

# Modélisation et contrôle actif des instabilités aéroacoustiques en cavité sous écoulement affleurant

Ludovic CHATELLIER

5 Septembre 2002

*Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques*  
UMR CNRS 6609



Groupe de Recherche 1186 : Mécanique des fluides active

---

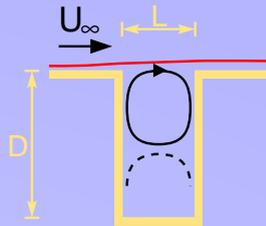
Aéroacoustique des cavités peu profondes à faible nombre de Mach

▶ Développement de systèmes de contrôle actif dédiés

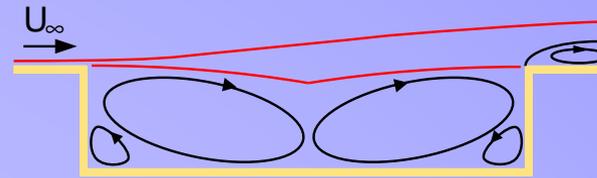
- Généralités sur l'écoulement de cavité
- Modèle de stabilité
- Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité
- Contrôle actif des modes d'instabilité
- Dynamique de la couche de mélange: avec et sans contrôle
- Conclusions
- Perspectives

# Généralités sur l'écoulement de cavité

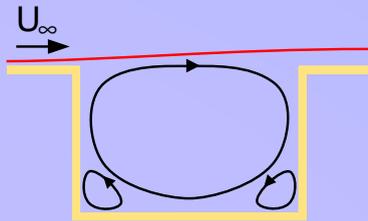
## Différentes structures d'écoulement



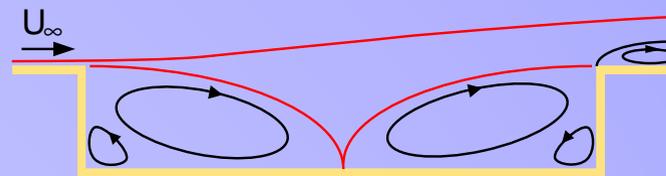
$L < D$   
Cavité profonde



$L > 3D$   
Cavité transitionnelle



$L \sim D$   
Cavité ouverte



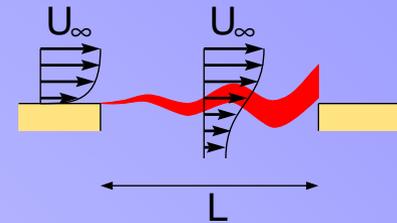
$L > 7D$   
Cavité fermée

# Généralités sur l'écoulement de cavité

## Comportement dynamique

Couche de mélange → *naturellement instable*

Bord aval → *forte contrainte cinématique*



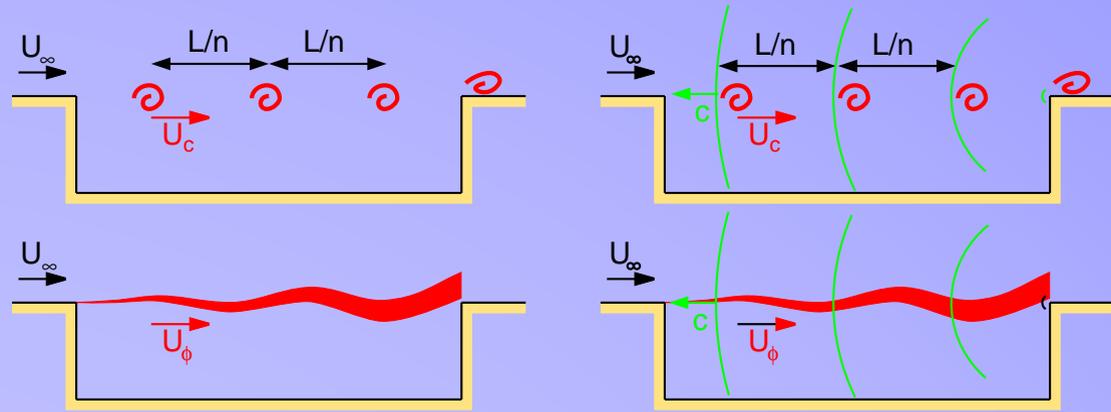
⇒ Configuration sujette à l'établissement de **modes d'oscillations auto-entretenues**

