



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

LABORATOIRE
NATIONAL
DE MÉTROLOGIE
ET D'ESSAIS



COMBUSTION DU PMMA SOUS ÉCHAUFFEMENT EXTERNE ET DÉFICIENCE EN OXYGÈNE

DAMIEN MARQUIS
RITA NOHRA
BENJAMIN BATIOU
THOMAS ROGAUME

CONTEXTE & OBJECTIFS

Confinement d'un local  Feu sous oxygénée

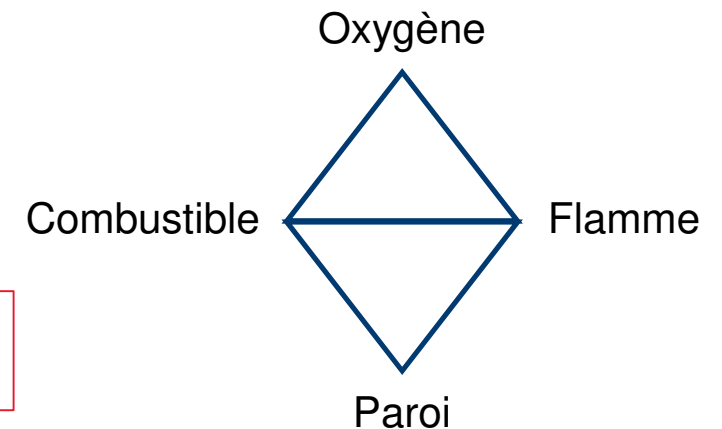
Développement du feu :

- Oxygène : f (Volume utile & Taux de renouvellement d'air).
- Parois : génère une sollicitation thermique externe

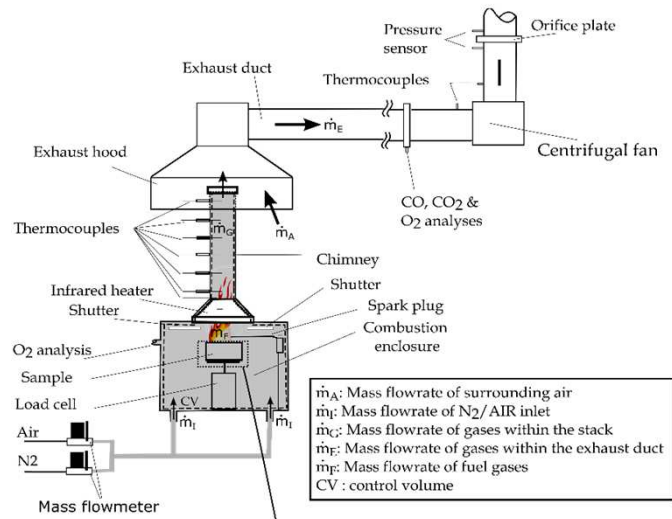
- ✓ Manque de connaissance sur le sujet
- ✓ Modèles inadaptés pour traiter ces conditions d'incendies

Objectifs

- Etudier l'évolution des régimes de combustion de matériau polymère
- Appréhender les phénomènes d'extinction de flamme



DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL



Phase gazeuse:

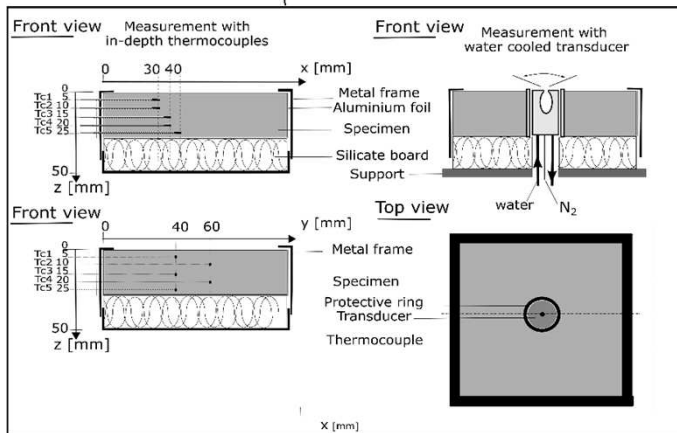
- Dégagement énergétique (Eq. de Werrel – ISO 5660-5)
- Densité de flux net : Radiomètre Schmidt-Boelter refroidit à l'eau
- Densité de flux radiatif : Radiomètre infrarouge ellipsoïdale refroidit à l'eau et purgé en N₂.
- Température au sein des gaz $f(z)$: TC-K 0.5 mm

$$T_G = T_{tc} + \frac{d_{tc}^2 \rho_{tc} c_{p,tc}}{4Nu \cdot \lambda_G} \frac{dT_{tc}}{dt} + \frac{\varepsilon_{tc} \sigma}{h_{cv}} (T_{tc}^4 - F_{tc-w} T_w^4 \varepsilon_w)$$

Phase solide :

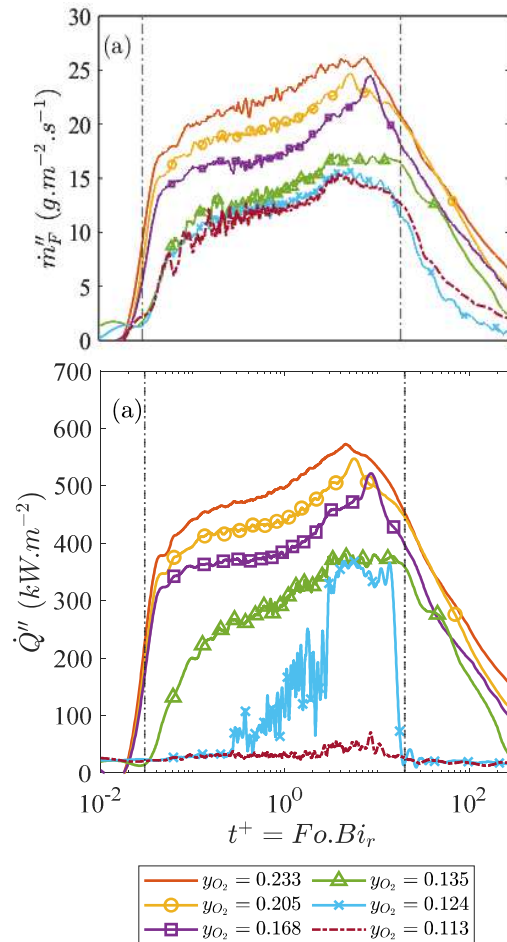
- Température interne $f(z)$: TC type K 0.5mm
- Masse
- Régression

