

Instabilités de combustion, un frein au développement de foyers à hautes performances

T. Schuller, D. Durox, P. Palies, J.-F. bourgouin, J. Moeck, S. Candel



Laboratoire EM2C, CNRS et Ecole Centrale Paris

85% de l'énergie primaire dans le monde est obtenue par combustion

19.5 %

Energie renouvelable

Hydraulique
0.690 Gtep (6.5%)

Biomasse (bois)
1.200 Gtep (11.3%)

Autres renouvelables
0.180 Gtep (1.7%)

6.3 %

Energie nucléaire

Nucléaire
0.669 Gtep

Total pour la combustion :

85.5 %



74.2 %

Energie fossile

Charbon
2.186 Gtep (20.6%)

Pétrole
3.504 Gtep (33.1%)

Gaz
2.164 Gtep (20.5%)



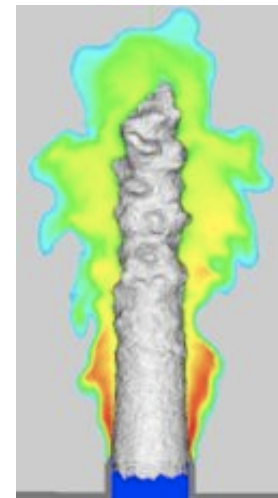
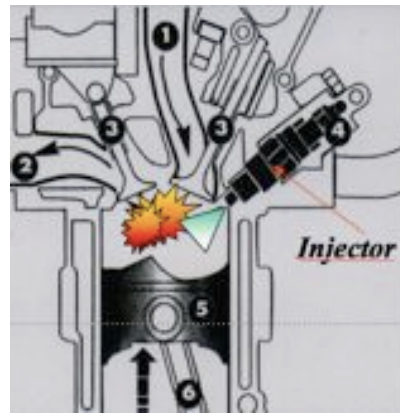
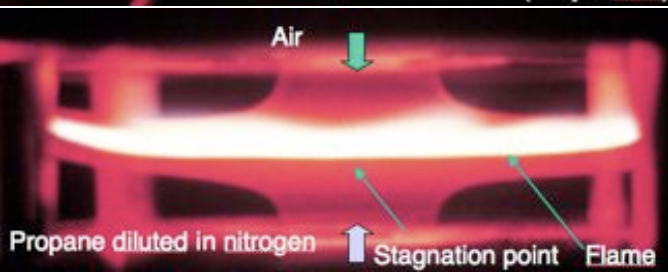
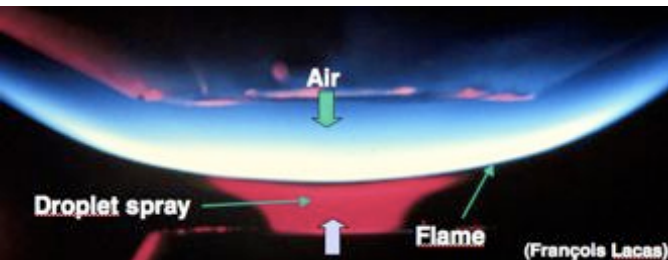
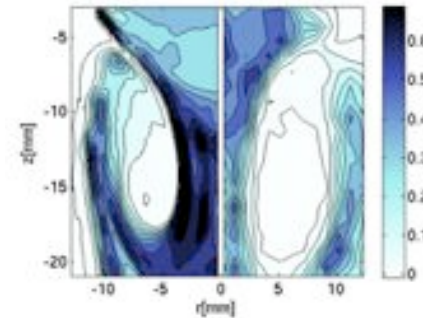
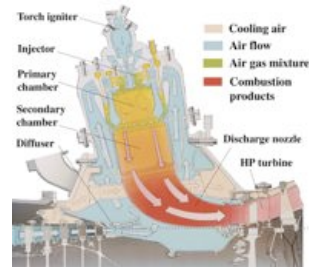
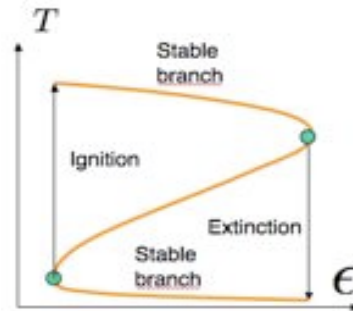
En comparaison, le nombre de scientifiques travaillant sur la recherche de base en combustion est assez réduit ~ **3000** (Symposium international sur la combustion à Orléans en 1990)

La complexité de la combustion en une planche

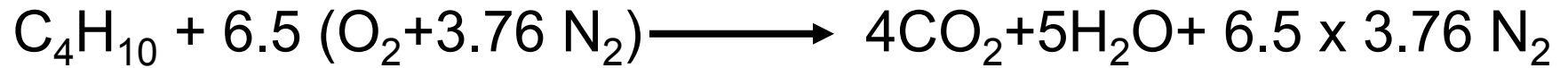


- (1) Beaucoup de modes de combustion, de configurations, de géométries et de conditions de fonctionnement
- (2) Cinétique chimique complexe multi-espèces
- (3) Des taux de réaction raides (Arrhenius)
- (4) Des problèmes multi-échelles
- (5) Des conditions critiques (allumage, extinction)
- (6) Des réactifs injectés sous forme liquide
- (7) La proximité des parois
- (8) Des pressions élevées, transcritiques
- (9) Des écoulements turbulents complexes
- (10) Un problème multiphysique (couplages avec beaucoup d'autres processus : acoustique, rayonnement...)

$$k_f = BT^\beta \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$



Combustion stoechiométrique du butane (C₄H₁₀)



$$X_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{1}{1 + 6.5(1 + 3.76)} \simeq 0.03$$

3% en volume ou 6% en masse pour un mélange à la stoechiométrie

$$m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 4 \times 12 + 10 = 58 \text{ g}$$

$$m_{\text{air}} = 6.5(32 + 3.76 \times 28) = 892 \text{ g}$$

$$m_{\text{tot}} = 950 \text{ g}$$

$$Y_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{58}{950} \simeq 0.06$$

Combustion stoechiométrique du butane (C₄H₁₀)



$$X_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{1}{1 + 6.5(1 + 3.76)} \simeq 0.03$$

3% en volume ou 6% en masse pour un mélange à la stoechiométrie

$$m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 4 \times 12 + 10 = 58 \text{ g}$$

$$m_{\text{air}} = 6.5(32 + 3.76 \times 28) = 892 \text{ g}$$

$$m_{\text{tot}} = 950 \text{ g}$$

$$Y_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{58}{950} \simeq 0.06$$

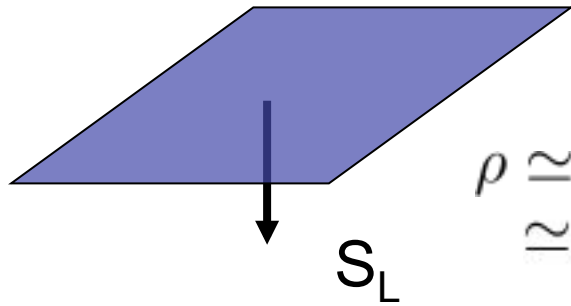
	PCI * (MJ/kg)	T _{ébullition} (°C)	ρ _L (kg/m ³)	ρ _V (kg/m ³)
Butane	45.6	0	585	2.50
Propane	46	-42	515	1.85

* Pouvoir Calorifique Inférieur

Puissance dégagée par la combustion de 1m² de butane

Mélange butane/air stoechiométrique

$$A = 1 \text{ m}^2$$



$p = 1 \text{ bar}, 15^\circ\text{C}$

$$\rho \simeq \rho_{air} \simeq 1.23 \text{ kg/m}^3$$

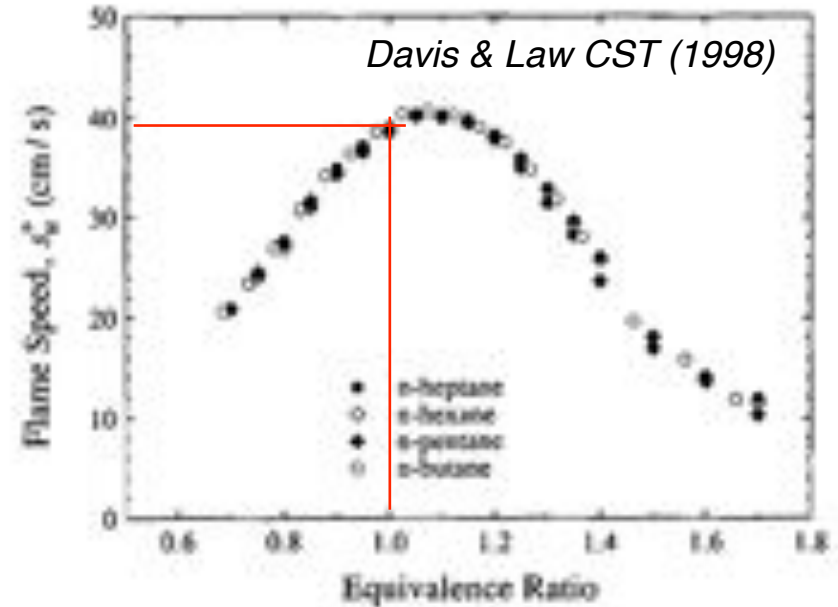
Vitesse de flamme

Débit masse de mélange consommé :

$$\begin{aligned} \dot{m} = \rho S_L A &= 1.23 \times 0.33 \times 1 \\ &= 400 \text{ g/s} \end{aligned}$$

Débit masse de butane consommé :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{C_4H_{10}} &= Y_{C_4H_{10}} \dot{m} \\ &= 0.06 \times 400 = 24 \text{ g/s} \end{aligned}$$



Puissance thermique :

