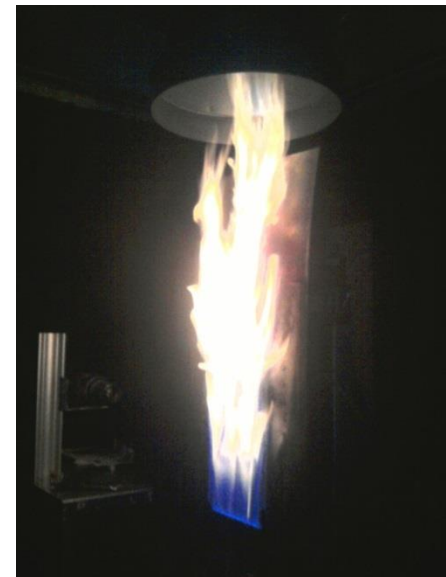


Analyse des profils de vitesse et temperature dans une flamme de paroi verticale



Rouen

Andres VALENCIA
Bertrand LECORDIER
Alexis COPPALLE
coppalle@coria.fr

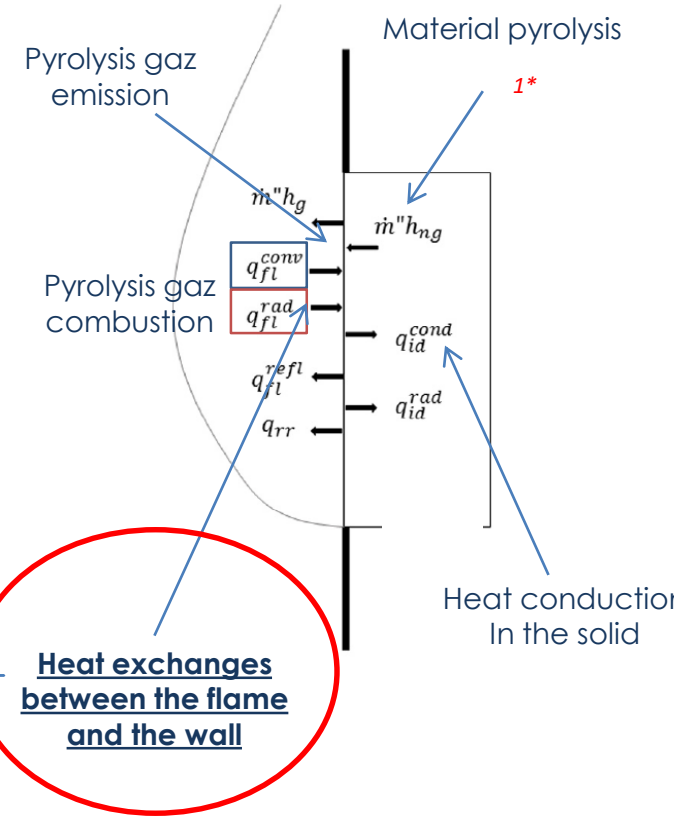


Introduction

Fire dynamic and propagation



Wall flame



Velocity and temperature in the flamme

← Convective heat flux

Soot volume fraction and combustion gas

← Radiative heat flux

===> This work is an experimental study of a canonical case of turbulent wall fire

Reference : Y. Pizzo, C. Lallemand, A. Kacem, A. Kaiss, J. Gerardin, Z. Acem, P. Boulet, B. Porterie, Combustion and Flame. 162 (2015) 226–236.

Introduction

○ The reactive boundary layer

- the **laminar** boundary layer diffusion flame: a classic and academic problem

forced flow configuration: Analytical Emmon's solution (1956)

(non-spreading; constant wall temperature; no thermal radiation)

buoyant (upward) configuration:

F. J. Kosdon, F. A. Williams & C. Buman (1969)

S. Kim, J. De Ris & F. William Kroesser (1971).

- **Turbulent** Wall Fires

Large eddy simulation of a non spreading wall fire
(porous burners)

Ren, Wang, Vilfayeau, Trouvé comb & flame (2016)

==> There are only a few studies for which experimental values T , V are available

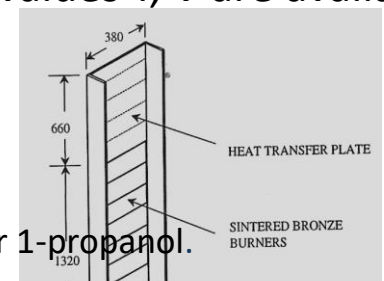
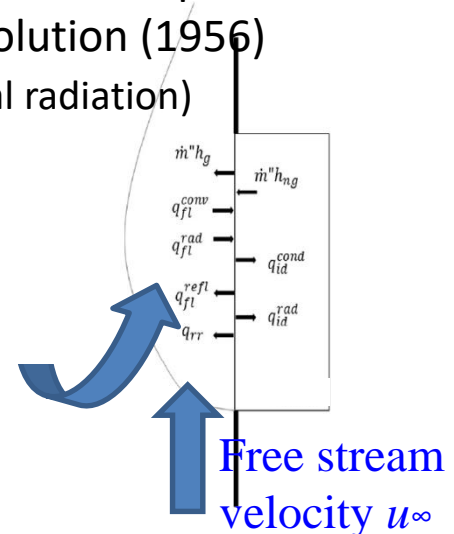
Re Ris, -7th IAFSS conference, (2002)

the burning surface: a porous burner

T. Ahmad and G.M. Faeth. 17th Symp Comb

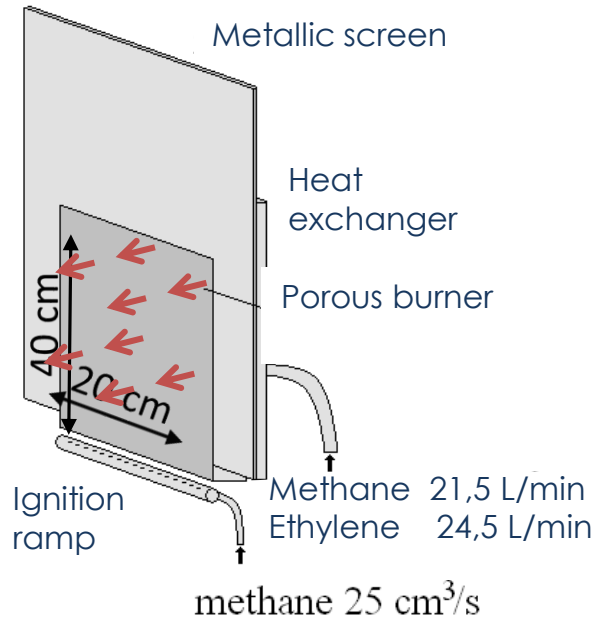
The burning surface: a

51-305 mm high wicks soaked with methanol, ethanol or 1-propanol.



