

# DÉVELOPPEMENT DE SYSTÈMES DE MESURE BASÉS SUR LA STÉRÉOVISION DÉDIÉS AUX FEUX EN PROPAGATION

Lucile Rossi<sup>1</sup>

1 : UMR CNRS SPE 6134, Université de Corse, 20250 Corte, France  
<http://www.firevision.fr>

## Résumé

Les feux de forêt représentent un risque majeur pour de nombreux pays dans le monde. Pour lutter contre ce danger, des actions de gestion, de prévention et de lutte sont réalisées. L'efficacité de ces trois types d'action est liée à la connaissance des phénomènes qui interviennent lors de la propagation des feux et à l'amélioration des modèles de comportement. Les feux sont caractérisés par l'évolution temporelle de leur position, vitesse, hauteur, surface et volume. Il est donc nécessaire de développer des systèmes permettant la mesure de ces caractéristiques. Depuis une dizaine d'années, des travaux utilisant le traitement d'image et la vision ont été menés pour obtenir des données estimées sur des feux expérimentaux. Trois familles de systèmes sont apparues : la première est dédiée aux feux se propageant en laboratoire. Elle utilise des informations 2D et ne permet l'estimation que d'un nombre restreint de caractéristiques. La deuxième est dédiée aux feux se propageant à l'extérieur sur de grands terrains de pente uniforme aménagés. Elle utilise des méthodes de traitement d'images et de vision et permet l'obtention d'un modèle de perception 3D du feu à partir d'information 2D. Ces méthodes nécessitent le positionnement sur le terrain de repères de position et de hauteur et sont difficilement transposables sur différentes configurations de terrain ; d'autre part, elles ne permettent pas l'estimation de la surface et du volume d'un feu. Une troisième famille de systèmes utilise la stéréovision pour obtenir un ensemble de points tridimensionnels de feu à partir desquels les caractéristiques géométriques des feux sont estimées. Cet article présente les travaux de recherche menés par l'auteur qui est à l'origine de la troisième famille de systèmes de mesure dédiés aux feux en propagation.

**Mots clés :** Feux de forêt, caractéristiques géométriques, mesure, stéréovision.

## Abstract

*Forest fires are a major risk to many countries around the world. To fight against this hazard, management actions, prevention and fight are performed. The effectiveness of these three types of action is related to the knowledge of the phenomena involved in the spread of fires and to the improvement of the fire behavior models. Fires are characterized by the temporal evolution of their position, rate of spread, height, surface and volume. It is thus necessary to develop systems able to measure these geometrical characteristics. For ten years, work in image processing and vision have been made to develop such devices used in the context of experimental spreading fires. Three families of systems have emerged : the first one is dedicated to laboratory spreading fires. It uses 2D information and it allows the estimation of a limited number of characteristics. The second one is dedicated to outdoor fires spreading on large lots of uniform slope landscaped. It uses image processing and vision methods and it permits to obtain a 3D fire perception model from 2D information. These methods require the placement of position and height markers on the ground and are not easily transferable to various types of terrain. Moreover, they do not allow the estimation of the surface and volume of a fire. A third family of systems uses stereovision in order to obtain tridimensional fire points from which the fire geometrical characteristics are estimated. This paper presents the research conducted by the author which is at the origin of the third family of measurement systems dedicated to spreading fires.*

**Keywords :** Wildland fire, geometrical characteristics, measure, 3D vision.

## 1. Introduction

Les feux de forêt représentent un risque majeur pour de nombreux pays dans le monde. En Europe, 10 000 km<sup>2</sup> de végétation sont détruits chaque année, et jusqu'à 100 000 km<sup>2</sup> en Amérique du Nord et en Russie. Les événements qui se sont déroulés ces trois dernières années fournissent des exemples de désastres causés par les feux : en 2009, un feu en Australie causa la mort de 200 personnes et brûla environ 3 000 km<sup>2</sup>. En 2010 en Is-

raël, un feu causa la mort de 40 personnes. Cette même année, 8 000 km<sup>2</sup> brûlèrent en Russie et le feu causa le décès de 50 personnes. Les feux provoquent des dégâts environnementaux (déforestation et désertification, pollution de l'air, émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère qui représente 20% des émissions totales, remise en circulation de métaux lourds et de radionucléides), des pertes économiques (destruction d'habitats et de moyens de lutte) et des pertes humaines parmi le public et les pom-

piers.

Pour lutter contre ce risque majeur, des actions de gestion, de prévention et de lutte sont réalisées. L'efficacité de ces trois types d'action est liée à la connaissance des phénomènes qui interviennent lors de la propagation des feux et à l'amélioration des modèles de comportement (McArthur, 1966; Forestry Canada Fire Danger Group, 1992; Balbi et al., 2007; Rossi et al., 2011). Les feux en propagation sont caractérisés par l'évolution temporelle de leur position, vitesse, hauteur, surface et volume. Pour obtenir des données expérimentales, des propagations de feux sont réalisées en laboratoire et en extérieur. Les propagations de feux réalisées en laboratoire sont faites en maîtrisant les conditions expérimentales et sont reproductibles quasiment à l'identique. Les propagations de feux menées en extérieur se rapprochent des conditions réelles mais elles sont plus complexes à réaliser et il est impossible de reproduire deux fois la même expérience.

