

Détection d'incendie: une nouvelle approche basée sur une caméra CCD bas coût opérant dans la proche infrarouge

Yannick Le Maout, Thierry Sentenac, Jean-José Orteu, Jean-Paul Arcens

► **To cite this version:**

Yannick Le Maout, Thierry Sentenac, Jean-José Orteu, Jean-Paul Arcens. Détection d'incendie: une nouvelle approche basée sur une caméra CCD bas coût opérant dans la proche infrarouge. Jean-Jacques BEZIAN. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. ENSTIMAC, 5p., 2007, ISBN 978-2-9511591-6-7. <hal-00167254>

HAL Id: hal-00167254

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00167254>

Submitted on 29 Aug 2007

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.

Détection d'incendie : Une nouvelle approche basée sur une Caméra CCD bas coût opérant dans le Proche Infrarouge.

Yannick Le Maoult, Thierry Sentenac, Jean José Orteu et Jean Paul Arcens

CROMeP- ENSTIMAC, Campus Jarlard, Route de Teillet, , 81013, Albi cedex 09

e-mail : yannick.lemaoult@enstimac.fr

Résumé : Nous proposons un nouveau système permettant de détecter un feu dans le proche infrarouge à l'aide d'une caméra CCD bas-coût. Après la présentation de notre problématique, nous décrivons le dispositif expérimental, puis nous expliquons la méthode de détection mise au point en insistant sur la nécessité d'utiliser une approche « multicritères ».

Mots clés : Détection, Feu, CCD, Caméra, proche infrarouge (PIR).

1)INTRODUCTION et RAPPELS SUR LA DETECTION FEU

Cette étude porte sur la *détection et la reconnaissance d'un feu* dans un entrepôt, lieu de stockage ou site industriel *confiné*¹. La détection des feux sur site industriel est généralement réalisée à l'aide de *capteurs thermiques ponctuels* répondant au flux émis par la flamme. Alors, pour obtenir une bonne couverture de l'espace à surveiller, il est nécessaire de *mailler* celui-ci à l'aide de nombreux capteurs. Par ailleurs, selon la position du feu par rapport aux capteurs, les temps de réponse de ces derniers peuvent être longs. A titre d'exemple, un capteur utilisant un thermocouple K dont l'extrémité est noircie réagit en 20 à 80 secondes ($\tau_{\text{moyen}} \sim 45$ secondes) devant un feu généré par la combustion d'un composé organique placé dans une coupelle de 100 mm de diamètre à 3,5 ou 10 m . Ceci montre les faiblesses spatiales (localisation) et temporelles d'un tel dispositif confronté à une combustion très rapide : il faudra un maillage « fin » pour bien localiser l'événement et réagir vite. Dans le domaine infrarouge, l'énergie émise par une flamme de diffusion d'air et de composés organiques se concentre à l'intérieur de bandes spectrales particulières. Ces bandes se situent vers [2-3 μm] ou [3-5 μm] avec des raies d'émission caractéristiques liées au CO₂ (4,3 – 2,7 μm) ou H₂O (2,7 μm) avec parfois apparition d'un rayonnement étendu liés à des suies (C₂) selon la formule moléculaire du combustible considéré. Il est donc possible d'utiliser celles-ci en effectuant, par exemple, des rapports d'énergie sur deux bandes pour procéder à la détection d'un feu, ceci à des instants différents afin de mettre à profit l'aspect fluctuant de la flamme par rapport à un autre phénomène fixe rayonnant dans les mêmes bandes (exemple : une lampe à incandescence). Des capteurs optiques ponctuels bas-coût et rapides, fonctionnant dans l'infrarouge en *multibandes*, sont donc utilisés dans le secteur industriel car les caméras infrarouges permettant d'obtenir une image « thermique » de la scène observée sont encore coûteuses, fragiles et ont été surtout utilisées pour des travaux de laboratoires sur la combustion [1], [2], [3]. Cet aspect multibandes IR a été étendu au domaine UV en combinant les résultats des analyses issus de l'IR et de la bande UV située vers 240-280 nm (pas de rayonnement solaire « parasite » dans cette bande) ; on parle alors de détecteurs ponctuels *multi IR « confirmés »UV*. L'augmentation du nombre des bandes spectrales de détection permet donc d'affiner la signature du phénomène observé, de l'isoler et donc de mieux le détecter parmi d'autres sources parasites ou « *interférents* » présents sur la plupart des sites industriels (lampes, arcs.etc). Cependant, il demeure difficile d'être complètement insensible à la présence de phénomènes parasites. C'est la raison pour laquelle, les approches les plus récentes utilisent des caméras CCD, celles-ci peuvent être bas-coût : $\sim 1/10$ du coût d'une