○ There is a need for T and V experimental data for turbulent wall fires

Experimental setup: burner

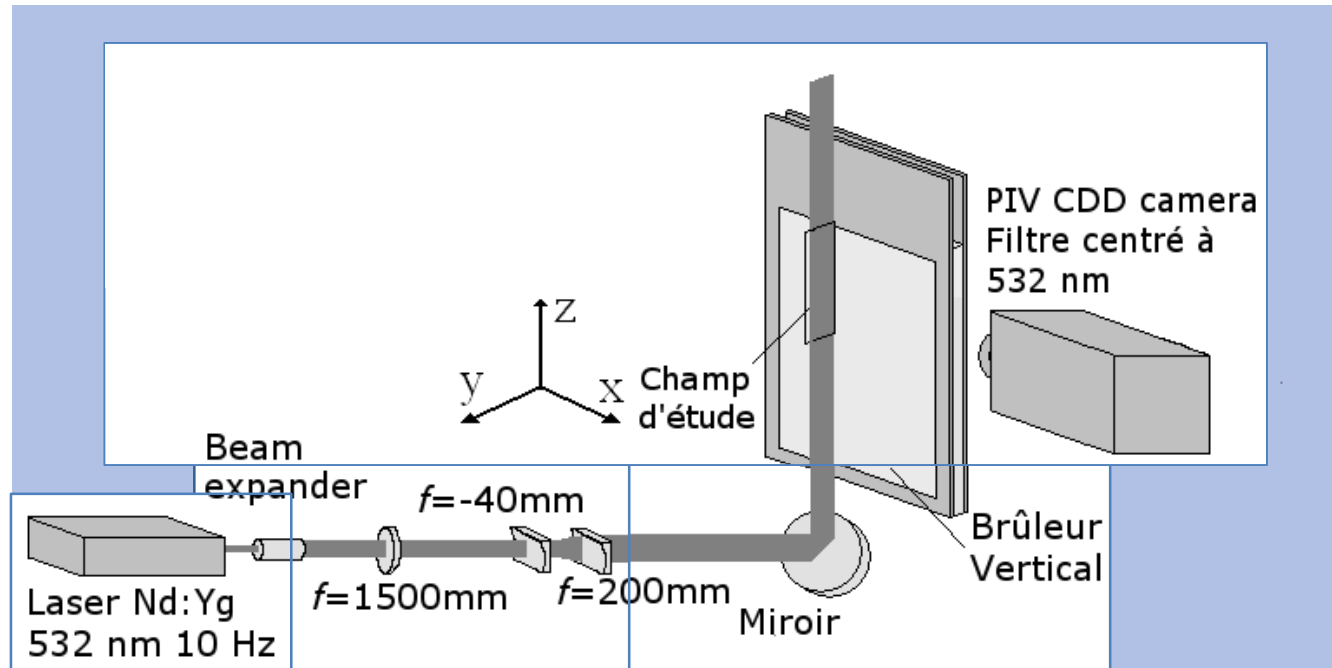


====> A stationary turbulent flame of 1 m height

References : - Hebert , Coppalle , Talbaut , Proc. Combust. (2013)

- Valencia *, Talbaut, Yon, Godard, Gobin, Coppalle Proc. Combust. (2017)

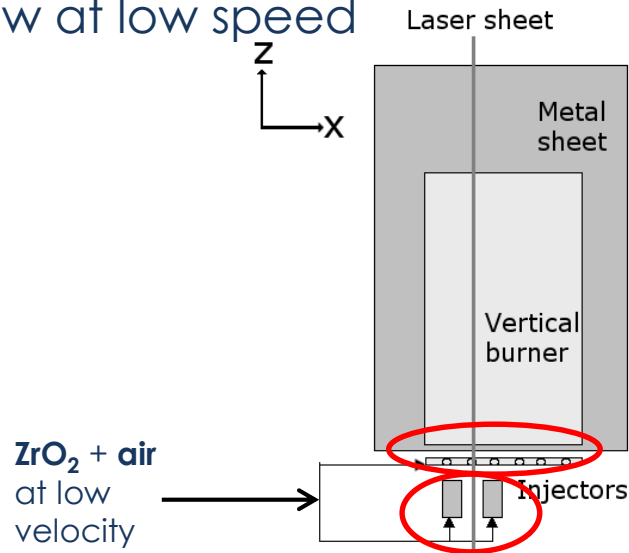
Experimental setup: PIV



Δt μs	W_{1P} pixel^2 - mm^2	W_{2P} pixel^2 - mm^2	recouvrement	n_{2p}	R pixel	Résolution finale mm^2	Vitesse minimale mesurable cm/s
200	64x64 4,5x4,5	28x28 1,9x1,9	50 %	10	0,05	1x1	6

Experimental setup: PIV

- **Soot particles** → spurious signal for the PIV image correlation
- Flow at low speed



