



# Outil métrologique pour la caractérisation des fronts de flamme basée sur le couplage d'une approche de flux de chaleur avec des données de traitement d'images

Steve RUDZ

Khaled CHETEHOUNA

**Olivier SERO-GUILLAUME**

# Sommaire

- I. Contexte
- II. Principe du capteur des flux thermiques
- III. Traitement d'images
- IV. Couplage du capteur de flux et du traitement d'images
- V. Expériences de laboratoire
- VI. Résultats et discussions
- VII. Conclusion

# I. Contexte

- Les feux de forêts ont un impact considérable sur 3 facteurs :
  - ◆ Environnement (Grèce 2007 : 200 000 hectares brûlés)
  - ◆ Economie (Australie 2009 : 750 habitations détruites)
  - ◆ Homme (Australie 2009 : 200 morts)
- Selon l'OMS les feux de forêts vont augmenter en nombre et en dangerosité à causes des changements climatiques



**Besoin d'une meilleure compréhension du comportement des feux de forêts**

# I. Contexte (suite 1)

- 4 types de modélisations :
  - ◆ Empirique (Rothermel 1972)
  - ◆ Automate Cellulaire (Alexandridis et al. 2008)
  - ◆ Géométrique (Glasa and Halada 2008)
  - ◆ Physique (Séro-Guillaume et al. 2008)
- Le problème majeur d'un modèle physique et le grand nombre de paramètres d'entrées ( $T_f$ ,  $K_f$ , ROS,  $\alpha_f$ ...)

 **Comment obtenir ces paramètres d'entrées ?**

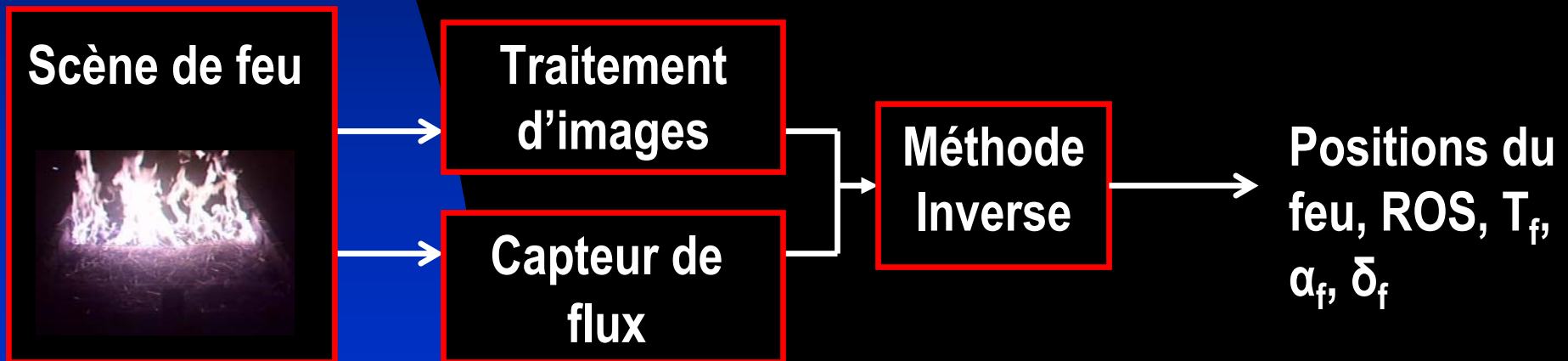
# I. Contexte (suite 2)

- La meilleure façon est de procéder à des essais grandeur nature mais :
  - ◆ Coûts élevés
  - ◆ Tributaire des conditions météorologiques
  - ◆ Contraintes d'instrumentations
- Pour palier à ce problème les paramètres d'entrées sont obtenus à **l'échelle tunnel à feu** ou à **l'échelle laboratoire**
- Les méthodes expérimentales pour mesurer les paramètres d'entrées sont classés en deux catégories :
  - ◆ Discrètes (thermocouples, fils, ...)
  - ◆ **Continues** (capteur de flux, traitement d'images)

- Les techniques de **traitement d'images** ont produit des **résultats encourageant** pour donner les **positions du front de flamme**
- Le capteur de flux a montré son efficacité pour déterminer les paramètres physiques et géométriques de la flamme mais :
  - ◆ Optimisation portant sur de nombreux paramètres
  - ◆ **Le temps de calcul est lié au nombre de paramètres d'entrées**