➔ Mesures indépendantes



Article : Marquis et al. **Combustion and flame** 269 (2024) 113664

METHODOLOGIE D'ANALYSE



Définition de la plage d'analyse basée sur la perte de masse

Moyenne temporelle

$$\langle \varphi \rangle = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \varphi(t) dt$$

$$t_1 = \operatorname{argmin}_t \left[\frac{d^2 m}{dt^2} \right]$$

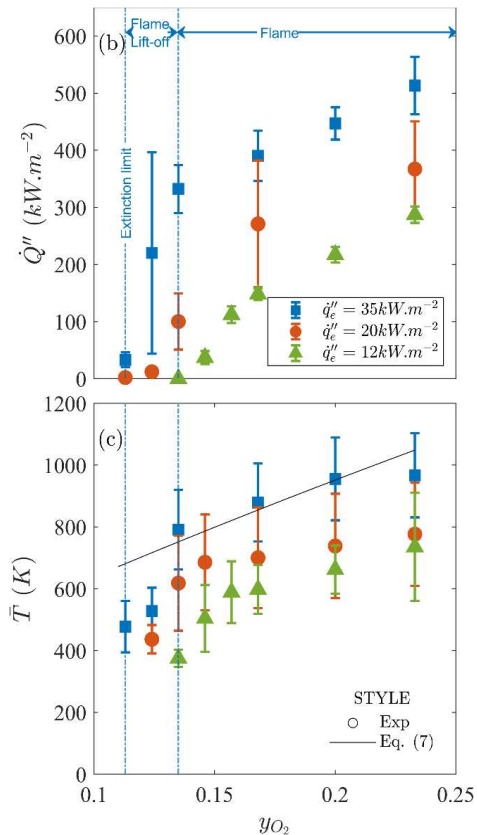
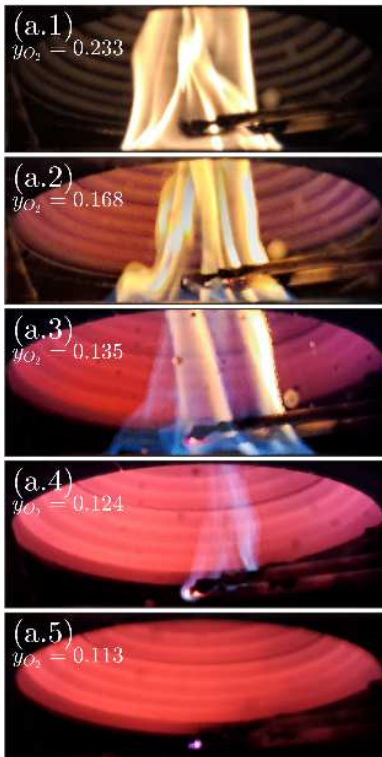
$$t_2 = \left\{ \operatorname{argmax}_t \left[\frac{d^2 m}{dt^2} \right] \middle| t_\infty \right\}$$

Moyenne spatiale $\langle T_G \rangle$

$$\langle \overline{T_G} \rangle = \frac{1}{z_{max}^+ - z_{min}^+} \int_{z_{min}^+}^{z_{max}^+} \langle T_G \rangle dz$$

➔ Méconnaissance de la hauteur de flamme

CARACTÉRISTIQUES EN PHASE GAZEUSE



Réactivité de la phase gazeuse

\dot{Q}'' et $\bar{T} = f(\dot{q}_e'', y_{O_2})$ ➡ Profil logistique

Deux régimes de flamme distincts : $f(y_{O_2})$

☐ Combustion avec flamme de diffusion
➡ Rayonnement + structure : $f(y_{O_2})$

☐ Combustion avec flamme décollée
➡ Comportement stochastique

Fraction massique d'O₂ à l'extinction $y_{O_2}^{ex} : f(\dot{q}_e'')$

■ a) Structure de la flamme à 35kW.m⁻² b) Taux de dégagement de chaleur c) Température de gaz (moyenne spatiale)

CARACTÉRISTIQUES EN PHASE GAZEUSE

Réactivité de la phase gazeuse

Concentration d'O₂ adimensionnée $y_{O_2}^+ = \frac{y_{O_2} - y_{O_2}^{ex}}{y_{O_2}^\infty - y_{O_2}^{ex}}$