Particle Seeding system

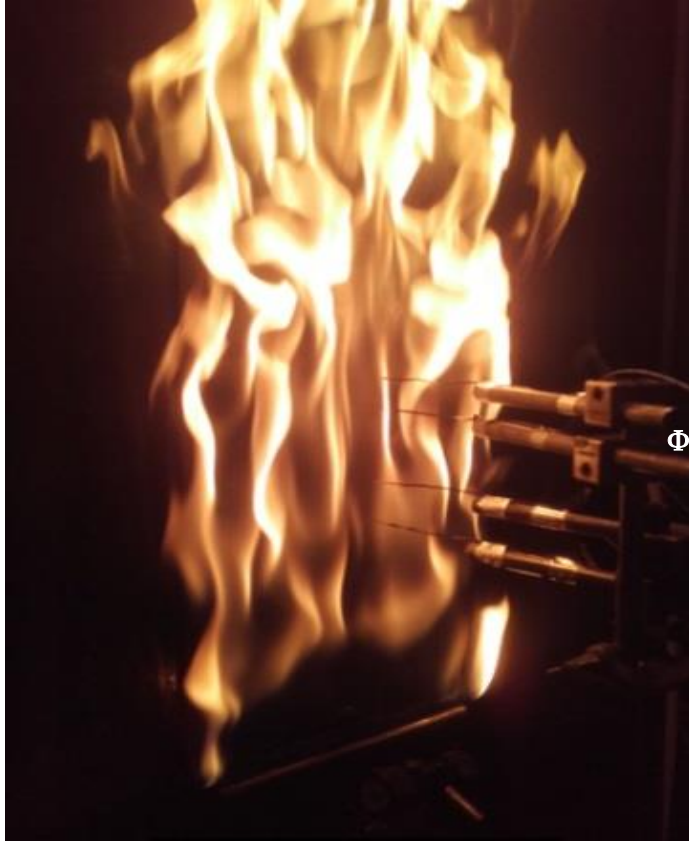
Trois injection points:

→ **Two injectors**, at $y = 1$ cm from the wall and under the bottom of the burner

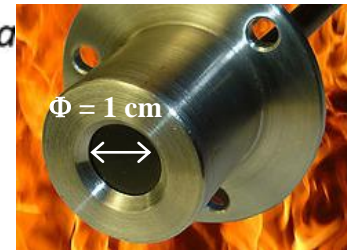
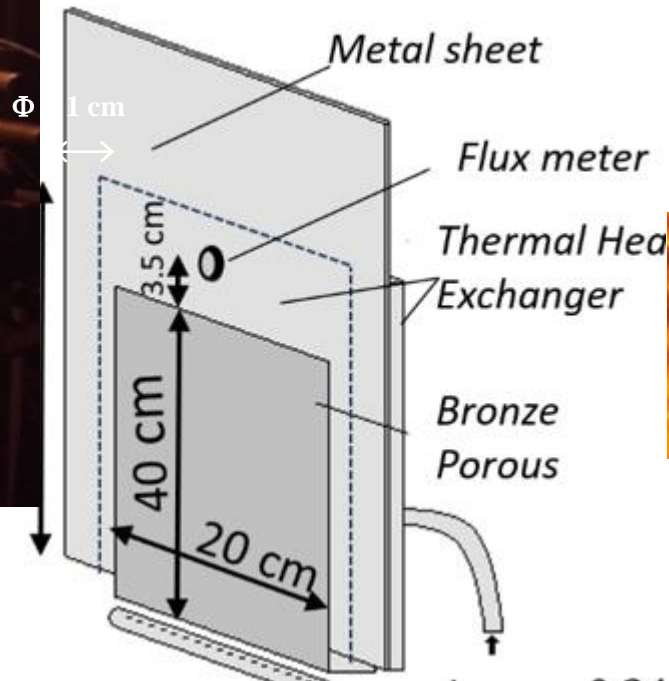
Injection velocity ZrO₂/air
→ **2 injectors** ~ 6 cm/s (~15 cm³/s)

→ Injection through the ignition gas line to increase the seeding close to the wall of the burner

Experimental setup: TC and heat flux sensor

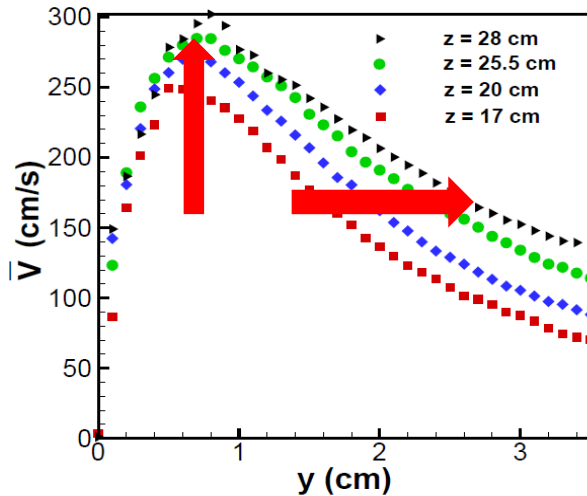


the 4 thermocouples on their support
TC size: 0.5 mm

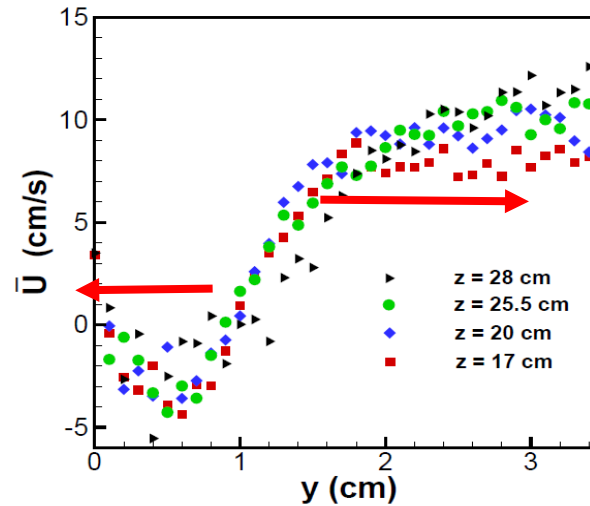


view of the heat flux sensor

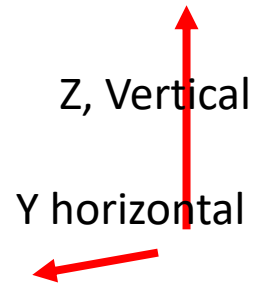
Results: mean velocities



a.: Vertical



b.: Horizontal.