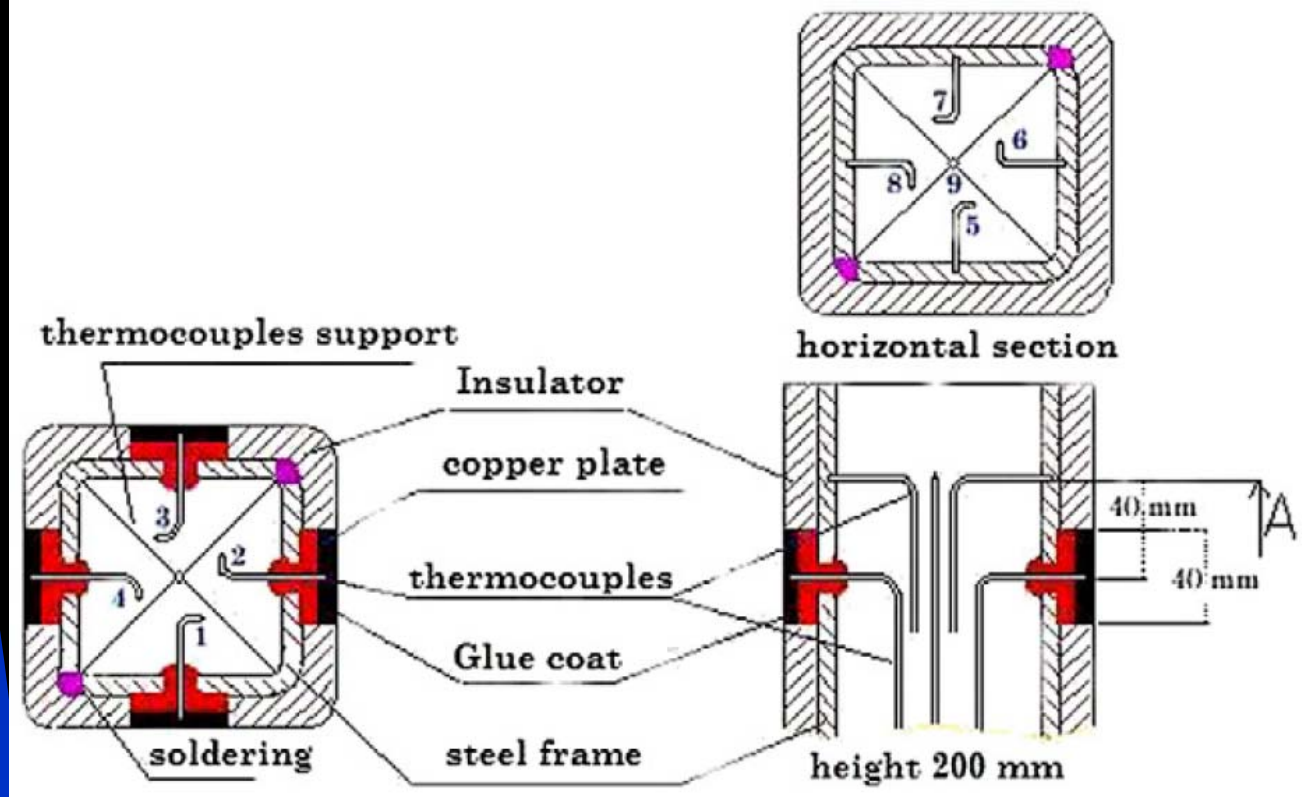
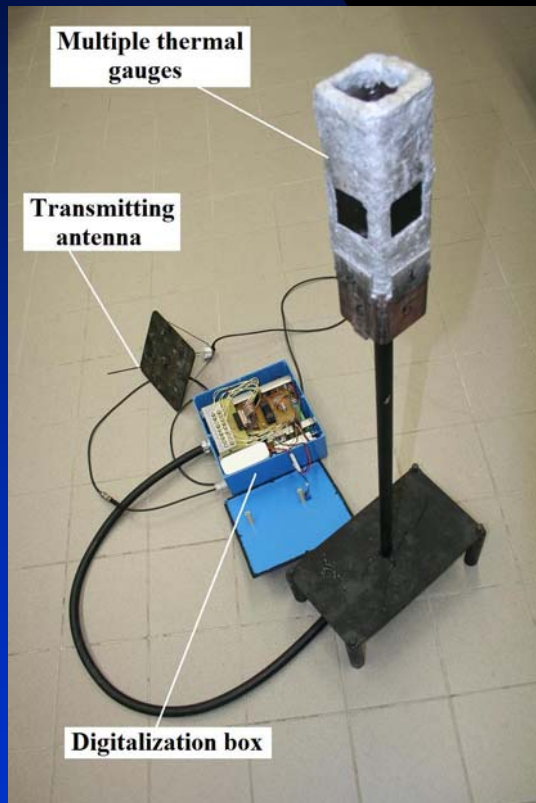
# I. Contexte (suite 4)

- 👉 L'objectif de ce travail est de **coupler les mesures du capteur de flux** avec celles du **traitement d'images** afin de réduire le nombre de paramètres à optimiser



