

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



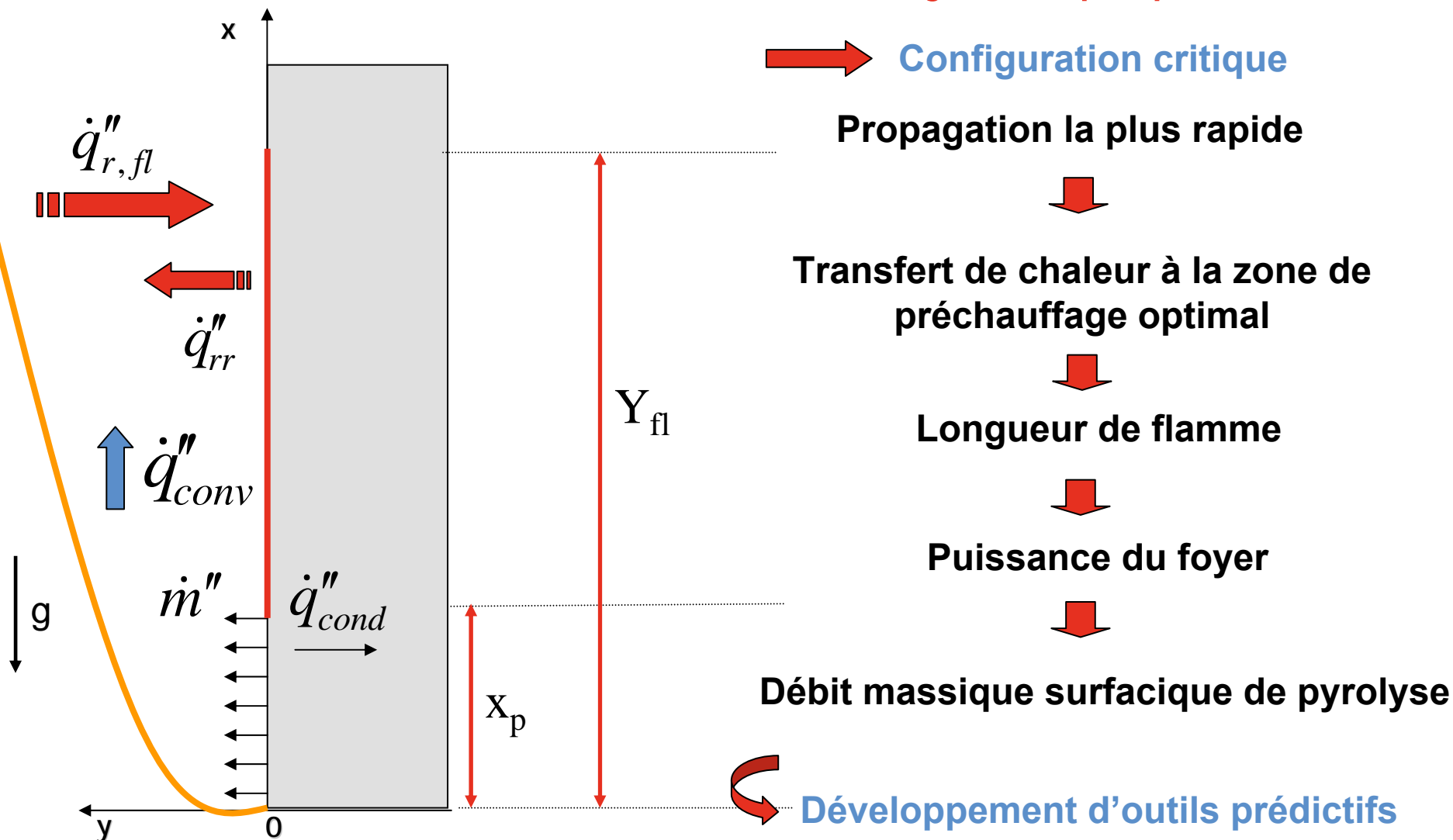
Modèle simplifié de propagation le long d'une plaque plane inclinée de PMMA

Y. PIZZO, J-L. CONSALVI, P. QUERRE, M. COUTIN et B. PORTERIE



Contexte de l'étude

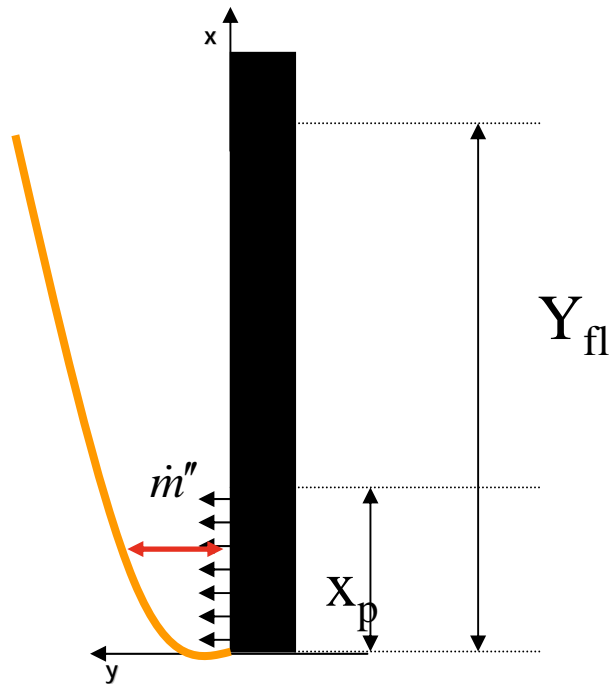
Flamme de diffusion turbulente établie le long d'une plaque verticale



Contexte de l'étude

Nouveau modèle de Pyrolyse

Une nouvelle approche pour modéliser le débit massique de combustible dans la zone de pyrolyse lors d'un feu est proposée



Détermination d'un seul coefficient caractérisant le matériau au feu

Nombre de transfert de Masse

Épaisseur de flamme ou \dot{m}''

Démarche Globale

Configuration Académique, appropriée à une résolution analytique (2D, mise en place aisée...)

Matériau de référence : PMMA

Étude
expérimentale
(Etat stationnaire)

Débit massique surfacique

Théorie de la
couche limite
laminaire
réactive

Calibration

Nombre de transfert de masse
B

Modèle analytique

Prédiction de la phase
propagative du feu

Analyse théorique

Équations de la couche limite réactive (convection naturelle)

$$\eta = (Gr_x^{1/4} / x\sqrt{2}) \int_0^y \frac{\rho}{\rho_\infty} dy$$

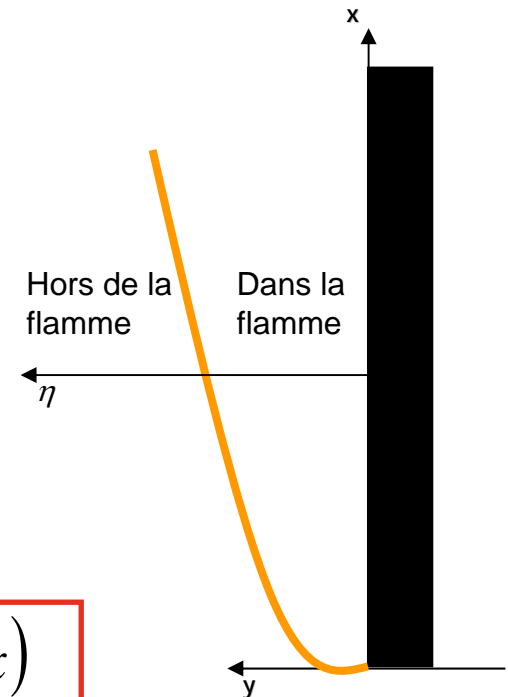
$$B = \frac{Y_{O_2, \infty} Q_p - C_p (T_{pyr} - T_\infty)}{L_v}$$

$$Gr_x = \frac{gx^3 (T_w - T_\infty)}{\nu_\infty^2 T_\infty}$$

$$\begin{cases} f''' + 3ff'' - 2f'^2 = \begin{cases} f_1(B), & \text{dans la flamme} \\ f_2(B), & \text{hors de la flamme} \end{cases} \\ J'' + 3Pr f J' = 0 \end{cases}$$

$$\eta = 0 \quad , \quad f' = 0, \quad f(0) = BJ'(0) / 3Pr \quad \text{et} \quad J = 1$$