The **vertical speed increases with height** since the buoyancy forces are enhanced by the continuous heat released by the flame

The **thickness of the boundary layer increases with height** due to the mixing of the flame with the air.

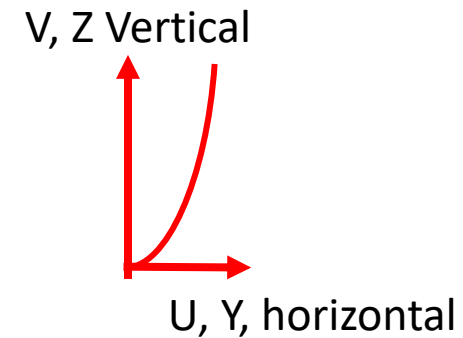
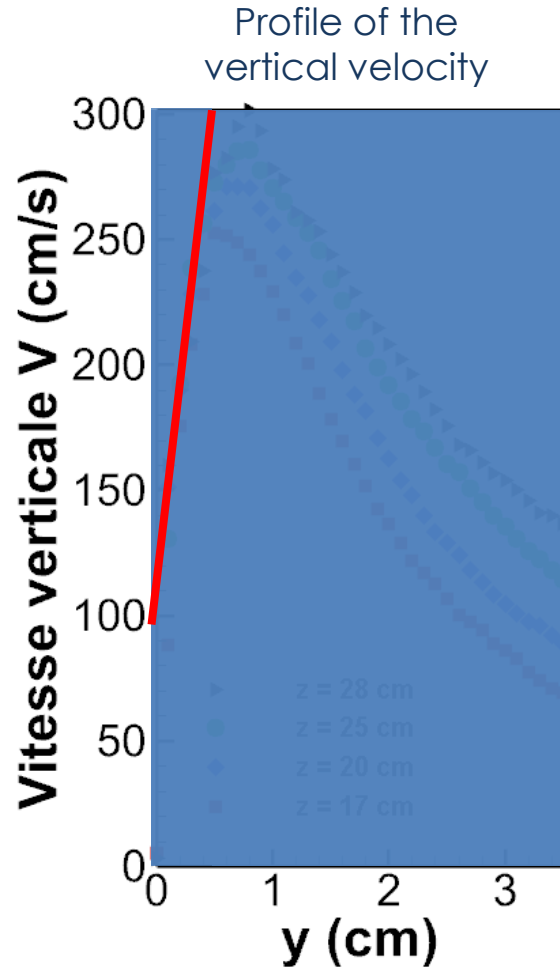
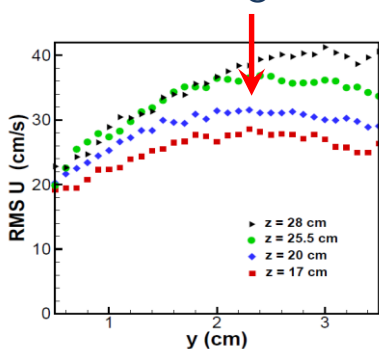
Results: Analysis of the boundary layer

3 zones :

Close to the wall: 0 – 4 mm:
strong increase of the velocity
More or less linear variation

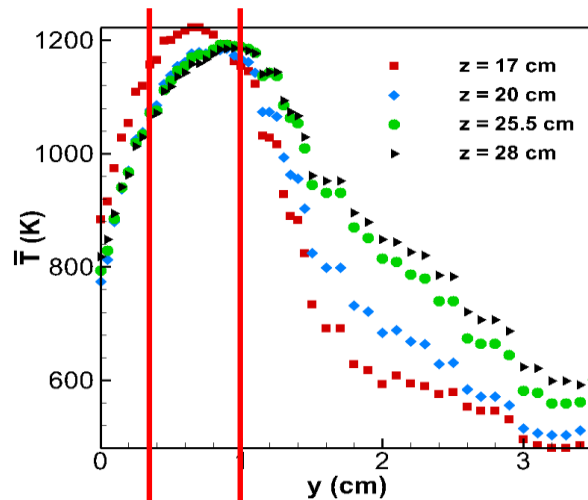
Maximum velocity : 4 mm – 1cm :

Far from the wall: > 1cm
decrease of the velocity
Due to mixing with air



Results: Analysis of the boundary layer

at 4 different heights in the flame (17, 20, 25,5 et 28 cm).

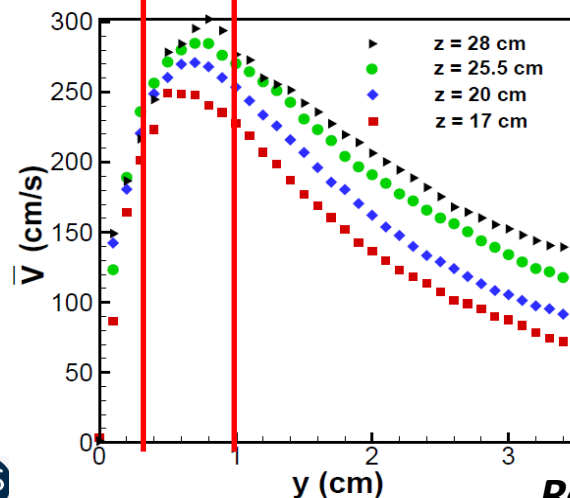


Average temperature

$$T_{fl} = 1200 \text{ K} ; x = 25 \text{ cm}$$

$$v(20^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}) = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Gr = \frac{g x^3 (T_{fl} - T_\infty)}{v_\infty^2 T_\infty} = 2 \cdot 10^9$$



Average vertical velocity

Conclusion:

- The temperature and V velocity profiles look alike
- for $z > 20$ cm: T_p max does not change while V_{max} increase with the height