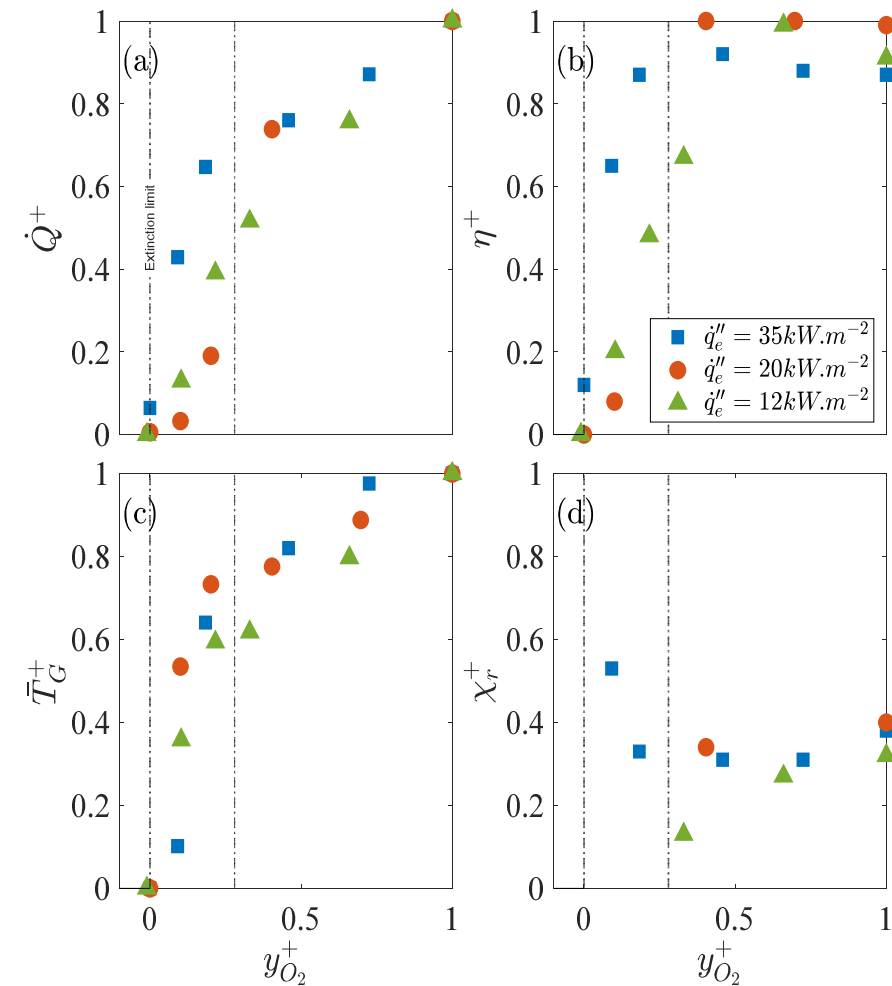
a) Taux de dégagement de chaleur adimensionnée $\dot{Q}^+ = \frac{\dot{Q} - \dot{Q}^{ex}}{\dot{Q}^\infty - \dot{Q}^{ex}} \sim \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}^\infty}$

b) Rendement de combustion η^+

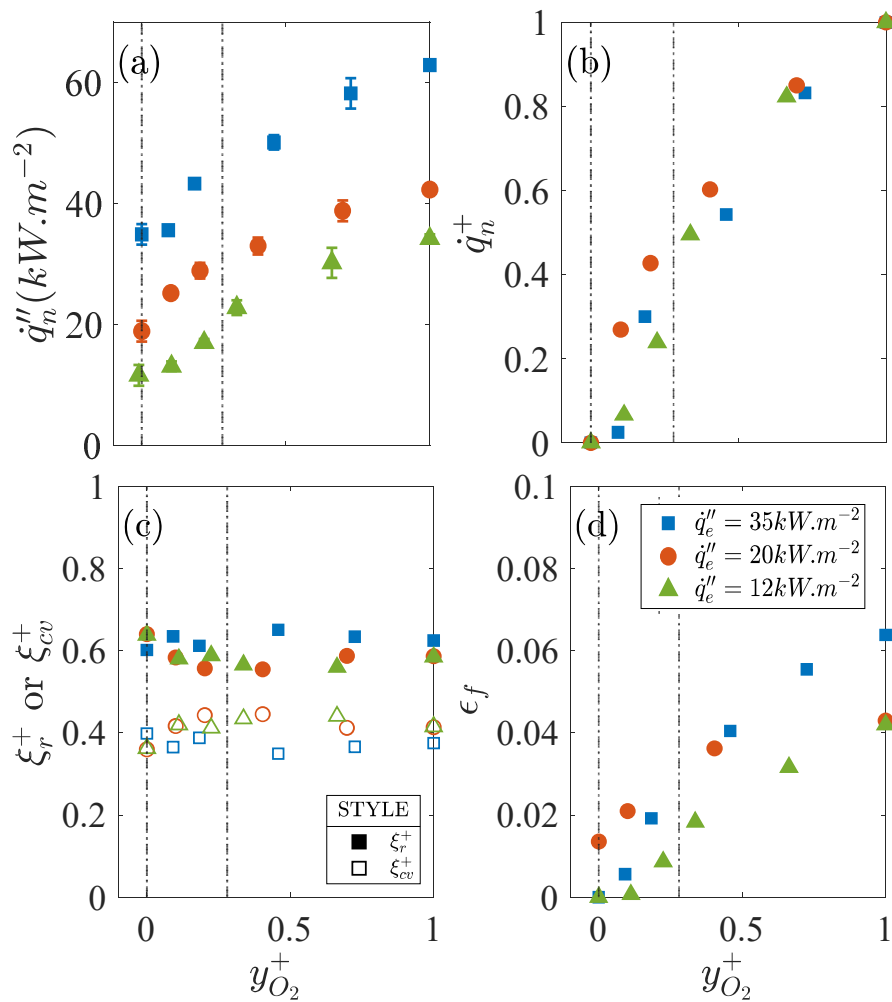
c) Température des gaz adimensionnée $T_G^+ = \frac{\bar{T}_G - \bar{T}_G^{ex}}{\bar{T}_G^\infty - \bar{T}_G^{ex}}$

