



**Réseau Maîtrise des Risques Technologiques
(GRR SER Haute-Normandie)**



Séminaire GDR incendie du 23 & 24 juin 2008

***Estimation en temps réel de la puissance dégagée lors d'un incendie
de compartiment***

H. Besnard¹, M. Lebey², E. Lambert³

Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes - CNRS FRE 3102

Université du Havre – BP 540 76058 Le Havre Cedex

(¹ Doctorant Université du Havre - ² Université du Havre UFRST - ³ IUFM de l'Académie de Rouen)



Plan

- I) Estimation de la puissance d'un incendie localisé dans un espace semi confiné à l'aide d'une caméra de thermographie infrarouge**
 - I-1) Détermination de la puissance transportée par les fumées**
 - I-2) Détermination de la puissance évacuée à travers les parois de la maquette**

- II) Estimation de la vitesse des fumées sortantes de la maquette**



Problème réel :

➤ A leur arrivée sur les lieux, les équipes d'intervention doivent:

A) Prendre des décisions rapidement,

Et

B) Trouver des réponses à des questions basiques:

➤ Par exemple:

- 1) Le feu est-il en phase de croissance ou décroissance ?
- 2) Y-a-t-il des risques de flashover ou de backdraught ?
- 3) Peut-on engager des équipes à l'intérieur ?



➤ d'où

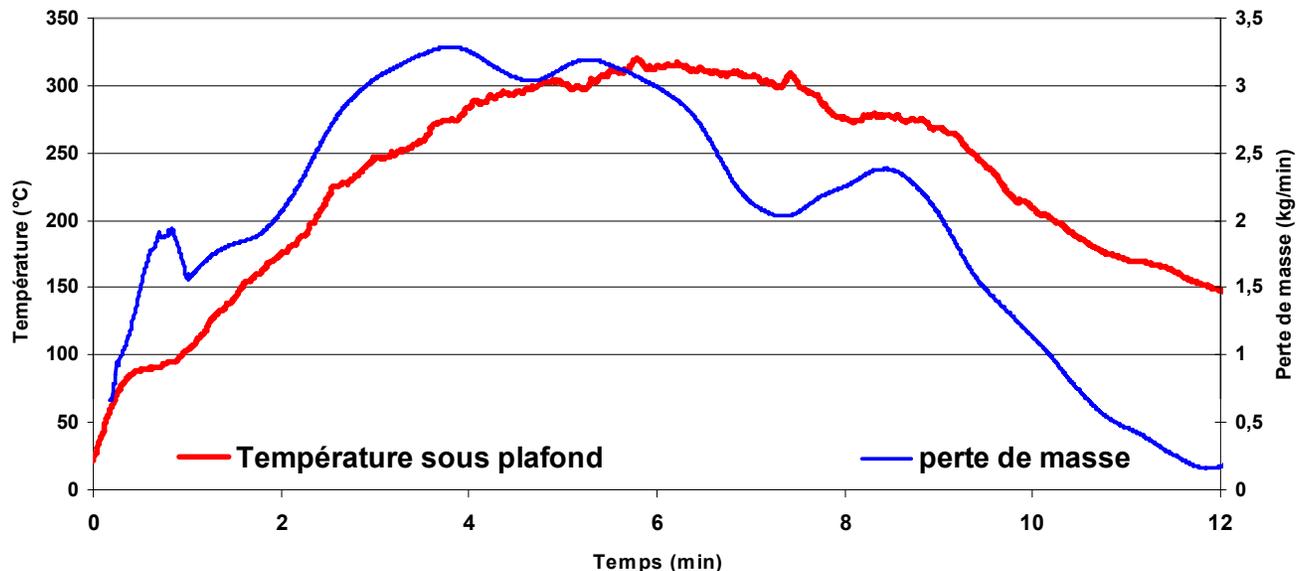
Estimation en temps réel de la puissance dégagée lors d'un incendie de compartiment

Grandeur caractéristique : la température

➤ La Température est un paramètre d'analyse pertinent car

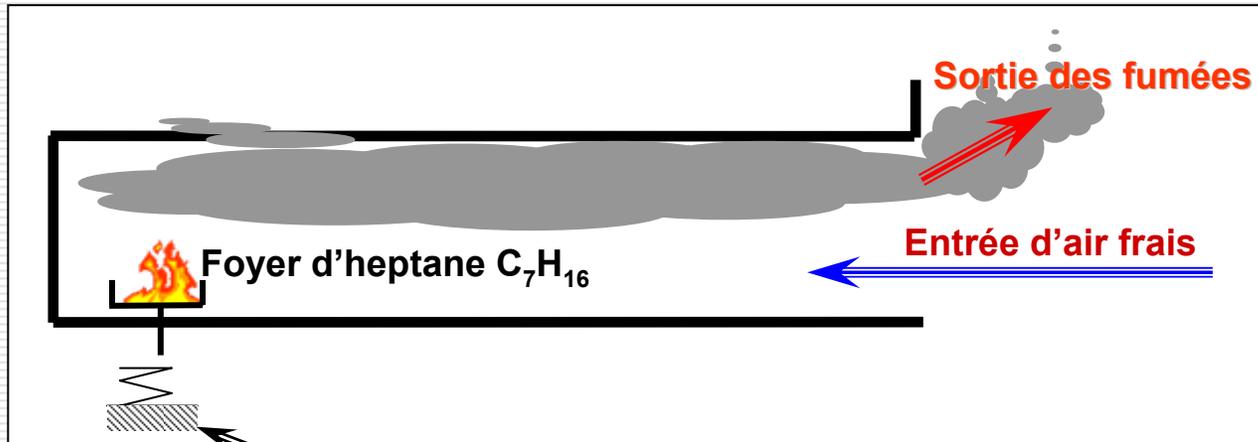
- 1) c'est une grandeur facilement accessible
- 2) son évolution peut être liée à celle de la puissance du feu

Exemple : Evolutions temporelles de la température et de la vitesse de combustion (perte de masse) pour un foyer de bois en « grandeur réelle »



➤ **Idée de base** : Estimer la puissance du foyer, à partir des mesures de température

Conditions expérimentales



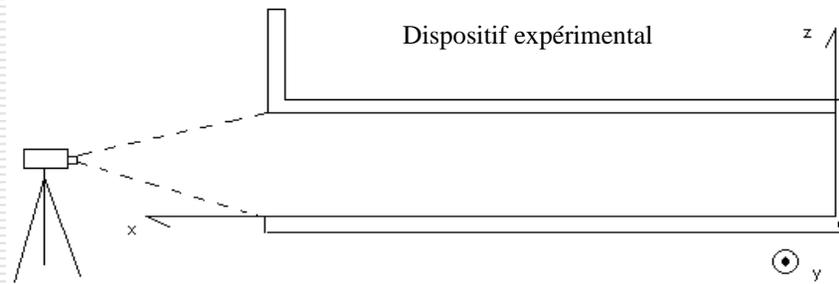
➤ Mesures :