$$\eta \rightarrow \infty \quad , \quad f' = 0 \quad \text{et} \quad J = 0$$

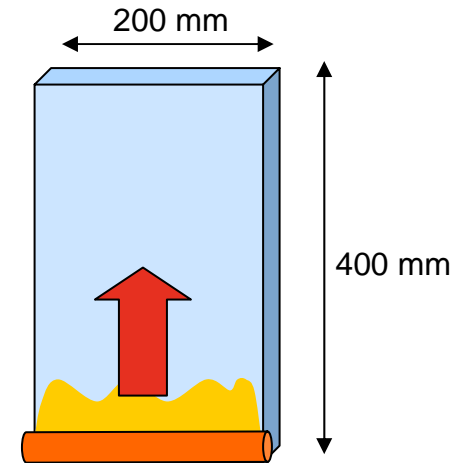


$$\dot{m}'' = -3\nu_\infty \rho_\infty f(0) Gr_x^{1/4} / (2^{1/2} x)$$

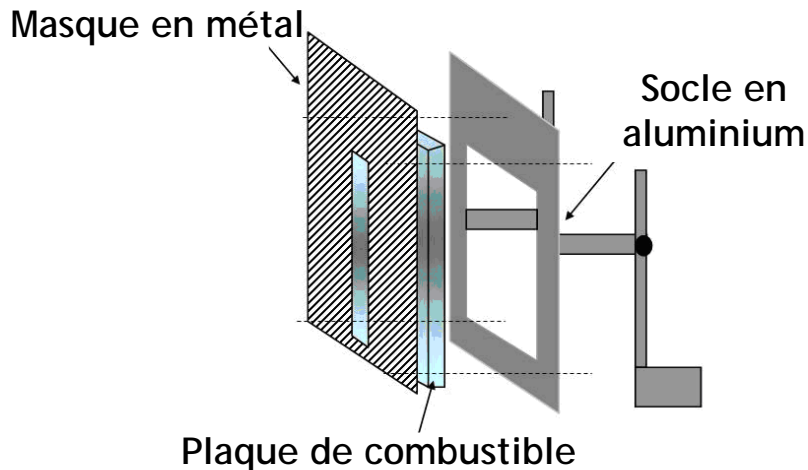
Étude expérimentale : configuration et dispositif

Configuration retenue, dite « de référence »

- Matériau standard (PMMA)
- Échelle de laboratoire
- Paroi plane verticale
- Mode ascendant
- Propagation
- Phase stationnaire



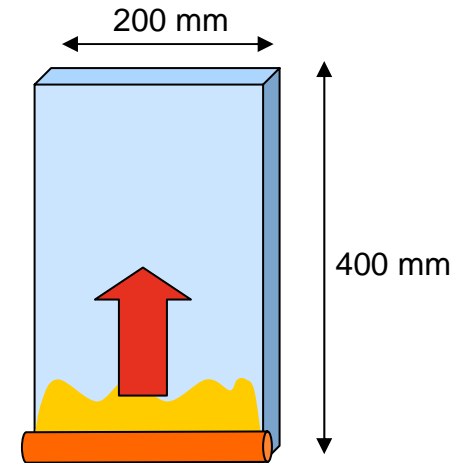
Dispositif Expérimental



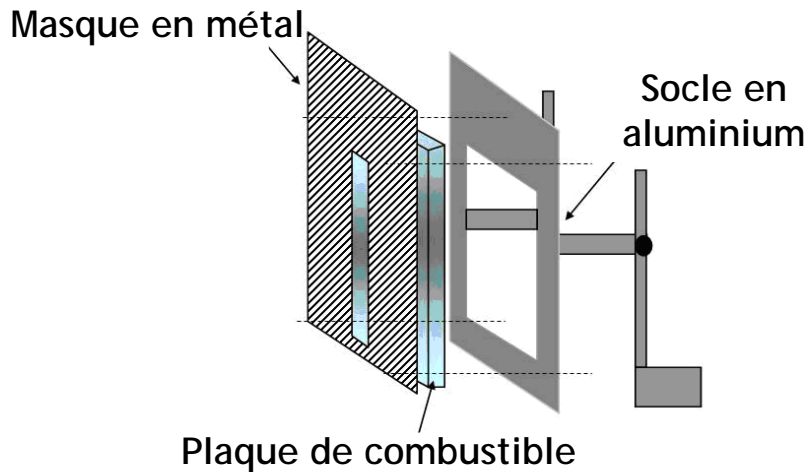
Étude expérimentale : configuration et dispositif

Configuration retenue, dite « de référence »

- **Matériau standard (PMMA)**
- **Échelle de laboratoire**
- **Paroi plane verticale**
- **Mode ascendant**
- **Propagation**
- **Phase stationnaire**