# II. Principe du capteur thermique

## ■ Le capteur des flux de chaleur

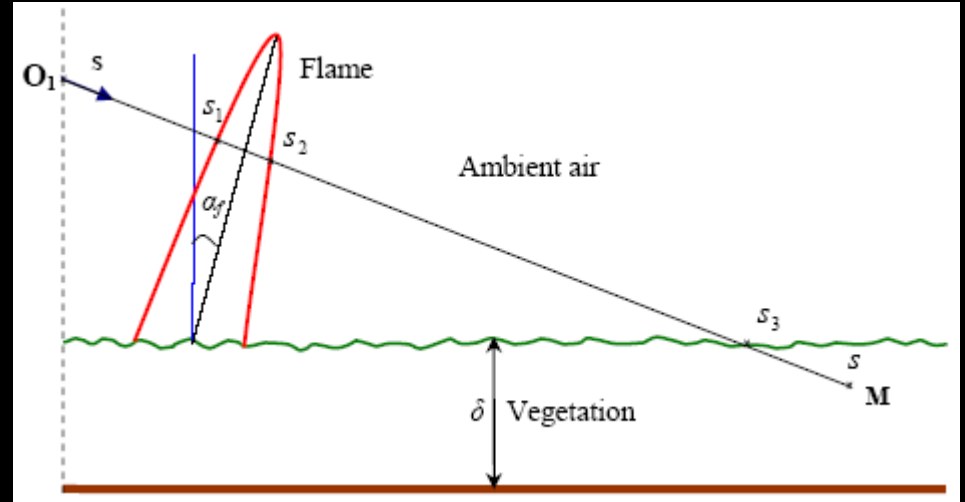




# II. Principe du capteur thermique (suite 1)

- Modélisation du flux thermique émit par la flamme et reçu par le capteur :

Intégration de l'ETR



$$i(s) = K_f e^{-K_v(s-s_3)} \int_{s_1}^{s_2} i_b(\bar{s}) e^{-K_f(s_2-\bar{s})} d\bar{s} + K_v \int_{s_3}^s i_b(\bar{s}) e^{-K_v(s-\bar{s})} d\bar{s}$$

+

$$\varphi_i(\mathbf{M}) = \int_{\omega=0}^{4\pi} i(s) \mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_i d\omega$$

$$\varphi_i(\mathbf{M}) = K_f \frac{B}{\pi} \int_{\omega=0}^{4\pi} \int_{s_1}^{s_2} T_f^4 e^{-K_v(s-s_3)} \mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_i d\bar{s} d\omega + K_v \int_{\omega=0}^{4\pi} \int_{s_3}^s i_b(\bar{s}) e^{-K_v(s-\bar{s})} \mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_i d\bar{s} d\omega$$

Flamme

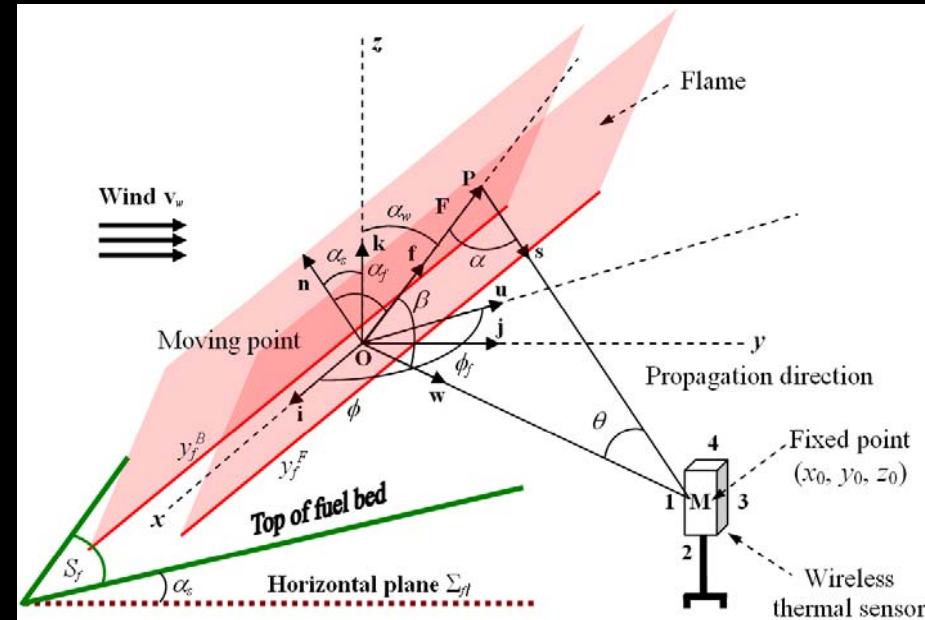
Végétation

# II. Principe du capteur thermique (suite 2)

Rayonnement  
de la flamme



$$\Phi_i^{th}(\mathbf{M}) = \varphi_i(\mathbf{M}) - \varphi_3(\mathbf{M}) = K_f \frac{B}{\pi} \int_{\Omega_f} T_f^4 \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_i}{PM^2} d\Omega$$