- 1) Température (Thermocouples K)
- 2) Masse (capteur d'effort)
- 3) Vitesse (anémomètre)
- 4) Logiciel d'acquisition & traitement

Labview



Les données issues des thermocouples sont remplacées par les champs de températures d'une caméra de thermographie infrarouge



Combustion de 100g d'heptane dans un foyer de diamètre 12,5cm; fréquence d'acquisition 60hz



Caractéristiques de la caméra:

- Taille de la matrice (320*240) bolomètres
- Ouverture de l'objectif horizontalement et verticalement: (24*18)°
- Gamme de longueurs d'ondes: (7 <math>< \lambda < 12)</math>μm
- Fréquence d'acquisition jusqu'à 60hz
- Gammes de Températures (-40<math>< T < 120)</math>°c (0<math>< T < 500)</math>°c (350<math>< T < 1350)</math>°c

Méthode utilisée: le bilan d'énergie et le modèle de zones

Système étudié: Les fumées et les parois qui les confinent

Lors de l'estimation de la puissance du foyer à l'aide de thermocouples nous avons conclu:

$$\Phi_{\text{foyer}} \approx \Phi_{\text{enthalpie}} + \Phi_{\text{parois}} \quad \text{Avec:} \quad \Phi_{\text{foyer}} = -c \Delta h \frac{dm}{dt}$$

Deux termes sont à estimer:

➤ 1) La puissance transportée par la fumée

$$\Phi_{\text{enthalpie}} = \rho_{\text{réf}} T_{\text{réf}} l \int_{z_i}^h v_{(z,t)} C_p \left(1 - \frac{T_{df}(z,o)}{T_{df}(z,t)} \right) dz$$

➤ 2) La puissance évacuée à travers les parois

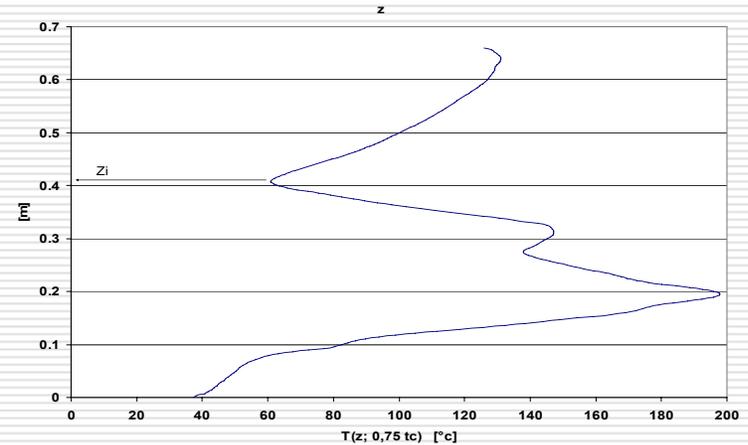
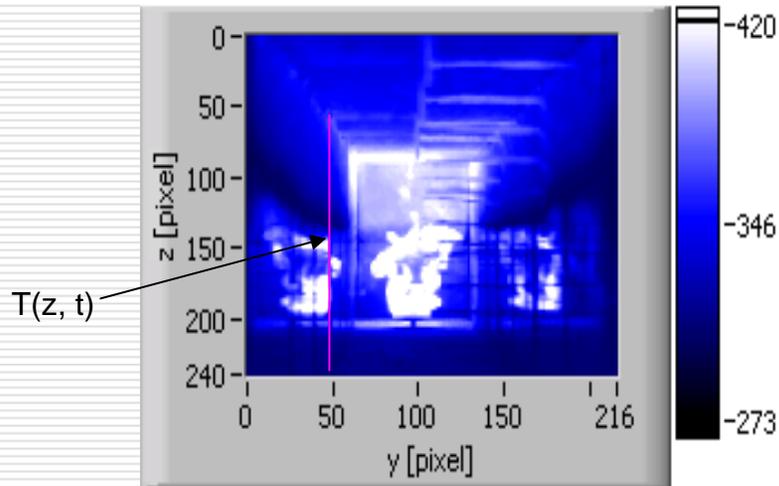
$$\Phi_{\text{parois}} = \Phi_{\text{rayonné}} + \Phi_{\text{convection}}$$

$$\Phi_{\text{rayonné}} = \varepsilon_{\text{suie}} \sigma \left(T_{DF}^4(t) - T_{DF}^4(o) \right) S_{DF}$$

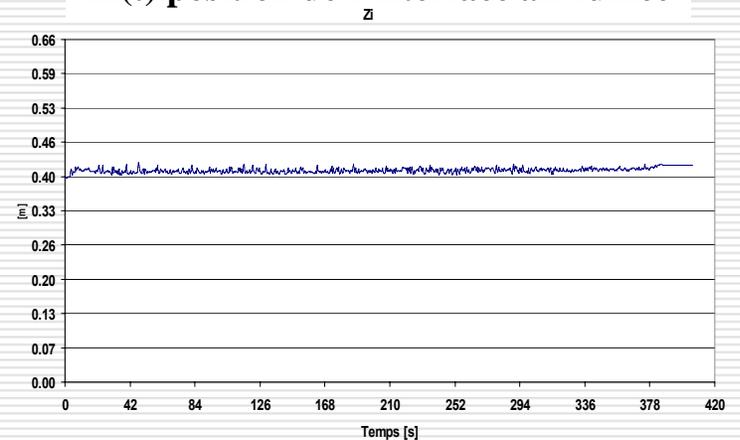
$$\Phi_{\text{convection}} = h_c \left(T_{DF}(t) - T_{DF}(o) \right) S_{DF}$$

Détermination de la position de l'interface air fumée (Z_i) dans le cadre du modèle de zones

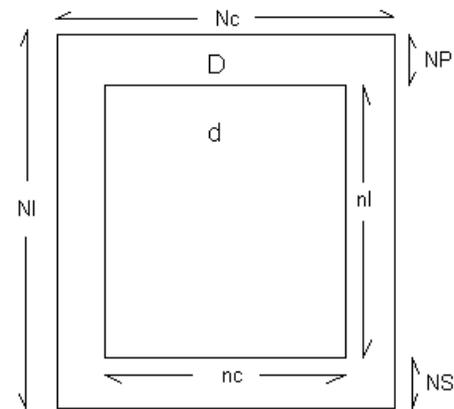
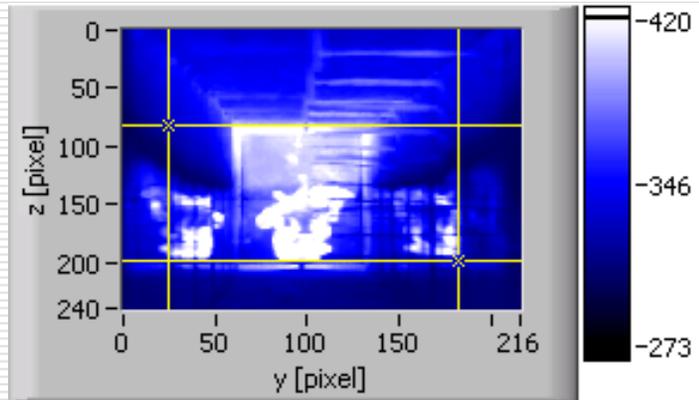
Profil vertical de température