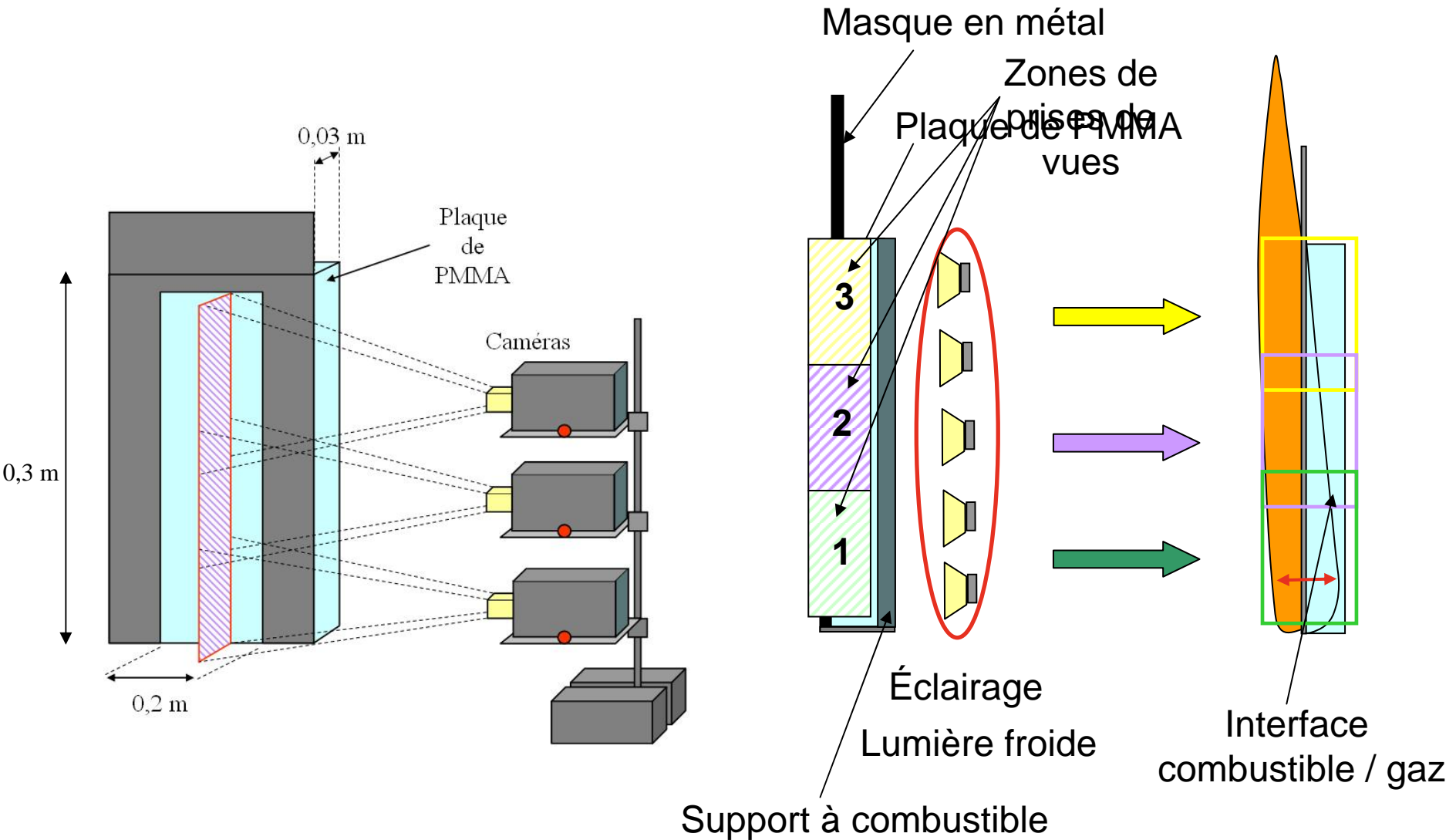


Dispositif Expérimental



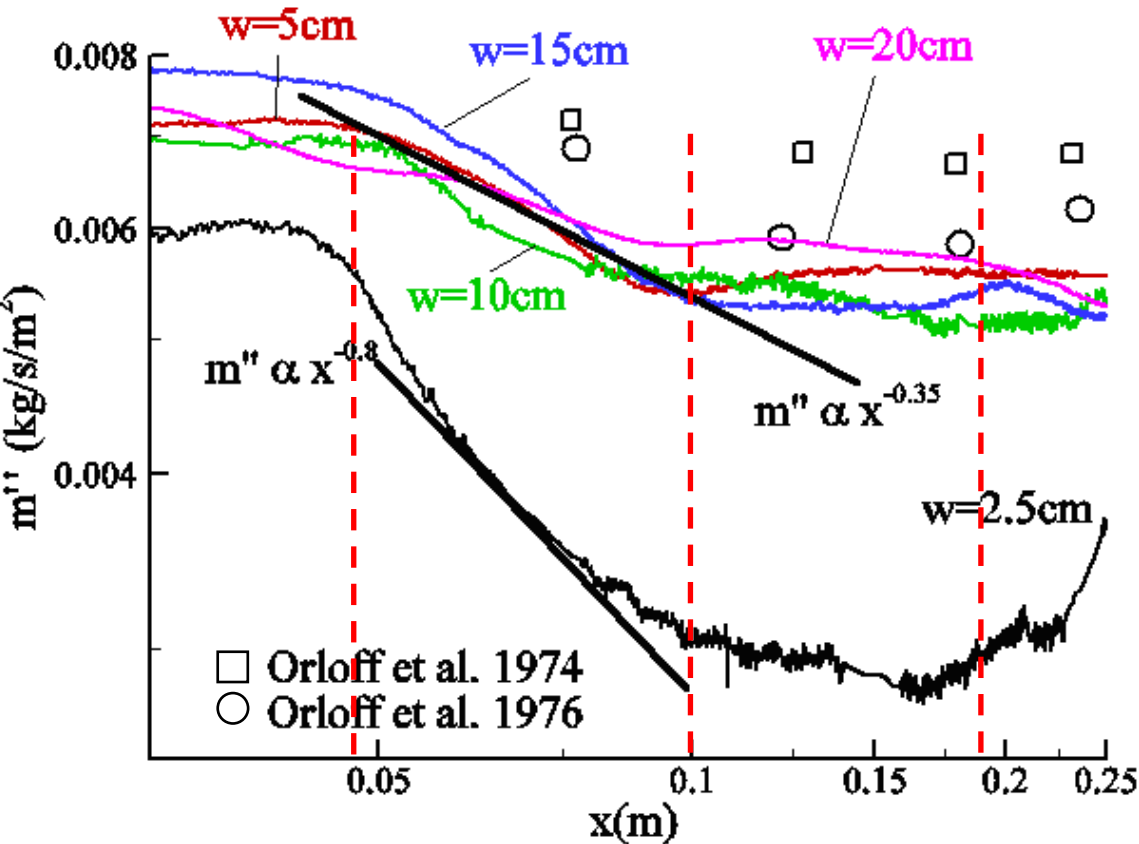
Étude expérimentale

Instrumentation (système vidéo) :



Résultats expérimentaux

Débits massiques surfaciques de pyrolyse : effet de la largeur de la plaque combustible



4 régions

$0 < x < 4$ cm : x ↗, \dot{m}'' ↗

4 cm $< x < 10$ cm : zone laminaire
- LBL* théorie : $\dot{m}'' \propto x^{-0.25}$
- Exp : $\dot{m}'' \propto x^{-0.35}$

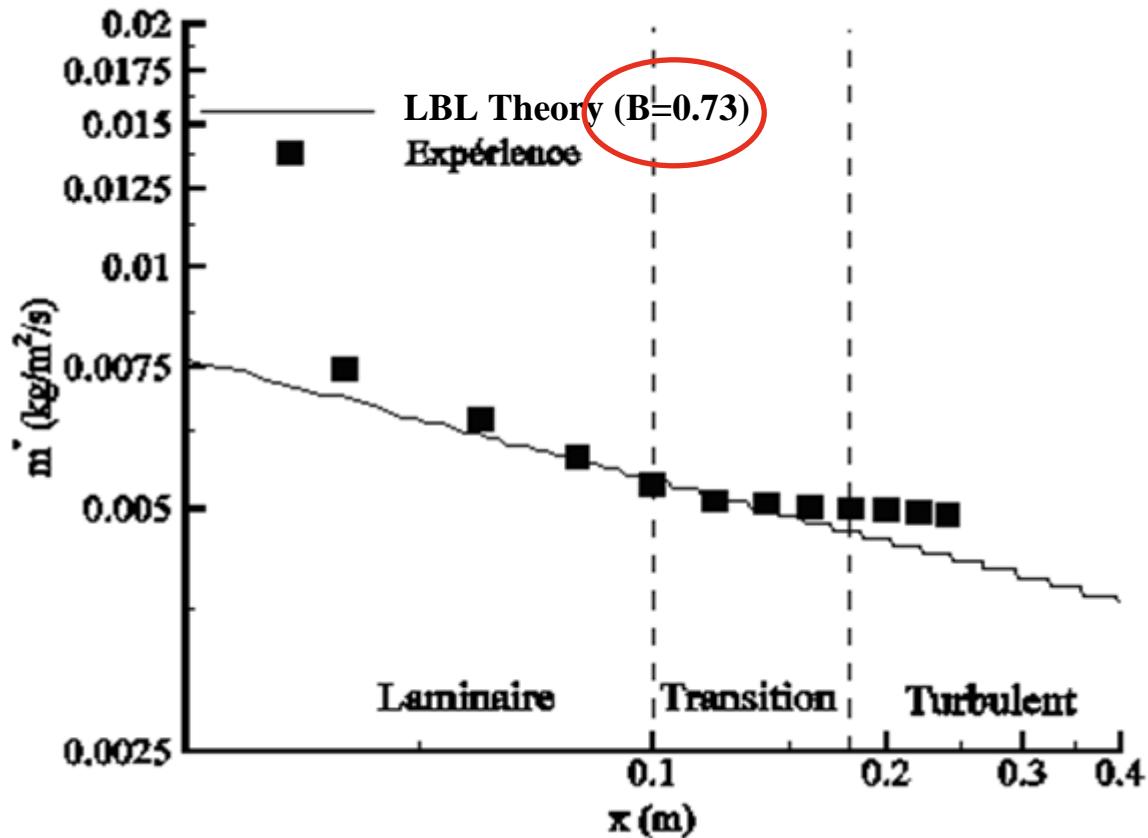
10 cm $< x < 18$ cm :
Transition Laminaire-Turbulent

$x > 18$ cm : Pleinement Turbulent
 \dot{m}'' ↗



W < 5 cm, apparition d'effets 3D

Détermination du Nombre de transfert de masse



➔ $B_{PMMA} = 0.73$

Modèle de propagation simplifié

Formulation d'un modèle de pyrolyse basé sur la détermination du nombre de transfert de masse

Simulation de la dégradation d'une plaque de PMMA en phase transitoire

→ Théorie de la couche limite valable (zone laminaire et transition)

→ B_{PMMA} (calibration, configuration de référence)

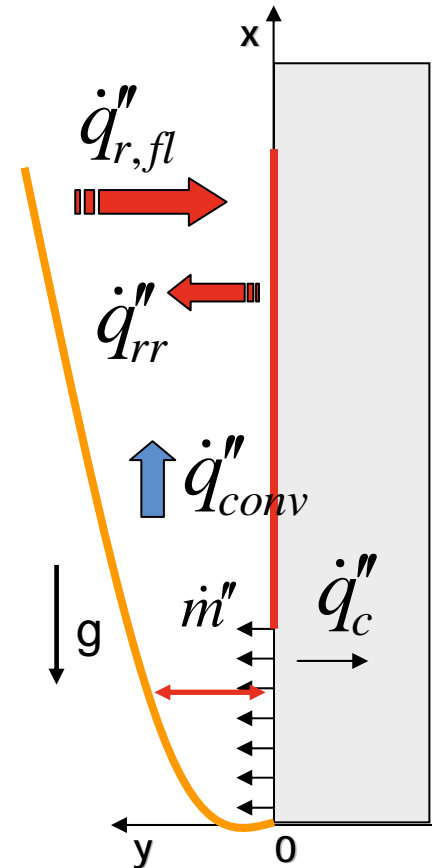
→ Durant le transitoire :

$$\dot{m}'' L_v = \dot{q}_{conv}'' + \dot{q}_{r,fl}'' - \dot{q}_{rr}'' - \dot{q}_{cond}''$$

→ L'évolution du débit de pyrolyse pendant le stationnaire est seulement due à la relaxation de la conduction dans le solide (Quintiere et al. (1994,1998))