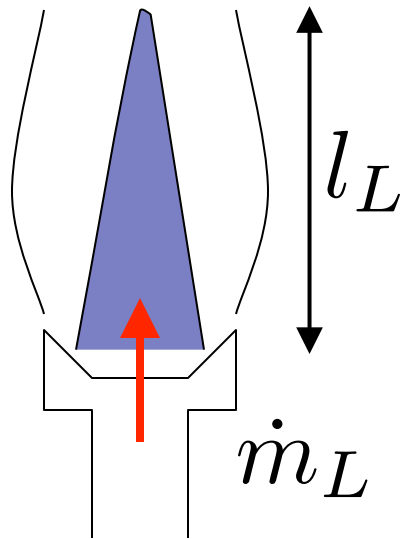
$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{th} &= \dot{m}_{C_4H_{10}} PCI \\ &= 0.024 \times 45.6 \cdot 10^6 \end{aligned}$$

$$\mathcal{P}_{th} \simeq 1 \text{ MW}$$

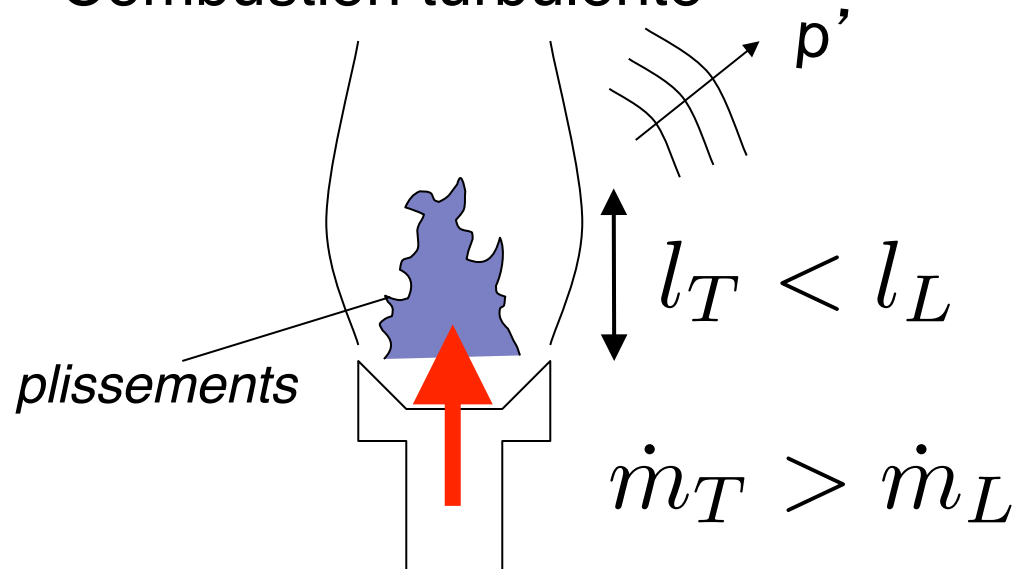
Pour les alcanes

Bruit de combustion

Combustion laminaire



Combustion turbulente



La taille de la flamme a diminué
alors que le débit a augmenté

Front de flamme bien identifié

Stationnaire

Pas de bruit

Front de flamme est plissé

Siège de mouvements désordonnés

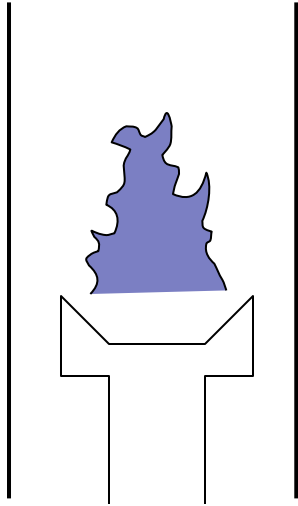
Emission sonore large bande

Puissance acoustique
rayonnée

$$\eta = \frac{P_a}{P_{th}} \sim 10^{-n} \quad n = 6 - 7$$

Effet d'un confinement

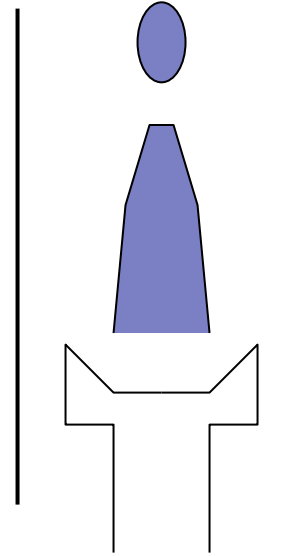
Régime stable



Mouvements désordonnés
de faible amplitude

Bruit large bande

Régime instable



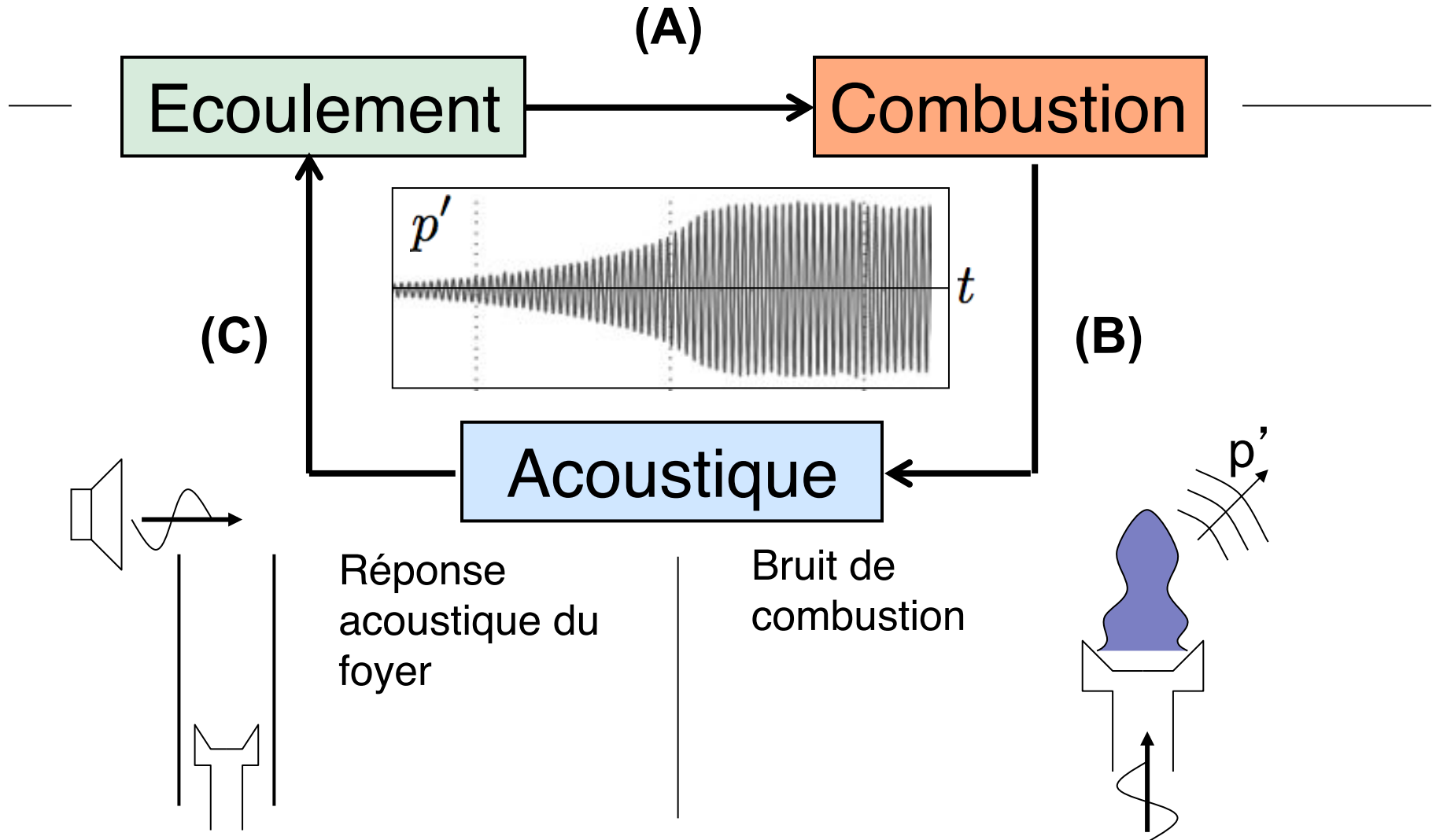
Mouvement cyclique de grande
amplitude auto-entretenu

Apparition d'une fréquence préférentielle
selon :

- **la position de la flamme dans le tube**
- **la longueur de la cavité**
- **des conditions aux limites**

Film « organ pipe »

Principe d'un couplage acoustique-combustion



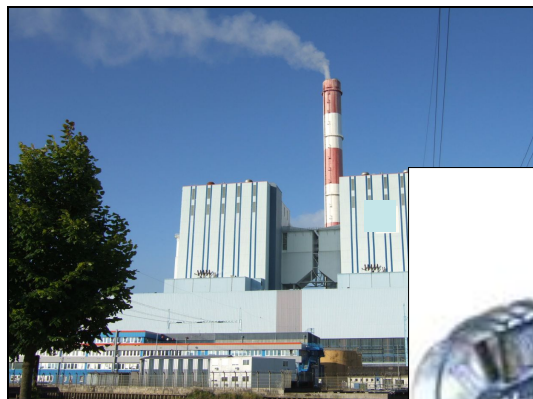
Instabilités dans les foyers opérant en régime stationnaire

Les nouvelles technologies de combustion favorisent les couplages thermo-acoustiques



Pression élevée	Rendement élevé	Densités d'énergie élevées
Design compact	Gain de poids	Environnement réfléchissant
Combustion pauvre	Réduction des NOx	Stabilisation difficile