Propagation sans vent

+

Simplifications mathématiques

Deux expressions simples

## II. Principe du capteur thermique (suite 3)

◆ Face frontale :

$$\Phi_a^{th}(\mathbf{M}) = \frac{B}{\pi} \int_{-W}^W K_f T_f^4 \ln \left( \frac{\sqrt{(y_0 - y_f^F)^2 + X^2} l_f + \sqrt{(y_0 - y_f^B)^2 + X^2 + l_f^2}}{\sqrt{(y_0 - y_f^B)^2 + X^2} l_f + \sqrt{(y_0 - y_f^F)^2 + X^2 + l_f^2}} \right) dX$$

◆ Faces latérales :

$$\Phi_l^{th}(\mathbf{M}) = \frac{B}{\pi} \int_{y_0 - y_f^B}^{y_0 - y_f^F} K_f T_f^4 \ln \left( \frac{Y}{\sqrt{Y^2 + W^2}} \frac{l_f + \sqrt{Y^2 + W^2 + l_f^2}}{l_f + \sqrt{Y^2 + l_f^2}} \right) dY$$

# III. Traitement d'images

## ■ 4 étapes :

- ◆ Récupérer les images de la vidéo d'une propagation d'incendie
- ◆ Direct Linear Transformation (DLT) pour déterminer les coordonnées du feu dans un repère global à partir de ses coordonnées dans le repère de la caméra
- ◆ Segmentation des lignes du front de flamme
- ◆ Calcul des positions du front de flamme

# III. Traitement d'images (suite 1)

- Segmentation du feu : Ko et al. (2009)
  - ◆ Modèle probabiliste dans l'espace RGB
  - ◆ Indépendance des canaux RGB

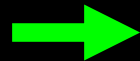
$$p_i(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i}} \exp\left(-\frac{(I_i(x, y) - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), i \in \{R, G, B\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p(I(x, y)) = p_R(I_R(x, y)) \times p_G(I_G(x, y)) \times p_B(I_B(x, y)) \\ \text{if } p(I(x, y)) > \tau \\ \text{then : } I(x, y) \text{ is fire-pixel} \\ \text{else : } I(x, y) \text{ is not fire-pixel} \end{array} \right.$$

# IV. Couplage du capteur thermique et du traitement d'images

- Les positions du front de flamme obtenues par traitement d'images sont aussi précises que celles obtenues en utilisant le capteur des flux thermiques

**Données traitement  
d'images fixées en  
paramètres  
d'entrées**



**Procédure  
d'optimisation**



**Réduction du temps  
de calcul et du  
nombre de variables**

# IV. Couplage du capteur thermique et du traitement d'images (suite 1)

- Le problème considéré ici est une minimisation d'une fonction avec contraintes :

minimize  $J(\xi)$

subject to  $\xi_l \leq \xi \leq \xi_u$

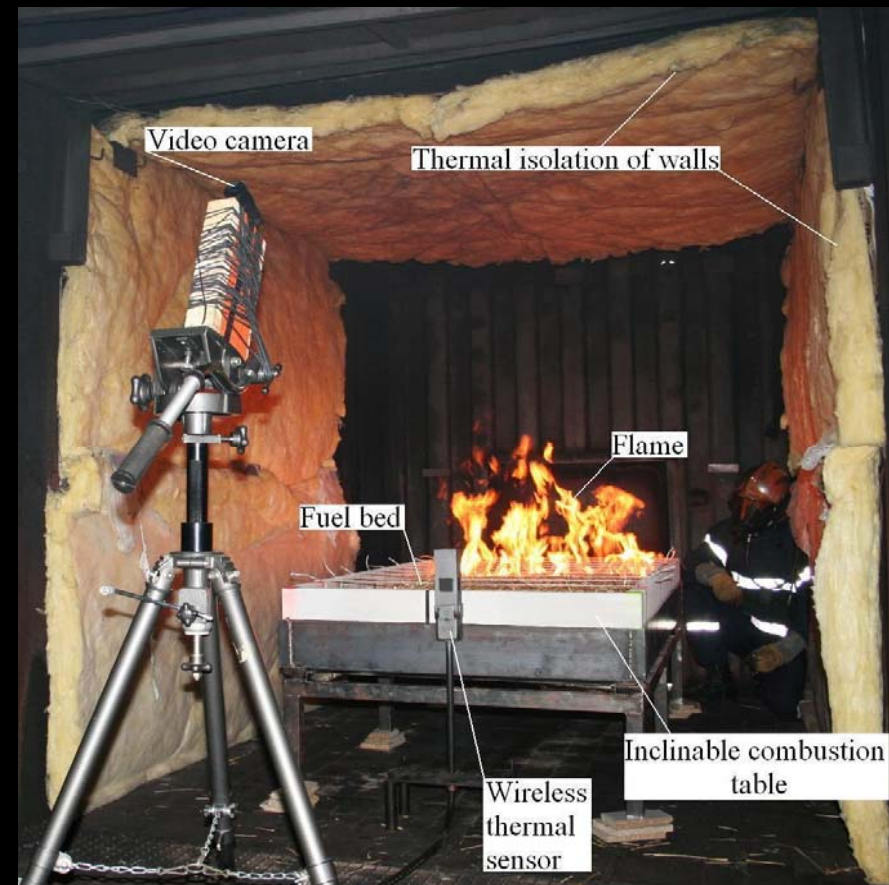
with  $J(\xi) = \frac{1}{\sum_{k=1,2,4} \|\Phi_k^{\text{exp}}\|} \left( \|\Phi_a^{\text{th}}(\xi) - \Phi_1^{\text{exp}}\| + \|\Phi_l^{\text{th}}(\xi) - \Phi_2^{\text{exp}}\| + \|\Phi_l^{\text{th}}(\xi) - \Phi_4^{\text{exp}}\| \right)$