→ Débit de pyrolyse (état stationnaire) → flux net à la paroi :

$$\dot{m}''_{steady} L_{v,eff} = \dot{q}''_{net} = \dot{q}_{conv}'' + \dot{q}_{r,fl}'' - \dot{q}_{rr}''$$



Modèle de propagation simplifié

Formulation d'un modèle de pyrolyse basé sur la détermination du nombre de transfert de masse

→ Le débit de pyrolyse peut s'écrire alors :

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{m}''_{steady} L_{v,eff}}{L_v} - \frac{\dot{q}''_{cond}}{L_v}$$

B empirique calibré à partir
d'une manip référence
+



\dot{m}''_{steady}

Théorie de la couche limite

Equation de la chaleur
(Zone de préchauffage)



\dot{q}''_{cond}

Simulation de la
propagation du feu le long
d'une plaque plane en
position inclinée

$$\dot{m}''_{Steady} = -3v_{\infty}\rho_{\infty}f(0)Gr_x^{1/4} / (2^{1/2}x)$$

$$Gr_x = \frac{g \cos \phi x^3 (T_w - T_{\infty})}{v_{\infty}^2 T_{\infty}}$$

Formulation et Résultats

Longueur de flamme

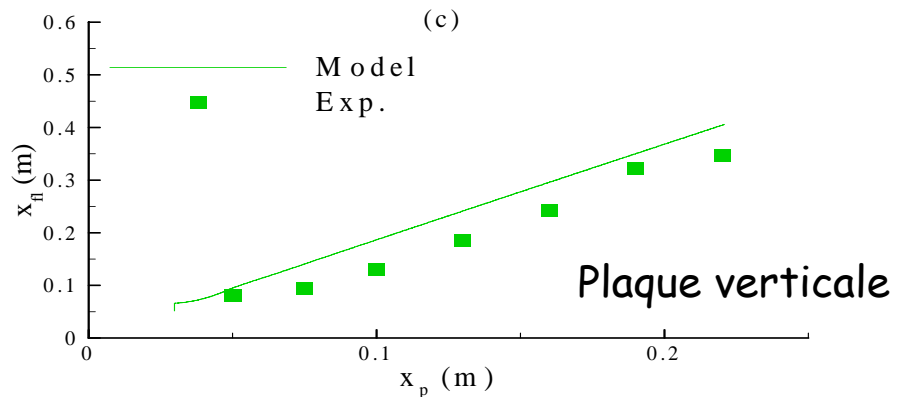
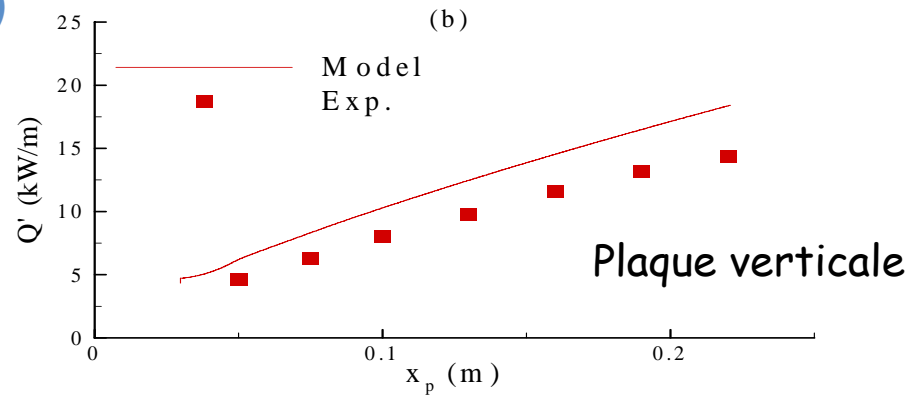
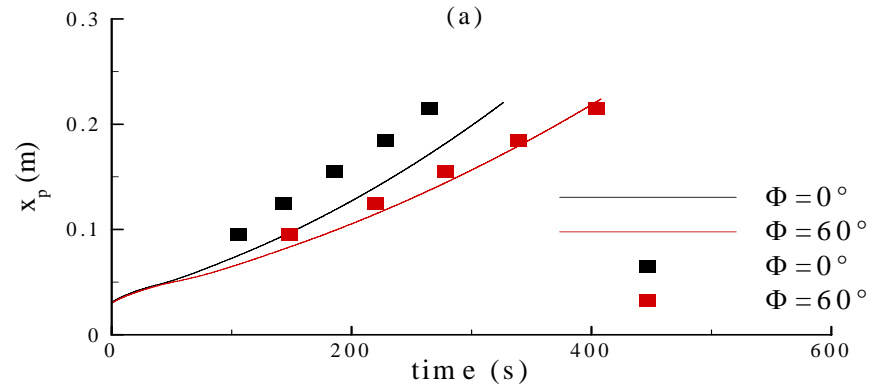


X_{fl} = Fonction (HRR par unité de largeur)

Flux en avant du front de pyrolyse

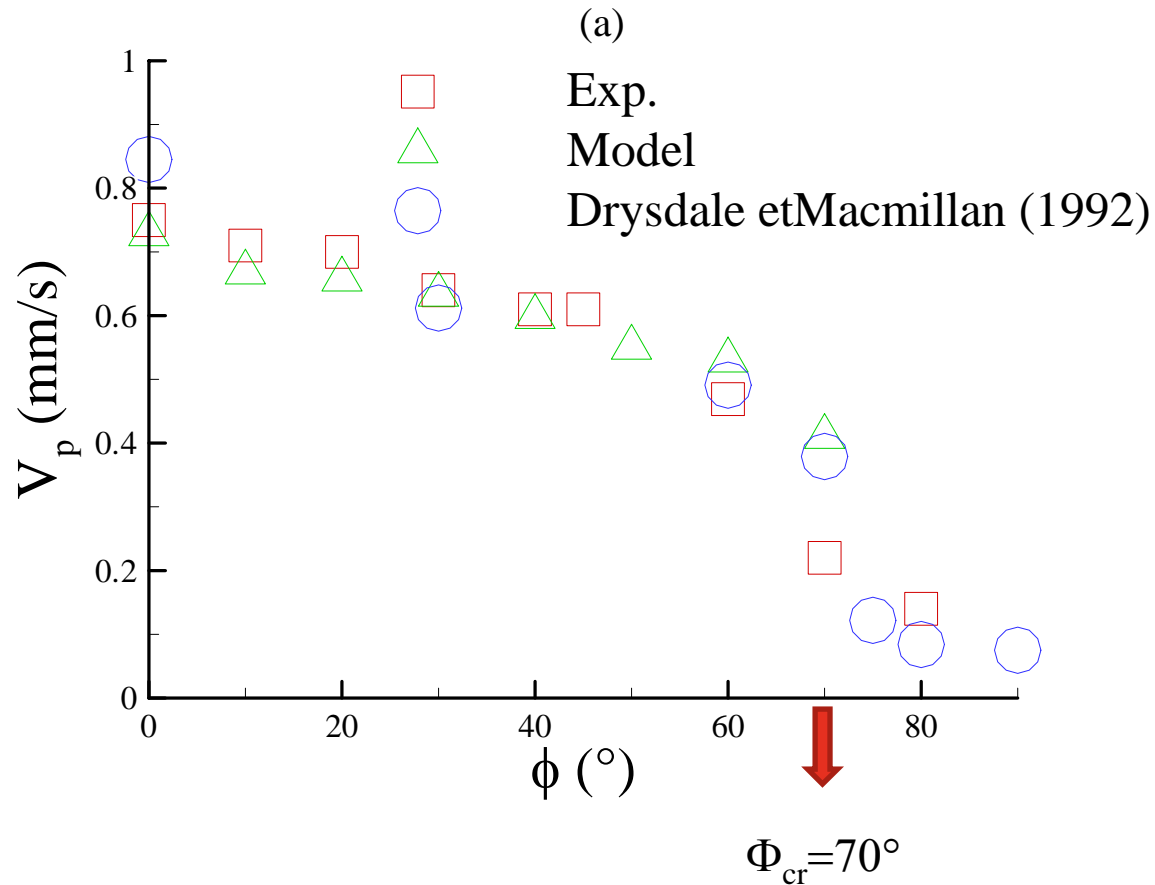


$$\dot{q}''_{fl} = \text{fonction} \left(\frac{x - x_p}{x_{fl} - x_p} \right)$$



Résultats

Vitesses de propagation du front de pyrolyse (plaque plane inclinée)



$\phi < \phi_{cr}$: la flamme s'attache sur la plaque pour former une couche limite
→ Bon accord