## Paramètres déterminants:

- ▶ Epaisseur relative de la couche limite incidente ( $\delta/D$ )
- ▶ Allongement longitudinal ( $L/D$ )
- ▶ Nombres de Reynolds  $Re_L$  et  $Re_\delta$
- ▶ Taux de turbulence en amont
- ▶ Nombre de Mach

# Généralités sur l'écoulement de cavité

## Plusieurs modes d'instabilité possibles



fluide-dynamique  
longitudinal

fluide-résonant  
longitudinal

fluide-résonant  
normal

fluide-élastique  
longitudinal

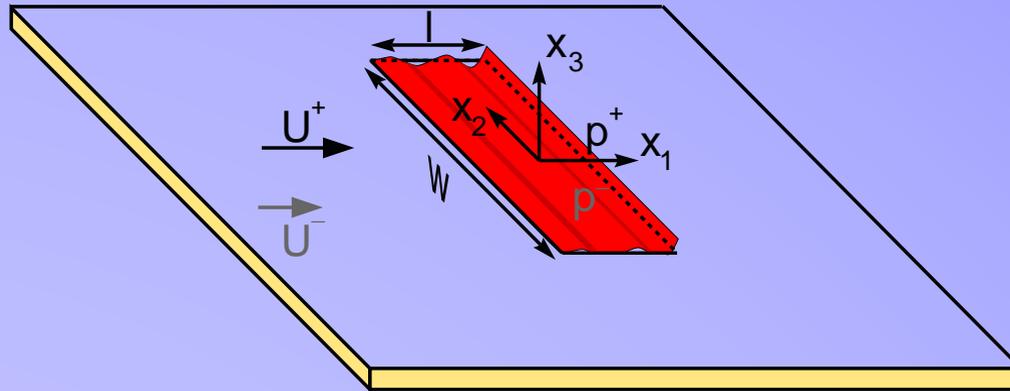
- Généralités sur l'écoulement de cavité
- **Modèle de stabilité**
- Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité
- Contrôle actif des modes d'instabilité
- Dynamique de la couche de mélange
- Conclusions
- Perspectives

## Développement du modèle de stabilité de Howe (1996)

- Déterministe, non empirique
- Influence de la géométrie
- ▶ Influence du nombre de Mach

## Représentation de la couche de mélange

frontière fluide séparant deux écoulements uniformes



## Nappe tourbillonnaire infiniment mince

- Définition :
- $h(x_1, x_2)$  tel que  $Dh/Dt = v_3$  pour  $|x_1| < l/2$  et  $|x_2| < w/2$
- Conditions aux limites :
- $h(x_1 = -l/2, x_2) = 0$
  - $v_3(x_1 = -l/2, x_2) = 0$
- Hypothèses :
- $h \ll (w, l)$
  - $h(x_1, x_2) \equiv h(x_1)$

## Mise en équations

Écoulement à faible nombre de Mach ( $M^2 \ll 1$ )



### **Equation de Helmholtz :**

$$\square \phi(\mathbf{x}, \omega) = (\Delta - k_0^2) \phi(\mathbf{x}, \omega) \equiv 0$$

$$\square G(\mathbf{x}|\mathbf{y}, \omega) = -\delta_{\mathbf{xy}}$$

## Conductivité de Rayleigh

J.W.S. Rayleigh (1896) - M.S. Howe (1996)

