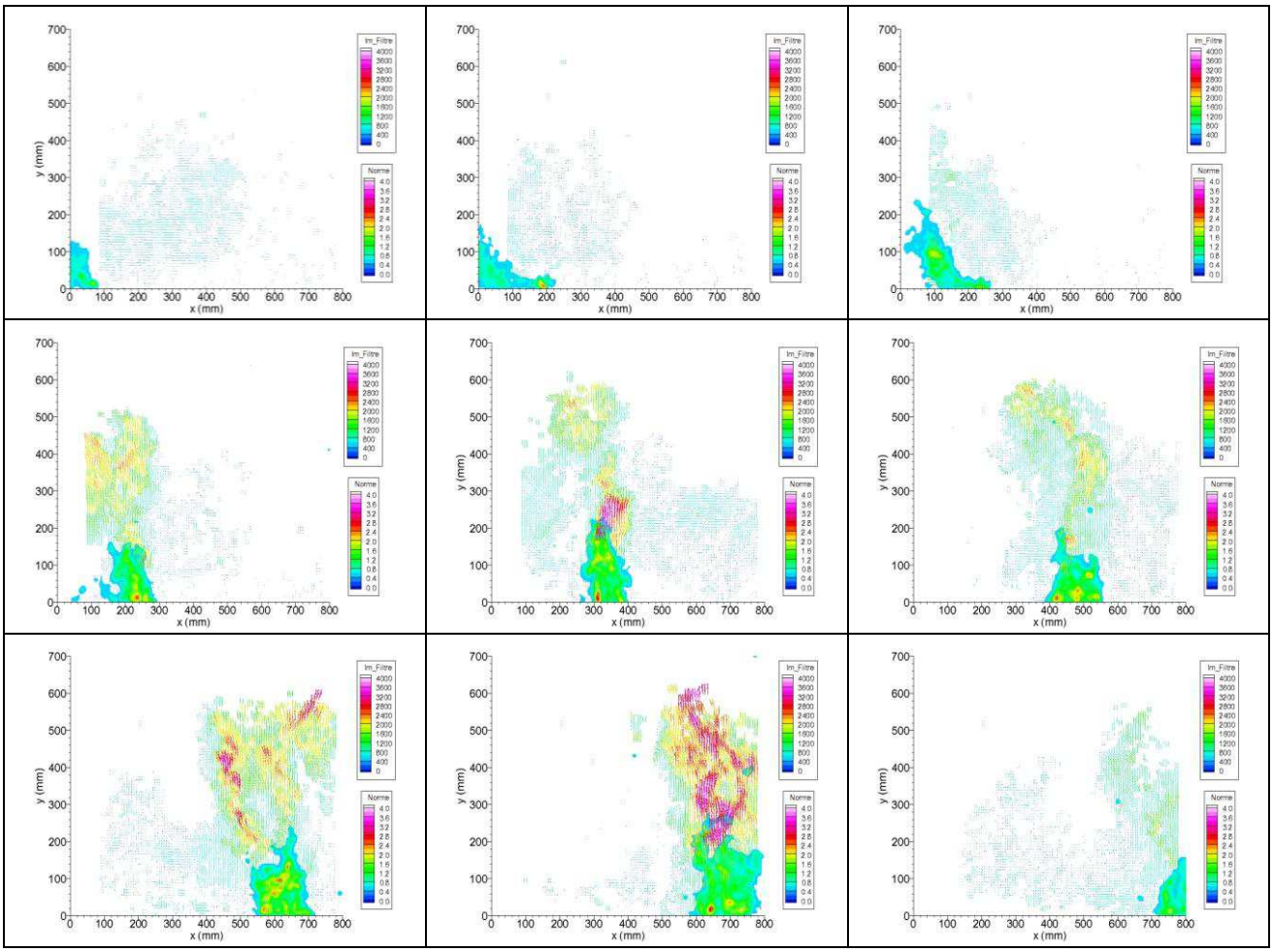


Figure 9 – Champs instantanés de vitesse et images simultanées de chimiluminescence OH issus d'une séquence pour le plan horizontal*

On observe la plupart du temps une très bonne corrélation spatio-temporelle entre position de la flamme et l'accélération des gaz brûlés dans son panache. Le champ de vitesse n'est pas toujours bien calculé loin de la flamme du fait des difficultés d'ensemencement homogène de l'air au repos avec des particules dans un grand volume.

Dans ce cas de propagation à plat, la PIV montre un écoulement dominé par la flottabilité avec des mécanismes d'entrainement d'air frais extérieur dans la colonne convective et des modes de

pulsation dans le champ de vitesse. On notera la valeur de 4 m/s comme ordre de grandeur des maximas de la norme des vitesses, et de l'ordre de 0.5 m/s pour la composante horizontale de la vitesse des gaz entraînés autour de la flamme.