Remarque

Estimation du nombre de transfert de masse par une perte de masse globale

Problème de cette technique 

Nécessite la connaissance du débit local de pyrolyse le long de la plaque combustible

$$\dot{m}'' = -3v_{\infty}\rho_{\infty}f(0)Gr_x^{1/4} / (2^{1/2}x)$$

$$\dot{m}_{x_p} = \int_0^{x_p=0.2m} \dot{m}''(x) = \int_0^{x_p=0.2m} -3v_{\infty}\rho_{\infty}f(0)Gr_x^{1/4} / (2^{1/2}x) = 0.24 \text{ g / s}$$

En utilisant B=0.73

La perte de masse obtenue expérimentalement (0.2m, 0.2m, 0.03m) \approx 0.24 g / s

Configuration de référence

BALANCE

Etat stationnaire

Conclusion

Existence d'un nombre de transfert de masse empirique permettant d'ajuster au mieux les débits de pyrolyse expérimentaux à la TCLL

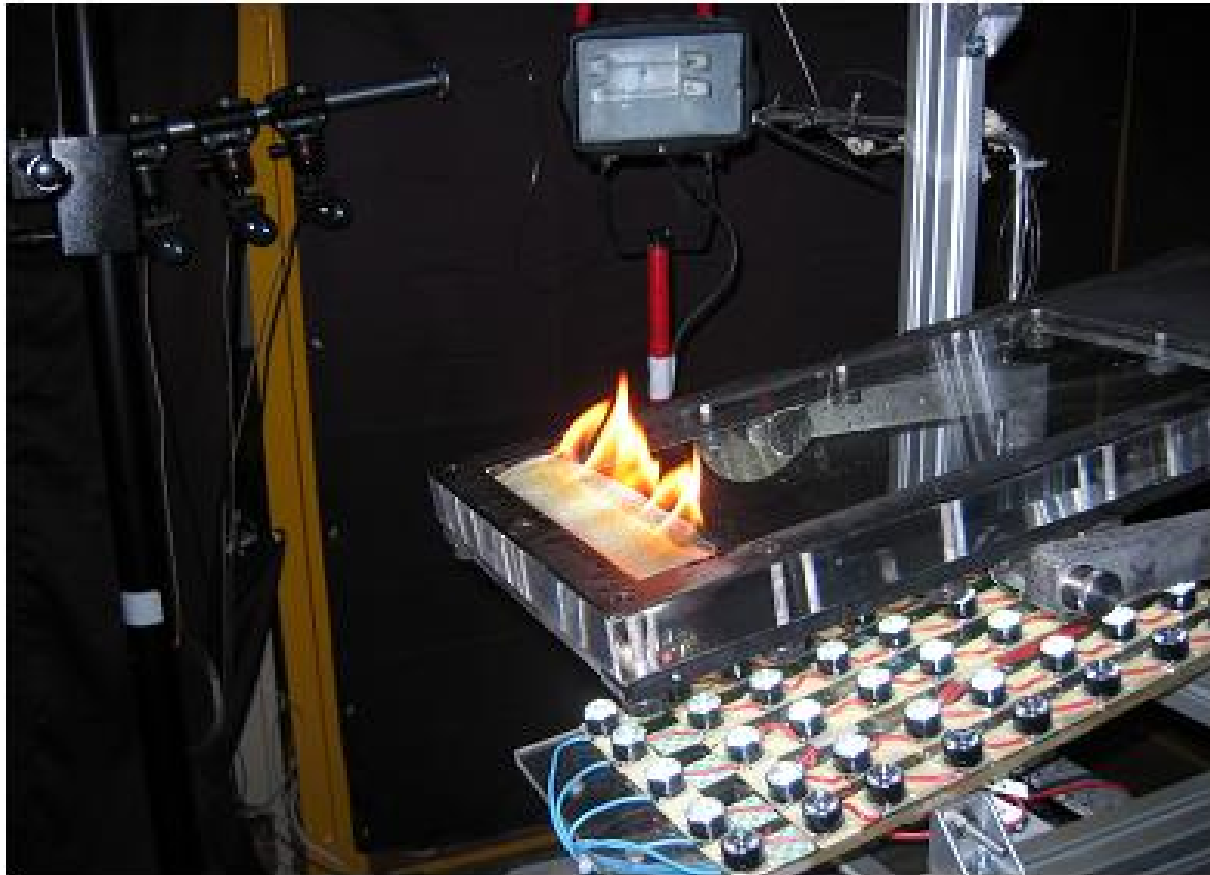
Formulation d'un modèle concernant la phase transitoire à l'aide de ce nombre de transfert de masse

Application de ce modèle de pyrolyse à la simulation du feu le long de plaques planes en positions inclinées

Bon accord entre les résultats obtenus par le modèle et les résultats expérimentaux