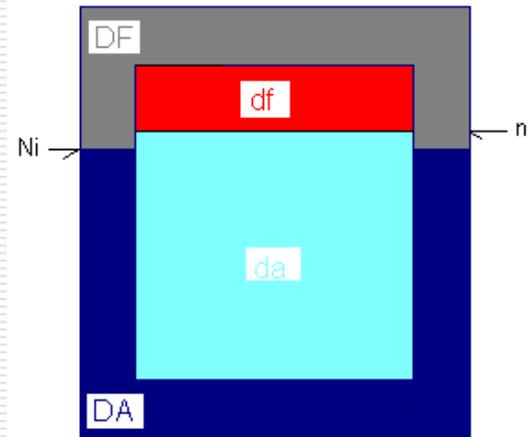
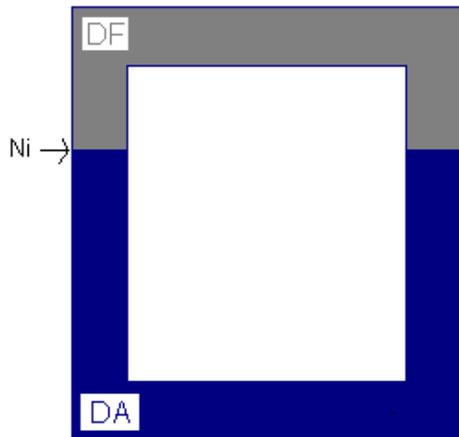
$Z_i(t)$ position de l'interface air fumée



Deux domaines sont considérés celui de la flamme (d) et celui relatif aux parois (D)



Le modèle de zones conduit à définir deux nouvelles régions situées dans le plan défini par l'entrée du tunnel et le plan du foyer

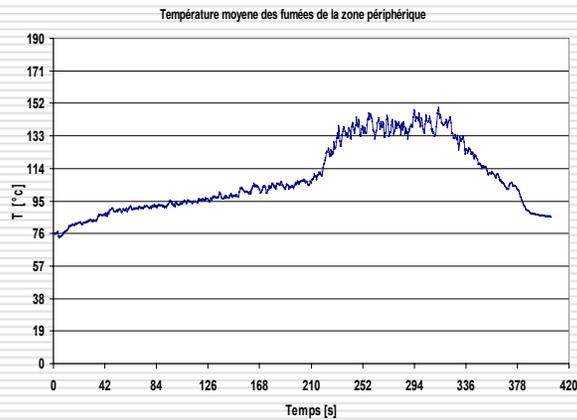


$$d = da + df$$

$$D = DA + DF$$

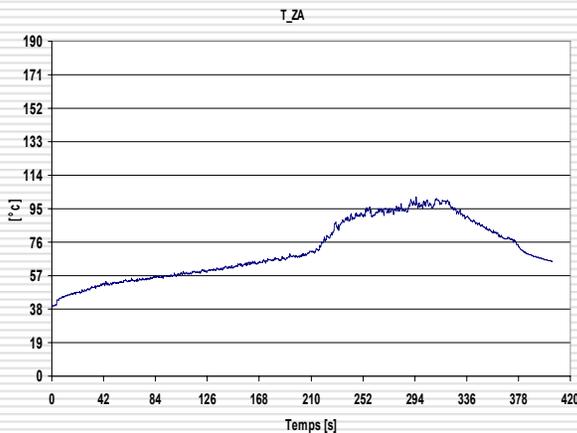
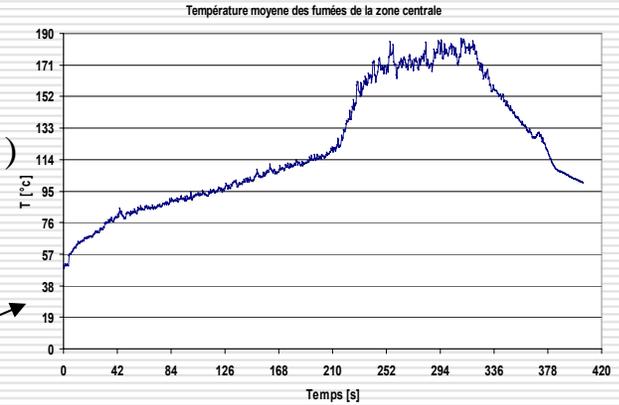
$$n_i = NS + \frac{n_l}{N_l} N_i$$

ϵ_{cir} est arbitraire \longrightarrow Modifier les émissivités des images infrarouge \longrightarrow Modifier les $T(y, z)$



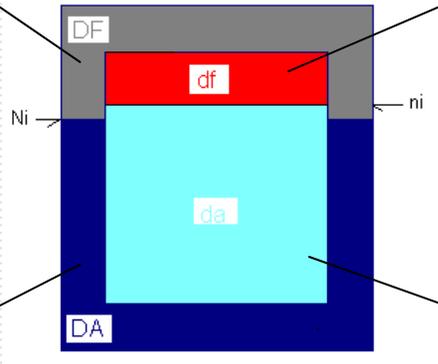
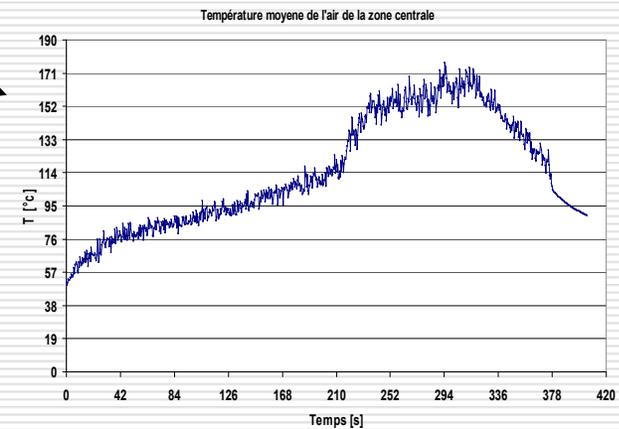
$$Z_i < Z < h \quad T = \sqrt[4]{\frac{\epsilon_{cir}}{\epsilon_f^*}} T_{cir}$$

Avec: $\epsilon_f^* = f(\epsilon_{sui}, \epsilon_{flamme}, \epsilon_{fumée})$
 et $\epsilon_f^* = 0,6$