d) Fraction radiative de la flamme χ_r^+

- Profils conservés
- Transition $y_{O_2}^+ \sim 0.28$
- Flamme convective



CARACTÉRISTIQUES EN PHASE GAZEUSE

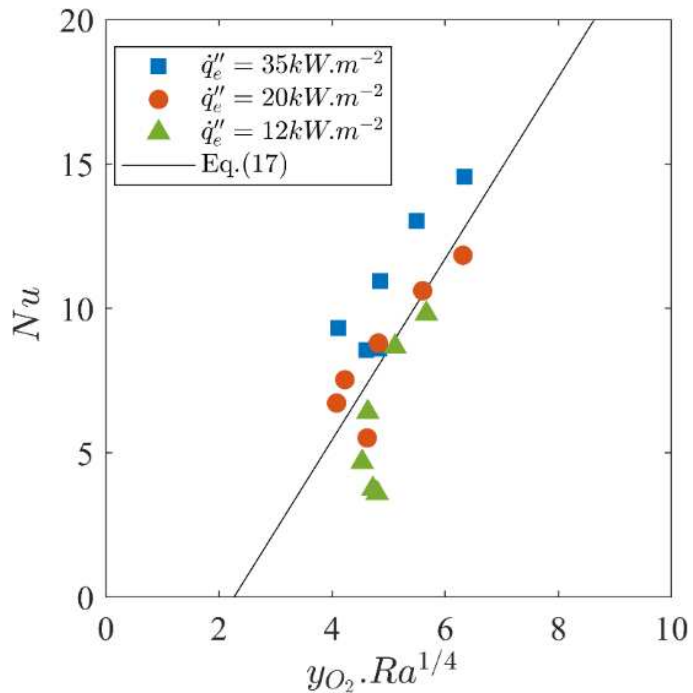


Réactivité de la phase gazeuse

- Densité de flux total net \dot{q}_n''
- Flux net adimensionné \dot{q}_n^+
- Part radiative ξ_r^+ et convective ξ_{cv}^+ du flux net
- Emissivité de flamme ϵ_f

- Flux net : forte dépendance à $y_{O_2}^+$
- Profil du flux net est conservé
- Contribution majoritairement radiative
- Emissivité de flamme évolue

CARACTÉRISTIQUES EN PHASE GAZEUSE



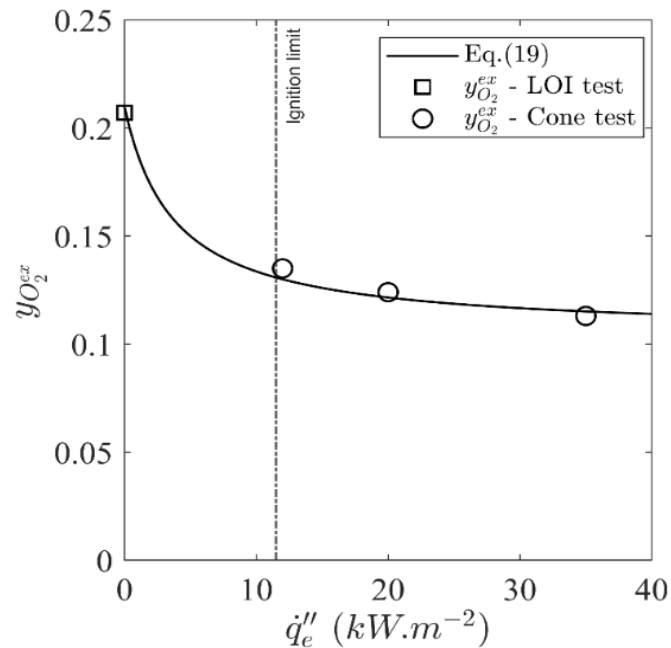
■ Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh.

Corrélation - Nombre de Nusselt

Nombre de Nusselt : $Nu = f(Ra)$

$$\rightarrow Nu = \frac{h_{cv} L_x}{k_G} = 3.1 y_{O_2} \left(\frac{g L_x^4 \dot{q}_e''}{T_\infty \nu_G \alpha_G k_G} \right)^{1/4} - 7.1$$

CARACTÉRISTIQUES EN PHASE GAZEUSE



Extinction de flamme

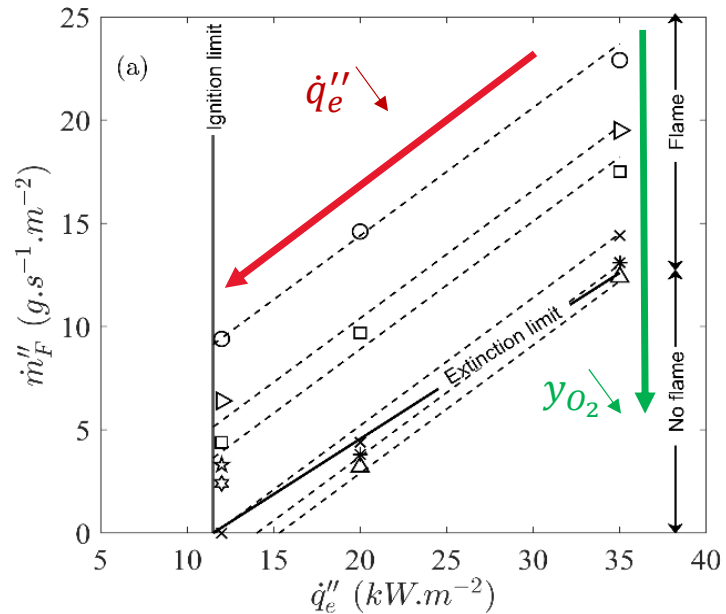
$$y_{O_2}^{ex} \simeq \frac{c_P(T_G^C - T_\infty)}{(\Delta h_C)/r} \left(1 + \frac{h_{cv}(T_G^C - T_s) - \varepsilon_s \sigma T_s^4}{\varepsilon_s \xi_r^+ \dot{q}_e'' + h_{cv}(T_G^C - T_s) - \varepsilon_s \sigma T_s^4} \right)$$

$$\lim_{\dot{q}_e'' \rightarrow \infty} y_{O_2}^{ex} \simeq c_P(T_G^C - T_\infty) / ((\Delta h_C)/r)$$