Results: Analysis of the boundary layer

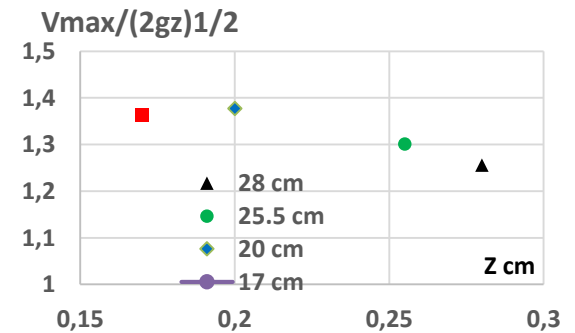
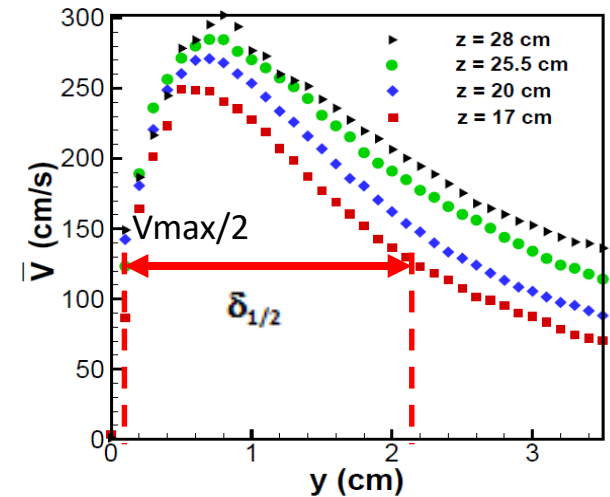
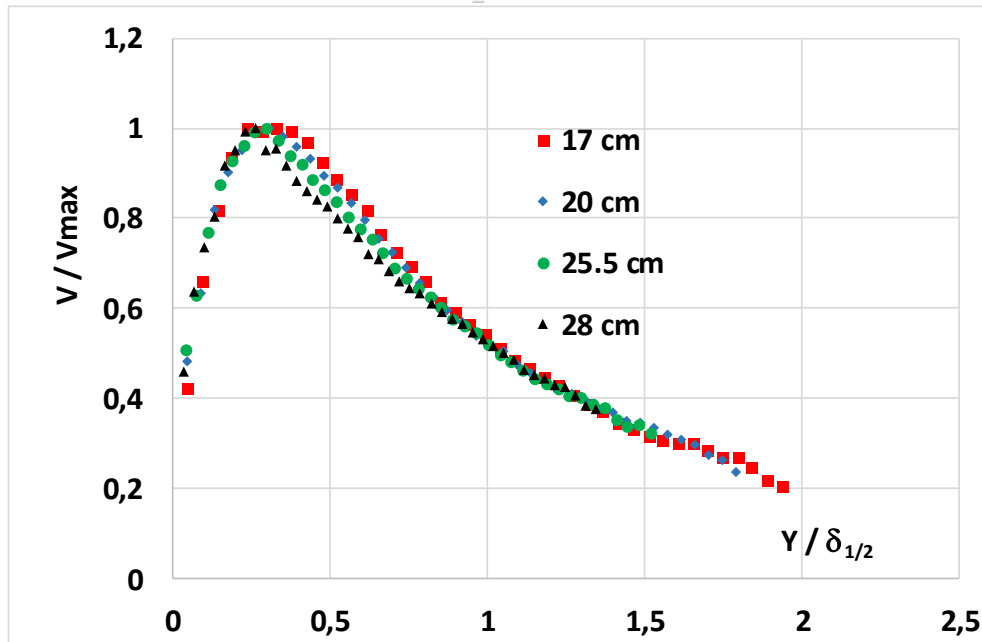
similarity for vertical velocity profile

Laminar boundary layer

$$\frac{gx^3(T_w - T_\infty)}{\nu_\infty^2 T_\infty} \longrightarrow \eta = (y/z)Gr_z^{1/4}$$

Non reacting Turbulent boundary layer (Tsuji)

$$\delta_U = \int_0^\infty \frac{W}{W_m} dy$$

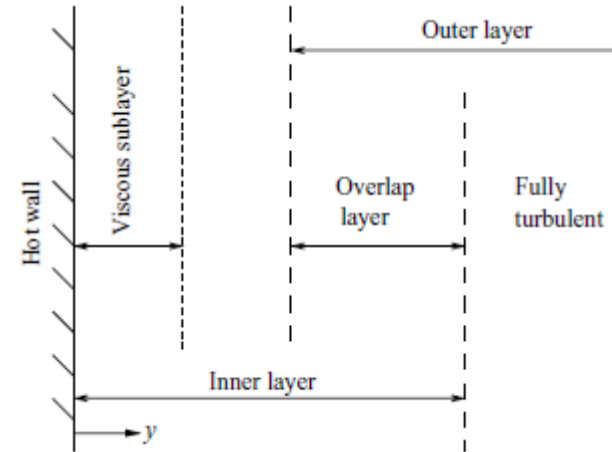


Resultats: près de la paroi

HOLLING AND H. HERWIG, JFM 2005
Analysis of the convective BL on hot walls

théorie asymptotique:

$$Gr = \frac{g x^3 (T_{fl} - T_{\infty})}{\nu_{\infty}^2 T_{\infty}} = \infty \quad (> 10^{10})$$



Dans la couche limite il y a

une couche interne (inner) où la viscosité a une grande influence
et une couche externe (outer) où la turbulence est importante

(schéma similaire à celui de la couche limite avec une convection forcée)