~ 1 GW th



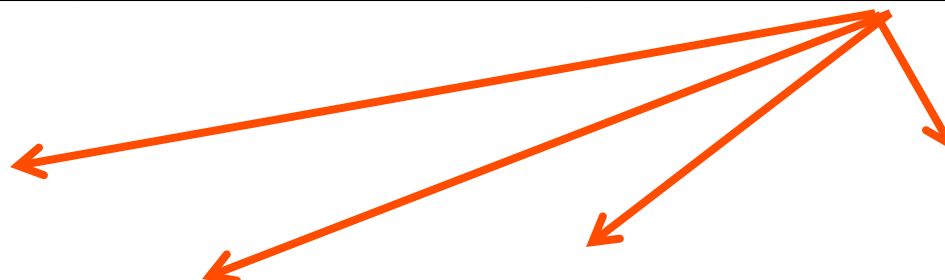
~ 100 MW th



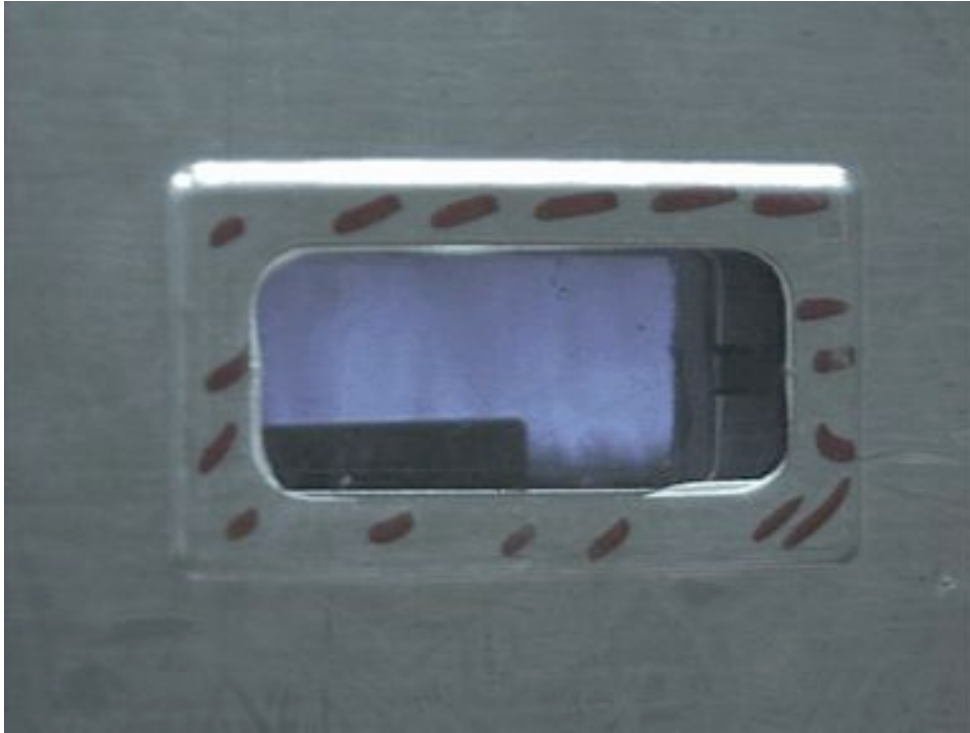
~ 1 MW th



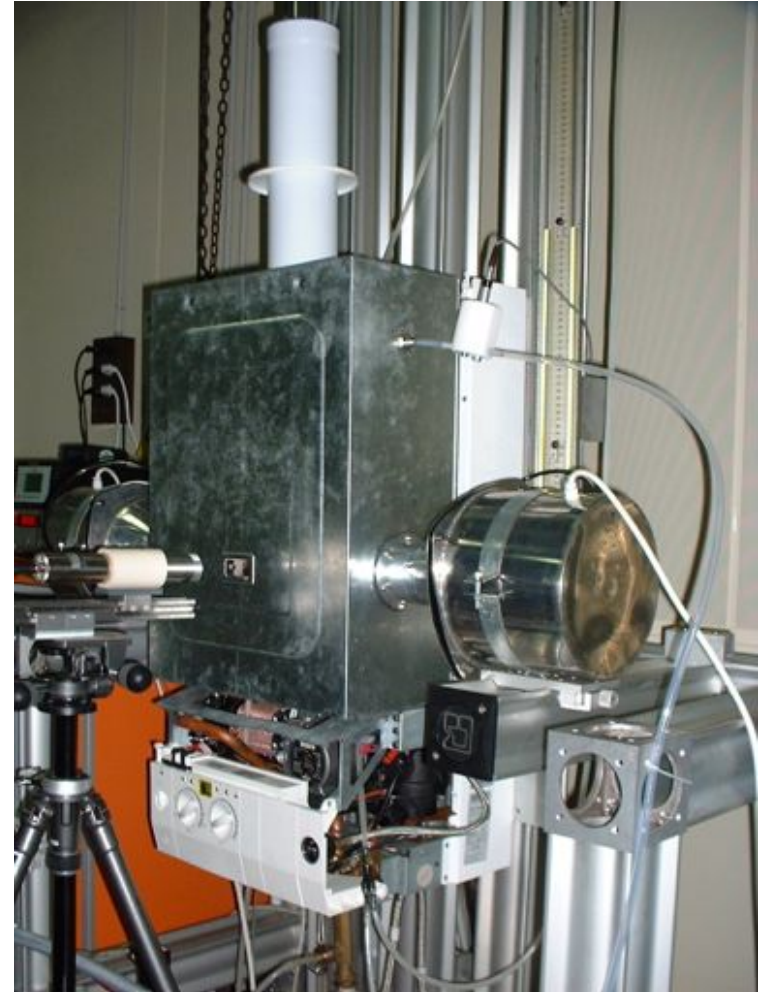
~ 10 kW th



Instabilité dans une chaudière domestique alimentée au gaz naturel

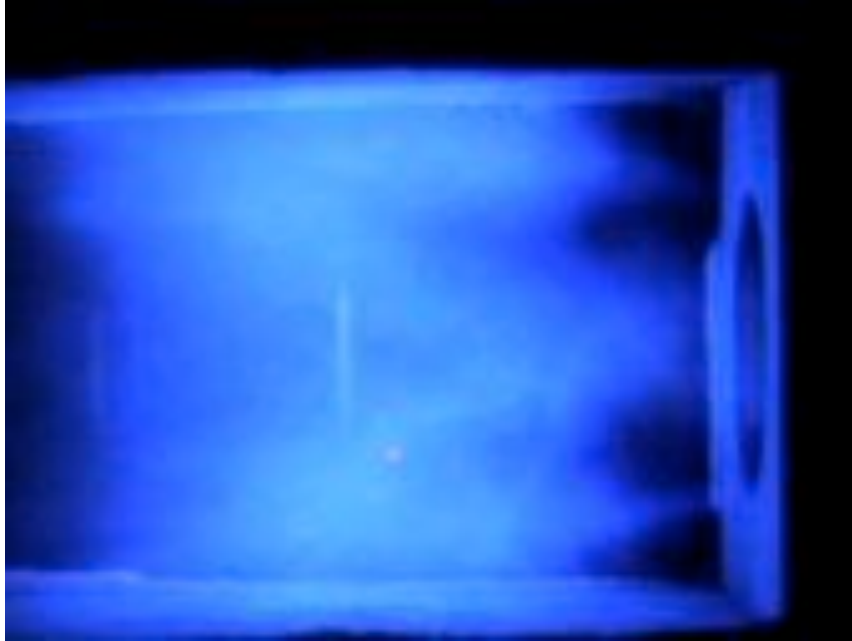


Lors de l'instabilité la paroi de la chaudière se déforme indiquant une variation importante de la pression dans le foyer.



$$P_{th} = 10 \text{ kW}, p = 1 \text{ bar}$$

Transition vers un régime instable entraînant une remontée de la flamme dans l'injecteur: « flashback »



Chambre équipée d'un injecteur aéronautique

$$P_{th} = 300 \text{ kW} \quad p = 1 \text{ bar}$$

L'opérateur change la qualité du mélange combustible/air et le système devient instable

Régime stable : La zone de combustion fluctue autour d'une position moyenne avec des mouvements aléatoires de faible amplitude. Le bruit de combustion rayonné reste modéré et large bande.

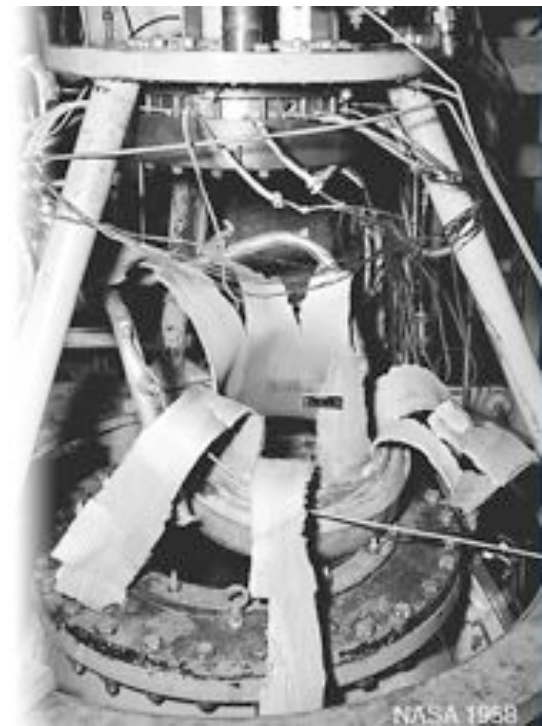
Régime instable : Apparition de mouvements synchronisés de grande amplitude accompagnés d'un pic de mission sonore important. Intensification des flux de chaleur. La flamme a ici tendance à rentrer dans l'injecteur.

Dynamique et contrôle de la combustion

Les instabilités de combustion perturbent le fonctionnement de nombreux systèmes et peuvent conduire, dans des situations extrêmes, à des accidents spectaculaires



Liquid rocket engine after HF instability



Objectifs

- [1] Identifier les mécanismes fondamentaux
- [2] **Développer des méthodes de prévision**
- [3] Développer des méthodes de contrôle

La prévision de ces phénomènes posent de grosses difficultés – 3 points sont examinés ici

(A) Stabilisation des flammes par swirl

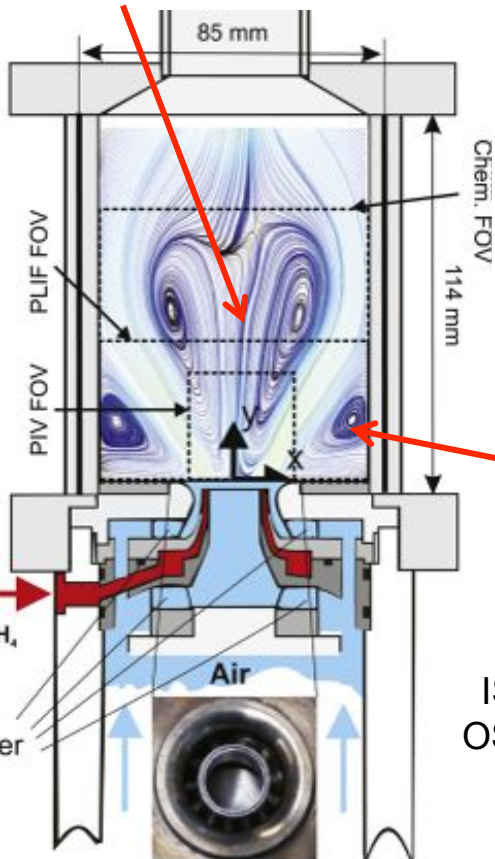
La mise en rotation de l'écoulement (swirl) crée une zone centrale dépressionnaire qui permet de stabiliser des flammes compactes

$$S > 0.6$$

$$S \simeq \frac{\int v_x v_\theta r^2 dr}{R \int v_x^2 r dr} \quad \text{Nombre de Swirl}$$

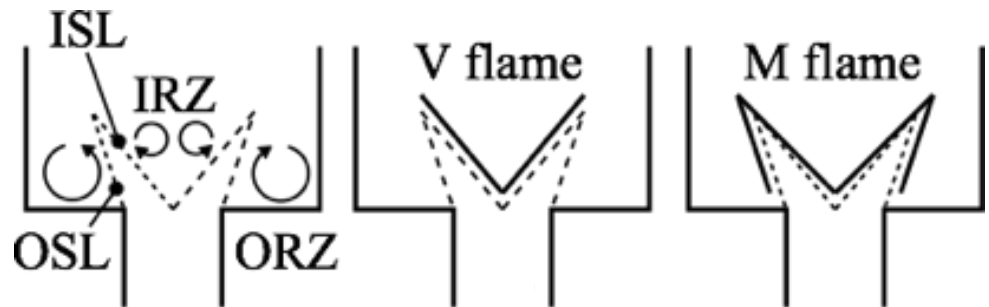
IRZ = Inner
Recirculation Zone

● La topologie de la flamme dépend d'interactions complexes avec les couches de cisaillement