La Figure 10 présente des exemples de couples image de flamme / champ de vitesse issus d'une séquence acquise pour la configuration à 30°. Dans ce cas, la représentation du contour de flamme ne peut plus bénéficier de la forme quasi 2D du front de flamme en propagation. En effet, dans cette configuration, le front de flamme adopte une forme en V, complètement 3D, s'étirant au centre au fur et à mesure de la propagation du feu. On remarque toutefois là encore une très bonne corrélation entre champ aérodynamique et image instantanée de flamme, même si celle-ci est intégrée le long de la ligne de visée. La dynamique de la flamme est plus importante. Les maxima de vitesse en aval de la flamme sont cette fois de l'ordre de 6 m/s pour une composante horizontale pouvant atteindre 1.5 m/s près de la zone de réaction. On peut donc penser qu'il y a effectivement une augmentation d'entrainement dans un front de flamme étiré dont la tête avance sur le plan lumière, avec une très nette pénétration des gaz frais amont dans la zone de combustion. Cette augmentation de l'entrainement amont explique une augmentation de la dynamique de mélange dans le front de flamme et transforme la topologie de cette dernière en la couchant sur le végétal et en augmentant les contraintes mécaniques sur les surfaces de réaction, qui gagnent en corrugation et fluctuations.

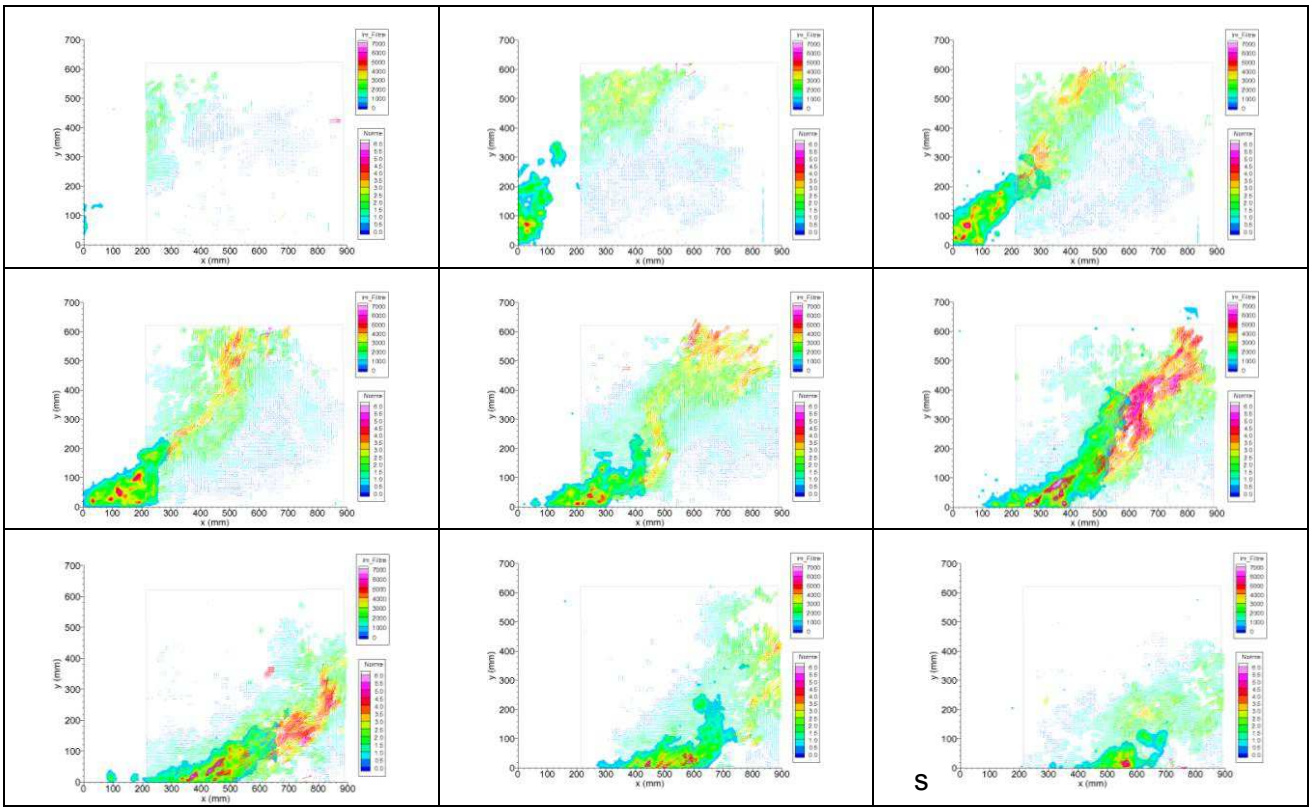


Figure 10 – Champs instantanés de vitesse et images simultanées de chimiluminescence OH issus d'une séquence pour le plan incliné à 30°*