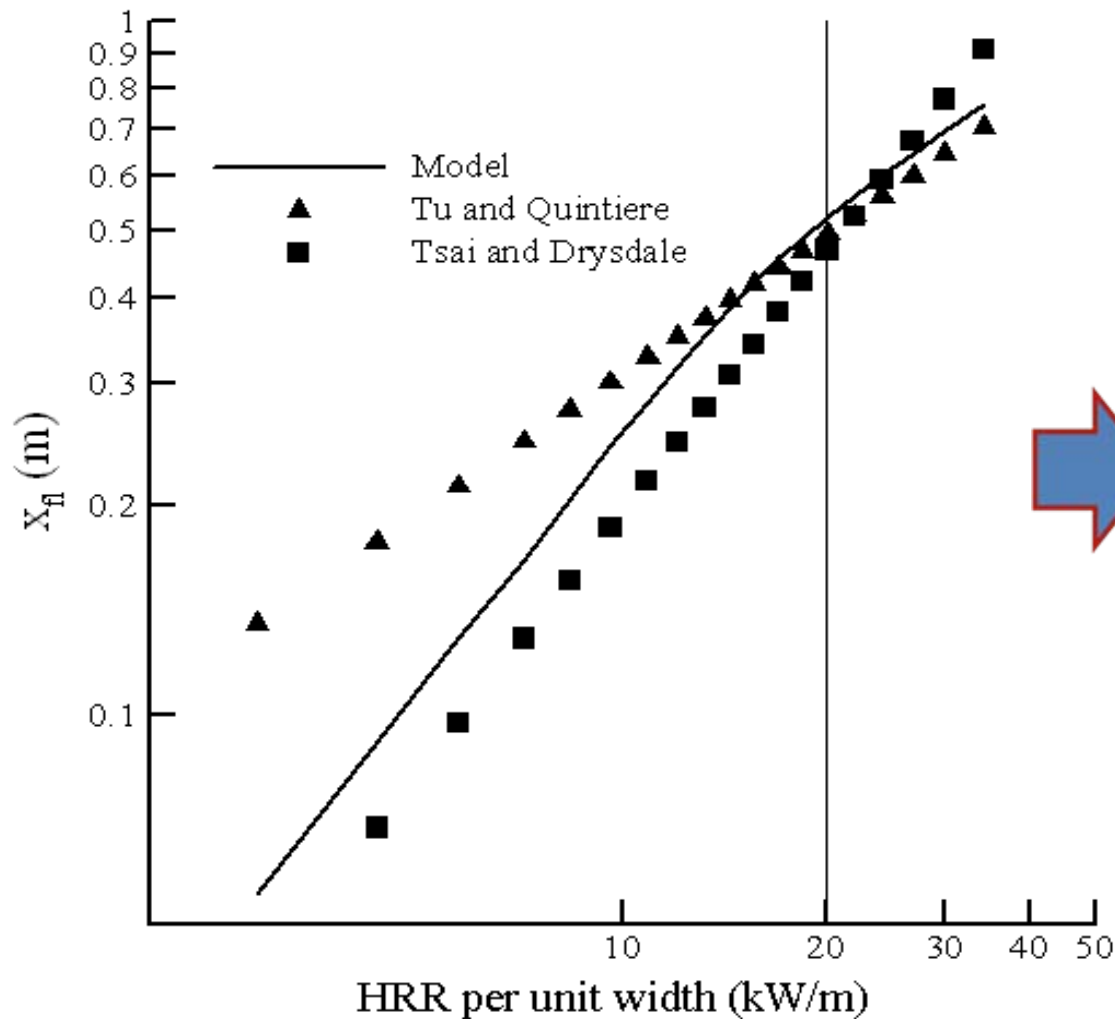
FIN

Propagation du feu le long d'une plaque plane inclinée



Modèle de propagation simplifié

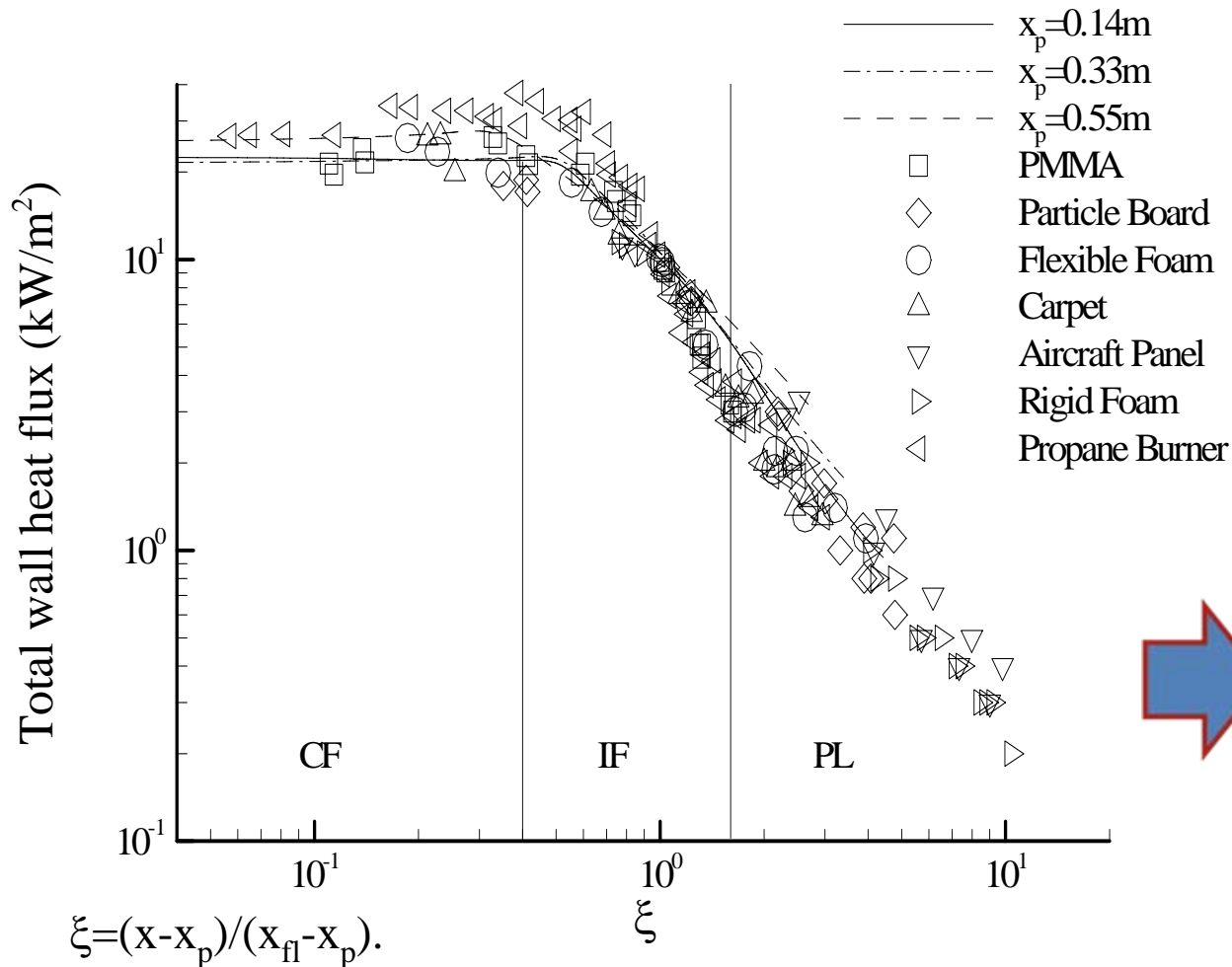
Estimation de la longueur de flamme pour une puissance linéique donnée



Longueurs de flamme

Modèle de propagation simplifié

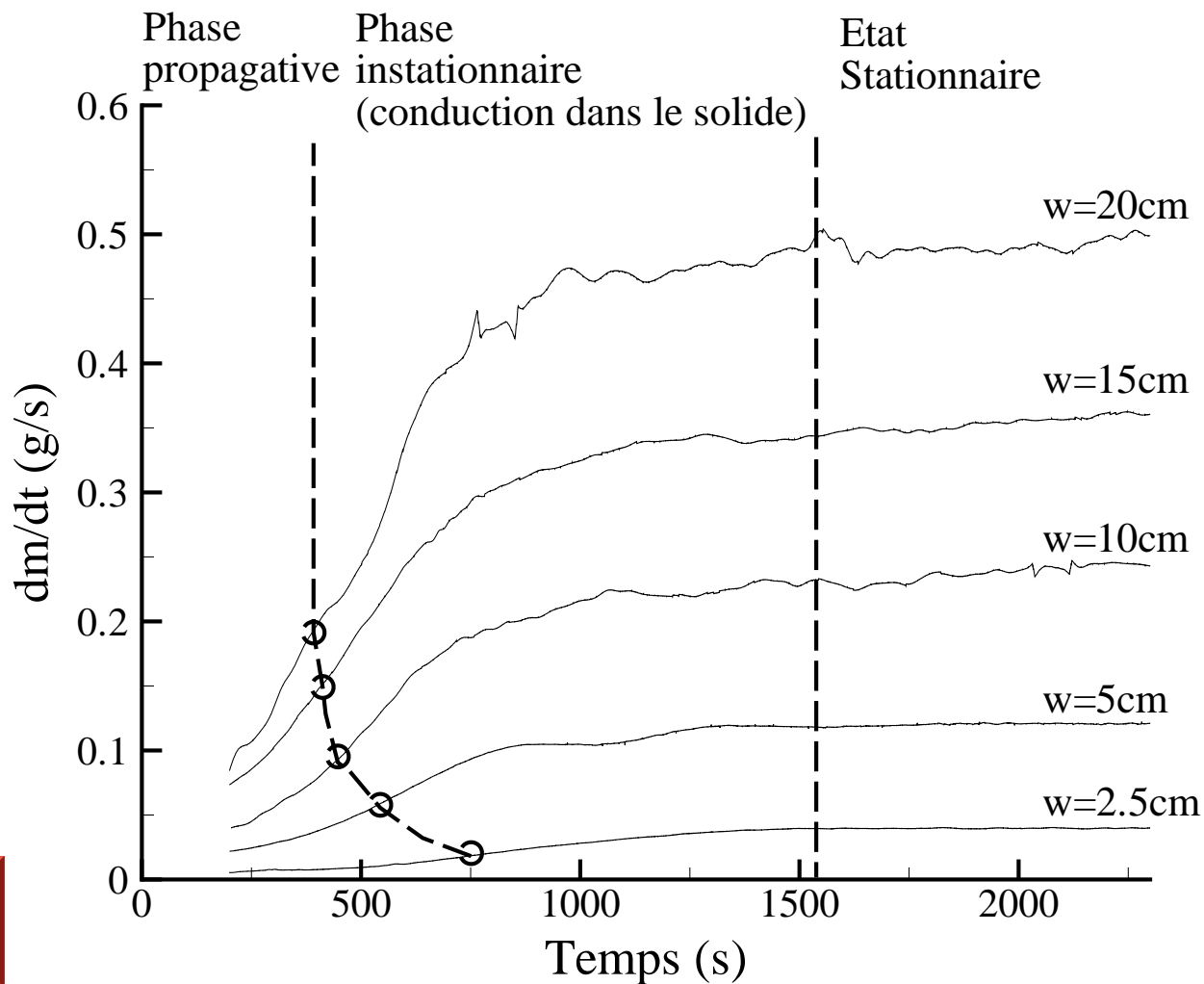
Estimation de la distribution du flux le long de la plaque combustible