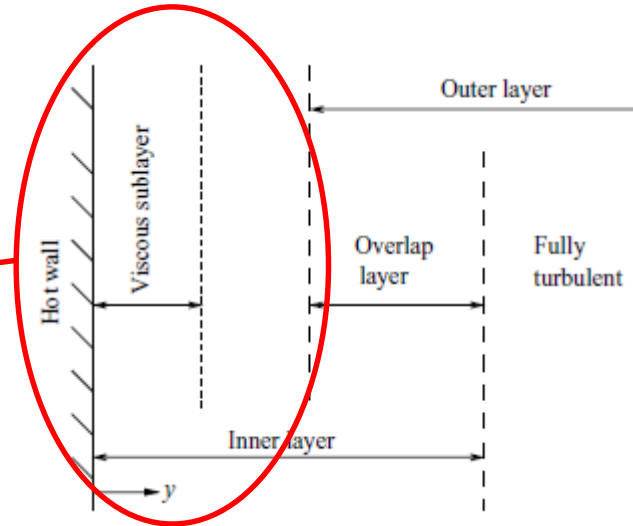
Dans la couche interne: Les deux modes de transferts, moléculaire et turbulent, sont présents.
Dans la couche externe, qui est complètement turbulente: transport par les flux turbulents

Resultats: près de la paroi

Profils similaires pour la Tp et la vitesse verticale

HOLLING AND H. HERWIG, JFM 2005
 Analysis of the convective BL on hot walls

**Près de la paroi:
 dans la couche interne**



$$0 = \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial y} - \overline{u'v'} \right) + g\beta(T - T_0),$$

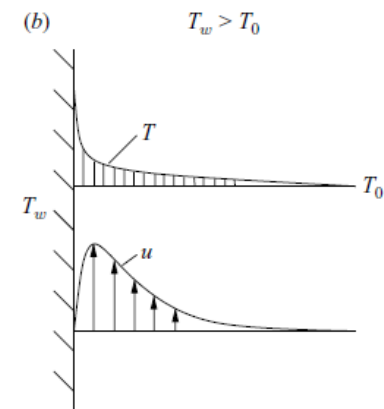
$$0 = \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} - \overline{v'T'} \right),$$

(couplées par T)

Théorie asymptotique : $Gr = \frac{g x^3 (T_{fl} - T_\infty)}{\nu_\infty^2 T_\infty} = \infty \quad (> 10^{10})$

==> profils similaires pour U (vertical) et T

$$\Theta^\times = y^\times \quad U^\times = \frac{1}{6}y^{\times 3} - \frac{1}{2}\Theta_0^\times y^{\times 2} + \left. \frac{\partial U^\times}{\partial y^\times} \right|_w y^\times$$



Resultats: près de la paroi

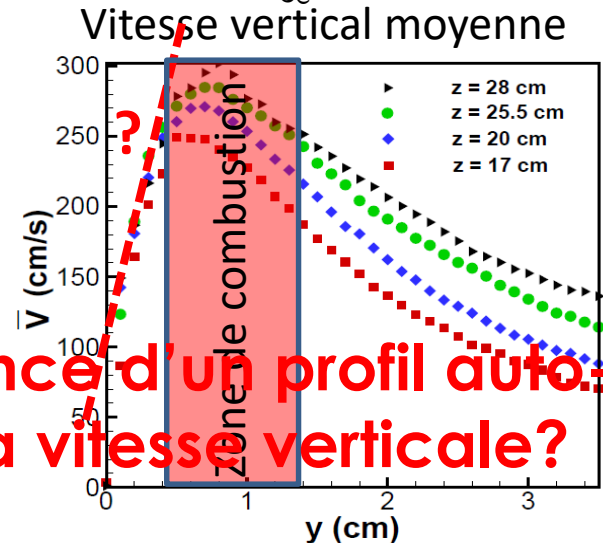
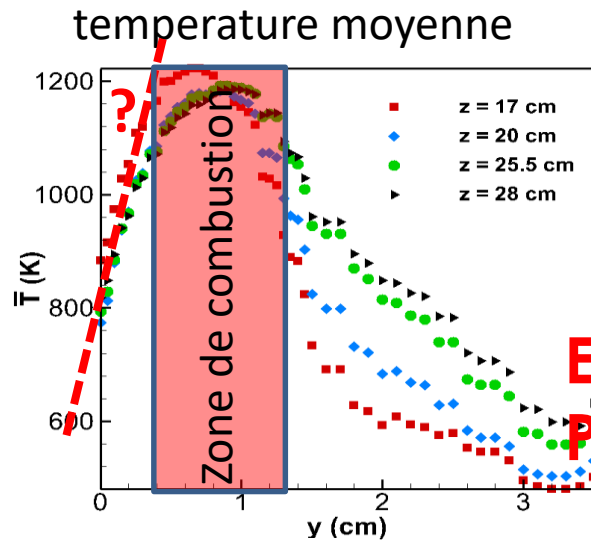
Existence d'une théorie asymptotique pour les couches limites
avec convection naturelle et non réactives:

$$Gr (> 10^{10})$$

Près de la paroi (dans la couche interne) $T_p - T \propto y$
 $U \propto y^3$

Pour le cas de la flamme de paroi

$$Gr = \frac{g x^3 (T_{fl} - T_{\infty})}{\nu_{\infty}^2 T_{\infty}} = 2 \cdot 10^9$$