Actuellement, il n'existe pas de dispositifs commerciaux permettant la mesure des caractéristiques géométriques des feux en propagation. Depuis une dizaine d'années, des recherches sont réalisées en traitement d'images et en vision pour développer de tels systèmes. Pastor et al. (2006) proposent une méthode dédiée aux expériences de propagation de feux faites en laboratoire sur une surface plate. Une caméra est utilisée pour suivre l'évolution temporelle du front de feu linéaire et calculer sa vitesse de propagation. Les auteurs utilisent quatre points de calibration positionnés aux extrémités de la surface de propagation rectangulaire dont les dimensions sont connues. Cette méthode est limitée à des surfaces planes sur lesquelles se propagent des fronts linéaires. Martinez-de Dios et al. (2006) ont développé un système pour le suivi de feux de forme curviligne obtenu sur un plateau incliné. Deux caméras positionnées respectivement en face et sur le côté par rapport à la direction de propagation du feu sont utilisées. La méthode développée exploite des informations 2D et ne peut pas estimer des informations pour l'ensemble des points du front. Seule la hauteur du point le plus avancé du front de feu et son inclinaison sont obtenues à partir des images acquises par la caméra latérale et la vitesse de propagation est calculée à partir de la vue de face du feu. Des techniques de vision par ordinateur sont également utilisées pour suivre les feux de végétation dans (Martinez-de Dios et al., 2008). Le système calcule un modèle de perception tridimensionnel d'un feu en propagation à partir de vues complémentaires qui incluent une vision aérienne. Des informations issues de différents capteurs tels que des capteurs de télémétrie et des systèmes de localisation GPS sont utilisées. Cette méthode nécessite le positionnement sur le terrain de repères artificiels ou naturels (arbres ou camions de pompiers) pour réaliser la calibration des différentes caméras. De plus, le matériel utilisé est onéreux et le procédé développé n'est pas applicable pour le suivi de feux à l'échelle du semi-terrain ou du laboratoire. Très récemment, un système de lo-

calisation multi-vues a été développé par Verstockt (Verstockt et al., 2011). Il fusionne les résultats de détection simple-vue de différentes caméras en utilisant des projections homographiques sur de multiples plans horizontaux et verticaux qui découpent la scène. Le croisement de ces plans crée une grille de points 3D de capteurs virtuels. En associant cette grille et une procédure de nettoyage utilisant des filtres dans les domaines temporel et spatial, des informations relatives à la position du feu, sa taille et sa direction de propagation sont estimées à partir de données vidéo. Cette méthode nécessite de tracer au sol un carré de 1 m de côté et elle est difficilement applicable en extérieur.

Une recherche utilisant la stéréovision est menée depuis 2007 par l'auteur de cet article afin de mesurer les caractéristiques géométriques de feux en propagation telle que la position, la vitesse, la hauteur, la surface et le volume avec la volonté de développer un système pouvant être utilisé aussi bien en laboratoire qu'en extérieur, ne nécessitant pas le positionnement de repères, ni la connaissance de la topographie de la surface de propagation du feu. Cet article présente cette recherche.

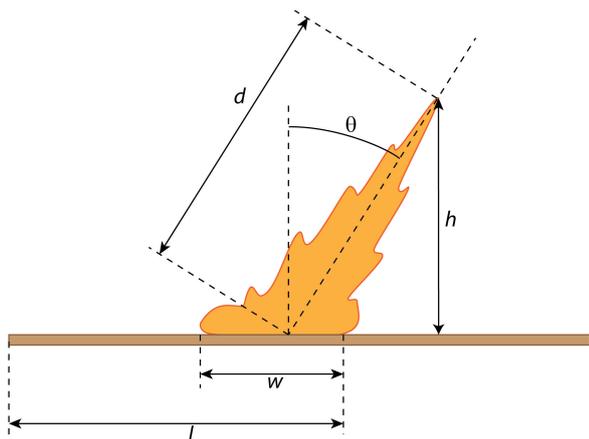
## 2. Contexte scientifique

Plusieurs contextes déterminent un besoin de métrologie pour les feux : les chercheurs ont besoin de comprendre les phénomènes intervenant lors de la propagation des incendies, de les modéliser et de valider leurs modèles de comportement en comparant les données numériques avec des données réelles ; les professionnels de la lutte contre les feux déploient et adaptent leurs moyens de lutte en anticipant le comportement du feu et en se basant sur des estimations visuelles de caractéristiques géométriques du feu et des conditions climatiques. Un premier ensemble de caractéristiques géométriques utilisées par ces deux communautés est présenté en Figure 1. Leur estimation peut être faite à partir de traitement d'images prises de côté par rapport à la direction de propagation du feu.

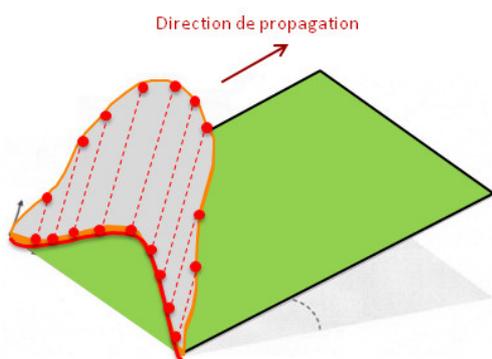
Les chercheurs travaillant sur les modèles de comportement de feux ont besoin d'informations supplémentaires. Il s'agit de la position au sol du front de feu, la vitesse de chacun des points et leur hauteur, la surface et le volume du feu. Ces données nécessitent des informations tridimensionnelles (Figure 2).

Une contrainte s'est imposée à la recherche présentée dans cet article : dans une perspective de transfert technologique, développer des systèmes utilisables et accessibles à l'achat au plus grand nombre. Toutefois, les systèmes employés doivent permettre de travailler en tenant compte des points suivants :

- Les flammes ne présentent pas d'arêtes ;
- Le mouvement des flammes est imprévisible ;
- La propagation en extérieur rajoute des difficultés qui sont (Figure 3) :
  - Les conditions de luminosité, variables au cours d'une même expérience de propagation,



**FIGURE 1 :** Vue de côté d'un feu et description des caractéristiques géométriques d'un feu : position du point au sol le plus avancé du front ( $l$ ), largeur du front ( $w$ ), hauteur ( $h$ ) et inclinaison par rapport à la normale au plan de propagation du feu ( $\theta$ ).



**FIGURE 2 :** Front de feu sur un terrain en pente et/ou en présence de vent.



**FIGURE 3 :** Front de feu en semi-terrain.

- La couleur du feu peut ne pas être homogène et varier du jaune, au rouge à l'orange et au blanc,
- Il peut y avoir lors de la combustion un dégagement de fumées plus ou moins denses et plus ou moins noires qui peut masquer des zones de flamme.