Flux en amont du front de pyrolyse

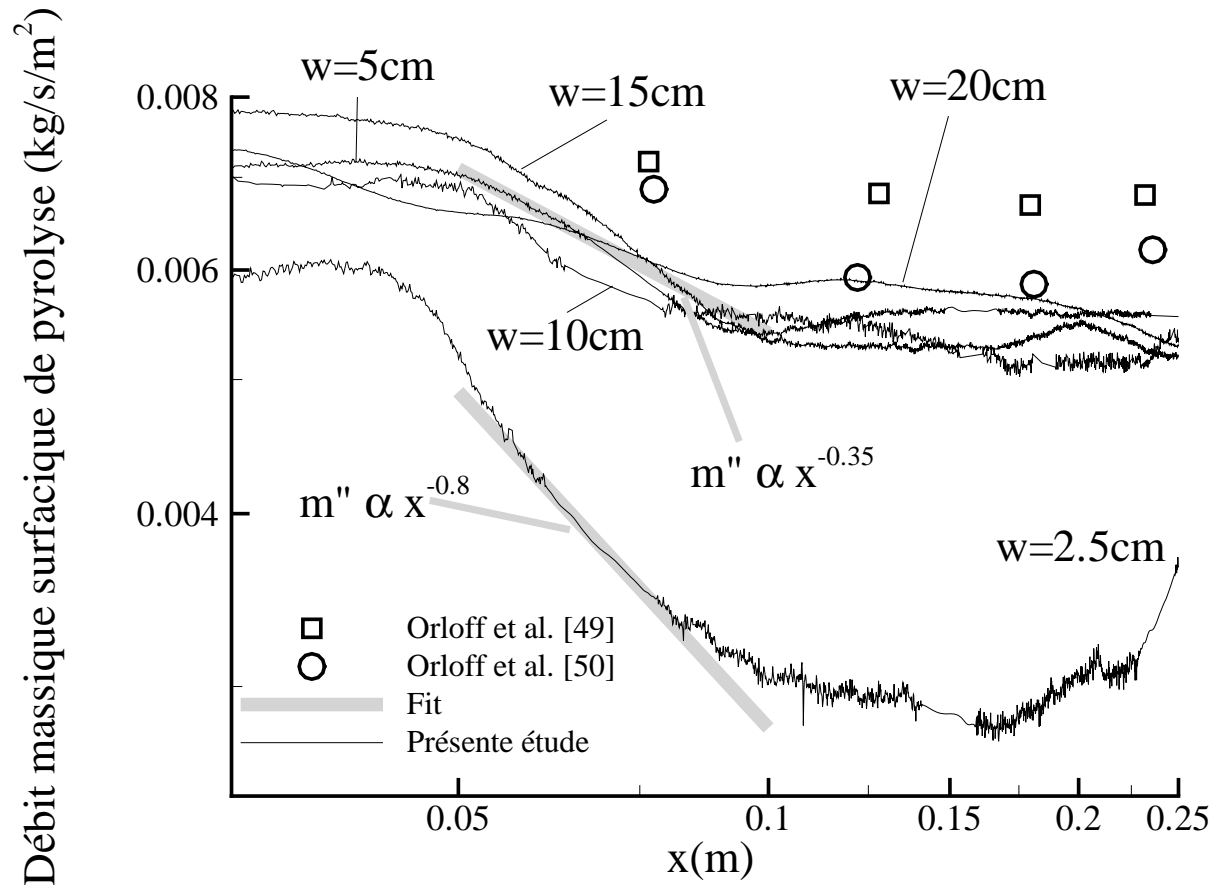
Résultats expérimentaux

Pertes de masse globales



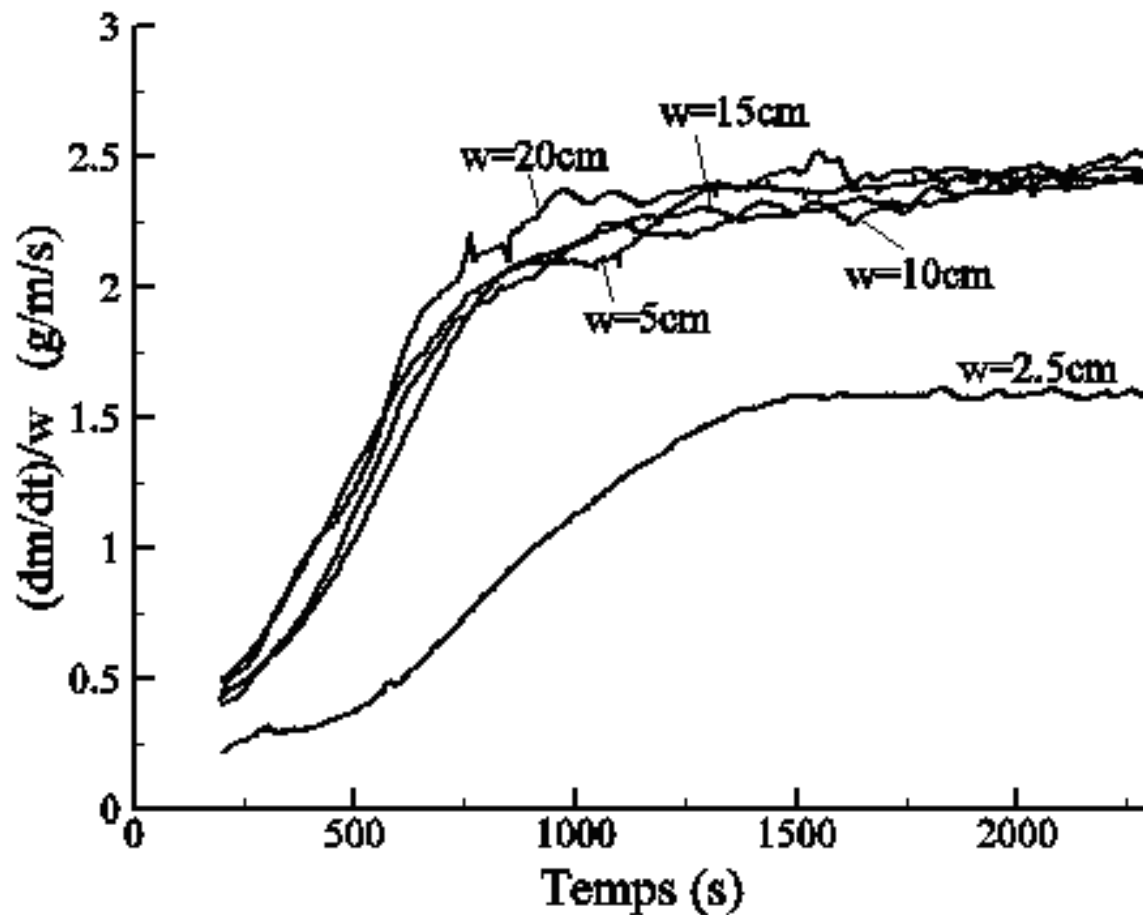
Résultats expérimentaux

Débits massiques surfaciques de pyrolyse : effet de la largeur de la plaque combustible



Résultats expérimentaux

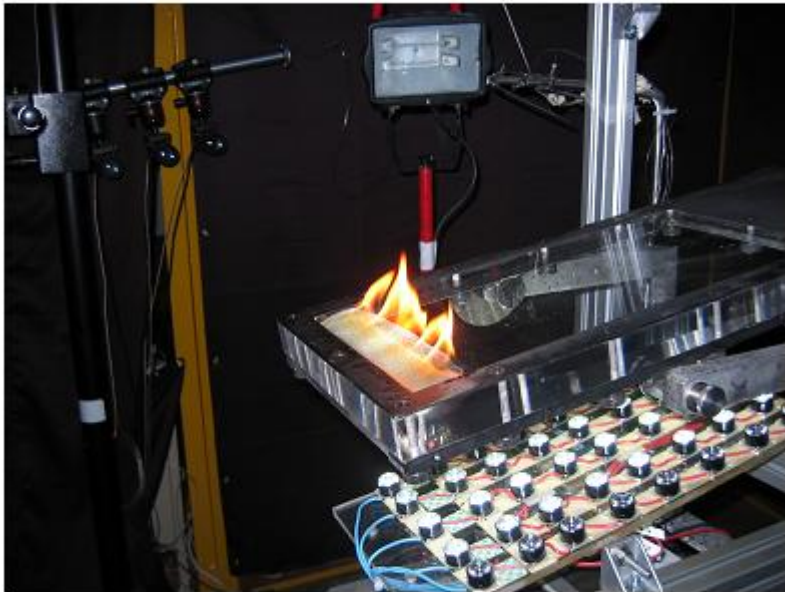
Pertes de masse globales



Questions

Validation du modèle de pyrolyse en phase propagative

Variation des conditions environnementales : étude de la propagation du feu le long d'une plaque plane inclinée