■ Limite de la fraction massique d'oxygène à l'extinction vs sollicitation externe

CARACTÉRISTIQUES EN PHASE SOLIDE

Vitesse de perte de masse



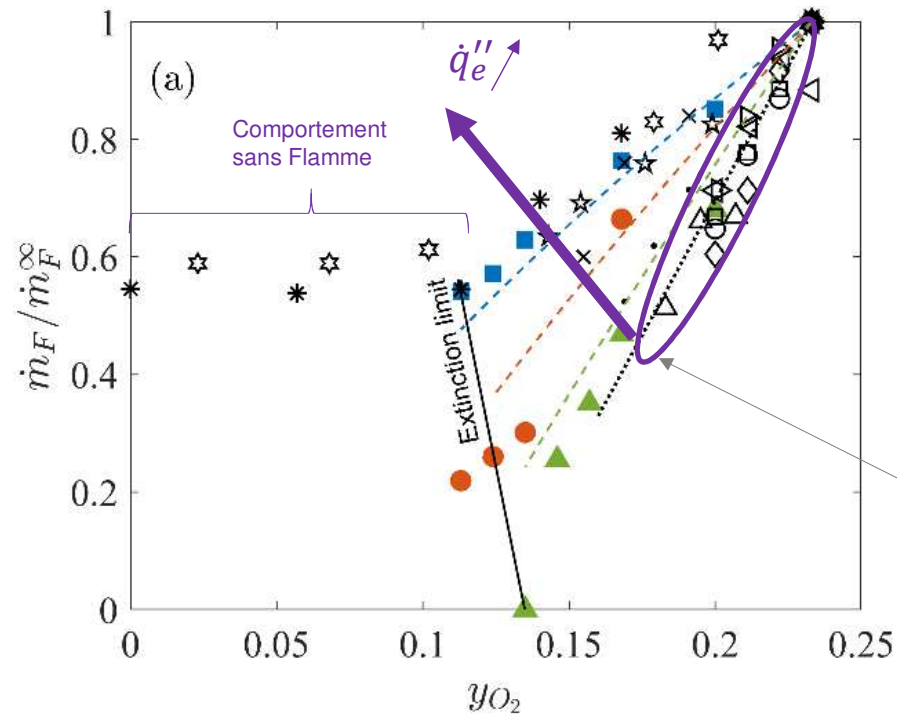
○	$y_{O_2} = 0.233$	★	$y_{O_2} = 0.157$	*	$y_{O_2} = 0.124$
△	$y_{O_2} = 0.200$	☆	$y_{O_2} = 0.146$	△	$y_{O_2} = 0.113$
□	$y_{O_2} = 0.168$	×	$y_{O_2} = 0.135$		

■ Vitesse de combustion en fct de la densité de flux externe

- Comportement différent de la phase gazeuse
- Profile linéaire : $f(y_{O_2})$
- Pente conservé $\forall y_{O_2}$

CARACTÉRISTIQUES EN PHASE SOLIDE

Vitesse de perte de masse



■	$\dot{q}_c'' = 35kW.m^{-2}$	*	[9]- $A_s = 0.008m^2$ - $\dot{q}_c'' = 50kW.m^{-2}$
●	$\dot{q}_c'' = 20kW.m^{-2}$	☆	[11]- $A_s = 0.01m^2$ - $\dot{q}_c'' = 50kW.m^{-2}$
▲	$\dot{q}_c'' = 12kW.m^{-2}$	×	[12]- $A_s = 0.008m^2$ - $\dot{q}_c'' = 30kW.m^{-2}$
△	[2]- $A_s = 0.068m^2$	•	[12]- $A_s = 0.008m^2$ - $\dot{q}_c'' = 15kW.m^{-2}$
◁	[2]- $A_s = 0.073m^2$	☆	[13]- $A_s = 0.008m^2$ - $\dot{q}_c'' = 16kW.m^{-2}$
◇	[6]- $A_s = 0.040m^2$	[30] Eq.(22)
◻	[6]- $A_s = 0.160m^2$	- - -	$\dot{q}_e'' = 35kW.m^{-2}$ -Eq.(21)
○	[6]- $A_s = 0.360m^2$	- - -	$\dot{q}_e'' = 20kW.m^{-2}$ -Eq.(21)
▽	[8]- $A_s = 0.071m^2$	- - -	$\dot{q}_e'' = 12kW.m^{-2}$ -Eq.(21)

[Ref]: cf article Marquis et al. **Combustion and flame** 269 (2024) 113664

Tests sans sollicitation externe

➔ Modèle de Peatross et Beyler (pointillé noir)