$$K_R = \frac{Q}{\phi^+ - \phi^-}$$

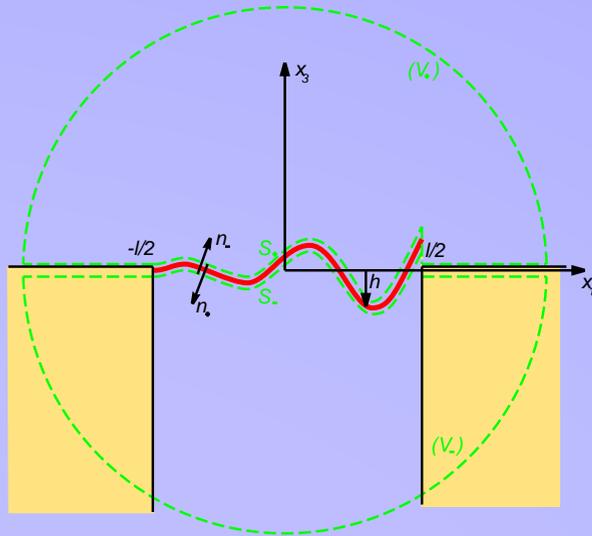
$$K_R = i\rho\omega \frac{Q}{p^+ - p^-}$$



Caractérise les propriétés d'absorption acoustique d'une interface en présence d'un écoulement

## Représentation des domaines supérieur et inférieur

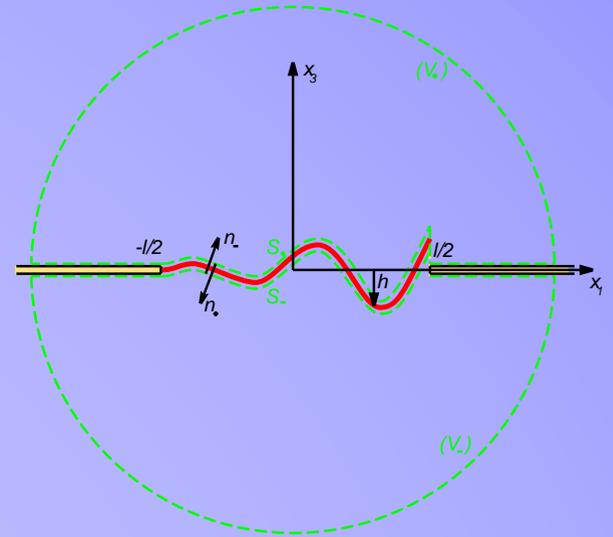
### Cavité profonde



$$G^+ \neq G^-$$

Formulation hydrodynamique (Howe)

### Ouverture rectangulaire simple



$$G^+ = G^-$$

Formulation hydrodynamique (Howe)

et

Formulation progressive

Equation intégrale de Fredholm de première espèce

$$1 + k_1 e^{i\sigma(1+i)\xi} + k_2 e^{i\sigma(1-i)\xi} = \int_{-1}^1 \zeta(\eta) \kappa(\sigma, M, w/l, \xi - \eta) d\eta$$