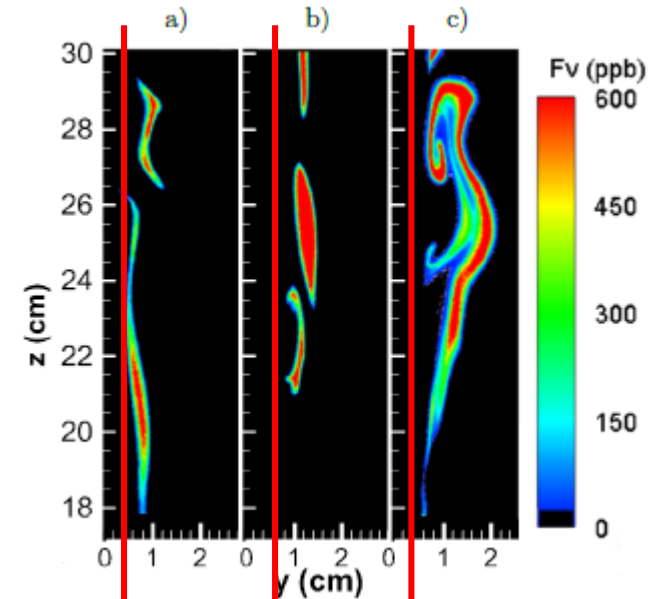
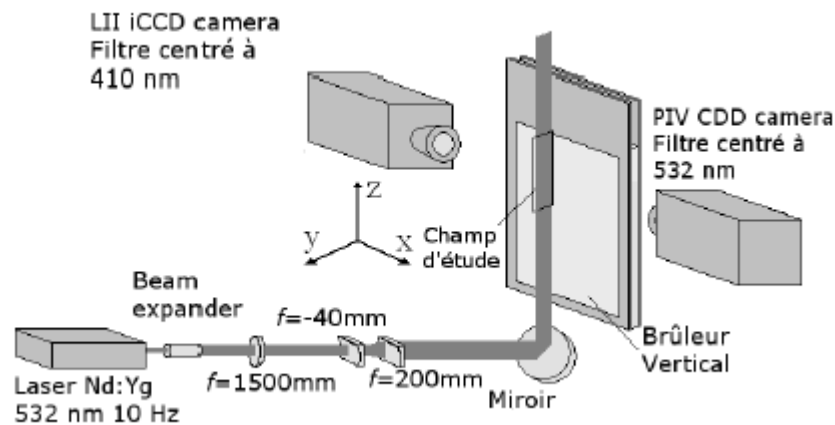
Existence d'un profil auto-similaire
Pour la vitesse verticale?

$$\Theta^x = y^x \quad ?$$

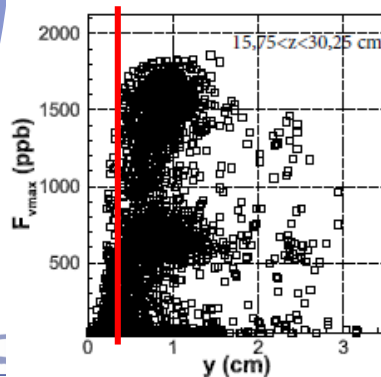
$$V = \frac{1}{6} y^x{}^3 - \frac{1}{2} \Theta_0^x y^x{}^2 + \left. \frac{\partial U^x}{\partial y^x} \right|_w y^x \quad ?$$

Resultats: près de la paroi

Mesures simultanées des suies et de la vitesse de l'écoulement LII + PIV



Exemples de poches de suie générées dans la flamme en configuration de paroi verticale. (Valencia Int Symp Comb 2017)

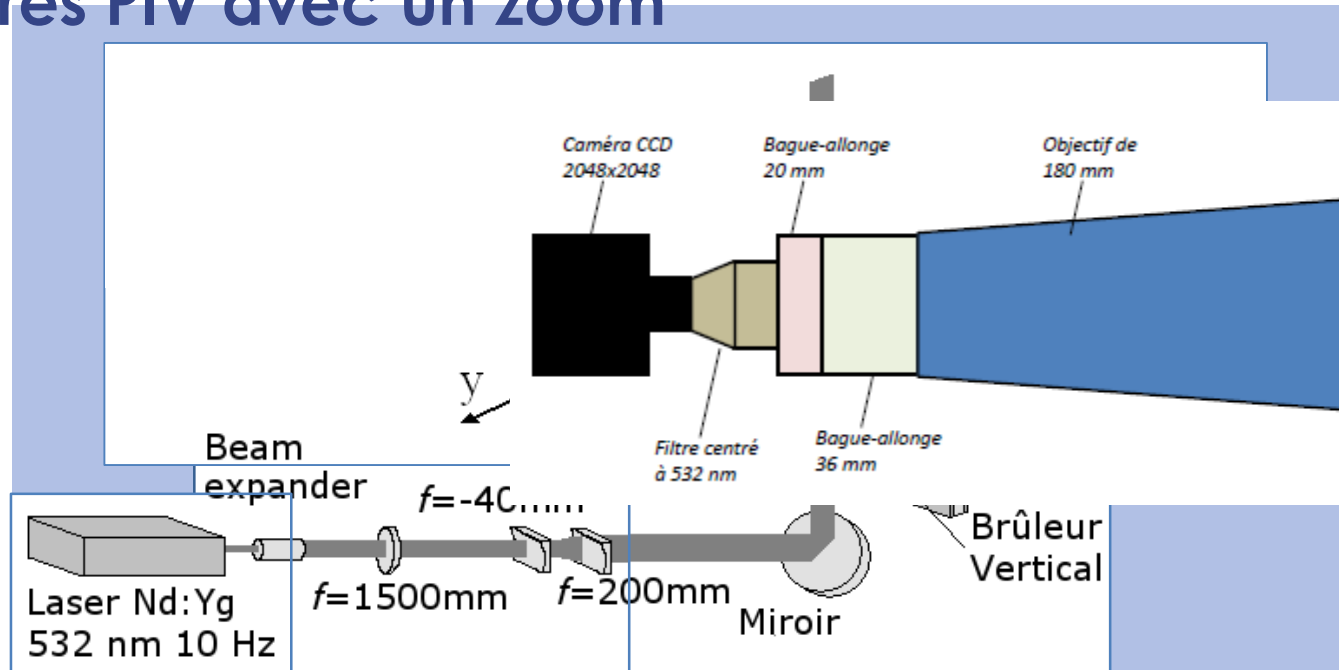


Conclusion:
La zone de combustion > 3-4 mm/ paroi

Fraction volumique maximale f_{vmax}
par rapport à la position y du centroïde
des poches de suie.