Les travaux présentés dans cet article sont basés sur l'utilisation de la stéréovision dans le but d'obtenir des points 3D de feu à partir desquels les caractéristiques géométriques des feux sont estimées.

### 3. Système de stéréovision

Pour éviter la phase de calibration nécessaire à tout système de stéréovision (Hraud et Monga, 1995), les travaux ont été initiés avec un système trinoculaire pré-calibré qui comprend trois caméras rigidement liées (la distance entre les deux plus proches caméras est de 12 cm et celle entre les deux caméras les plus éloignées est de 24 cm). Il s'agit de la caméra Bumblebee XB3 de chez PT Grey (PtGrey, 2012). Elle possède un champ de vision horizontal (HFOV) de  $66^\circ$ , une distance focale de 3,8 mm et des capteurs CCD 1/3" Sony ICX445AQ. Le système est pré-calibré contre les distorsions et désalignements, la résolution d'image est de  $1280 \times 960$  et la fréquence d'acquisition de 15 images/s. Les images des 3 caméras sont acquises simultanément sous un format brut; elles sont rectifiées deux à deux avec les paramètres intrinsèques et extrinsèques du système de stéréovision et interpolées en couleur en post-traitement.

### 4. Obtention de points 3D de feu par stéréovision

Les points 3D de feu sont obtenus à partir de l'algorithme suivant (Akhloufi et al., 2008; Rossi et al., 2011) :

1. Segmentation des images pour l'extraction des régions de feu ;
2. Détection de points d'intérêt dans les régions segmentées ;
3. Calcul automatique de la disparité au cours du temps et appariement de points d'intérêt ;
4. Calcul de points 3D en utilisant la stéréocorrespondance.

#### 4.1. Segmentation d'images de feux

Deux algorithmes différents sont utilisés pour segmenter les zones de feu dans les images prises en laboratoire et en extérieur. Ceci est dû au fait que les couleurs de feu et l'environnement sont très différents. L'algorithme de segmentation des feux en extérieur qui a été développé utilise des informations combinées issues des systèmes de couleur YUV et RGB (Westland et Ripamonti, 2004). Des travaux menés sur notre base d'images et sur des images d'Internet de feu en extérieur ont montré que le canal « V » du système de couleur YUV

permettait de segmenter des zones de feu avec toutefois de petites détections parasites de certaines végétations de couleur jaune. Une classification non supervisée K-means d'ordre 2 est ensuite appliquée au canal «V» pour extraire les zones les plus grandes correspondantes aux zones de feu. La figure 4 donne le résultat de cette procédure pour l'image présentée en Figure 3 ; on peut constater que la plus grande zone segmentée par le canal «V» correspond à la zone de feu.



FIGURE 4 : Canal «V» du système YUV.

La couleur moyenne  $\bar{m} = (m_R, m_V, m_B)$  et l'écart type  $\sigma = \max\{\sigma_R, \sigma_V, \sigma_B\}$  des pixels de la plus grande zone segmentée par le canal « V » sont ensuite déterminés dans le système de couleur RVB en utilisant un modèle 3D gaussien (Gonzales et al., 2004). Les pixels de cette plus grande zone sont ensuite vérifiés dans le système de couleur RVB afin de déterminer si leur couleur est proche de la couleur moyenne du feu. Ceci est réalisé de la façon suivante : un pixel est représenté par un vecteur à trois dimensions  $p = (p_R, p_V, p_B)$ . Il est classé en utilisant la formule suivante :

$$\begin{cases} \|p - \bar{m}\| \leq k\sigma & z \in \text{feu} \\ \text{autrement} & z \notin \text{feu} \end{cases} \quad (1)$$

Où  $\|p - \bar{m}\| = ((p_R - m_R)^2, (p_V - m_V)^2, (p_B - m_B)^2)^{\frac{1}{2}}$  et  $k$  est une constante. Les résultats d'une telle segmentation est présentée en Figure 5. L'image est ensuite binarisée et seule la zone de feu est maintenue en blanc dans l'image. A partir de cette dernière, des opérateurs mathématiques morphologiques sont appliqués pour combler d'éventuels trous apparaissant dans la zone de feu du fait de la présence de fumée. La combustion en laboratoire est plus complète et génère des fronts de feu de couleur blanche et jaune (Figure 6). Pour segmenter les images de feu en laboratoire, des informations dans le système de couleur RVB sont directement utilisées de sorte d'extraire les régions de couleurs blanche (RVB (255,255,255)) et jaune (RVB (255,255,0)). La procédure de segmentation est initialisée avec une valeur de seuil égale à 5 et elle est réalisée plusieurs fois avec un seuil croissant jusqu'à ce que la superficie de la zone sélectionnée soit stable. Les valeurs de seuil utilisées

pour segmenter les zones blanches et jaunes de l'image sont déterminées séparément et calculées pour chaque image de la séquence analysée. Les zones blanches et jaunes sont ensuite assemblées et l'ensemble ainsi formé constitue la zone de feu pour la suite du traitement.



FIGURE 5 : Zone de feu extraite.



FIGURE 6 : Front de feu en laboratoire.

En extérieur et en laboratoire de petites zones de braises incandescentes peuvent être détectées par les deux algorithmes présentés ; elles sont éliminées en considérant leur petite taille.

Les deux méthodes de segmentation qui ont été développées présentent l'avantage de ne pas nécessiter d'intervention humaine dans le traitement. Le manque d'images de feu en extérieur présentant des difficultés de segmentation telles que la présence de couleur non homogène de flamme, de fumées plus ou moins denses et noires, de conditions variées d'environnement et d'illumination rend difficile un test quantifié d'efficacité.