avec

$$\xi = \left( y_{f_1}^k, y_{f_2}^k, \dots, y_{f_N}^k, l_f, \phi_f \right)$$

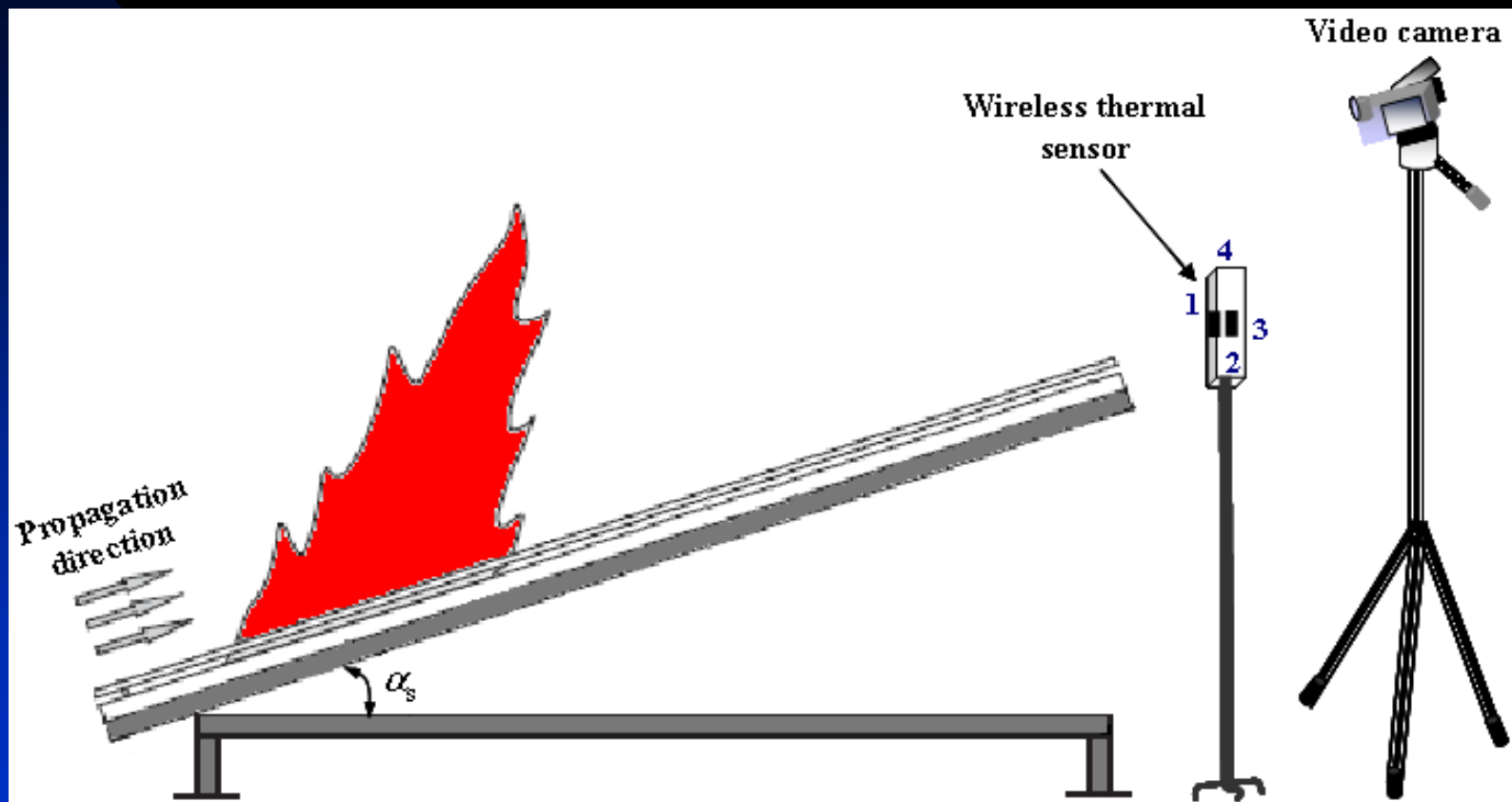
# V. Expériences de laboratoire

- Une charge de  $1,2 \text{ kg.m}^{-2}$  de paille
- Surface de brûlage de  $2 \text{ m}^2$  (2m x1m) avec une profondeur de 0,2 m
- Camera vidéo (640x480, 30 images/s)