Resultats: près de la paroi

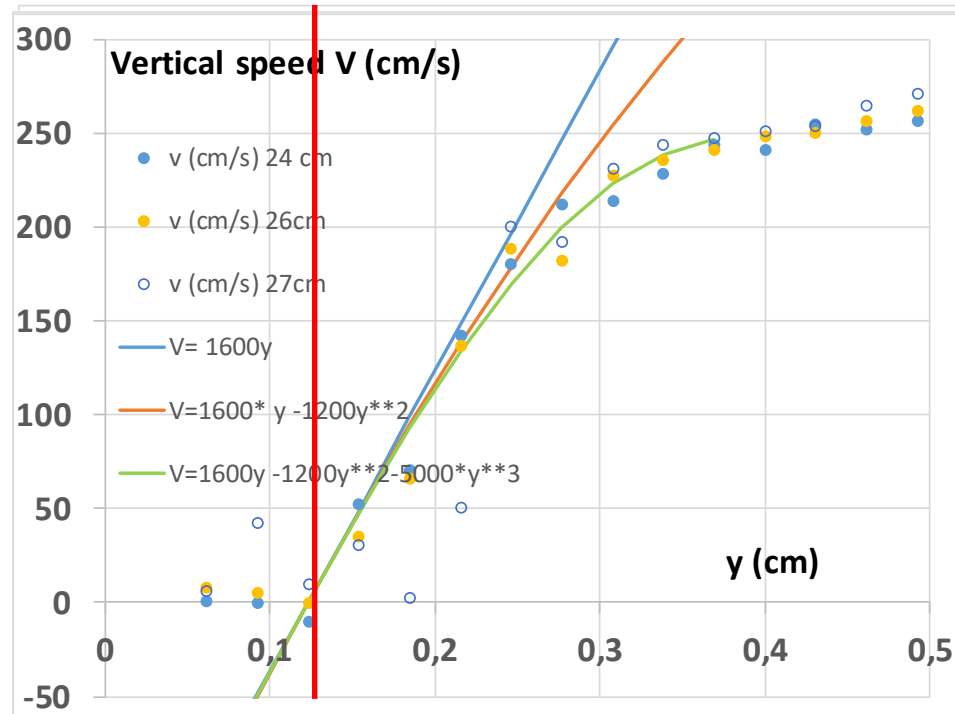
Mesures PIV avec un zoom



Δt μs	W_{1P} $pixel^2$ - mm^2	W_{2P} $pixel^2$ - mm^2	Recouvrement	n_{2p}	R $pixel$	Résolution finale mm^2	Vitesse minimale cm/s
400	64x256 1,4x5,6	28x28 0,6x0,6	50 %	10	0,05	0,3x0,3	1

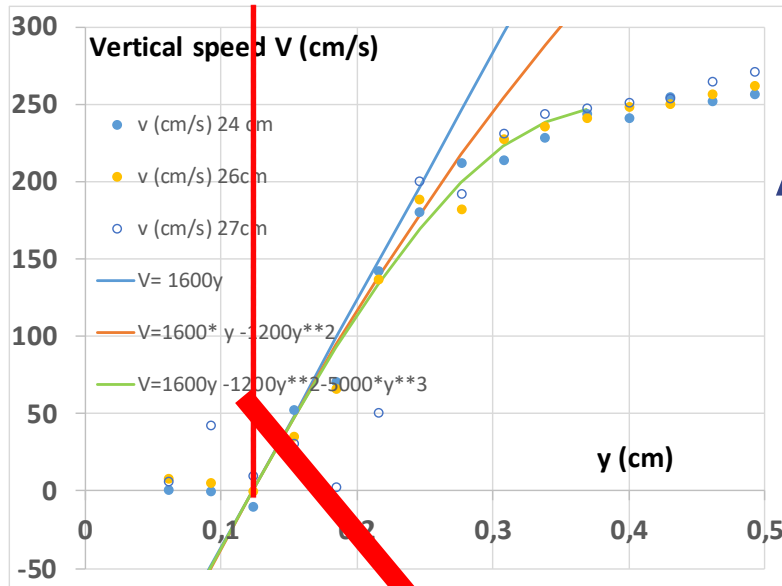
Resultats: près de la paroi

Mesures PIV avec un zoom



Resultats: près de la paroi

Mesures PIV avec un zoom



Avec les valeurs connues de

$$\beta = 1/573 \text{ (=1/300}^\circ\text{C)},$$

$$\Delta T_w = 350 - 20 \text{ (}^\circ\text{C) et}$$

$$q_w = 23 \text{ kW/m}^2$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial V}{\partial y} - \overline{u'v'} \right) + g\beta(T - T_0),$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} - \overline{v'T'} \right),$$

$$V = \frac{\tau_w}{\mu} y - \frac{1}{2!} \frac{g\beta\Delta T_w}{\nu} y^2 + \frac{1}{3!} \frac{g\beta q_w}{\lambda\nu} y^3$$

$$V(\text{cm/s}) = \tau_w/\mu y - 1244 y^{**2} - 7230 y^{**3}$$

$$V(\text{cm/s}) = 1600 y - 1200 y^{**2} - 5000 y^{**3}$$

Conclusions

Dans le cas d'une flamme de paroi (40 cm de hauteur):
Les mesures de température et de vitesse montrent que

- Le maximum de vitesse verticale est de l'ordre de $V = 2-3 \text{ m/s}$
avec de grandes fluctuations de vitesse horizontale, $\text{rms}U/U_{\text{max}} = 300\%$
- Les profils des vitesses verticales $V(y)$ et des températures $T(y)$ sont très similaires
mais pour $z > 20 \text{ cm}$: la température n'augmente plus avec la hauteur
- Près de la paroi, dans la zone interne, il est raisonnable de penser que le dégagement de chaleur est négligeable ($y < 4 \text{ mm}$)
==> La similitude observée pour les CL non réactive peut s'appliquer
il existe des profils similaires pour la vitesse verticale

$$\mathbf{V} = \frac{\tau_w}{\mu} y - \frac{1}{2!} \frac{g\beta\Delta T_w}{\nu} y^2 + \frac{1}{3!} \frac{g\beta q_w}{\lambda\nu} y^3$$

- Analyse à poursuivre pour la température : $T^+ = y^+$?
- Ensuite ces résultats devront être analysés afin de vérifier la validité des lois de paroi utiles pour la CFD dans le cas d'une paroi réactive.