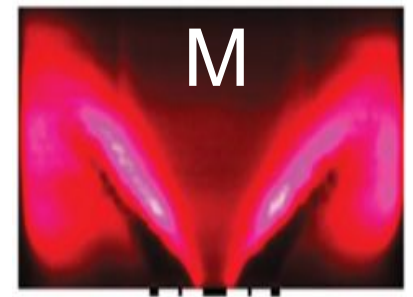


ORZ = Outer
Recirculation Zone

ISL = Inner Shear Layer
OSL = Outer Shear Layer

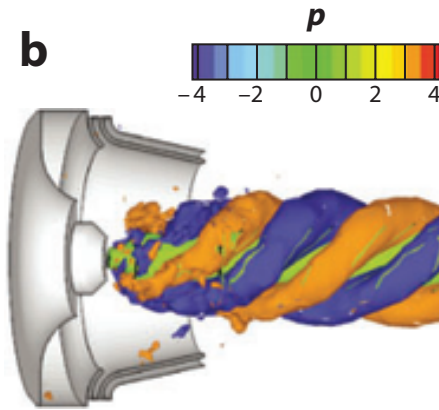


Palies et al. C&F (2010)



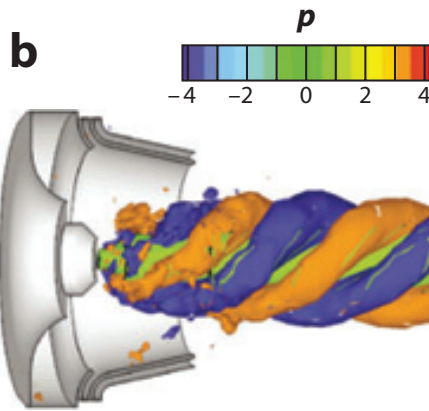
Kim et al. CST (2012)

- Les écoulements swirlés sont le siège d'instabilités hydrodynamiques qui modifient la combustion

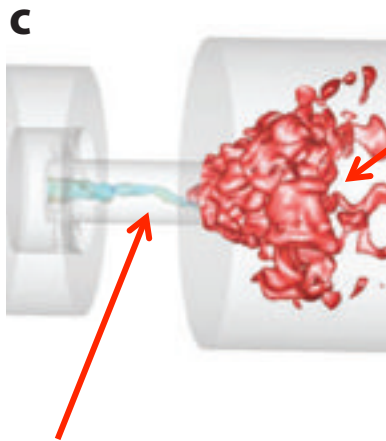


Instabilités hydrodynamiques hélicoïdales

● **Les écoulements swirlés sont le siège d'instabilités hydrodynamiques qui modifient la combustion**



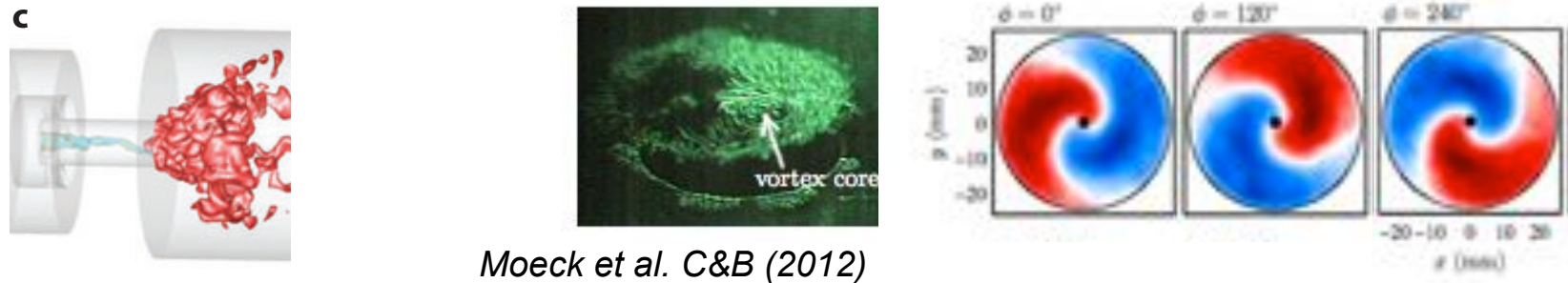
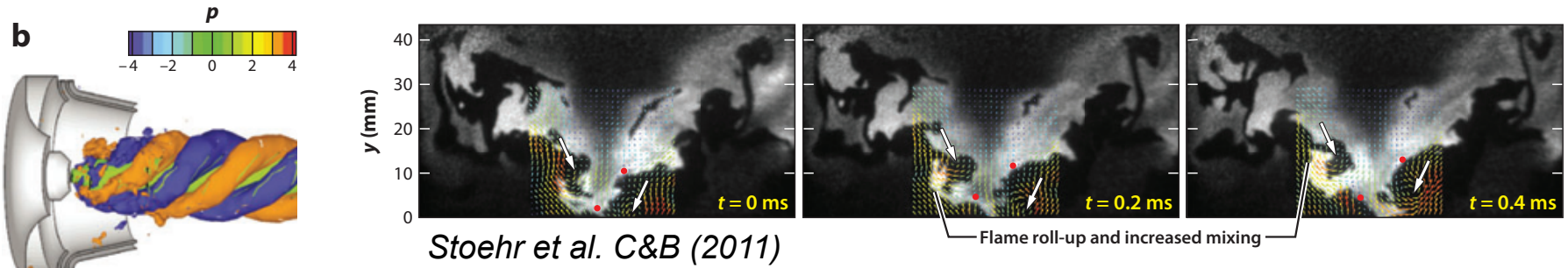
Instabilités hydrodynamiques hélicoïdales



Dégagement de chaleur

PVC (Precessing Vortex Core) Instabilité tourbillonnaire hélicoïdale souvent observée dans les expériences et les simulations de flammes swirlées

● **Les écoulements swirlés sont le siège d'instabilités hydrodynamiques qui modifient la combustion**



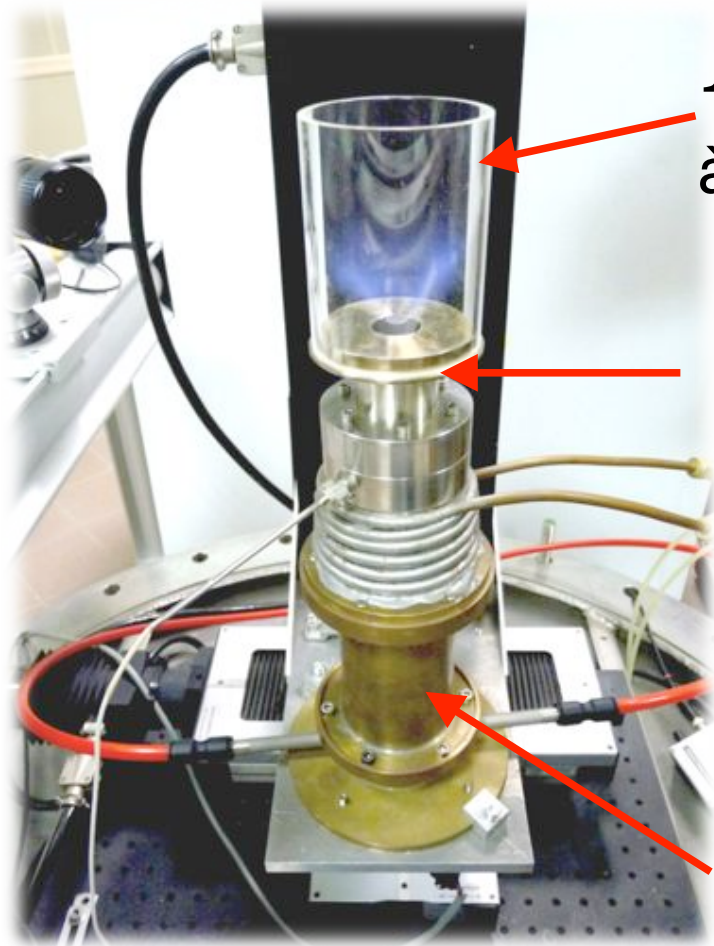
● **La réponse acoustique des flammes dépend fortement de leur topologie**

Durox et al. PCI (2009)



film

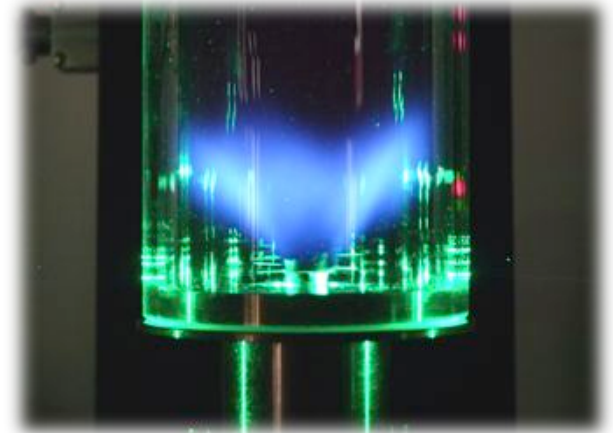
● La réponse acoustique des flammes swirlées dépend de la réponse dynamique du swirler