Influence des paramètres :  $\sigma = \pi \frac{fL}{U}$ ,  $w/l$ ,  $M$

- Discrétisation et inversion numérique
- Respect des conditions aux limites

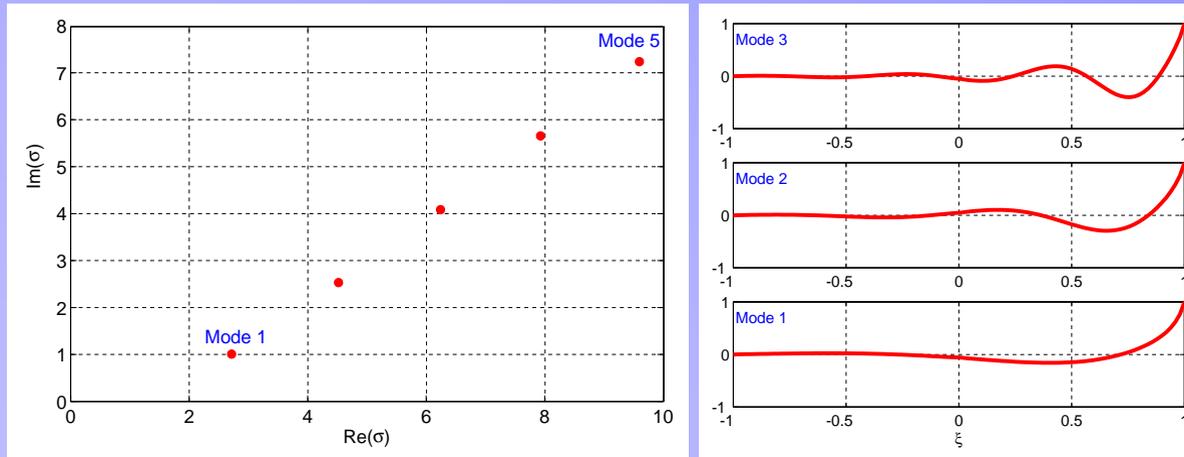
⇒ **Détermination de  $\zeta$  à  $h$**

⇒ **Calcul de la conductivité de Rayleigh** :  $K_R = \pi \frac{w}{2} \int_{-1}^1 \zeta(\eta) d\eta$

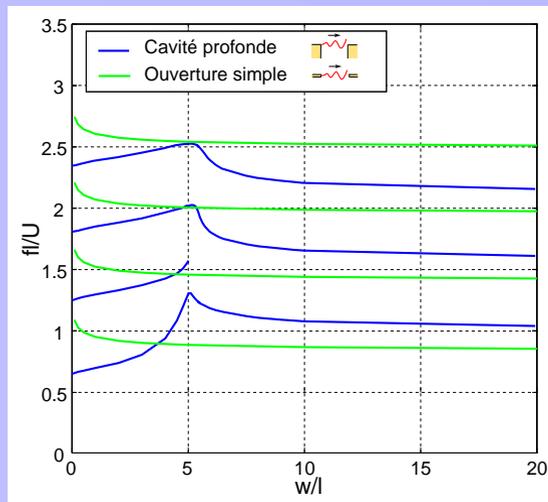
- Recherche itérative des pôles de  $K_R$   
(introduction de *fréquences complexes*)

⇒ **Estimation de la fréquence des modes d'instabilité**

## Distribution des modes d'instabilité

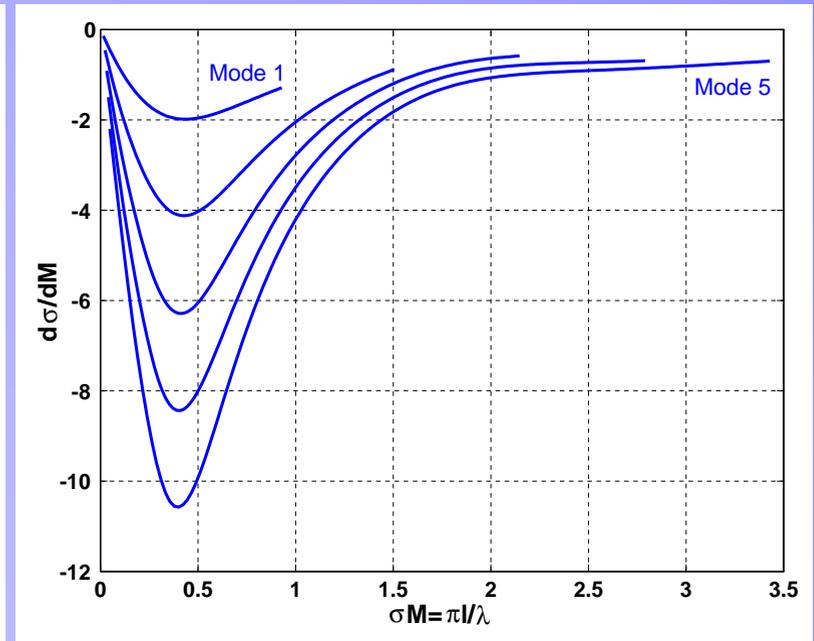
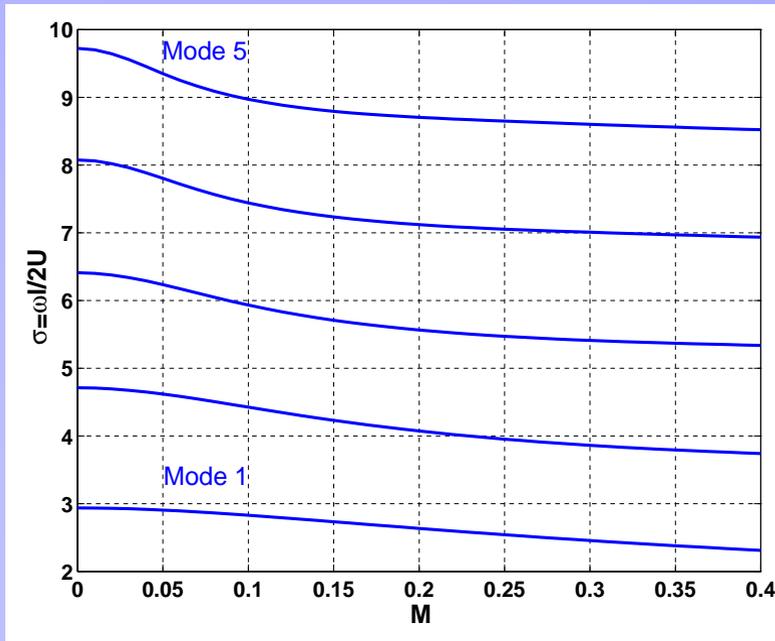