#### 4.2. Détection de points d'intérêt

L'image binarisée qui est le résultat de l'étape de segmentation présente des discontinuités de luminance brutales. Le contour de feu final est obtenu en utilisant l'algorithme de Canny. Une version modifiée de l'algorithme

de détection de points d'intérêt de Harris est ensuite appliquée pour extraire les points d'intérêt du contour (Harris et Stephens, 1988; Schmid et al., 2000) (Figure 7).



FIGURE 7 : Points d'intérêt détectés.

#### 4.3. Calcul automatique de la disparité et appariement

Afin de traiter automatiquement les séquences d'images de front de feu, un algorithme de calcul automatique de disparité a été développé. Dans le cas d'une paire stéréo alignée d'images, la disparité et la profondeur d'un objet sont liées :

$$z = \frac{B \times f}{d} \quad (2)$$

Où  $d$  est la disparité,  $f$  est la focale,  $B$  est la distance entre les deux caméras de stéréovision, et  $z$  est la position en profondeur de l'objet.

Si l'objet se déplace, la valeur de sa profondeur et donc de sa disparité change. L'algorithme suivant est réalisé pour chaque ligne de l'image segmentée (Figure 8). Soit :

- $X_{max}$  l'abscisse maximum des points de feu détectés ;
- $X_{min}$  l'abscisse minimum des points de feu détectés ;
- $\Delta X_{max}$  est la valeur absolue de la différence entre  $X_{max}$  de l'image de gauche et  $X_{max}$  de l'image de droite ;
- $\Delta X_{min}$  est la valeur absolue de la différence entre  $X_{min}$  de l'image de gauche et  $X_{min}$  de l'image de droite.

La différence  $d = (\Delta X_{max} + \Delta X_{min})/2$  est calculée ; on suppose que  $d$  est la disparité par ligne des points correspondant dans les deux images. A partir de la position du point correspondant de la première image  $x_1$ , on cherche le point  $x$  correspondant sur la même ligne et dans l'intervalle  $[x_1 + 0,75d, x_1 + 1,25d]$ . Pour chacun des points présents dans cet intervalle, un coefficient de corrélation est calculé en utilisant la fonction de corrélation normalisée par la valeur d'illumination moyenne sur le voisinage avec une fenêtre de  $11 \times 11$  points (Trucco et Verri, 1998).

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (G_{mn} - \bar{G})(H_{mn} - \bar{H})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (G_{mn} - \bar{G})^2 \sum_m \sum_n (H_{mn} - \bar{H})^2}} \quad (3)$$

Où  $G$  et  $H$  sont les régions délimitées par la fenêtre de corrélation dans chaque image,  $\bar{H}$  est le niveau moyen de gris dans la fenêtre  $H$ ,  $\bar{G}$  est le niveau moyen de gris dans la fenêtre  $G$ ,  $G_{mn}$  est le niveau de gris dans la fenêtre  $G$ ,  $H_{mn}$  est le niveau de gris dans la fenêtre  $H$ .

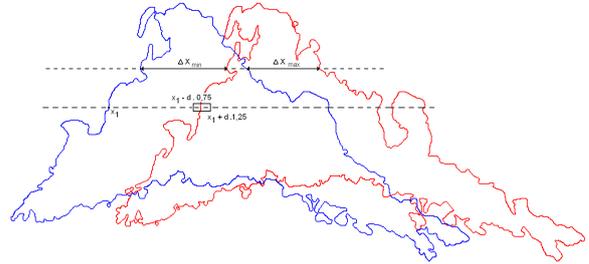


FIGURE 8 : Calcul de disparité par ligne.

A l'intérieur de chaque intervalle, le point dont le score de corrélation est maximum et supérieur à 0,3 est sélectionné. Si plusieurs points candidats ont le même score à l'intérieur du même intervalle, la priorité est donnée à celui situé le plus à gauche et qui n'est pas encore apparié.

Cette procédure d'appariement est effectuée de gauche à droite et de droite à gauche. Enfin, une procédure finale est effectuée pour éliminer les appariements erronés. On suppose que le feu est un objet continu aussi la différence de disparité entre deux points proches doit être petite. A partir de la disparité de l'ensemble des points appariés, la moyenne  $\bar{d}$  et l'écart type  $\sigma_d$  sont calculés. Les points sélectionnés sont ceux qui vérifient :

$$|d_i - \bar{d}| \leq \sigma_d \quad (4)$$

Où  $d_i$  est la disparité du  $i^{me}$  point apparié.

#### 4.4. Calcul de points 3D

Un algorithme de triangulation permet d'obtenir les coordonnées tridimensionnelles des points appariés (Figure 9) (Hartley et Zisserman, 2003). L'origine du repère des points 3D se situe au centre de la caméra de gauche du système trinoculaire. L'axe horizontal des X correspond à la largeur du front de feu ; l'axe vertical des Y correspond à sa hauteur et l'axe des Z correspond à sa profondeur.

Un rendu de surface tridimensionnelle est obtenu en appliquant l'algorithme de Crust sur l'ensemble des points 3D (Amenta et al., 1998). Cet algorithme travaille avec des points non organisés et il est basé sur le diagramme de Voronoï 3D et la triangulation de Delaunay. La figure 10 présente la forme 3D du front ainsi obtenu à partir des points présentés en figure 9. Ce rendu 3D permet visuellement d'estimer si la forme reconstruite est compatible avec l'image 2D de départ et donne des premières informations sur la hauteur (axe des Y), la profondeur (axe des Z) et la largeur du feu (axe des X).

## 5. Estimation de caractéristiques géométriques de feu

A partir des points 3D de feu obtenus à chaque instant d'acquisition d'images, plusieurs caractéristiques géométriques du front de feu peuvent être estimées (Rossi et al., 2010; Molinier et al., 2011) :

- La position au sol du front ;
- La vitesse de propagation des points du front ;
- La hauteur et l'inclinaison du front ;
- La surface d'un front de feu et facteur de forme.