1 - Tube à flamme

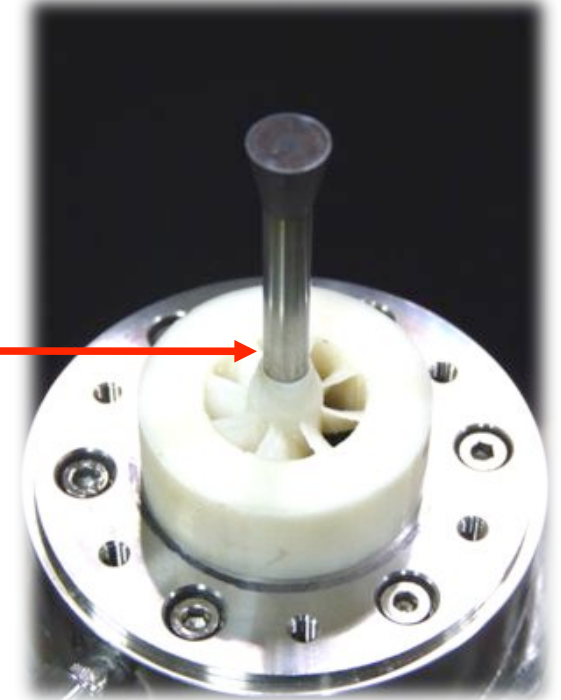
2 - Injecteur

4 - Plenum



Flamme et rayons laser LDV

3 - Swirler



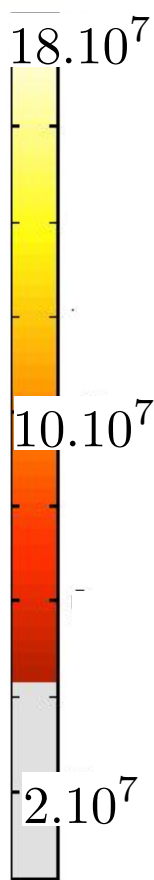
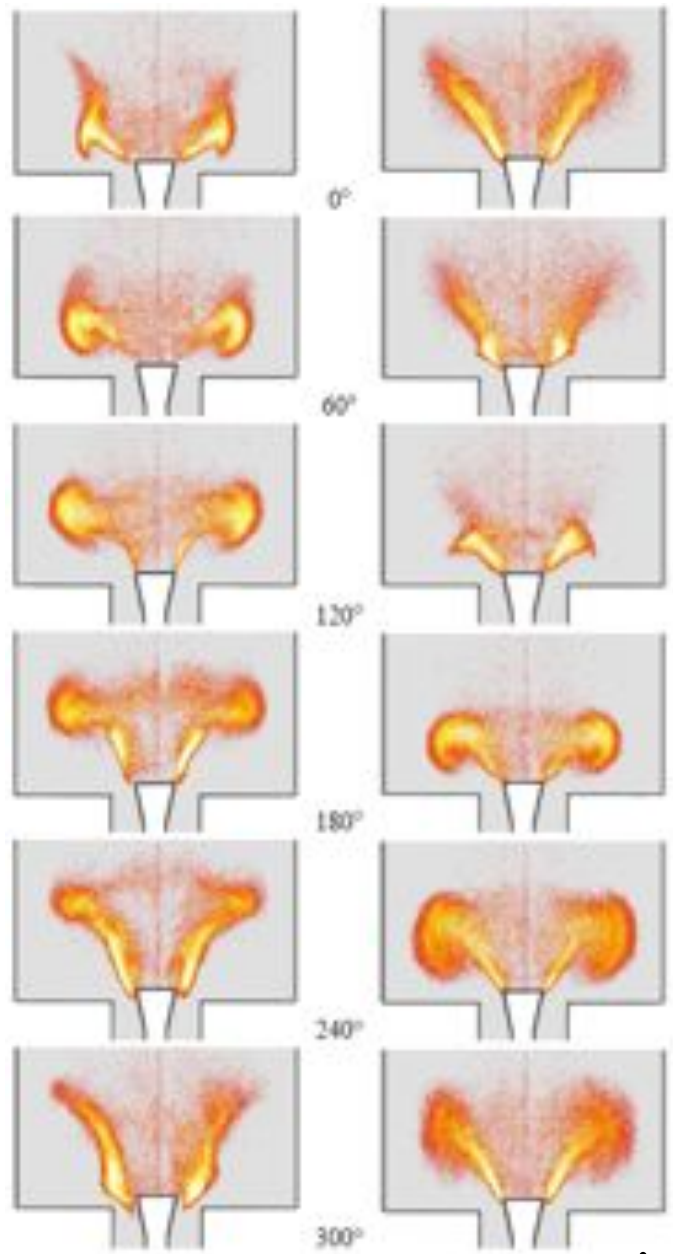
Swirl number : $S = 0.55$
Equivalence ratio : $\phi = 0.7$

Palies et al. C&B (2010)

Zoom sur la vanne de mise en rotation de l'écoulement (Swirler)

● $f = 60$ Hz

● $f = 90$ Hz

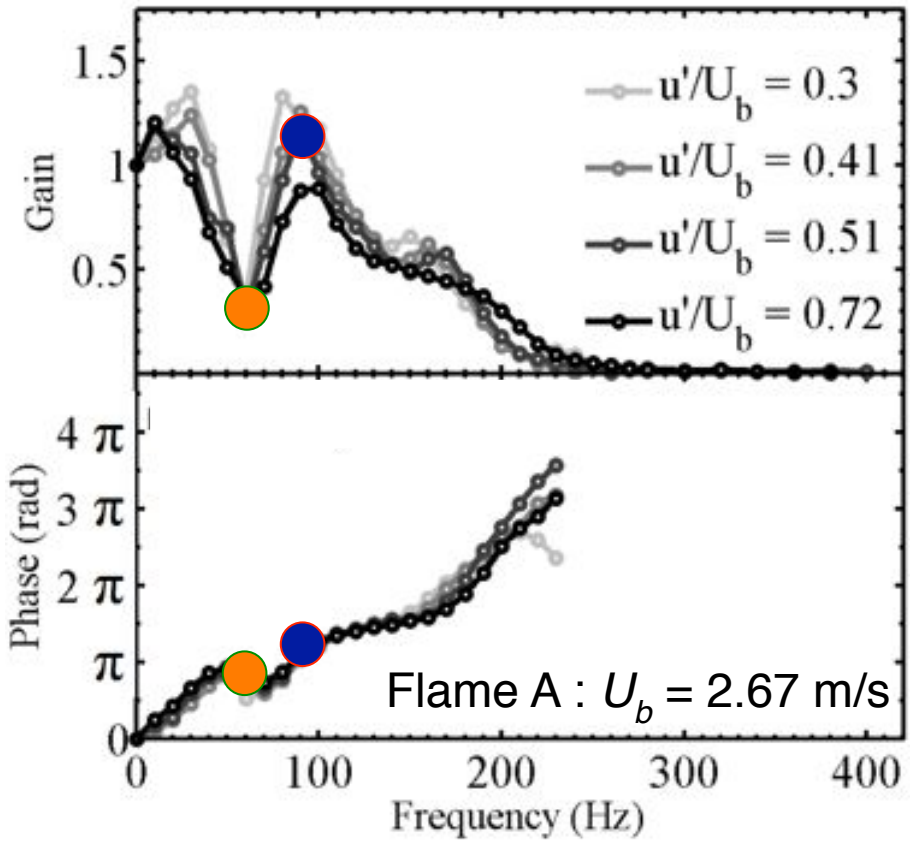


$\dot{Q} (\text{Wm}^{-3})$

Fonction de Transfert de Flamme (FTF)

$$\frac{\dot{Q}'}{\dot{Q}} = FTF(\omega, |u'/U_b|) \frac{u'}{U_b}$$

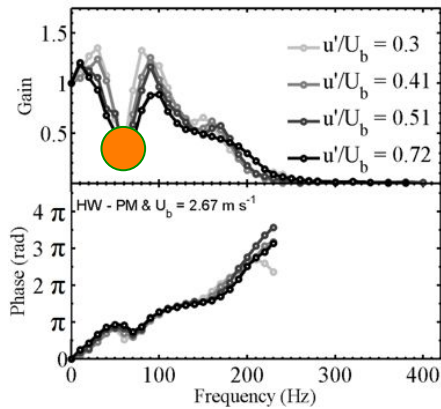
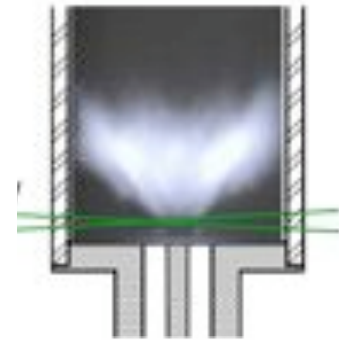
$$FTF = G \exp(i\varphi)$$



Flame A : $U_b = 2.67$ m/s

Oscillations du nombre de swirl

Measurements of velocity signals at the base of the flame indicate that at **60 Hz** signals are out of phase.