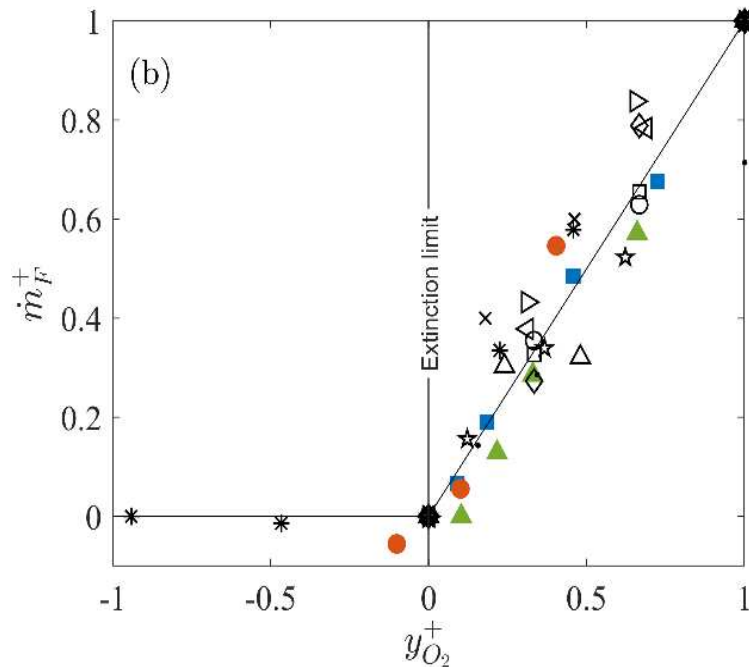
$$\dot{m}_F / \dot{m}_F^\infty = 9.15y_{O_2} - 1.13$$

Adapté pour configuration sans flux externe ou faible \dot{q}_e''

■ Ratio entre la vitesse de combustion à y_{O_2} donnée et celle sous air en fonction fraction en dioxygène

CARACTÉRISTIQUES EN PHASE SOLIDE

Vitesse de combustion



Ratio entre la vitesse de perte de masse à y_{O_2} donnée et celle sous air en fonction fraction en dioxygène

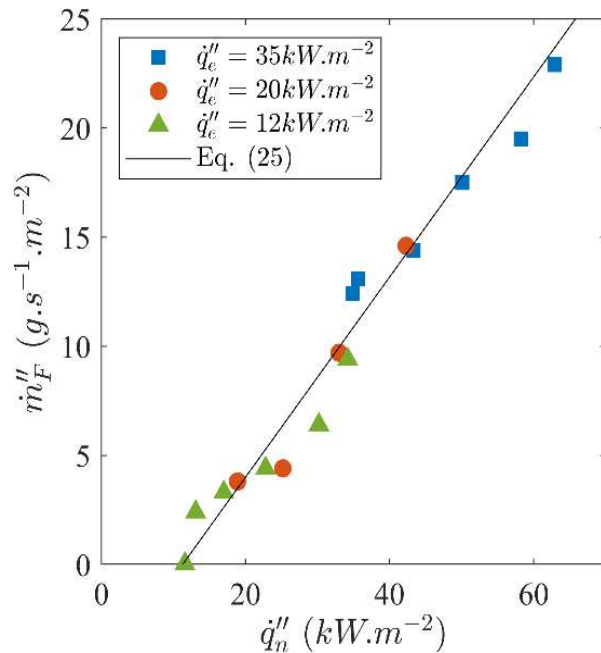
■	$\dot{q}_e'' = 35kW.m^{-2}$	*	[9]- $A_s = 0.008m^2$ - $\dot{q}_e'' = 50kW.m^{-2}$
●	$\dot{q}_e'' = 20kW.m^{-2}$	☆	[11]- $A_s = 0.01m^2$ - $\dot{q}_e'' = 50kW.m^{-2}$
▲	$\dot{q}_e'' = 12kW.m^{-2}$	×	[12]- $A_s = 0.008m^2$ - $\dot{q}_e'' = 30kW.m^{-2}$
△	[2]- $A_s = 0.068m^2$	•	[12]- $A_s = 0.008m^2$ - $\dot{q}_e'' = 15kW.m^{-2}$
◁	[2]- $A_s = 0.073m^2$	☆	[13]- $A_s = 0.008m^2$ - $\dot{q}_e'' = 16kW.m^{-2}$
◇	[6]- $A_s = 0.040m^2$	[30] Eq.(22)
□	[6]- $A_s = 0.160m^2$	- - -	$\dot{q}_e'' = 35kW.m^{-2}$ -Eq.(21)
○	[6]- $A_s = 0.360m^2$	- - -	$\dot{q}_e'' = 20kW.m^{-2}$ -Eq.(21)
▽	[8]- $A_s = 0.071m^2$	- - -	$\dot{q}_e'' = 12kW.m^{-2}$ -Eq.(21)

[Ref]: cf article Marquis et al. **Combustion and flame** 269 (2024) 113664

$$\dot{m}_F^+ = \frac{\dot{m}_F - \dot{m}_F^{ex}}{\dot{m}_F^\infty - \dot{m}_F^{ex}}$$

$$\dot{m}_F^+ \propto y_{O_2}^+, \forall \dot{q}_e''$$

CARACTÉRISTIQUES EN PHASE SOLIDE



■ Vitesse de perte de masse en fct de la densité de flux net

Enthalpie de gasification (pente)

$$\Delta h_g = \Delta h_R + \int_{T_\infty}^{T_{ig}} c_p(T) dT = (2180 \pm 110) \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Alibert ($\Delta h_g = 2250 \text{ kJ.kg}^{-1}$)

Perte critique (intersection à l'ordonnée)

$$\dot{q}''_l = (11.8 \pm 1.3) \text{ kW.m}^{-2}$$

Condition pour l'inflammation $\dot{q}''_{ig} > \dot{q}''_l$

$$\dot{q}''_{ig} = (11.5 \pm 1) \text{ kW.m}^{-2} \text{ (Déterminé expérimentalement)}$$