### 5.1. Position du front au sol

Les points 3D de feu obtenus sont irrégulièrement répartis dans l'espace et il est nécessaire de différencier ceux qui sont dans la partie basse du front de ceux qui appartiennent à la partie haute de la flamme dans le but d'estimer la position du front au sol. Les images 2D sont utilisées pour réaliser cette séparation. La figure 11 montre un exemple de la stratégie de sélection de points ; les points de la base du front sont en rouge et ceux de la partie haute du front sont en bleu.

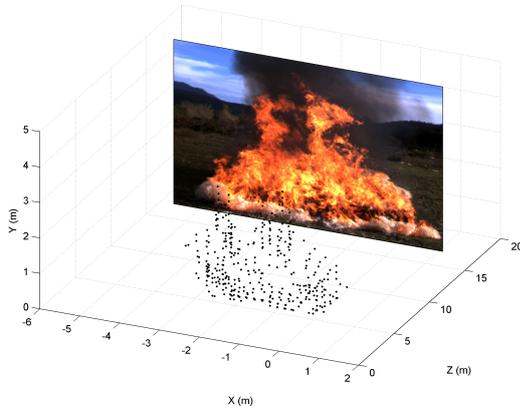


FIGURE 9 : Coordonnées tridimensionnelles de points de feu.

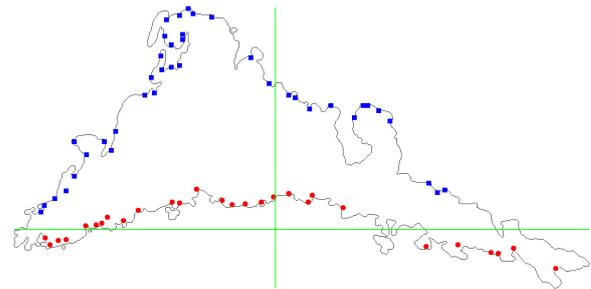


FIGURE 11 : Sélection des points du front au sol.

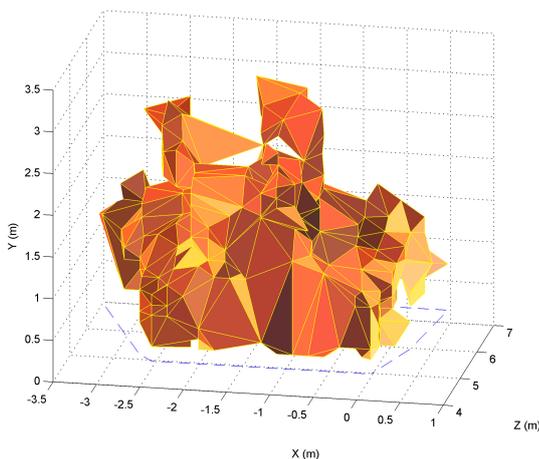
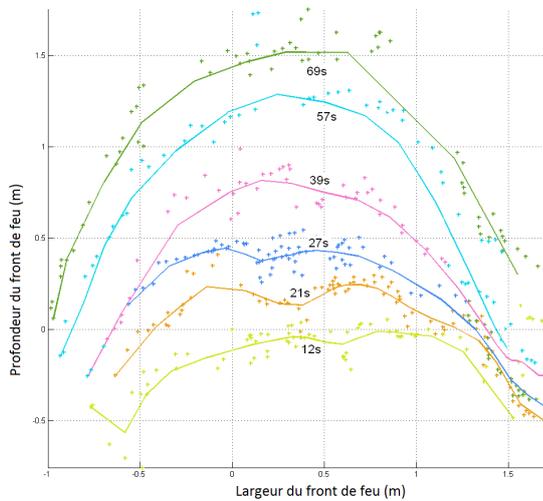


FIGURE 10 : Reconstruction tridimensionnelle d'un front de feu.

A partir des points 2D de la base sélectionnés et en utilisant le fait que chaque point 2D a un point 3D qui lui correspond, les points 3D du front de feu sont séparés en points correspondant à la base et points correspondant à la partie haute du feu. Le sol sur lequel se fait la propagation peut être plat, incliné de manière régulière ou être régulier uniquement localement. Aussi, une procédure a été développée pour estimer le plan de base sur lequel a lieu la propagation à partir des points 3D de la base du front obtenus à des instants successifs (et qui correspondent à une propagation sur environ 3 mètres de distance). Ce dernier est estimé à partir des points 3D sélectionnés et en utilisant une technique des moindres carrés. Par l'intermédiaire d'une homographie, les coordonnées des points 3D sont ensuite modifiées pour former un plan de base pour lequel  $Y = 0$ . Les points 3D du bas du front sélectionnés à chaque instant sont ensuite projetés sur le plan de base et interpolés en utilisant une B-spline d'ordre 3 (Foley et al., 1993; Schneider et Eberly, 2003; Ononye et al., 2007). La figure 12 montre l'évolution temporelle de la ligne de

front pour un feu en en laboratoire.



**FIGURE 12 :** Evolution temporelle de la ligne de front d'un feu en laboratoire.

Cette expérience a été réalisée sur un plateau incliné à  $20^\circ$  et sans présence de vent ; la mise à feu a été faite le long d'une ligne horizontale (Figure 13). L'effet de la pente est visible par la déformation de la forme de la ligne de front qui devient curviligne.

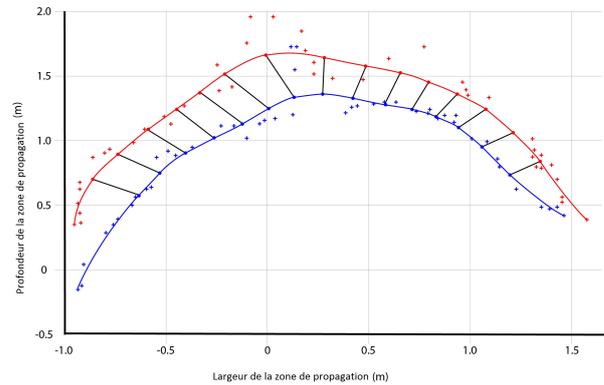


**FIGURE 13 :** Plateau incliné à  $20^\circ$  sur lequel a été faite la propagation du feu dont l'évolution temporelle de position est présentée en figure 9.