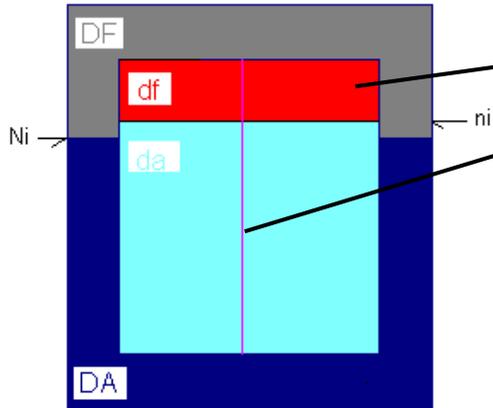


$$0 < Z < Z_i \quad T = \sqrt[4]{\frac{\epsilon_{cir}}{\epsilon_a^*}} T_{cir}$$

Avec: $\epsilon_a^* = f(\epsilon_{plâtre}, \epsilon_{flamme})$



Puissance transportée par les fumées

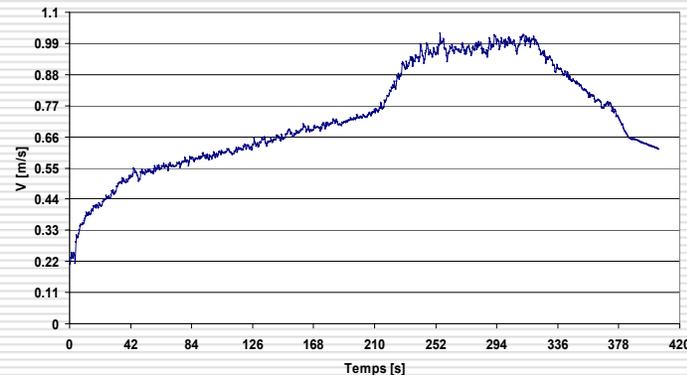
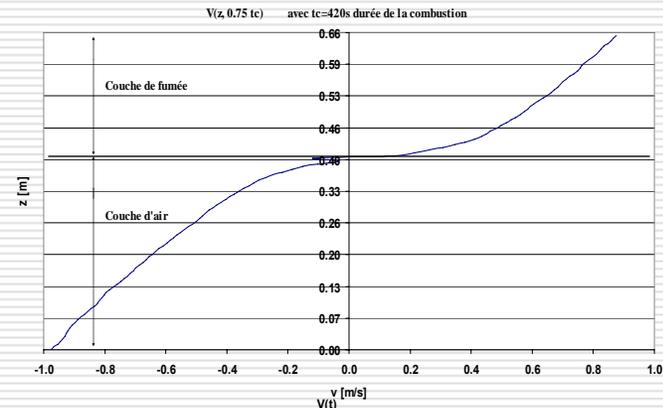
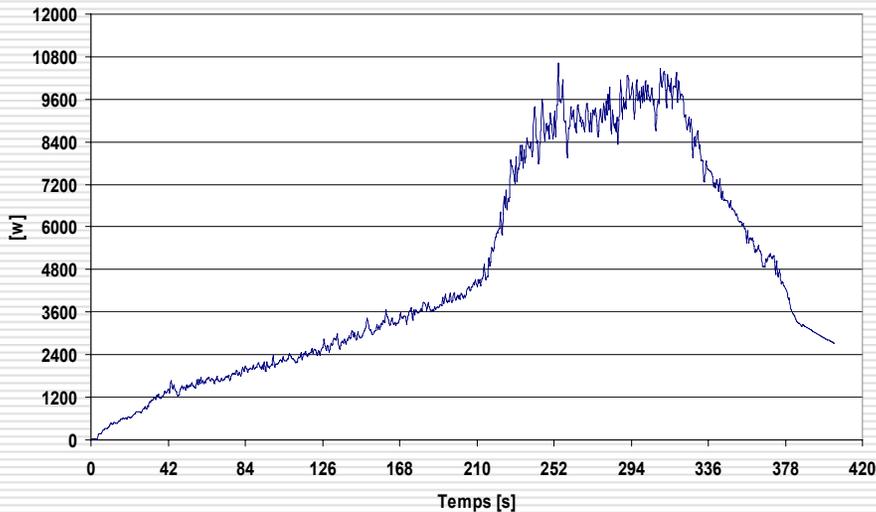


$$\Phi_{enthalpie} = \rho_{réf} T_{réf} l \int_{z_i}^h v(z, t) C_p \left(1 - \frac{T_{df}(z, 0)}{T_{df}(z, t)} \right) dz$$

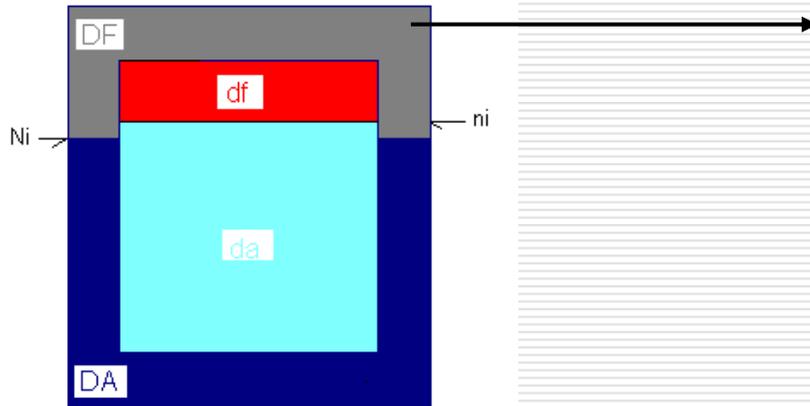
$$v(z, t) = \sqrt{2 g T(z, t) \int_{z_i}^z \frac{1}{T_{\infty}(z, t)} - \frac{1}{T(z, t)} dz}$$

On obtient:

Puissance transportée par les fumées



Puissance évacuée à travers les parois qui confinent les fumées



$$\Phi_{\text{parois}} = \Phi_{\text{rayonné}} + \Phi_{\text{convection}}$$

1) Expression du flux de convection

$$\Phi_{\text{convection}} = h_c (T_{DF}(t) - T_{DF}(o)) S_{DF}$$

Avec: $h_c = \sqrt{\frac{k_p \rho_p C_p}{t}}$ Hypothèse du mur semi infini

$$S_{DF} = \frac{(N_l - N_i) N_c - [N_l - (N_p + N_i)] n_c}{N_l N_c} S_t$$

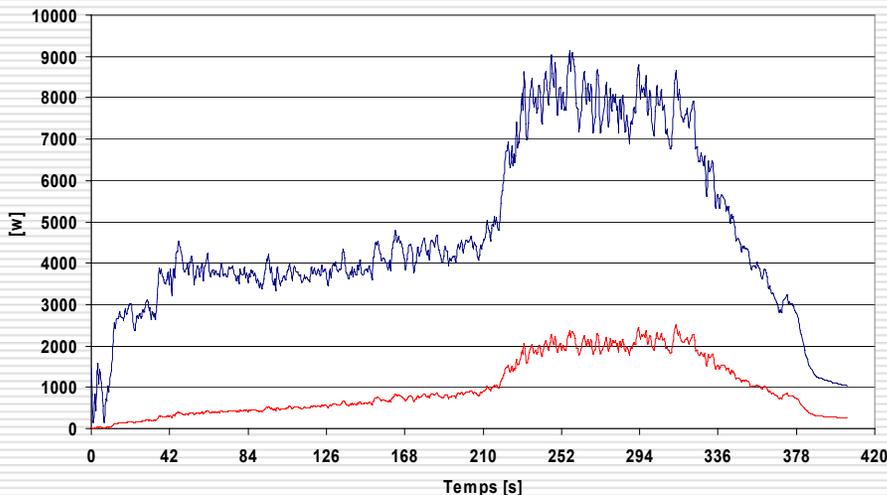
$$S_t = \sum_{j=1}^4 S_j$$

2) Expression du flux rayonné vers les parois

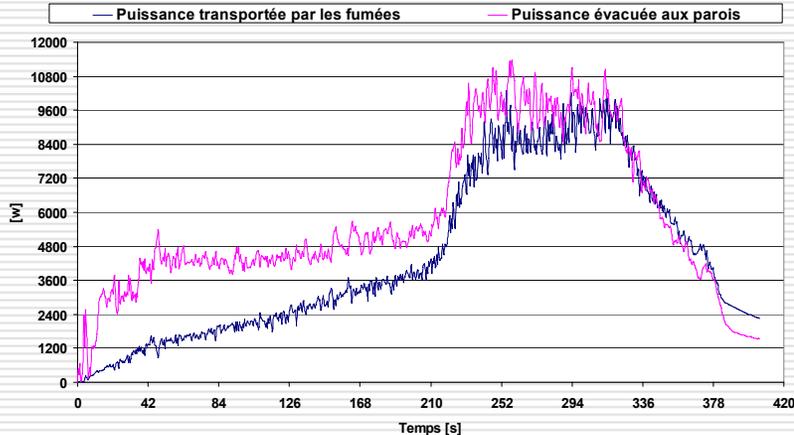
$$\Phi_{\text{rayonné}} = \varepsilon_{\text{suie}} \sigma (T_{DF}^4(t) - T_{DF}^4(o)) S_{DF}$$

On obtient:

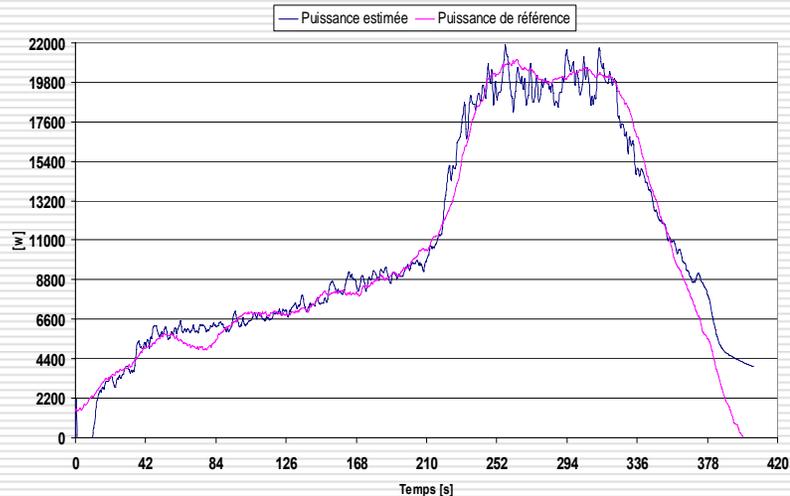
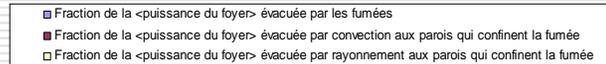
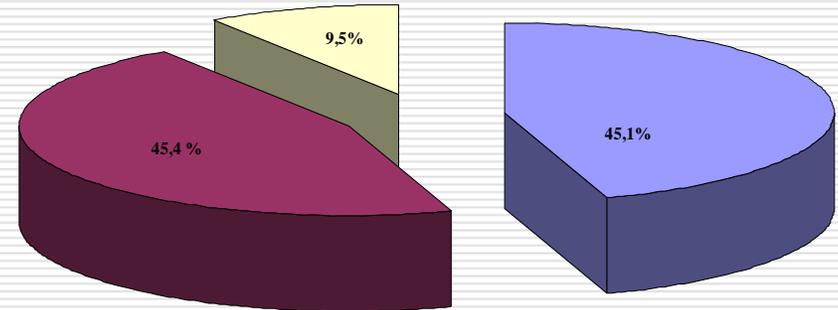
— Pray->parois fumées — Pconv->parois fumées



Résultats:

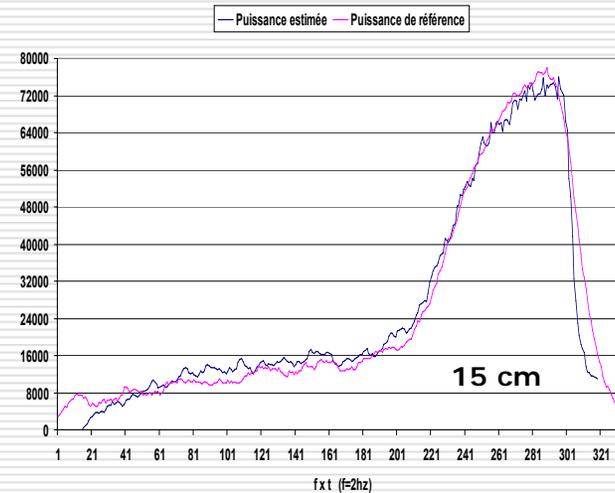
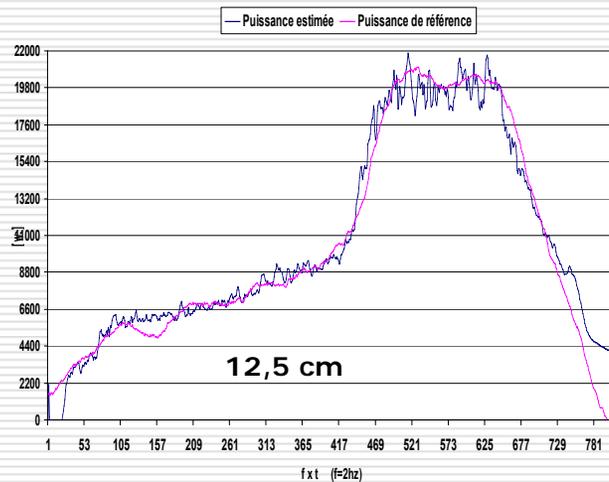
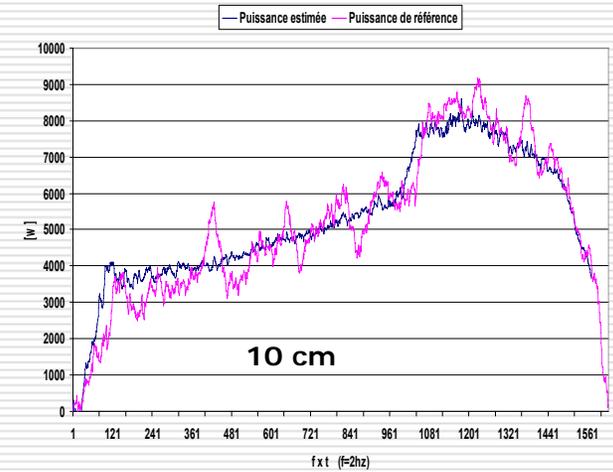
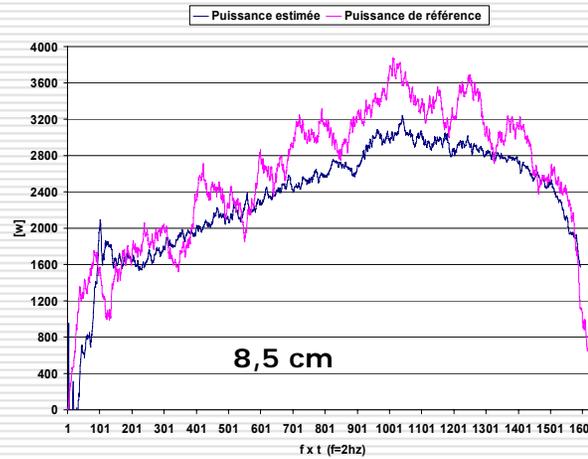
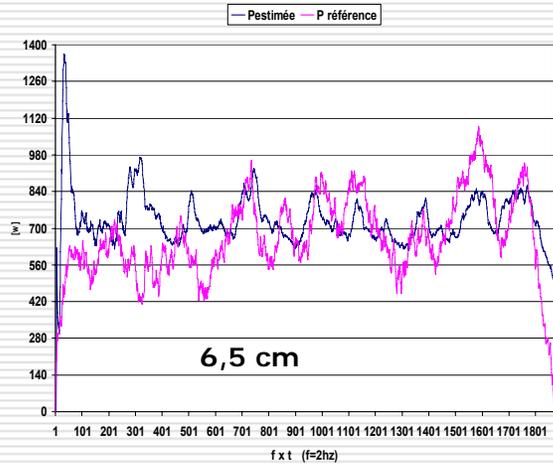


Contribution des différents transferts thermiques à la puissance du foyer



- Bon accord général entre la puissance déduite de l'évolution de la masse brûlée et celle estimée en utilisant une caméra de thermographie infrarouge
- Bon accord avec la puissance maximum
- Ecart plus importants lorsque la puissance est faible (début et fin de combustion)

Résultats expérimentaux pour différents diamètres de foyer:



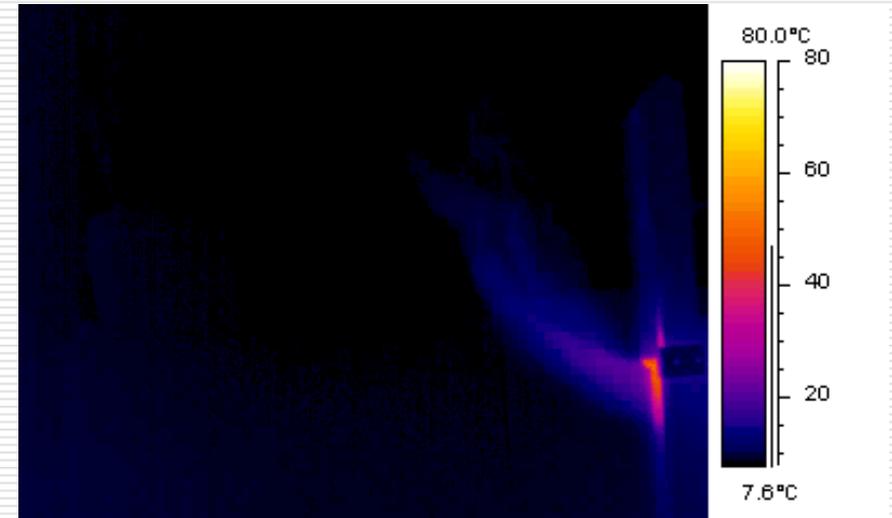
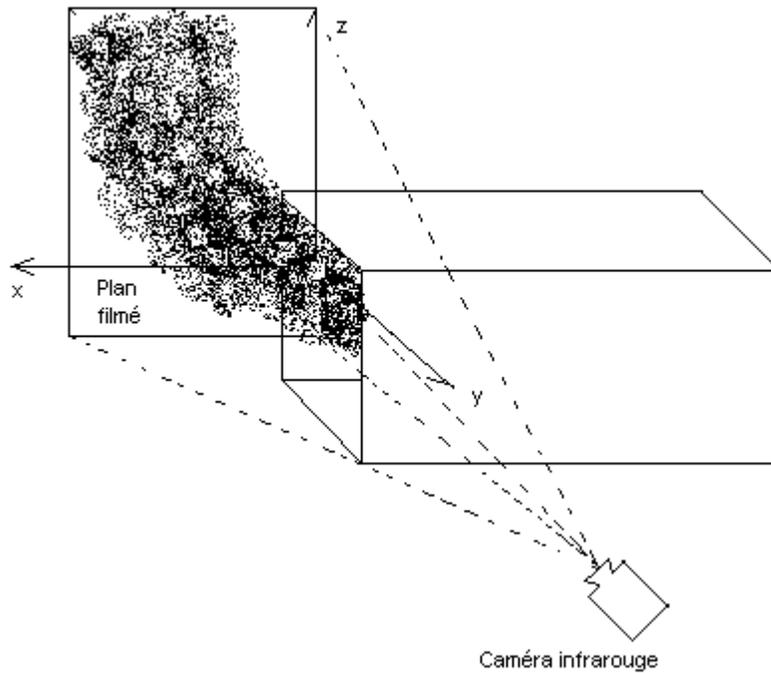
Conclusions et perspectives

- 1) **Bon accord général avec la puissance calculée à partir des mesures de masse brûlée**
- 2) **Méthode applicable en temps réel**
- 3) **Ne nécessite pas l'instrumentation préalable de la maquette.**
- 4) **D'autres tests sont à mener pour valider la méthode en faisant varier divers paramètres (échelle, type de foyer, géométrie,...)**
- 5) **Simplifier la méthode en se ramenant à l'étude d'un domaine unique**
- 6) **Estimer l'émissivité des suies à la fois dans les flammes et les fumées au cours de la combustion**

* * *

Estimation de la vitesse des fumées qui sortent du tunnel

➤ Dispositif expérimental



Modèle utilisé et hypothèses

1/2

- La relation fondamentale de la dynamique appliquée à une particule fluide (RFD)