4 Conclusion et perspectives

L'expérience présentée ici permet l'étude spatio-temporelle de la propagation d'un feu de végétal. A cause de la dépendance d'échelle, les essais en laboratoire ne permettent pas de reproduire tous les phénomènes d'un feu réel, mais la configuration choisie en restitue assurément certains, notamment l'effet de la pente du lit végétal sur la combustion. De plus, le protocole expérimental est contrôlé et répétable pour envisager la mise en œuvre de diagnostics optique en combustion. Ainsi, l'analyse expérimentale a été réalisée par PIV pour la caractérisation aérodynamique et imagerie de chimiluminescence OH* pour la caractérisation des structures de flamme. Ces deux

techniques de mesure étant couplées et synchronisées pour rechercher des corrélations entre champs aérodynamique et scalaire.

Ce protocole bâti sur des diagnostics optiques de la combustion doit permettre de livrer des cas de référence pour calibrer les outils intrusifs en développement et destinés aux essais feux, où PIV et chimiluminescence ne sont pas envisageables pour l'instant.

Les résultats montrent ainsit deux régimes de flammes suivant l'inclinaison du lit de combustible. Sur un plan horizontal, on observe la propagation d'une flamme verticale dominée par la flottabilité, qui se déplace en translation horizontale avec un front de réaction localisé sur la partie supérieure du lit végétal. A 30° de pente, la flamme s'incline vers le lit végétal : elle est plus réactive, sa propagation est beaucoup plus rapide et les effets d'entrainement de l'air semblent plus importants.

L'étude expérimentale de la propagation de flamme d'incendie naturel est donc un nouveau champ d'application de la vélocimétrie laser et des diagnostics optiques en combustion, pour lequel de nombreuses perspectives d'étude et de développement subsistent. On peut ainsi citer l'amélioration des conditions d'ensemencement de l'air environnant le feu. Dans la flamme et son proche voisinage, la contribution du signal de diffusion des suies en plus de celui des particules de ZrO_2 dans le calcul d'inter-corrélation dans les fenêtres d'analyse PIV reste à quantifier. Enfin, le même type de couplage de diagnostics optiques peut être envisagé à plus grande échelle.

Références

[1] Morandini F, Silvani X, Experimental investigation of the physical mechanisms governing the spread of wildfires, International Journal of Wildland Fire, 2010;19: 570-82.

[2] Boulet P, Parent G, Collin A, Acem Z, Porterie B, Clerc JP, Consalvi JL, Kaiss A, Spectral emission of flames from laboratory-scale vegetation fires, International Journal of Wildland Fire, 2009;18: 875-84.

[3] Parent G, Acem Z, Lechêne S, Boulet P, Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire, International Journal of Thermal Sciences, 2010;49: 555-62.

[4] Silvani X, Morandini F, Dupuy J-L, Effects of slope on fire spread observed through video images and multiple-point thermal measurements, Experimental Thermal and Fluid Science, 2012;41: 99-111.

[5] Morandini F, Silvani X, Susset A, Feasibility of particle image velocimetry in vegetative fire spread experiments, Experiments in Fluids, 2012;53: 237-44.

[6] A. Susset, J.M. Most, M. Trinité, D. Honoré, M. Perrin. Etude des corrélations spatio-temporelles entre le champ aérodynamique et les zones réactives d'une flamme turbulente non-prémélangée stabilisée par un brûleur bluff-body. 6ème Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser. I.S.L. Saint Louis. 22-25 Septembre 1998.

[7] Honoré D., Maurel S., Quinqueneau A. Particle Image Velocimetry in a semi-industrial 1 MW boiler. The 4th International Workshop on PIV, Göttingen (Allemagne), Sept. 17-19, 2001.

[8] C. Rottier, G. Godard, F. Corbin, A.M. Boukhalfa, D. Honoré. An endoscopic Particle Image Velocimetry system for high temperature furnaces. Meas. Science and Technol. 21:115404, 2010.

[9] D. Honoré. Advanced measurements in industrial combustion systems. In "Turbulent Combustion", VKI Lecture Series 2007-08, Ed. L. Vervisch, D. Veynante, J.P.A.J. Van Beeck, Von Karman Institute for Fluid Dynamics – ISBN-13 978-2-930389-78-8 ©2007.

[10] Susset A, Most J, Honoré D, A novel architecture for a super-resolution PIV algorithm developed for the improvement of the resolution of large velocity gradient measurements, Experiments in Fluids, 2006;40: 70-79.

Remerciements

L'ensemble des auteurs remercie Alexis Coppalle, Martine Talbaut et Jérôme Yon du CORIA pour avoir mis à disposition leur laboratoire pour la réalisation de cette expérience.