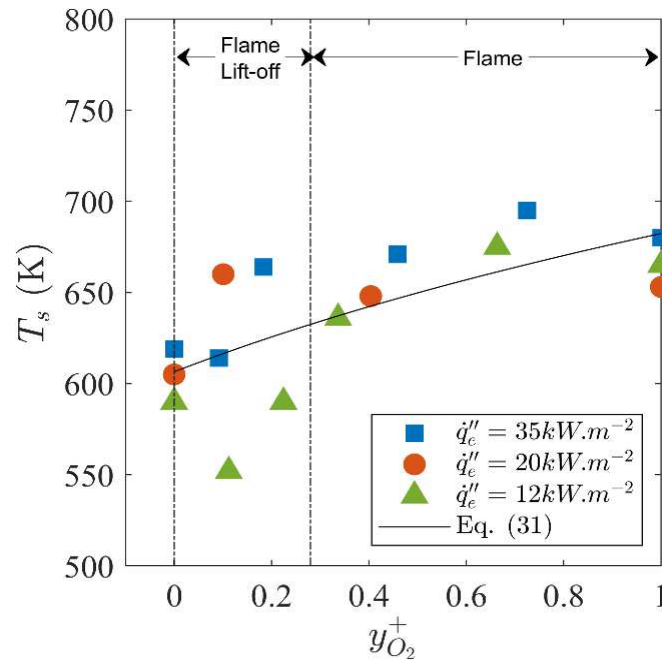
$$T_{ig} \sim \sqrt[4]{\dot{q}''_l / \varepsilon_s \sigma} = 685 \text{ K}$$

BILAN D'ENERGIE

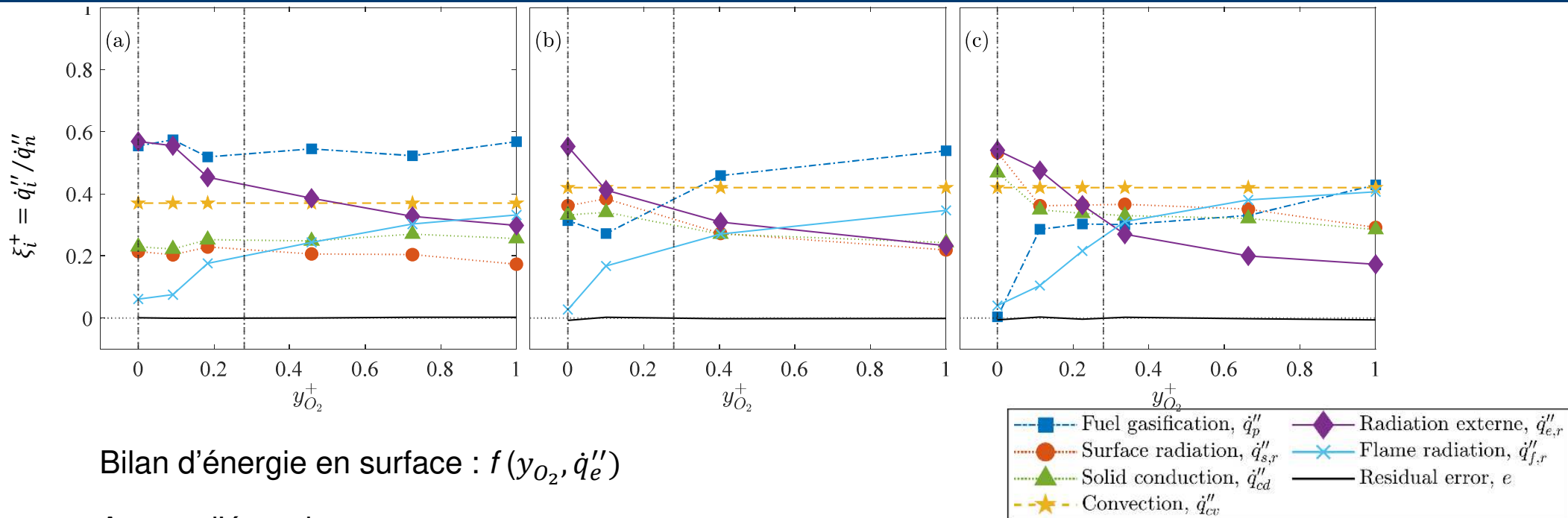
$$\underbrace{\varepsilon_s(\gamma_f \dot{q}_{e,r}'' + \varepsilon_f \sigma T_{G,C}^4)}_{\dot{q}_r''} + \underbrace{\frac{\text{Nu} \cdot k_G \ln(1+B)}{L_x B} (T_G^C - T_s)}_{\dot{q}_{cv}''} = \underbrace{\lambda_T \frac{T_s - T_a}{\delta_t}}_{\dot{q}_c''} + \underbrace{\varepsilon_s \sigma T_s^4}_{\dot{q}_{s,r}''} + \underbrace{\dot{m}_F'' \Delta h_R}_{\dot{q}_p''}$$

Température de surface

➔ $T_s: f(y_{O_2}, \dot{q}_e'')$



BILAN D'ENERGIE



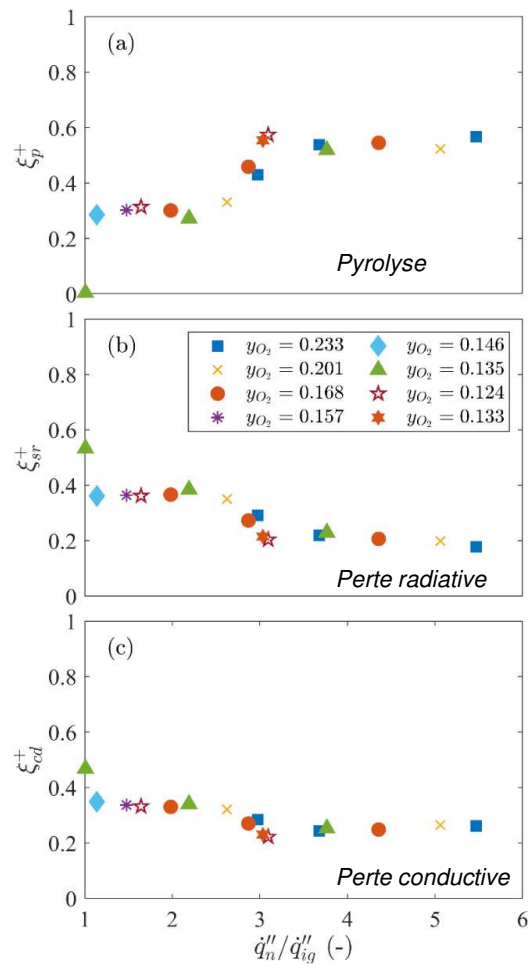
Bilan d'énergie en surface : $f(y_{O_2}, \dot{q}_e'')$