caméra IR et elles permettent la *reconnaissance de la forme d'un objet* à l'aide d'analyses d'images. Une étude bibliographique [4] a permis de mettre en évidence un manque quant aux systèmes étudiés qui avaient pour point commun l'utilisation de la bande visible complétée parfois par des capteurs ponctuels pour « confirmer » la détection incendie, ce qui pénalisait beaucoup la détection précoce d'un feu : en se basant sur l'énergie thermique rayonnée par un objet, la détection dans le visible ne peut se faire que si la scène observée comporte des objets très chauds (présence de flamme avérée). Pour pallier ce défaut, nous avons proposé de faire l'ensemble des détections dans le proche IR (PIR) en équipant la caméra CCD utilisée dans notre étude, une VHR 2000 munie d'un détecteur Sony 752 x 582 pixels, d'un filtre Wratten Kodak ne laissant passer que la partie PIR du rayonnement incident *soit de 750 à 1100 nm* ce qui a permis de définir *un seuil bas de détection d'un point chaud, assimilé à un corps noir, égal à 320 °C* [5]. La température de 320 °C se trouve être proche des températures d'inflammation de nombreux corps solides [6] ce qui permet de détecter des *feux « cachés »* derrière des parois, par transfert conductif de la chaleur dégagée. Enfin, la transmission atmosphérique $\tau_{\text{atm}}(\Delta\lambda)$ est très bonne dans le PIR comparée aux autres bandes de la radiométrie IR (tableau 1) :

Fenêtre spectrale $\Delta\lambda$	0.75 – 1.1 μm	1-3 μm	3-5 μm	5-8 μm	8-12 μm
	(PIR)				
$\tau_{\text{atm}}(\Delta\lambda)$	> 0,95	0,75	0,78	0,19	0,93

Tableau 1 : $\tau_{\text{atm}}(\Delta\lambda)$ / « observation » d'un corps noir à $T = 1500 \text{ K}$ ($T \sim T_{\text{flamme}}$)
 $D_{\text{observation}} = 100 \text{ m}$, Atmosphère standard : 330 ppm de CO_2 et 50 % d'humidité relative
(ces résultats sont issus d'un calcul fait à l'aide d'un modèle statistique à bandes étroites)

2) LA METHODE DE DETECTION « FEU »

Elle a été testée dans un tunnel *obscur* de 3 x 3 x 13 m développé au CRoMeP, l'obscurité permettant de contrôler les éclairagements parasites. Le tunnel contenait des bancs nécessaires à la production de *foyers types* définis à partir de la norme Afnor En54 et d'un standard dérivé de l'aéronautique : la norme JTSO-C79 qui ont permis de choisir et dimensionner les phénomènes de combustion : feux de liquides (acétone, alcool, essence A) représentatifs de quelques solvants présents sur site industriel, feux de solides (bois, carton, papier) représentatifs des emballages présents dans les locaux de stockage (caisses..etc). Chaque foyer était produit à l'aide d'une quantité de matière constante : 100 ml pour les liquides dans une coupelle de 120 mm de diamètre ou 120 grammes de bois sous forme de bûchettes. Ce dispositif de test comportait également un générateur *d'interférents* : des lampes électriques (de couleurs ou non) disposées sur une rampe au fond du tunnel d'essai ainsi qu'un système permettant de produire un éclairage périodique de fréquence comprise entre 1 et 15 Hz à l'aide d'un chopper rotatif placé devant une lampe, cet ensemble pouvant simuler, par exemple, un voyant clignotant situé dans le champ de la caméra. Il était donc possible de « tromper » la détection en générant des phénomènes parasites près du « feu ». Nous avons alors étudié chaque événement séparément afin de constituer une base de données relative à l'ensemble des sources évoquées en commençant par le feu (figure 1) :