Ouverture rectangulaire simple -  $w/l=5$ ,  $M \rightarrow 0$



- Modes distribués dans le premier quadrant
- Nappe tourbillonnaire animée par une onde convective
- Dépendance à  $w/l$ : fonction de la représentation choisie

## Effet du nombre de Mach



Ouverture rectangulaire simple -  $w/l=1$

- Influence sensible du nombre de Mach pour les faibles allongements
- Point d'inflexion lié au nombre d'onde adimensionné  $\sigma M$
- ▶ Relation forte entre le convectif et l'acoustique
- ▶ Intérêt de la formulation progressive

# Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité

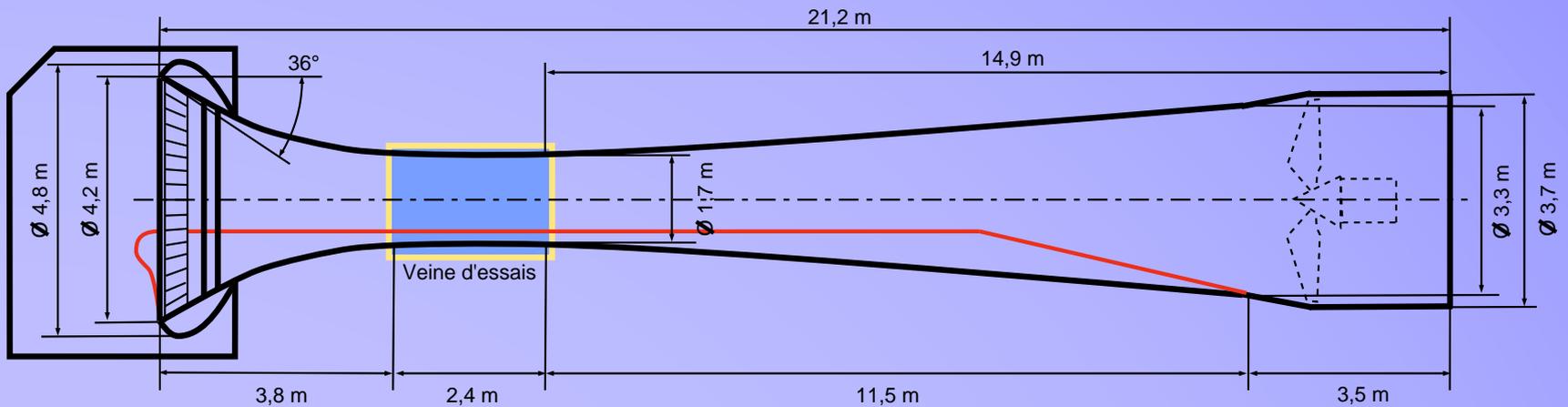
- Généralités sur l'écoulement de cavité
- Modèle de stabilité
- Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité
- Contrôle actif des modes d'instabilité
- Dynamique de la couche de mélange
- Conclusions
- Perspectives