Apport d'énergie

- Part convective \dot{q}_{cv}'' insensible à y_{O_2} & \dot{q}_e'' et majoritaire (par rapport à $\dot{q}_{f,r}''$ et $\dot{q}_{e,r}''$)
- Part du rayonnement flamme $\dot{q}_{f,r}''$ ($\dot{q}_{f,r}'' > \dot{q}_{e,r}''$ sous air) diminue avec y_{O_2}
- Part du rayonnement externe $\dot{q}_{e,r}''$ augmente qd y_{O_2} diminue

Pertes $f(\dot{q}_e'')$

BILAN D'ENERGIE



Contribution du flux net sur les pertes de chaleur

Différents comportements au niveau de la phase solide

Faible flux de chaleur $\dot{q}_n'' < 2.7\dot{q}_{ig}''$

➡ Pyrolyse < Pertes (radiative + conductive)

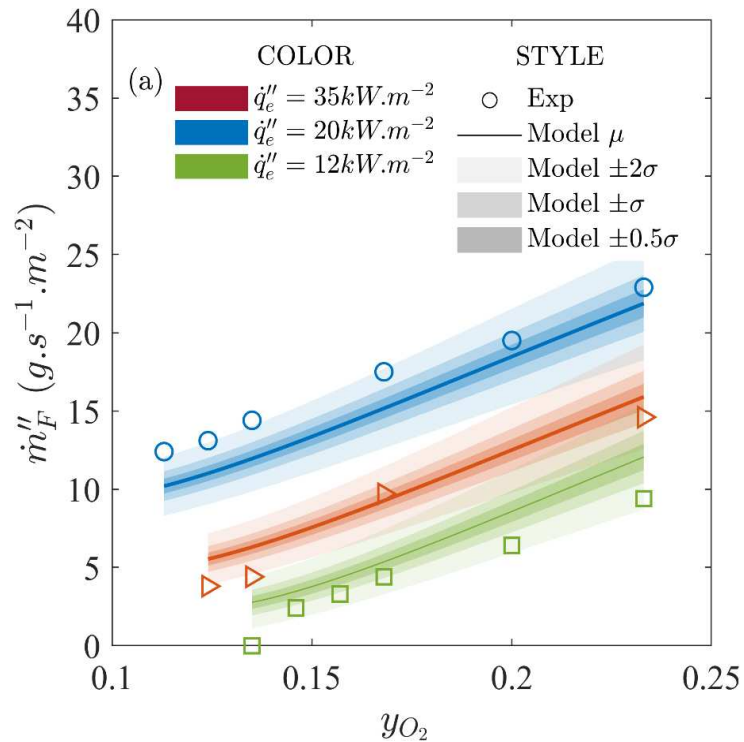
$\dot{q}_n'' \in [2.7\dot{q}_{ig}''; 3.6\dot{q}_{ig}'']$

➡ Changement de comportement avec augmentation de la contribution de la pyrolyse

Haut flux de chaleur $\dot{q}_n'' > 3.6\dot{q}_{ig}''$

➡ Equilibre thermique (pyrolyse = pertes)

MODÈLE ANALYTIQUE



$$\dot{m}_F'' = \frac{Nuk_G B(T_G^C - T_s) + \varepsilon_s [\sigma(\varepsilon_f T_{G,C}^4 - T_s^4) + (1 - \varepsilon_f) \xi_r^+ \dot{q}_e'']}{\Delta h_g}$$

$$y_{O_2}^{ex} \simeq \frac{c_p(T_G^C - T_\infty)}{(\Delta h_c)/r} \left(1 + \frac{h_{cv}(T_G^C - T_s) - \varepsilon_s \sigma T_s^4}{\varepsilon_s \xi_r^+ \dot{q}_e'' + h_{cv}(T_G^C - T_s) - \varepsilon_s \sigma T_s^4} \right)$$

- Incertitude numérique estimée par une Méthode « Quasi Monté Carlo »
- Etude de sensibilité globale

CONCLUSIONS

Phase gazeuse

- ❑ Altération des caractéristiques de la flamme.
- ❑ Profil des courbes conservé $\forall \dot{q}_e''$
- ❑ Changement de régime de combustion : $y_{O_2}^+ \sim 0.28$
 - ➔ Comportement stochastique en limite d'extinction de flamme.
- ❑ $y_{O_2}^{ex}$ sensible à l'intensité du flux de chaleur externe.
- ❑ En surface, le flux de chaleur est principalement radiatif (en raison de la présence du flux externe).
- ❑ L'apport de la flamme est majoritairement convectif

Phase solide

- ❑ Déplétion en oxygène a un impact indirect sur le phase solide de polymères non-charbonneux
 - ✓ Oxydation négligeable (débit de pyrolyse trop important)
 - ✓ Diminution du flux net impact les transferts de chaleur et de masse.
- ❑ Profil différente de la phase gazeuse
- ❑ Température de surface n'est pas unique
- ❑ Bilan d'énergie en surface : $f(y_{O_2}, \dot{q}_e'')$
- ❑ Comportement du produit est dépendant de l'équilibre entre les pertes et la pyrolyse.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

LABORATOIRE
NATIONAL
DE MÉTROLOGIE
ET D'ESSAIS



MERCI