Figure 1 : séquence vidéo issue de l'observation d'une flamme d'acétone à 10 m (mode pulsant)
Hauteur moyenne de flamme : 38 cm, largeur de flamme ~12 cm

L'analyse a porté d'abord sur une étude comparative de l'énergie rayonnée par chaque type de feu, le premier *attribut* retenu ici étant la température équivalente corps noir de la surface réactive déduite d'un étalonnage spécifique réalisé à l'aide de la caméra CCD et d'un corps noir LAND 500-1500 °C, tous deux placés sur un banc optique. Les températures équivalentes corps noir (Teq CN) des différents feux étaient comprises entre ~650 et 900 °C. La limite basse, 650 °C, constituant donc un premier indice ou seuil de détection d'une combustion. Entre 320 et 650 °C, le système de détection activait le mode « point chaud » qui était chargé de trouver un précurseur d'incendie (feu couvant) en activant une RI (Région d'Intérêt) par phénomène présent. Nous avons ensuite examiné les fluctuations spatio-temporelles de la flamme pour retenir un deuxième *attribut* [7] : la variation de hauteur de la flamme observée $H = f(t)$, après binarisation des images puis sa représentation en fréquence $H(f)$ en utilisant une transformée de Fourier rapide (TFR), permettant le tracé des fréquences caractéristiques du phénomène et le calcul d'un *critère de périodicité* à partir de l'identification des harmoniques présentes dans le signal pendant une durée t . On a ainsi retrouvé une fréquence caractéristique de pulsation comprise entre 4 et 5 Hz, en moyenne 4,4 Hz, très proche de la valeur fournie par la relation de Chitty et Cox [8] : $F(\text{Hz}) = 1,5 \times \sqrt{D}$ avec D , diamètre de la coupelle ; pour $D = 120 \text{ mm}$, $F = 4,3 \text{ Hz}$ (écart relatif ~3%). Après avoir testé cette approche sur des signaux synthétiques, nous avons soumis celle-ci à des essais comparatifs sur différents feux et interférents « périodiques ». En ajustant la fréquence du chopper vers 3 et 4 Hz, nous parvenions à « placer » l'indice de périodicité de la source lumineuse choppée au milieu des indices des feux (alcool, acétone et bois pour plusieurs degrés d'avancement de la combustion). Ceci indiquait une mauvaise robustesse du système de détection. Pour cette raison, nous avons opté pour un traitement moins déterministe en analysant le *paramètre d'intermittence* de la flamme qui a été décrit et observé par plusieurs auteurs dans le cadre de travaux fondamentaux sur la combustion [9]. Ce paramètre est basé sur l'analyse de la probabilité de présence de la flamme au-dessus d'une hauteur caractéristique, servant de seuil dans le calcul. Ce seuil peut varier de $H=0$ (le pied de flamme) à H_{max} désignant la hauteur maximale atteinte par la celle-ci en régime dynamique. En parcourant le fichier complet des hauteurs H_i pour un même phénomène, il était possible de tracer la courbe d'intermittence I comprise entre 1 et 0 ou 100 % et 0% en fonction d'un paramètre $X_i = H_i / H_{\text{moyenne}}$ adimensionnel, H_{moyenne} étant la hauteur moyenne de flamme calculée sur l'ensemble des H_i . Les figures 2a et 2b montrent une flamme de diffusion avec ses régions caractéristiques illustrant la notion d'intermittence et le paramètre I tracé pour plusieurs feux :