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{f}_i$$

- Hypothèses:

- 1) Une particule fluide parcourt une trajectoire définie par les maxima de températures de chaque colonne d'une image infrarouge ($C_{T_{\max}}$)
- 2) Les fumées se comportent comme un gaz parfait
- 3) La pression est quasiment constante

- L'équation de la trajectoire nous permet d'écrire

$$\frac{dz}{dx} = \frac{v_z}{v_x} = \tan \theta$$

La RFD projetée sur les axes (x, z), en négligeant les frottements:

$$-\frac{v_x}{T^2} \frac{dT}{dt} + \frac{1}{T} \frac{dv_x}{dt} = 0$$

$$-\frac{v_x \tan \theta}{T^2} \frac{dT}{dt} + \frac{1}{T} \left(v_x \frac{d \tan \theta}{dt} + \tan \theta \frac{dv_x}{dt} \right) = \left(\frac{1}{T_{\text{amb}}} - \frac{1}{T} \right) g$$

Modèle utilisé

2/2

Avec la dérivée particulière:

$$\frac{d \tan \theta}{dt} = \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \tan \theta + \frac{\partial \tan \theta}{\partial t}$$

On obtient l'équation algébrique suivante:

$$\left(\frac{\partial \tan \theta}{\partial x} + \tan \theta \frac{\partial \tan \theta}{\partial z} \right) v_x^2 + \frac{\partial \tan \theta}{\partial t} v_x + \left(1 - \frac{T}{T_{amb}} \right) g = 0$$

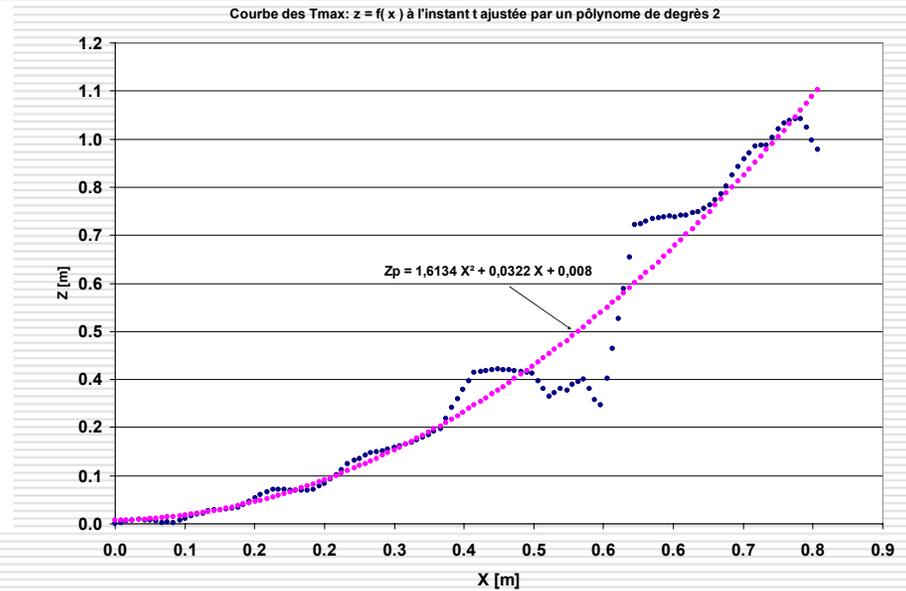
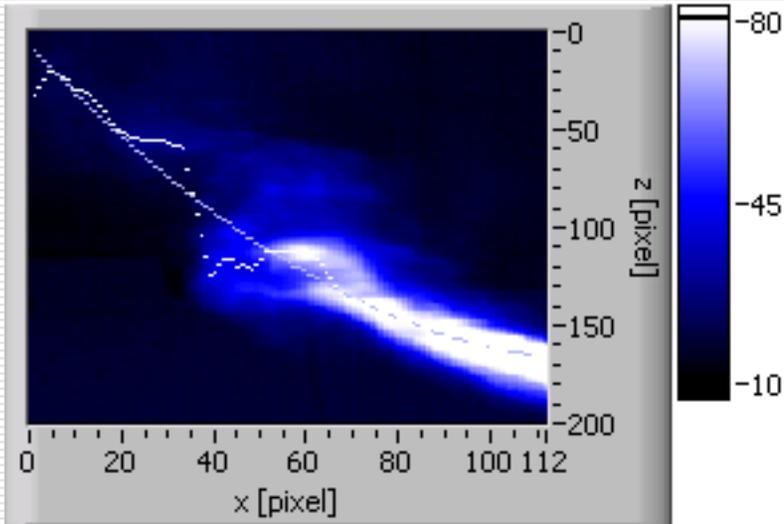
Sa résolution nous donne les deux solutions suivantes

$$v_{x\pm} = \frac{-\frac{\partial \tan \theta}{\partial t} \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \tan \theta}{\partial t} \right)^2 - 4 \left(\frac{\partial \tan \theta}{\partial x} + \tan \theta \frac{\partial \tan \theta}{\partial z} \right) \left(1 - \frac{T}{T_{amb}} \right) g}{2 \left(\frac{\partial \tan \theta}{\partial x} + \tan \theta \frac{\partial \tan \theta}{\partial z} \right)}$$