Étude des angles compris entre
5° et 80° par rapport à la
verticale

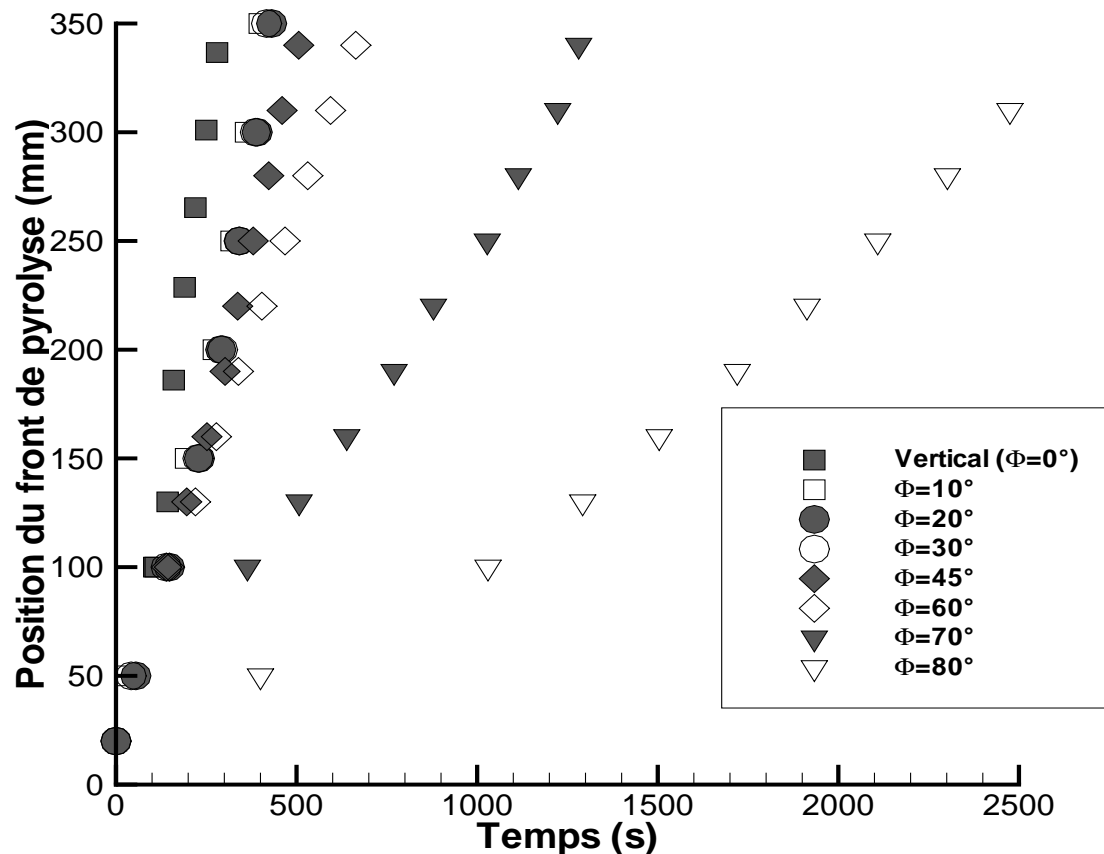


Validation du modèle analytique
en phase propagative

Utilisation du Nombre de transfert de masse obtenu en position
verticale (B_{steady}) à l'état stationnaire pour simuler ces configurations

Variations de conditions environnementales

Étude de la propagation du feu le long d'une plaque plane inclinée

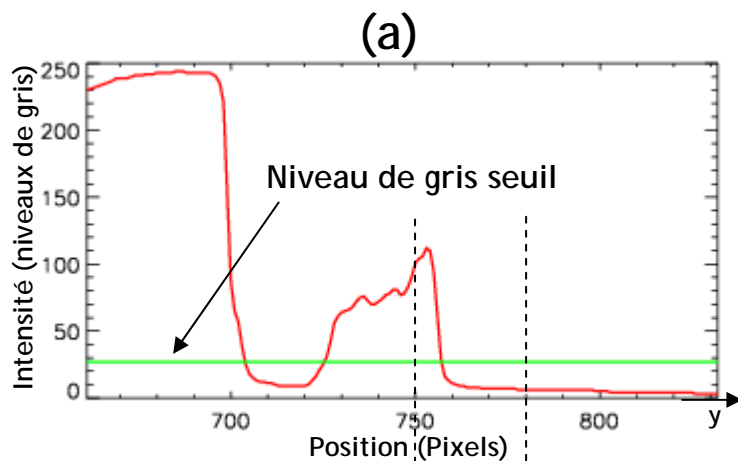


Développement d'un modèle de pyrolyse simplifié pour la phase propagative

Φ angle entre la position verticale et la plaque de combustible

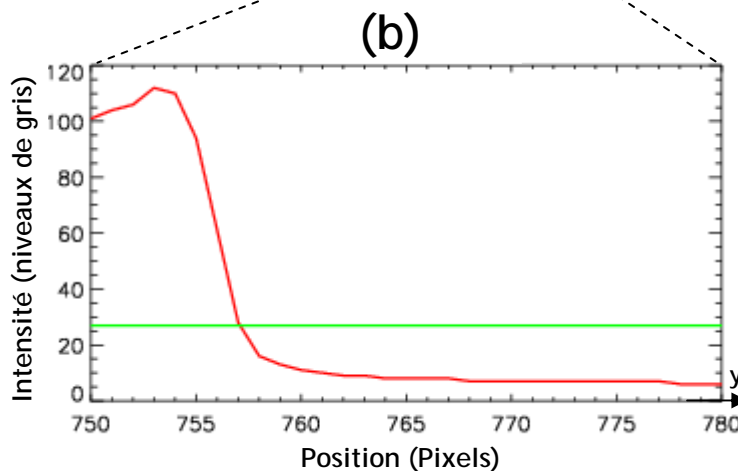
Traitement de données

Sensibilité de la mesure à la valeur du seuil de niveau de gris



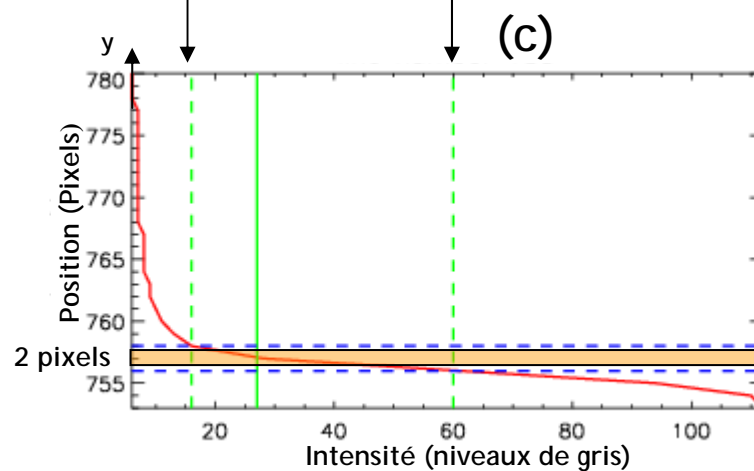
Valeur du niveau gris seuil : $T=15$

Localisation de la régression de la plaque combustible : 756



Valeur du niveau gris seuil : $T=60$

Localisation de la régression de la plaque combustible : 758



Technique de mesure peu sensible au niveau de gris seuil adopté

Nombre de transfert de masse modifié

Calcul des flux à la paroi

Introduction des pertes radiatives et conductives dans la théorie

Nombre de transfert de masse modifié Emmons [1956] :

$$B_t = \frac{(1 - \chi_R) Y_{O_\infty} Q_p - C_p (T_{pyr} - T_\infty)}{L_v + Q}$$

$$Q = \frac{\dot{q}_{cond}'' + \dot{q}_{rr}'' - \dot{q}_{fl}''}{\dot{m}''}$$

Flux non-convectif normalisé à la surface du matériau combustible

Numériquement :

$$(\dot{q}_{cond}'' + \dot{q}_{rr}'' - \dot{q}_{fl}'') \approx 4 \text{ kW} / \text{m}^2$$

$$\dot{m}'' = 0.005 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{s}$$



$$Q \approx 8 \times 10^5 \text{ J} / \text{kg}$$

Non négligeable par rapport à $L_v = 2 \times 10^6 \text{ J} / \text{kg}$

Mais $Q \approx \text{constant}$



Conservation des lois d'échelles

Résolution du système d'équations différentielles

Système d'équations différentielles ordinaires

$$\begin{cases} f''' + 3ff'' - 2f'^2 = \begin{cases} -[1 + (1 - J)B / \tau], & \eta \leq \eta_{fl} \\ -[(1 + r + B/\tau)J / r], & \eta \geq \eta_{fl} \end{cases} \\ J'' + 3Pr f J' = 0 \end{cases}$$

$$\eta \rightarrow \infty, f' = 0, J = 0$$

Résolution des équations
différentielles ordinaires

$$\eta = 0, f' = 0, J = 1$$

Contrainte

$$f(0) = BJ'(0) / 3Pr \quad \leftarrow$$

Itérer sur J jusqu'à
satisfaire la contrainte