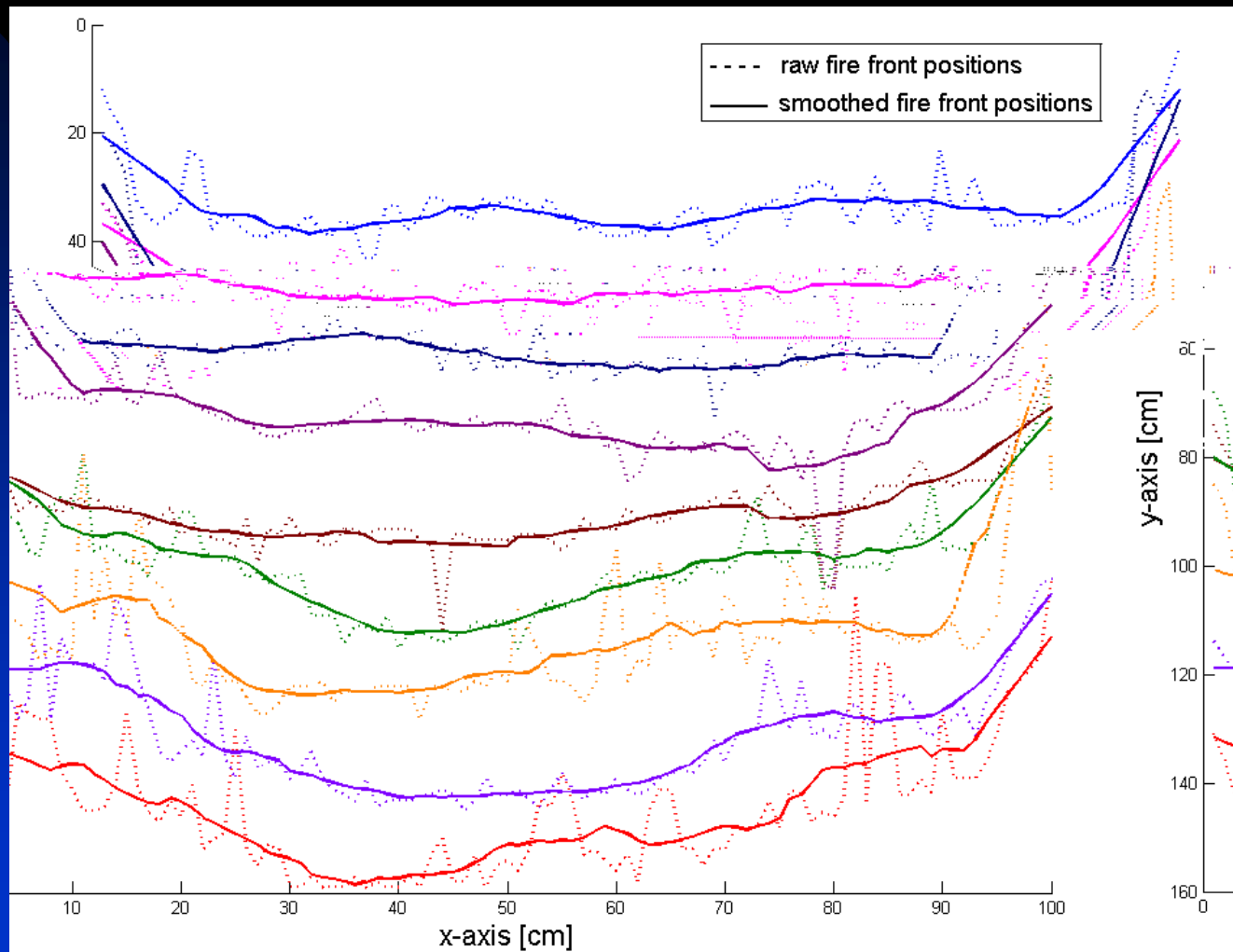




# V. Expériences de laboratoire (suite 1)



# VI. Résultats et discussions

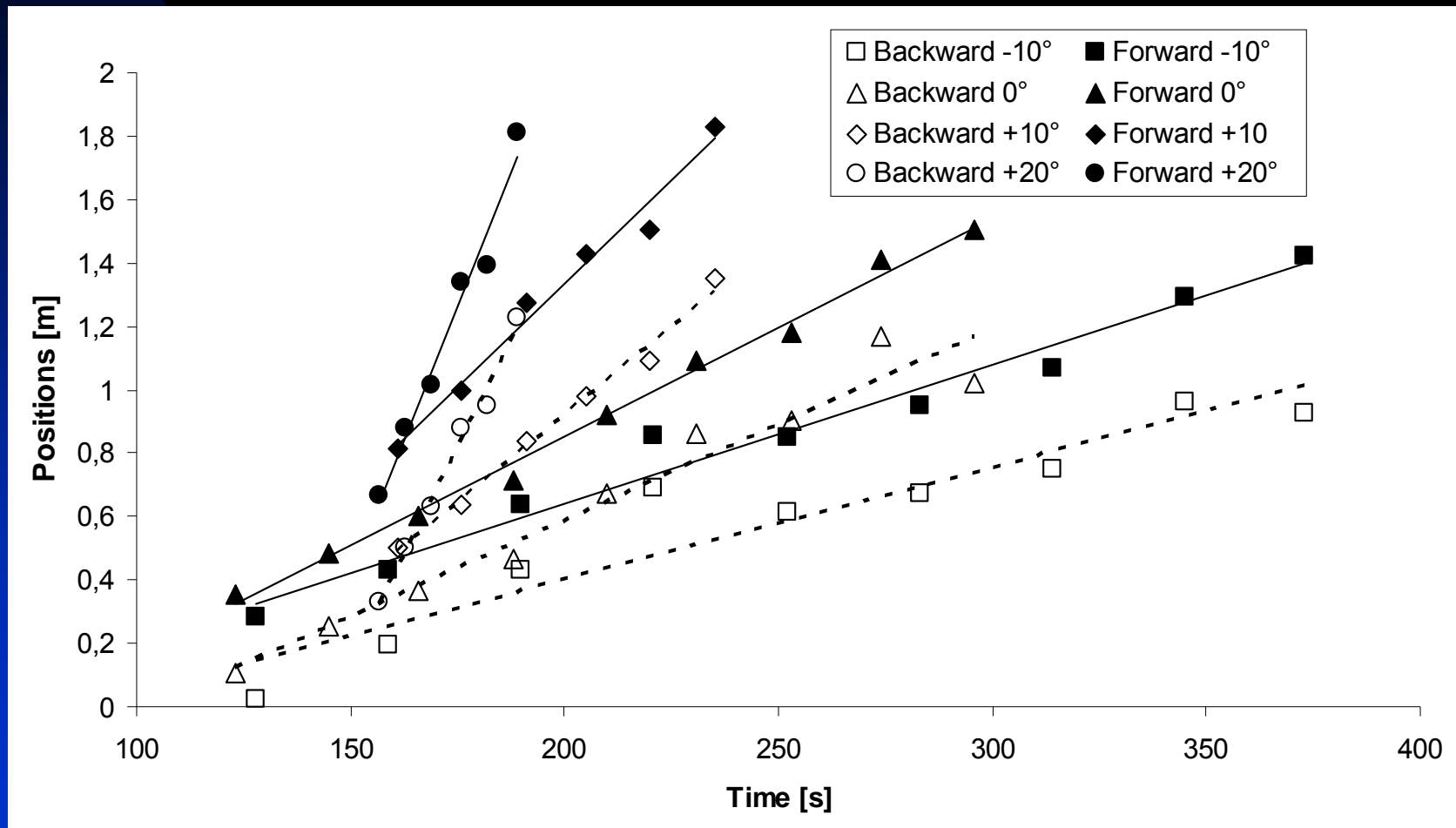


GDR Incendie - 17 & 18 Juin 2010  
CSTB - Champs sur Marne

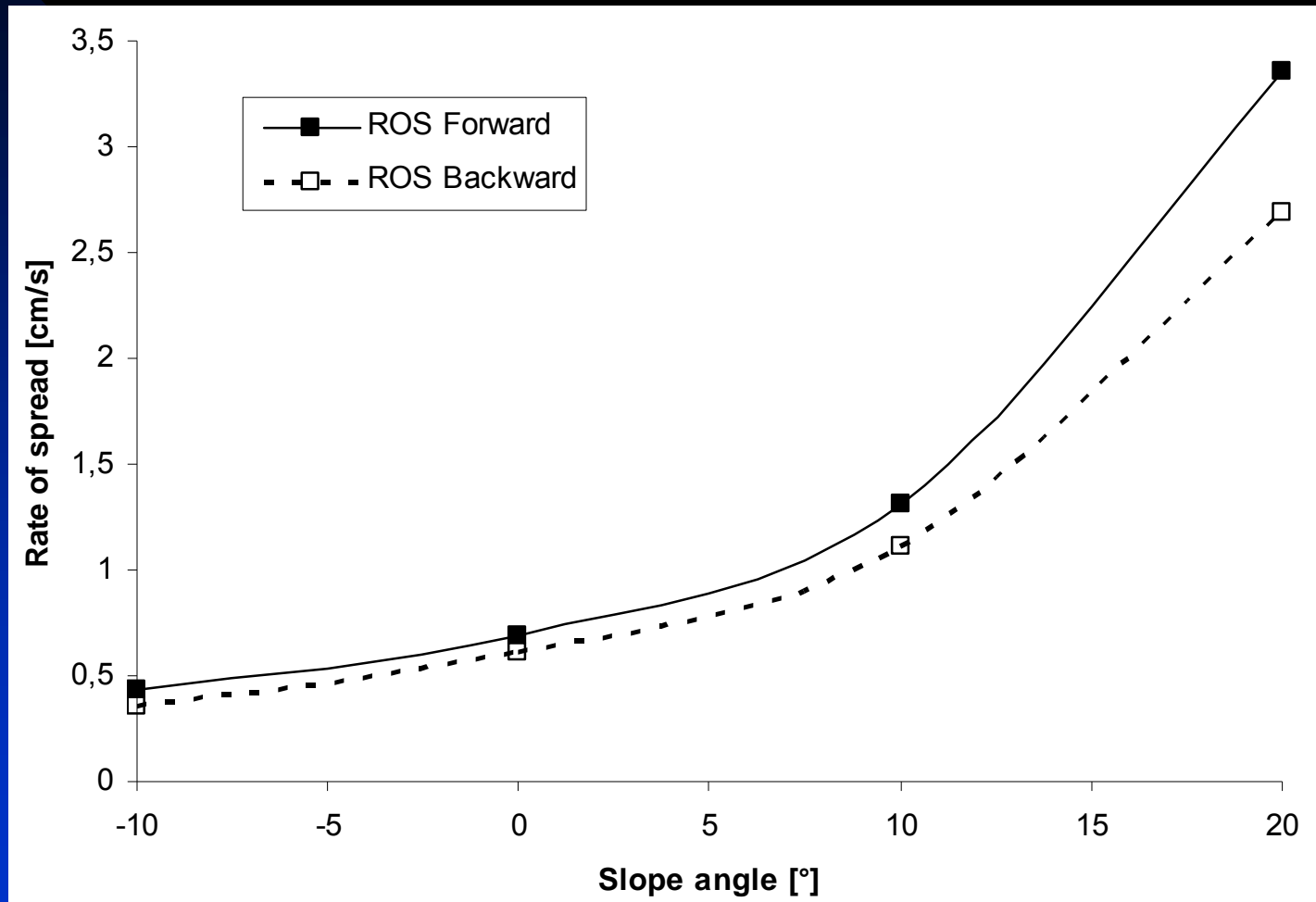
# VI. Résultats et discussions (suite 1)

Pente [°]	- 10	0	+10	+20
Longueur de flamme $l_f$ [cm]	53.5	65.2	116.5	112.0
Flux radiatif volumique de la flamme $\phi_f$ [kW.m <sup>-3</sup> ]	7.630	7.624	24.023	40.552
Température de flamme moyenne $T_f$ [K]	875	875	1166	1329
Emissivité de la flamme $\varepsilon_f$	0.18	0.18	0.25	0.27
Epaisseur moyenne de la flamme $\delta_f$ [cm]	28.2	27.0	40.8	42.9

# VI. Résultats et discussions (suite 2)



# VI. Résultats et discussions (suite 3)



# VI. Résultats et discussions (suite 4)

- 👉 Le volume de flamme augmente avec la pente
- 👉 Valeurs de l'émissivité de la flamme en accord avec les résultats de la littérature
- 👉 La vitesse de propagation augmente avec le pente : résultats en accord avec ceux de la littérature

# VII. Conclusion

- Un modèle de flamme mince avec des propriétés thermiques et radiatives moyennes a été dérivé à partir de l'équation de transfert radiatif
- Les équations obtenues mènent à une minimisation plus simple de la différence entre les flux thermiques théoriques et expérimentaux

# VII. Conclusion (suite 1)

- Le **couplage** du capteur de flux avec des données de traitement d'images donnent des **résultats satisfaisants** au regard de la littérature
- Le **temps de calcul** avec le nouvel outil métrologique est au **moins deux fois plus rapide** qu'avec celui sans le couplage



**Merci de votre attention !**