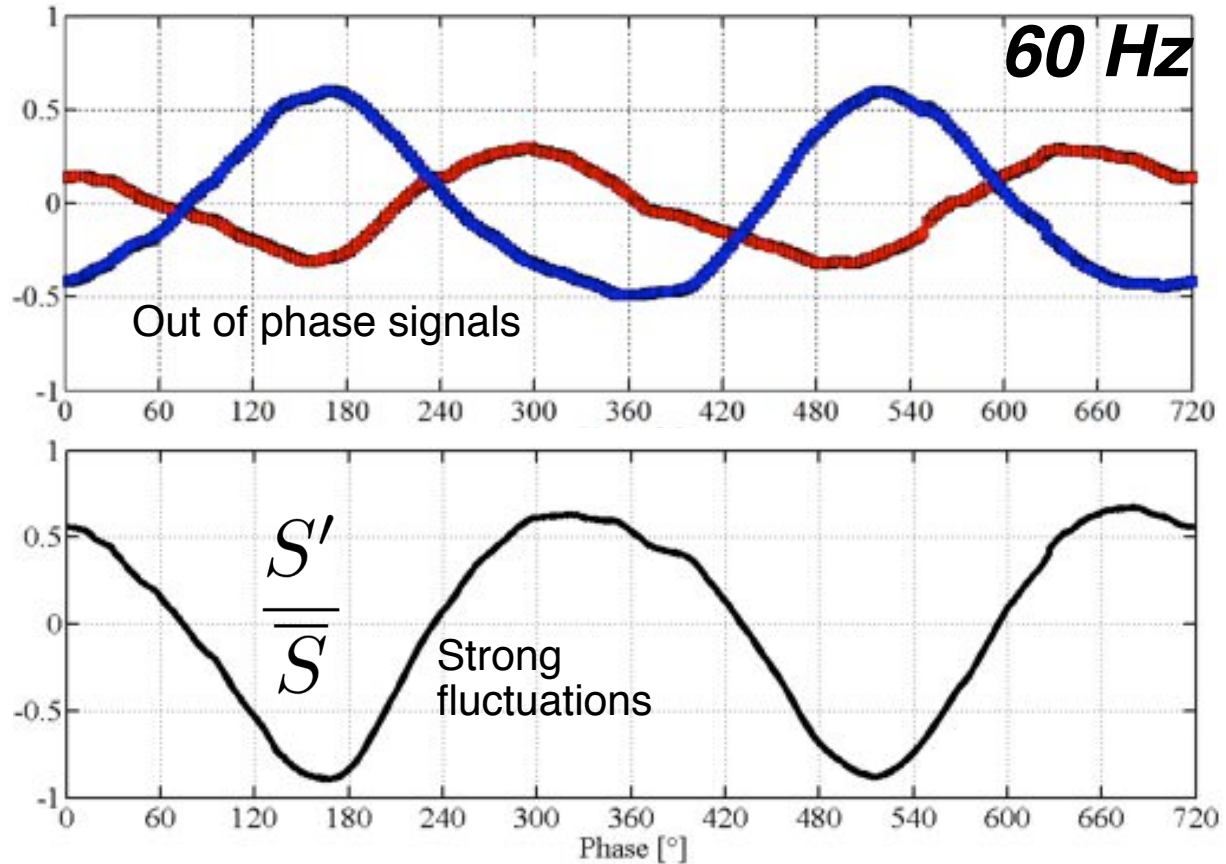


$$\frac{v'_\theta}{\bar{v}_\theta}$$

$$\bar{v}_\theta$$

$$\frac{v'_x}{\bar{v}_x}$$

$$\bar{v}_x$$

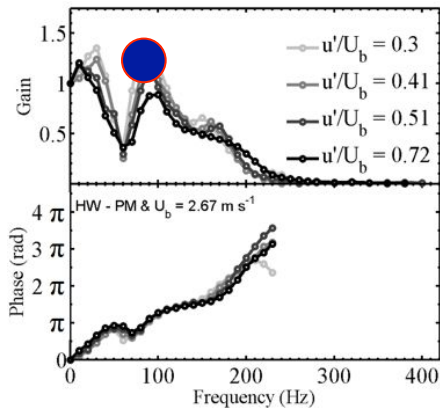
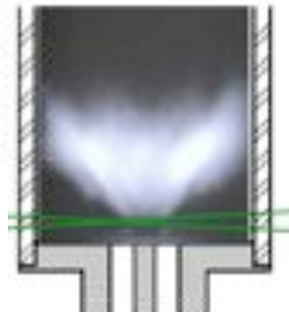


$$\frac{S'}{\bar{S}} = \frac{v'_\theta}{\bar{v}_\theta} - \frac{v'_x}{\bar{v}_x}$$

Swirl number oscillations are accompanied by oscillations of the flame angle. This condition corresponds to a local FTF minimum

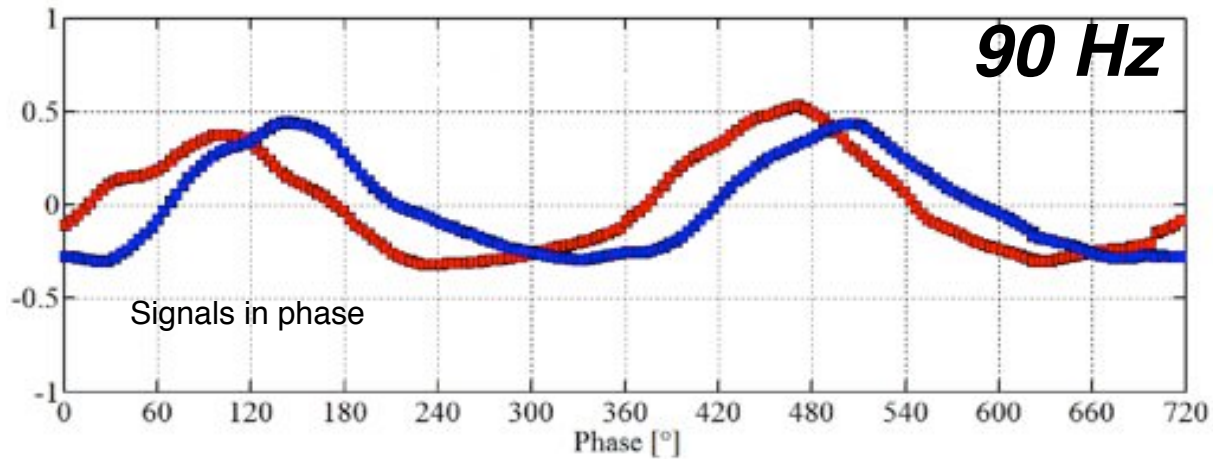
Oscillations du nombre de swirl

Measurements of velocity signals at the base of the flame indicate that at **90 Hz** signals are nearly in phase.

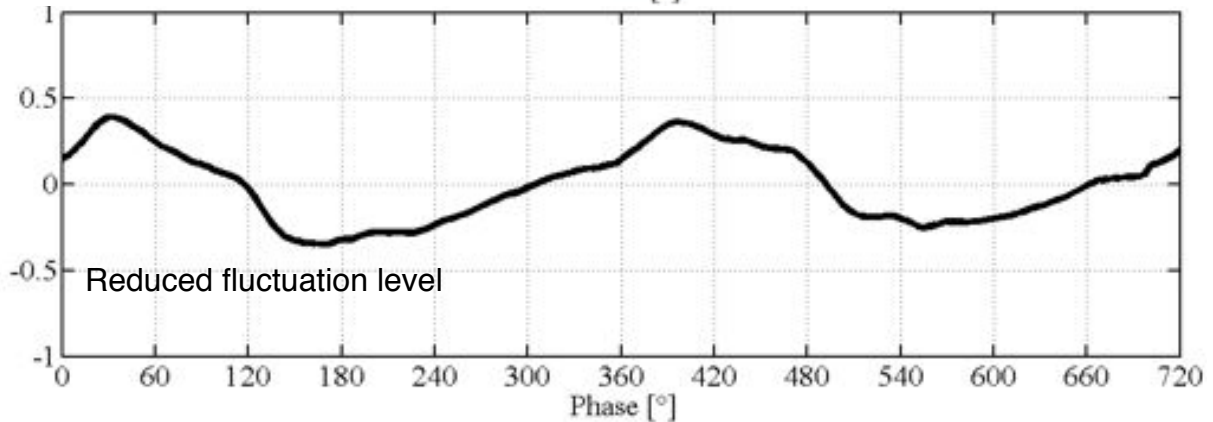


$$\frac{v'_\theta}{\bar{v}_\theta}$$

$$\frac{v'_x}{\bar{v}_x}$$

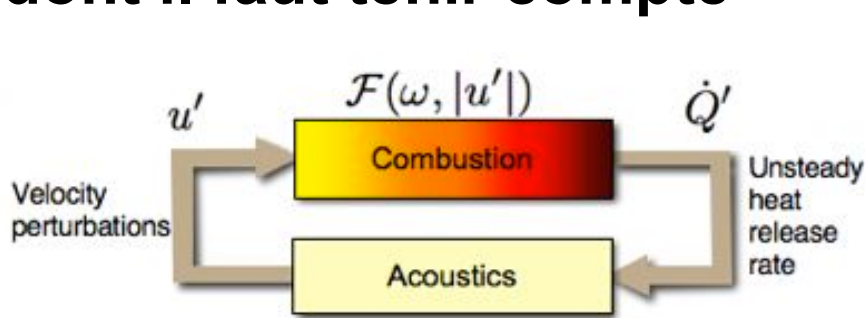


$$\frac{S'}{\bar{S}}$$



When swirl number oscillations are reduced, oscillations of the flame angle are also reduced and this corresponds to a local FTF maximum

(B) Les flammes ont des réponses fortement non-linéaires dont il faut tenir compte



La relation de dispersion et les taux de croissance des perturbations dépendent de l'amplitude

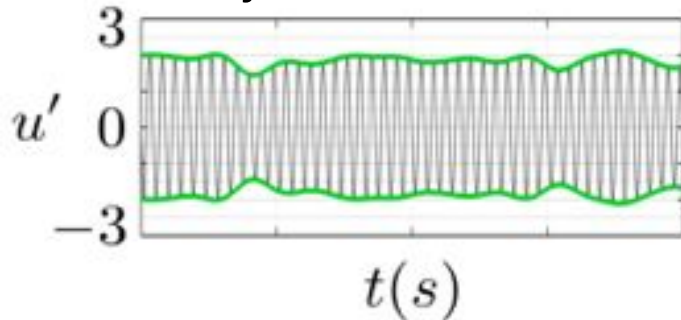
$$\mathcal{F}(\omega, u') = \frac{\dot{Q}'/\bar{Q}}{u'/\bar{u}}$$

FDF: Flame transfer function depends on input amplitude

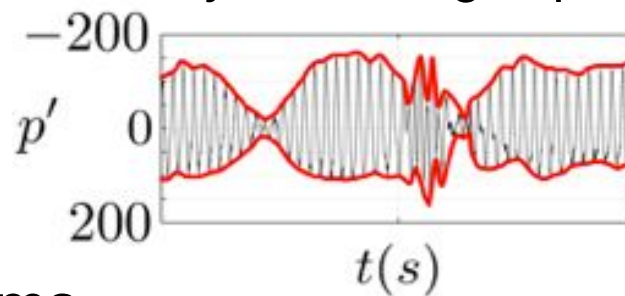
$$\mathcal{H}(\omega, u') = 0$$

$$\omega_i = \omega_i(u'/\bar{u})$$

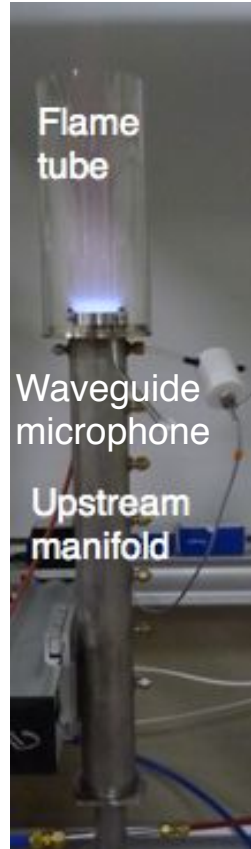
Cycle limite stable



Cycle limite galopant

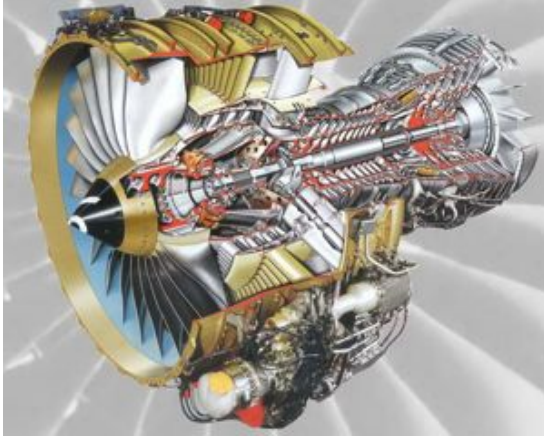


Films

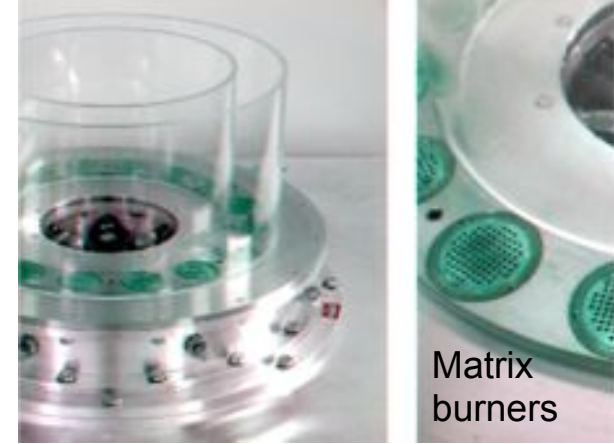


Des modes instables à des fréquences différentes peuvent interagir et éventuellement coexister. La dynamique de ces systèmes ne peut être décrite par des approches uniquement fréquentielles.