## Mesures de fluctuations de pression pariétale

- Signature des émergences aéroacoustiques
  - Couplages *fluide-résonants*
  - Influence de la géométrie
- ▶ Pertinence du modèle de stabilité

# Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité

## Soufflerie Nieuport

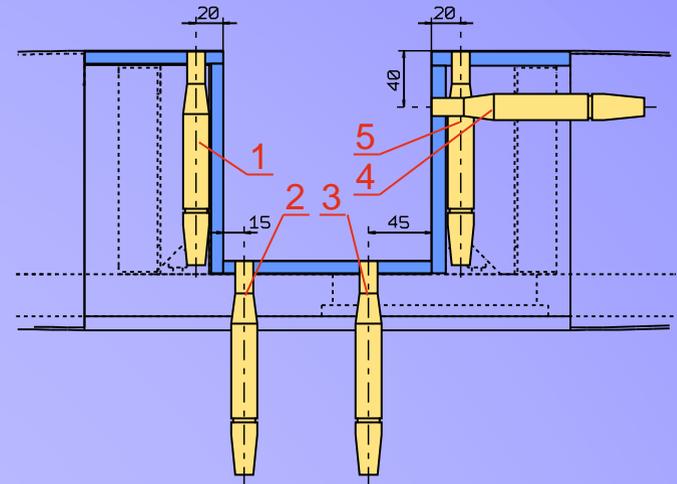
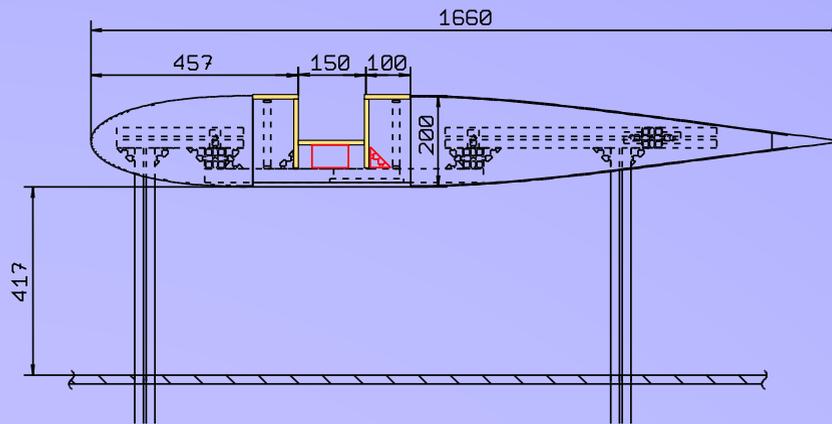


Vitesse max. : 31 m/s (37 m/s avec maquette)