### 5.2. Vitesse de propagation des points du front

A partir des lignes de front, le calcul de la vitesse de propagation des points du front se fait de la façon suivante : la vitesse du front est la distance qui sépare deux points « équivalents » situés sur deux fronts consécutifs. Pour calculer cette grandeur, les courbes de position sont traitées deux à deux. Sur la première, un ensemble de points équirépartis est considéré. La normale à chacun de ces points coupe la courbe suivante en un point «équivalent» (Figure 14) ; la vitesse est calculée en considérant la distance entre ces deux points divisée par

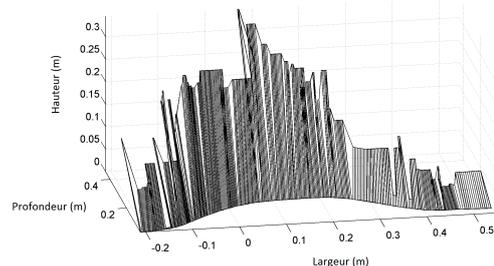
l'intervalle de temps entre les deux instants d'acquisition des images à partir desquelles les courbes ont été calculées.



**FIGURE 14 :** Points équivalents appartenant à deux courbes de fronts.

### 5.3. Hauteur et inclinaison d'un front de feu

La distance entre le plan de base et chaque point de la partie haute du front correspond à la hauteur de ce point. Pour obtenir la forme du front, la procédure suivante est réalisée : la ligne de front au sol est segmentée en tronçons de taille identique ; si  $n$  points 3D du bas de flamme ont été utilisés pour obtenir cette ligne, alors le nombre de segments est  $(n - 1) \times 20$ . Pour chaque tronçon, on calcule un point 3D moyen à partir des points 3D contenus dans le volume délimité par deux plans verticaux situés aux extrémités du tronçon ; si aucun point n'est présent dans un tronçon, on lui affecte le point moyen 3D du tronçon adjacent. On trace ensuite une droite pour laquelle les coordonnées  $(y, z)$  sont ceux du point 3D moyen et  $x$  décrit le tronçon. La figure 15 donne un exemple d'estimation de hauteur pour le front de feu présenté en Figure 4.



**FIGURE 15 :** Estimation de hauteur d'un front de feu non linéaire.

On peut ensuite estimer l'inclinaison de chaque tronçon en considérant le sol et le point haut de chaque tronçon.

## 5.4. Surface d'un front de feu

Le rendu de surface d'un front de feu est obtenu par triangulation à partir des points 3D de ce front. La surface totale du front est calculée en faisant la somme des surfaces triangulaires élémentaires (Figure 16).

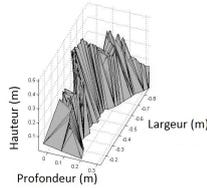


FIGURE 16 : Rendu de la surface d'un front de feu.

Le système de mesure basé sur la stéréovision présenté dans cet article permet donc de reconstruire en trois dimensions la forme d'un front de feu et d'en mesurer la surface ; ce que ne permet aucun autre système de mesure dédié aux feux en propagation. A partir de cette surface tridimensionnelle, il est possible de calculer une autre caractéristique géométrique des feux : il s'agit du facteur de forme. Ce dernier correspond à la portion de chaleur émise par le front de feu et reçue par une cible. L'équation (3) définit le facteur de forme  $dF_{dSi \rightarrow dT}$  pour un transfert d'énergie entre un élément de surface infinitésimal  $dSi$  vers une surface cible infinitésimale  $dT$  (Siegel et Howell, 2002).

$$dF_{dSi \rightarrow dT} = \frac{\cos \theta_{Si} \cos \theta_{Ti}}{\pi r^2} dT \quad (5)$$

Où  $r$  est la distance entre la surface de la cible et l'élément  $dT$ ,  $\theta_{Si}$  et  $\theta_{Ti}$  sont respectivement l'angle entre  $r$  et la normale au front de feu et l'angle entre  $r$  et la normale à la cible.

Soit  $S$  la surface totale d'une flamme divisée en petits éléments triangulaires de surface ;  $dSi$  représente le  $i$ ème triangle de  $S$ . Le facteur de forme  $F_{dS \rightarrow dT}$  pour l'émission de chaleur entre la surface totale de flamme  $S$  et la cible  $dT$  est alors (Siegel et Howell, 2002) :

$$F_{dS \rightarrow dT} = \frac{dT}{S} \sum_{\substack{i=1 \\ \cos \theta_{Si} > 0 \\ \cos \theta_{Ti} > 0}}^N \frac{\cos \theta_{Si} \cos \theta_{Ti}}{\pi r_i^2} dS_i \quad (6)$$

La figure 17 illustre le calcul qui est réalisé à partir de la forme 3D d'un front de feu et d'une position 3D d'une cible de surface élémentaire matérialisée par un rond.

## 6. Volume d'un front de feu en laboratoire

Une autre caractéristique géométrique qui intervient dans la modélisation du comportement d'un feu en propagation est son volume. Pour estimer une telle information, il faut avoir une forme tridimensionnelle complète

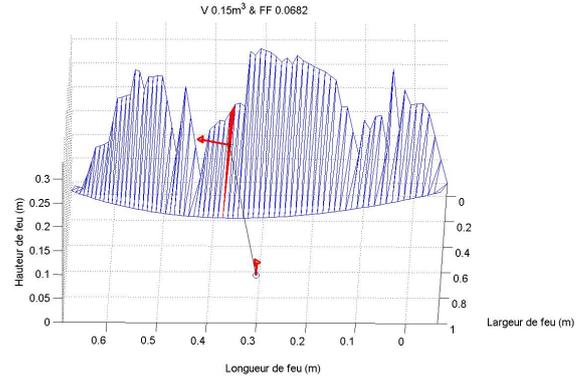


FIGURE 17 : Géométrie du calcul du facteur de forme entre une surface élémentaire triangulaire et une cible de surface élémentaire.

du front de feu. Ceci n'est possible qu'avec des informations complémentaires obtenues à partir d'une vision arrière et d'une vision avant du front de feu.