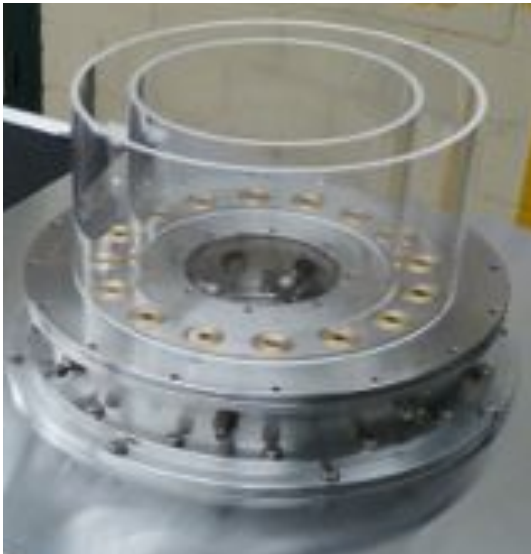
(C) Les foyers réels ont des géométries annulaires avec des injecteurs régulièrement distribués autour d'un axe



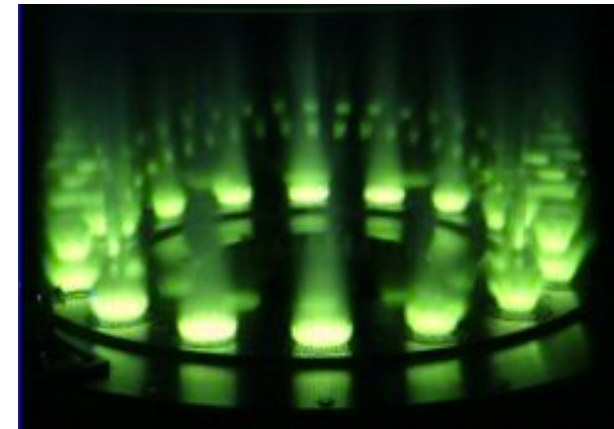
Flammes turbulentes
swirlées en V



Matrix
burners

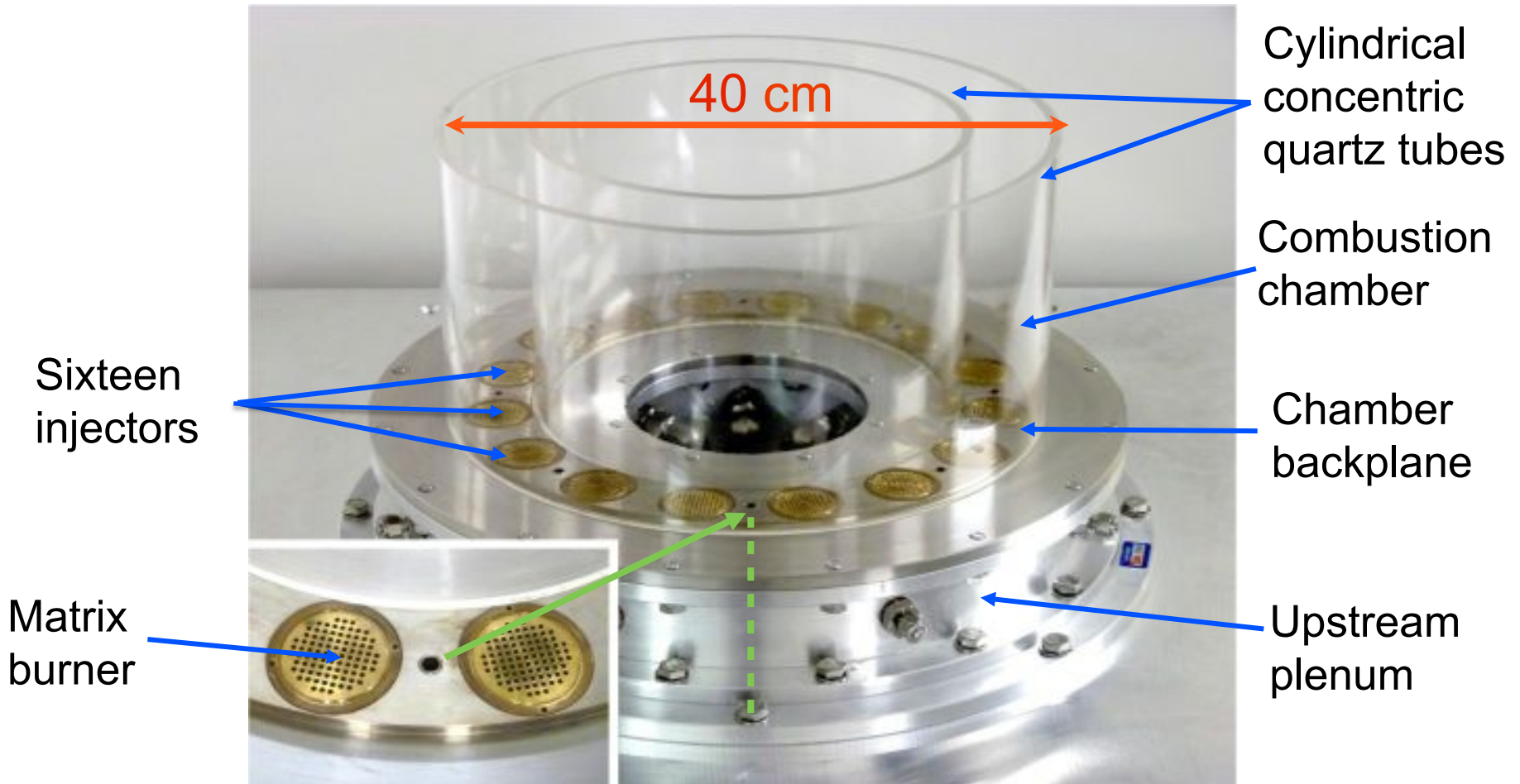


Flammes turbulentes
swirlées en M



Flammes coniques laminaires
stabilisées par des grilles

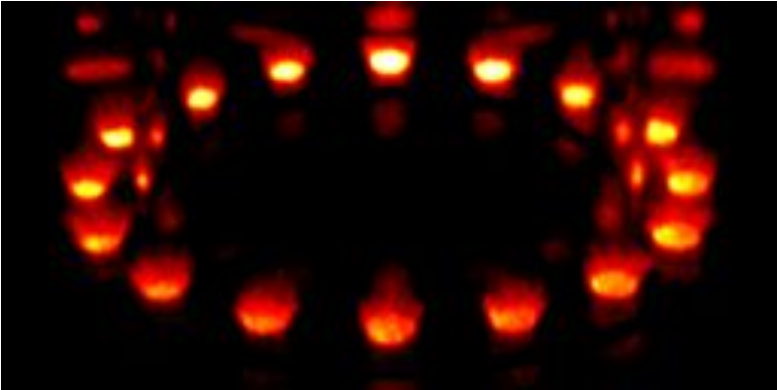
Foyer annulaire MICCA du laboratoire EM2C équipé d'injecteurs matriciels permet de stabiliser des flammes laminaires



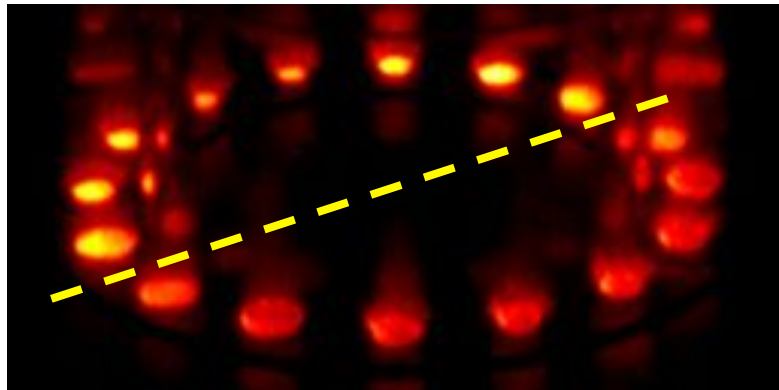
Un guide d'onde est situé à égale distance entre deux injecteurs pour mesurer la pression acoustique dans le foyer

Les foyers annulaires présentent une grande variété d'instabilités couplés par des modes azimuthaux et longitudinaux

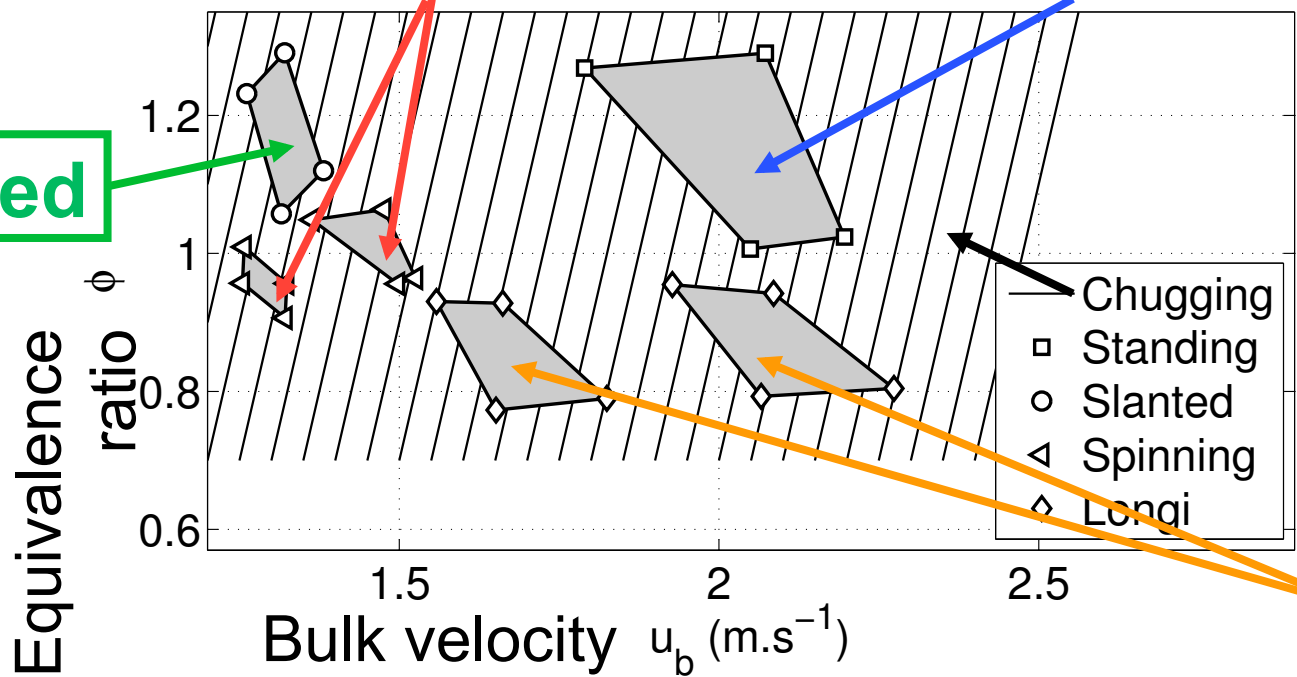
Bourgouin et al. PCI (2014)