On en déduit

$$v_z = v_x \tan \theta$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$$

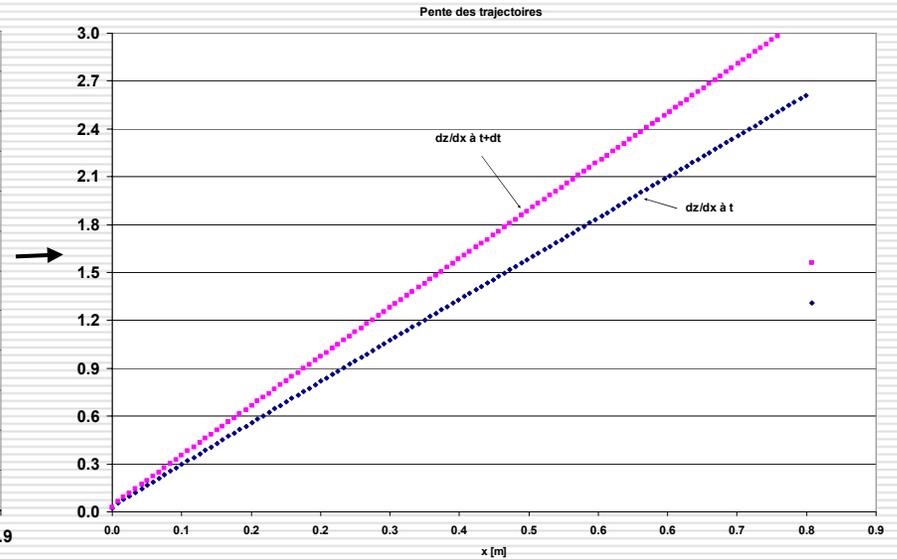
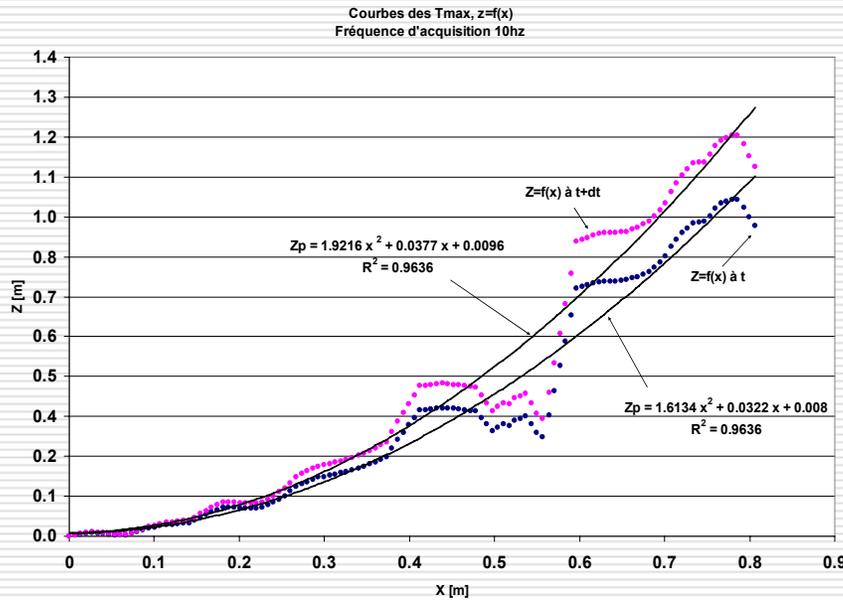
Détermination de la trajectoire fictive ($C_{T_{\max}}$)


- L'évolution de l'émissivité des fumées n'étant pas connue au cours de la combustion le champ de température est redéfini à partir de la connaissance de la température en sortie du tunnel (thermocouple).

$$T = \frac{\Delta T_{th}}{\Delta T_{cir}} (T_{cir} - T_{cir}^{\min}) + T_{th}^{\min}$$

Avec: $\Delta T_{th} = T_{th}^{\max} - T_{th}^{\min}$, $\Delta T_{cir} = T_{cir}^{\max} - T_{cir}^{\min}$, $T_{th}^{\min} = 10^{\circ}\text{C}$, $T_{th}^{\max} = 120^{\circ}\text{C}$

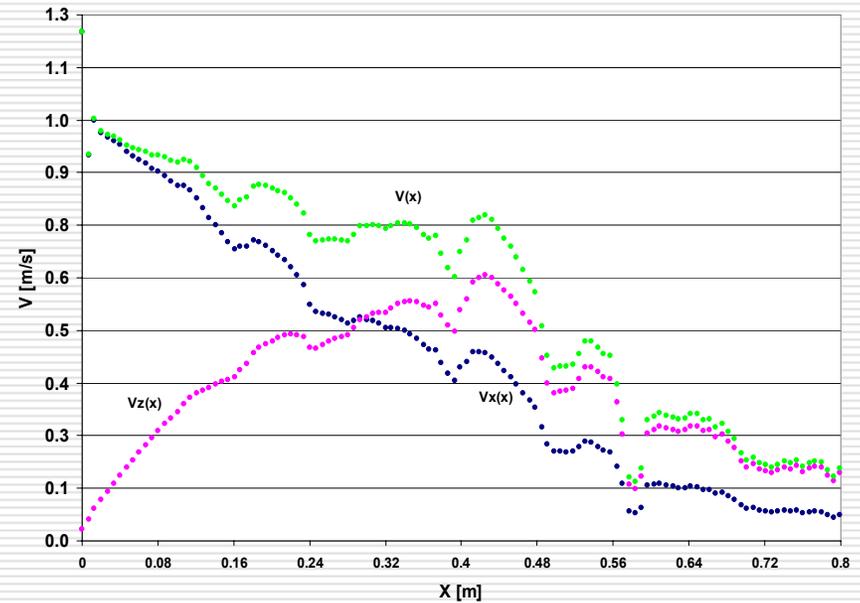
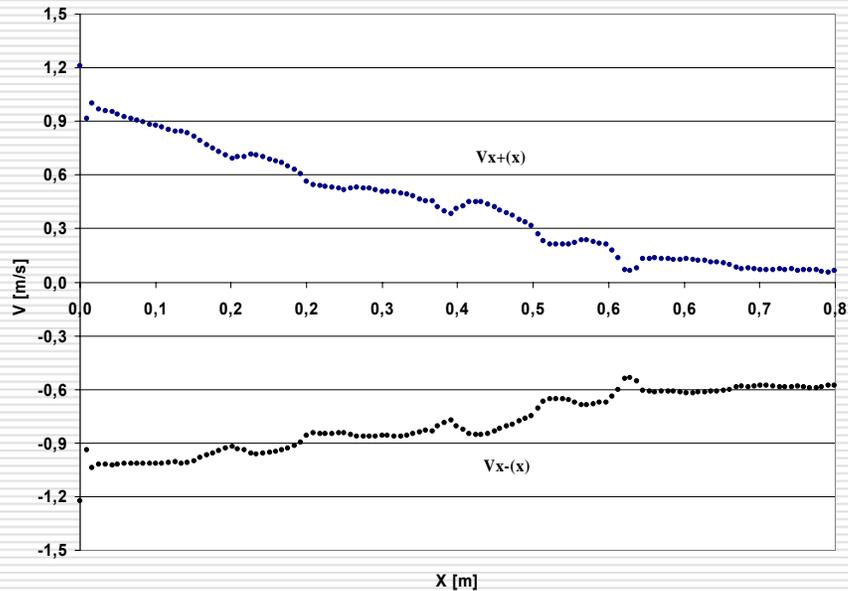
Trajectoires fictives à deux instants successifs



Avec: $\frac{\partial}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta}{\Delta x_i}$

$\frac{\partial \tan \theta}{\partial t}$

Représentation des vitesses associées au mouvement de la particule fluide



➤ La vitesse calculée en sortie du tunnel est inférieure à celle mesurée à l'anémomètre. Ceci peut s'expliquer par la non prise en compte des termes suivants:

- 1) Les frottements visqueux.
- 2) La composante horizontale des forces de pression

Conclusions et perspectives

- 1) **Méthode applicable en temps réel**
- 2) **Prendre en compte les termes négligés**
- 3) **Estimer l'émissivité des suies contenues dans la fumée au cours de la combustion**
- 4) **Estimer la puissance que la fumée dissipe dans son environnement au cours de sa propagation**

* * *

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil Régional de Haute-Normandie et l'ANR pour les financements qu'ils ont apportés permettant la réalisation de ces travaux de recherche