Une méthodologie a été développée pour obtenir une telle forme en laboratoire à partir de deux caméras Bumblebee XB3 (Molinier et al., 2011). Cette méthode nécessite :

- Le recalage des caméras afin de projeter dans un même repère les points 3D obtenus à partir des deux caméras ;
- Le calcul des points 3D du feu obtenus à partir des caméras trinoculaires placées respectivement devant le front et derrière le front et le recalage des points 3D ;
- L'estimation du plan de base du front de feu ;
- L'estimation de la base du front de feu et de sa partie haute ;
- Le maillage tridimensionnel ;
- L'estimation du volume.

La figure 18 montre la forme tridimensionnelle obtenue à partir des vues avant (1) et arrière (2) d'un front.

Au sein de l'UMR CNRS 6134 SPE – Université de Corse, le dispositif de stéréovision présenté dans cet article est désormais utilisé en laboratoire comme un instrument de mesure fiable des caractéristiques géométriques des fronts de feu. Des premiers travaux pluridisciplinaires ont été menés afin d'établir une relation entre l'intensité du front de feu obtenue par calorimétrie et la hauteur de flamme (Rossi et al., 2011; Barboni et al., 2010).

## 7. Système de stéréovision dédié aux feux en semi-terrain

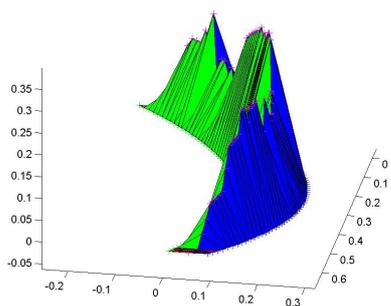
Le développement d'un outil de métrologie basé sur la vision permettant l'estimation des caractéristiques géométriques de feux en propagation à l'échelle du



(1)



(2)



(3)

**FIGURE 18** : Forme tridimensionnelle d'un front de feu (3) reconstruite à partir des vues de devant (1) et de derrière (2) de ce front de feu.

terrain est un deuxième objectif fixé. Des travaux ont été menés en considérant des feux expérimentaux d'environ 20 m de large, 5 m de haut et évoluant sur une cinquantaine de mètres (Figure 19).



**FIGURE 19** : Feu réalisé sur la commune de Letia (Corse du Sud, France) en 2010.

Des difficultés importantes apparaissent lorsque l'on travaille à l'échelle du terrain du fait notamment de la dimension du phénomène à suivre, des distances parcourues par ce dernier, des émissions de fumées, de la chaleur dégagée, de l'environnement non maîtrisé et des configurations de terrain. Afin d'obtenir des vues complémentaires du phénomène au cours de son évolution, il est nécessaire de positionner plusieurs systèmes de stéréovision avec une distance pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres entre chaque caméra XB3 ; par exemple à l'arrière et sur le côté par rapport à la direction de propagation du front de feu (Figure 20).

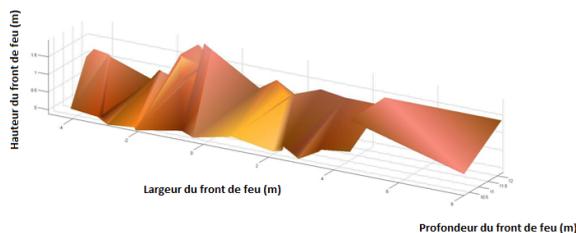


**FIGURE 20** : Caméras XB3 (dans cercle) autour d'une zone de propagation.

Les distances entre les systèmes de stéréovision rendent impossible l'utilisation de méthodes de recalage

de système de stéréovision telles que celles employant une grille de calibration (Hartley et Zisserman, 2003). Une procédure adaptée au terrain a été développée (Rossi et al., 2011). Elle est basée sur l'emploi d'un ballon de 1 m de diamètre, tenu à bout de bras par un homme (Figure 20) et déplacé à des positions successives. Pour chaque système de stéréovision, les positions 3D du centre de gravité du ballon sont comparées à un réseau théorique de positions générées par ordinateur. La position qui minimise la distance entre les positions 3D du ballon et le réseau théorique de positions donne la position réelle (translation et rotation) du ballon dans le repère du système de stéréovision. Quand les positions sont estimées dans les deux repères caméras, le recalage des deux cibles (dans un repère) permet d'obtenir les paramètres extrinsèques du système global de XB3.

A partir des images latérales, les caractéristiques géométriques présentées en Figure 1 sont estimées. Elles sont utilisées pour contrôler la reconstruction tridimensionnelle du front (Figure 21) à partir de laquelle la position, la vitesse, la surface et le facteur de forme sont calculés.



**FIGURE 21** : Front de feu reconstruit correspondant à l'image présentée en Figure 19.

## 8. Conclusions et perspectives

Grâce à la stéréovision, il est désormais possible d'estimer des caractéristiques de feux en propagation telles que la position, la vitesse, la hauteur, l'inclinaison, la surface. Ces données expérimentales sont importantes pour la communauté scientifique travaillant sur l'étude et la modélisation des feux de forêt. Les méthodes qui ont été développées permettent désormais de travailler avec un système de mesure en laboratoire qui estime également le volume du front de feu. Des travaux ont également été menés pour utiliser la stéréovision dans le cas de feux expérimentaux en extérieur. Le travail sur le terrain est beaucoup plus complexe compte tenu des dimensions du phénomène à étudier et des distances parcourues, du déploiement et de l'alimentation électrique du matériel et de la production de fumées. Afin d'améliorer l'efficacité des mesures effectuées à cette échelle, il est nécessaire de résoudre les verrous scientifiques que représentent les fumées et la perte de précision d'estimation lorsque le feu s'éloigne. Des travaux

de reconstruction 3D de feu à partir de caméras NIR sont actuellement menés. Des essais doivent être réalisés afin de voir si les ondes électromagnétiques du domaine proche infrarouge traversent les nuages denses de fumées générés par les grands feux. Une méthode de recalage de systèmes de stéréovision positionnés à de grandes distances les uns des autres (y compris sur un drone) sont également à l'étude. Ces travaux permettront de positionner des systèmes de stéréovision tout autour des zones de propagation, efficaces même en présence de fumées, et d'estimer le volume des feux. Enfin, un travail sur le maintien de la précision d'estimation lors du déplacement du feu doit être réalisé.