Tournant (486 Hz)



Stationnaire (495 Hz)



Slanted

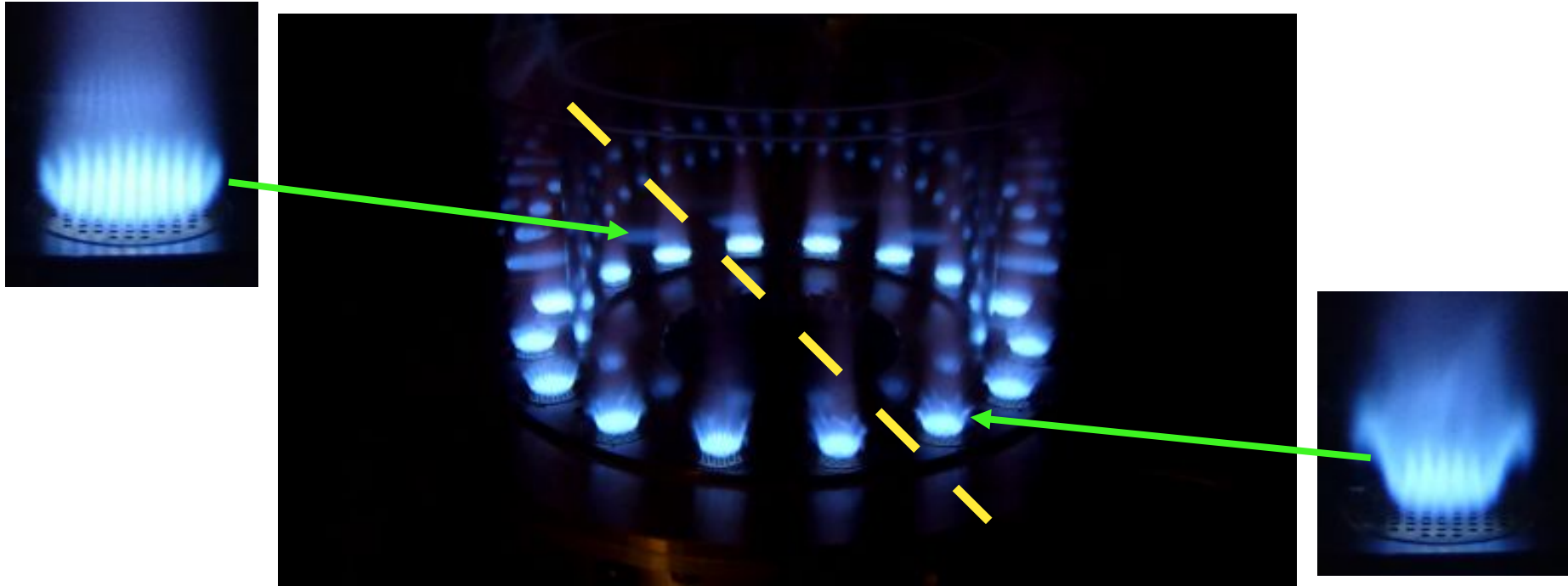
N3L Meeting
Munich
June 18-21, 2013

ASME
GT2014-25067

**Axial
(320 Hz)**

Slanted combustion instability (450 Hz)

Vidéo (25 images/s) du foyer lorsque le mode instable présente une structure inclinée selon la direction azimutale

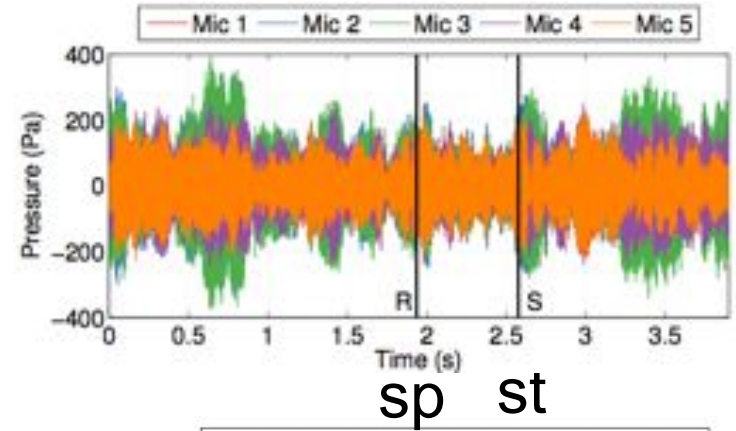
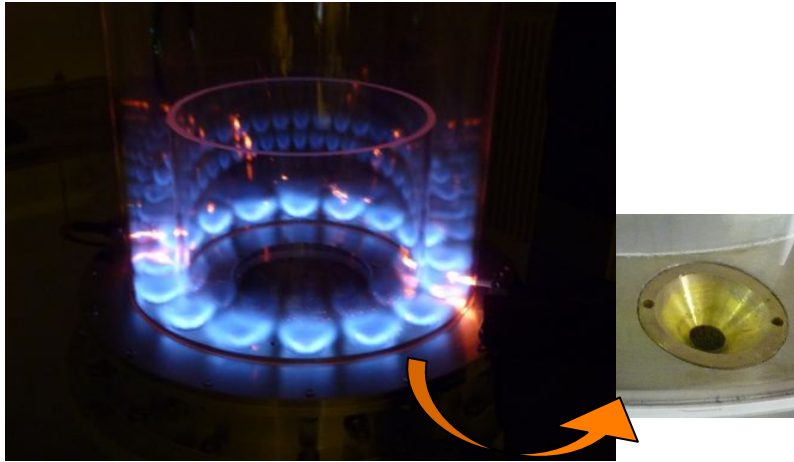


C₃H₈ - Air

$$\phi = 1.14 \text{ and } u_b = 1.33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Freq : 450 Hz

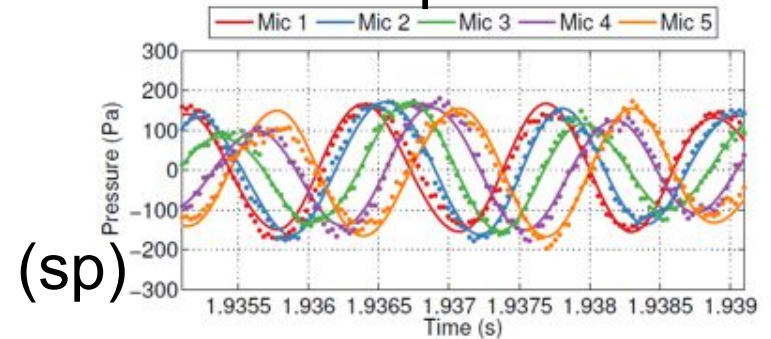
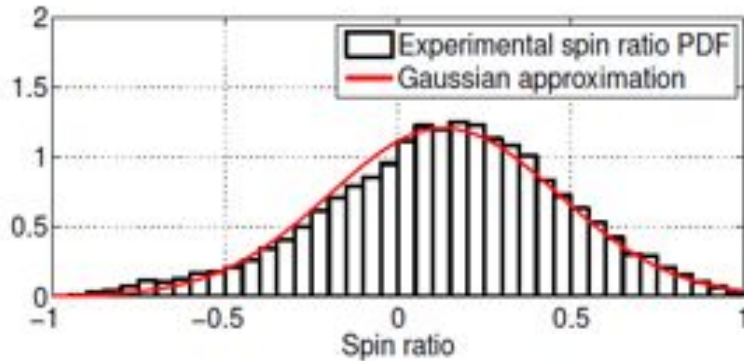
Foyer annulaire MICCA du laboratoire EM2C équipé d'injecteurs swirlés permettant de stabiliser des flammes turbulentes



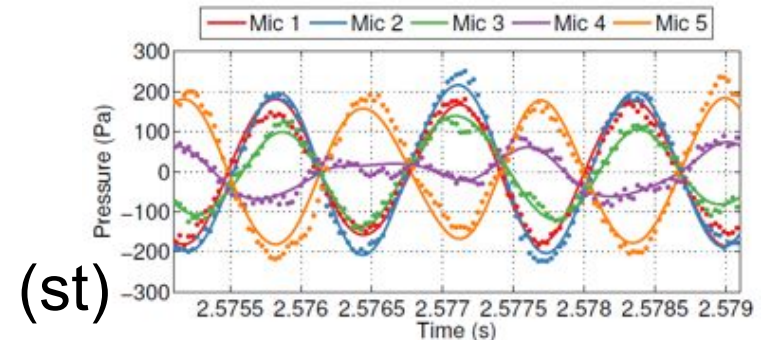
$$p(\theta, t) = a \exp(i\theta - i\omega t) + b \exp(-i\theta - i\omega t)$$

$$s = \frac{|a| - |b|}{|a| + |b|}$$

$s = +1$ or -1 : spinning
 $s = 0$: standing



(sp)



(st)

CONCLUSION

1 Les instabilités de combustion couplées par l'acoustique sont endémiques des foyers à hautes performances.

2 Il n'existe pas (encore) de méthode de prévision de ces phénomènes efficace sur des installations pratiques. **Seules des solutions palliatives sont actuellement mises en œuvre.**

3 Améliorer les performances des systèmes de combustion nécessite **d'améliorer notre connaissance des phénomènes de base.**

4 La diversité des phénomènes dynamiques à traiter nécessite des **moyens expérimentaux importants** combinés à des **outils de simulation et des capacités de calcul haute performance.**

5 Le développement d'outils de prévision utiles à l'ingénieur lors de la conception nécessite d'améliorer **les approches systèmes qui tiennent compte de géométries réalistes, de la topologie de l'écoulement, d'injecteurs multiples, et des interactions conjuguées** entre l'acoustique, l'écoulement et la combustion.