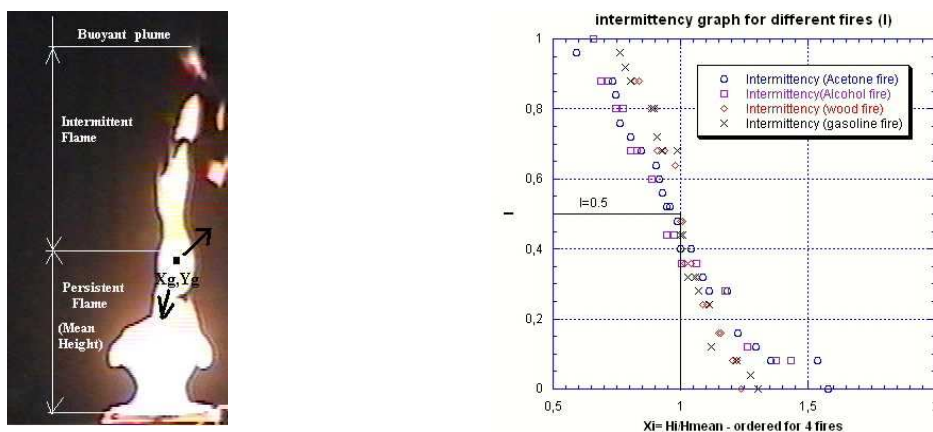


Figure 2a et 2b : flamme de diffusion et graphe d'intermittence pour plusieurs feux : Acétone, Alcool, bois, essence A

Le graphe 2b indique qu'au-delà de $1,7 \times H_{\text{moyenne}}$, la probabilité de présence de la flamme tend vers 0 ; de plus l'intermittence a un caractère très reproductible pour les différents feux et en choisissant $X_i = H_i/H_{\text{moyenne}}=1$, on obtenait une valeur caractéristique I des feux considérés dont la valeur moyenne était 0,47 et dont la dispersion se situait dans l'intervalle $\sim [I_{\text{moyenne}} - 1,5\sigma - I_{\text{moyenne}} + 1,5\sigma]$, σ représentant l'écart type de I (valeur de $\sigma = 0,047$). Le même calcul mené sur les interférents (lampes fixes et sources périodiques choppées) a montré que l'intervalle de I couvrait la gamme [0 - 0,22] ce qui permettait de bien différencier les « feux » des interférents. Pour améliorer la robustesse de la détection, la variation de H étant limitative, nous avons pris en compte un autre paramètre : la fluctuation de la surface et plus exactement de son centre de gravité représenté par X_g et Y_g (voir figure 2a). A partir d'une séquence de N images d'un phénomène fluctuant, un calcul de centre de gravité est fait sur la surface de celui-ci ce qui donne X_i, Y_i pour chaque image, puis pour la totalité de la séquence on constitue un fichier des $[X_i, Y_i]$. On calcule alors le centre de gravité X_g, Y_g des $[X_i, Y_i]$ et pour $i = 1$ à N, les distances euclidiennes données par : $L_i = \sqrt{(X_i - X_g)^2 + (Y_i - Y_g)^2}$, ce calcul est d'abord réalisé pour des sources stables (lampes) qui donnent chacune un ensemble $\{L_i\}$; le rayon $R_B = \max\{L_i\}$ correspond donc à un rayon maximal de fluctuation de bruit essentiellement lié au bruit spatial de la matrice CCD. Pour une séquence « feu » on teste *in fine* si $L_i > R_B$ pour l'image i ; si oui, un paramètre de « bougé » B_{xy} est incrémenté. A la fin de la boucle sur N, on calcule le paramètre $N_{\text{mouvement}} = B_{xy} / N$ et comme le paramètre I, $N_{\text{mouvement}}$ était compris entre 0 et 1. Après avoir intégré des corrections liées à la distance d'observation des phénomènes, on obtient :

Critère/phénomène	Feux	Lampes+chopper	Lampes
Téquivale CN	>650°C	>650°C (phase active)	>650°C
I	∈ [0,4 – 0,56]	∈ [0 – 0,22]	0
$N_{\text{mouvement}}$	> 0,9	≤ 0,258	0

Tableau 2 : Les seuils de détection définitifs pour les différents phénomènes

Les résultats consolidés ont permis de définir un classifieur implanté dans l'algorithme de détection afin de séparer les différentes classes (feux et non feux). Celui-ci a ensuite été testé aux « limites » en travaillant en mode *mono RI* (plusieurs phénomènes dans le champ mais une seule RI imposée) et en perturbant la détection (figure 3):