## Références

- Akhloufi M., Rossi L., Abdelhadi L., Tison Y., 2008. Dynamic fire modelling in three-dimensional space. Dans : IEEE International Workshops on Image Processing Theory, Tools and Applications, Sousse, Tunisie, pp. 68–74.
- Amenta N., Bern M., Kamvysselis M., 1998. A new Voronoi-based surface reconstruction algorithm. Dans : SIGGRAPH, Orlando, Etats-Unis, pp. 415–421.
- Balbi J.-H., Rossi J.-L., Marcelli T., Santoni P.-A., 2007. A 3D physical real-time model of surface fires across fuel beds. *Combustion Science and Technology* 179(12), 2511–2537.
- Barboni T., Morandini F., Rossi L., Molinier T., Santoni P. A., 2010. Relation between fireline intensity obtained by calorimetry and flame length. Dans : International Conference Combustion and Fire Dynamics, Santander, Espagne, pp. 427–439.
- Foley J., Dam A., Feiner S., Hughes J., 1993. *Computer graphics : Principles and practice*. Addison-Wesley, Etats-Unis.
- Forestry Canada Fire Danger Group, 1992. Development and structure of the Canadian forest fire behaviour prediction system. Rapport Technique ST-X-3 du Canadian Department of Forestry, Canada.
- Gonzales R.C., Woods R.E., Eddins S.L., 2004. *Digital image processing using Matlab*. Pearson, Prentice Hall, Etats-Unis, 237–239.
- Harris C.G. et Stephens M.J., 1998. A combined corner and edge detector. Dans : Proceedings Fourth Alvey Vision Conference, Manchester, Angleterre, pp. 147–151.
- Hartley R. et Zisserman A., 2003. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- Horand R. et Monga O., 1995. *Vision par ordinateur : outils fondamentaux*. Hermès, Paris, France, 147–170.
- McArthur A.G., 1966. *Weather and grassland fire behavior*. Australian Forestry and Timber Bureau Leaflet, N°100, Canberra, Australie.
- Martinez-de Dios J.R., André J.C., Gonçalves J.C., Arrue B.C., Ollero A., Viegas D.X., 2006. Laboratory Fire Spread Analysis Using Visual and Infrared Cameras. *International Journal of Wildland Fire* 15(2), 175–186.
- Martinez-de Dios J.R., Arrue B.C., Ollero A., Merino L., Gomez-Rodriguez F., 2008. Computer vision techniques for forest fire perception. *Image and Vision Computing* 26(4), 550–562.
- Molinier T., Rossi L., Akhloufi M., Tison Y., Pieri A., 2011. Estimation of fire volume by stereovision. Dans : Proc. SPIE Electronic Imaging, Image Processing : Machine Vision Applications Conference IV, Volume 7877, San Francisco, Etats-Unis.
- Ononye A.E., Vodacek A., Saber E., 2007. Automated extraction

- of fire line parameters from multispectral infrared images. *Remote Sensing of Environment* 108(2), 179–188.
- Pastor E., Águeda A., Andrade-Cetto J., Muñoz M., Pérez Y., Planas E., 2006. Computing the rate of spread of linear flame fronts by thermal image processing. *Fire Safety Journal* 41(8), 569–579.
- PtGrey, 2012. Fiche de données pour les systèmes "Bumblebee Stereo Vision Camera". <http://www.ptgrey.com/products/bbxb3/> (accès le 15 Mai 2012).
- Rossi L., Akhloufi M., Tison Y., 2011. On the use of stereovision to develop a novel instrumentation system to extract geometric fire fronts characteristics. *Fire Safety Journal* 46(1-2), 9–20.
- Rossi L., Molinier T., Akhloufi M., Tison Y., Pieri A., 2010. 3D vision system for the measurement of the rate of spread and the height of fire fronts. *Measurement Science and Technology* 21(10).
- Rossi L., Molinier T., Pieri A., Akhloufi M., Tison Y., 2011. Measurement of wildland fire geometric characteristics by stereovision techniques. *Measurement Science and Technology* 22(12).
- Rossi L., Molinier T., Santoni, P.A., Barboni T., Morandini F., 2011. Stereovision for the determination of fireline intensity in vegetation fire. Dans : *International Conference on Computational Methods and Experimental Measurements*, New Forest, Royaume-Uni, pp. 155–166.
- Rossi J.L., Simeoni A., Moretti B., Leroy-Cancellieri V., 2011. An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires. *Fire Safety Journal* 46(8), 520–527.
- Schmid C., Mohr R., Bauckhage C., 2000. Evaluation of Interest Point Detectors. *International Journal of Computer Vision* 37(2), 151–172.
- Schneider J.P. et Eberly D.H., 2003. *Geometric tools for computer graphics*, Morgan Kaufmann, Etats-Unis.
- Siegel R. et Howell J., 2002. *Thermal radiation heat transfer*. Taylor & Francis, New York, Etats-Unis.
- Trucco E. et Verri, F., 1998. *An Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Prentice Hall, Etats-Unis.
- Verstockt S., Van Hoecke S., Tilley N., Merci B., Sette B., Lambert P., Hollemeersch C.-F. J., Van de Walle R., 2011. Fire-Cube : A multi-view localization framework for 3D fire analysis. *Fire Safety Journal* 46(5), 262–275.
- Westland S., Ripamonti A., 2004. *Computational Colour Science*, John Wiley, Etats-Unis.