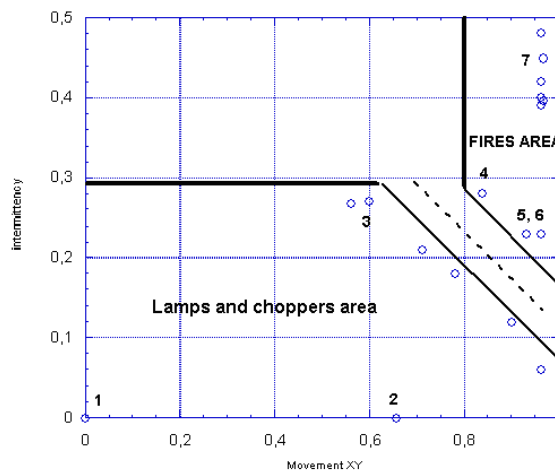


Figure 3 : $I = f(N_{\text{mouvement}})$ avec perturbations

Sur cette figure, tous les phénomènes présentaient une $T_{eq} CN > 650$ °C, la région (1) était liée aux lampes (colorées ou non), (2) correspondait à la combustion d'un ruban de

magnésium, l'indice de mouvement élevé étant lié au mouvement du ruban généré par la combustion de celui-ci. (3) correspondait à la zone des sources de lumière choppées, (4) à une flamme d'acétone à côté de laquelle on avait allumé une lampe de 1000 W, (5) : la même flamme d'acétone près de lampes rouge et jaune, (6) : Feu de bois perturbé par l'ouverture de la porte du tunnel près du foyer. Pour ces cas limites, la détection a fonctionné correctement.

3) CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons montré la faisabilité de la détection d'un feu en situation de laboratoire (situation confinée) à l'aide d'un capteur CCD bas-coût opérant dans le PIR, ceci avec une bonne fiabilité : plus de 85 % de réussite sur l'ensemble des essais. Le système permet la détection de point chaud (feu couvant) pour des températures de $\sim 320^{\circ}\text{C}$ ce qui constitue la limite basse pour une technologie de caméra à base Silicium. Le temps de détection est < 3 secondes pour des tailles de flamme aussi petites que $0,15 \times 0,1$ m, vues à 10 m (la surface occupée sur la matrice CCD par la flamme représentant alors moins de 0,007% du nombre de pixels total). Cette étude a ensuite été poursuivie en améliorant le modèle radiométrique dédié à la caméra CCD dans le but de passer du stade de l'imagerie proche IR à celui de la *thermographie proche IR* à travers le travail de thèse de Y.Rotrou [10] avec notamment une caractérisation fine de la matrice CCD. Le nouveau dispositif mis au point va maintenant être appliqué à de la mesure de température sans contact sur des pièces métalliques complexes.

¹ **Note** : le contexte d'application de ce système demeure confidentiel.

Références

- [1] H. Hayakasa, "Radiative characteristic and flame structure of small pool flames", Fire Technology, vol 32, issue 4, pp 308-322, 1996.
- [2] B. Bedat, A Giovannini, S.Pauzin, "Instantaneous temperature profile measurements in a flame by infrared line thermometry technique", Eurotherm Seminar N°17, October 1990.
- [3] Y. Le Maoult, "Modélisation de l'acquisition d'un thermogramme sur des gaz de combustion", thèse de l'université de Provence, Marseille, juin 1992.
- [4]] Walter Phillips III, Mubarak Shah, Niels da Vitoria Lobo, "Flame Recognition in Video", p. 224, Fifth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 2000.
- [5] T. Sentenac, Y. Le Maoult, G. Rolland and M. Devy, " Temperature correction of radiometric and geometric models for an uncooled CCD camera in the near infrared", IEEE transactions on instrumentation and Measurements, Vol. 52, N°1, pp 46-60, Feb. 2003.
- [6] D. Drysdale, "An introduction to fire dynamics ", John wiley ed., 1996.
- [7] Y.Le Maoult, T. Sentenac, J.J Orteu and J.P Arcens, Fire detection : a new approach based on a low cost CCD camera in the near infrared", Process Safety and Environmental Protection, Trans Icheme, part B, vol.85, 1-14, may 2007.
- [8] R. Chitty and E. Cox, "A method of measuring combustion intermittency in fires", Fire and materials, Vol. 3, pp 238-242, 1979.
- [9] E.E Zukoski, B.M Cetegen and T. Kubota "Visible structure of buoyant diffusion flames" , Twentieth international symposium on combustion, Combustion institute, pp 361-366, 1984.
- [10] Y.Rotrou, "Thermographie courtes longueurs d'onde avec des caméras silicium, contribution à la modélisation radiométrique ", thèse de Sup'Aéro, Albi , décembre 2006.