Taux de turbulence : 2%

# Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité

## Maquette instrumentée



Microphones 2 et 3 : Acoustique interne

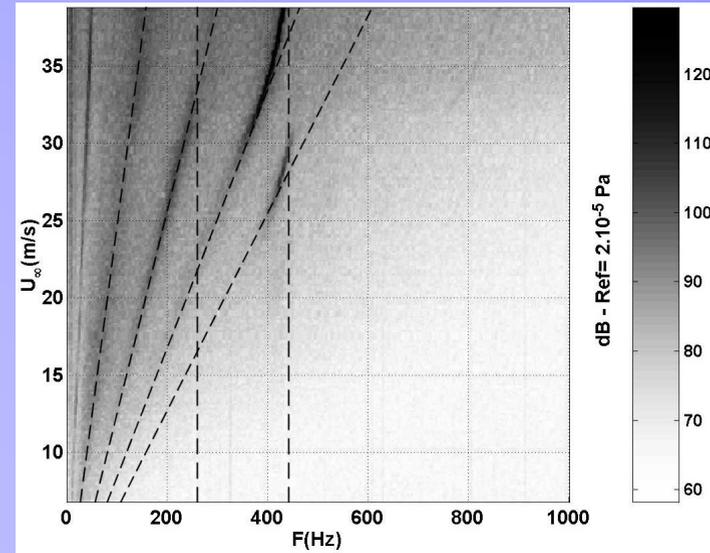
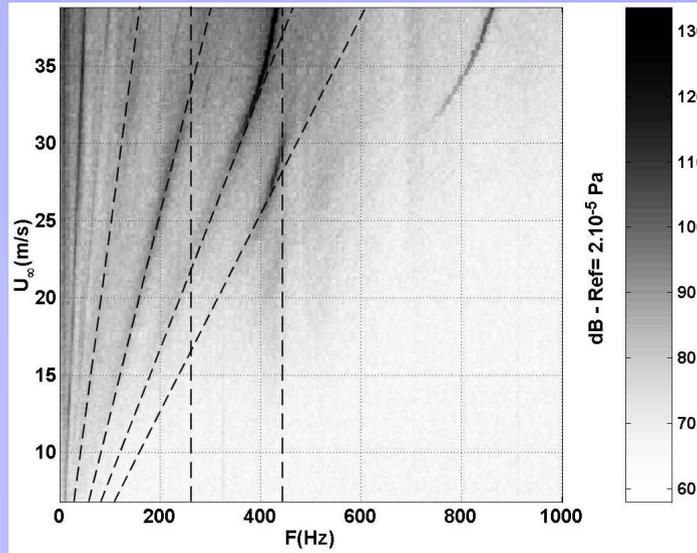
Microphone 4 : Interaction fluide-structure

Microphones 1 et 5 : Effets convectifs

Couche limite turbulente:  $\delta = 10$  mm à 12 mm

# Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité

## Signature des émergences aéroacoustiques



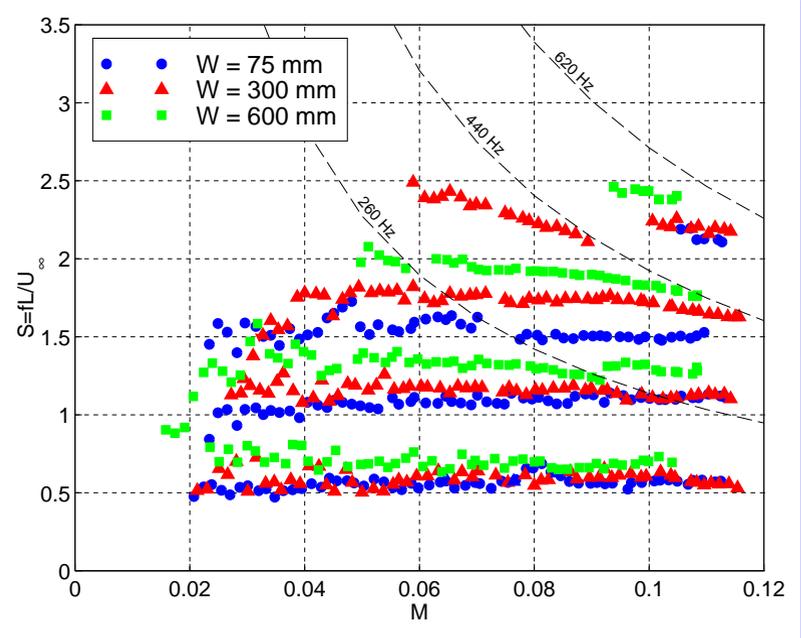
Microphone 2 (fond de cavité)  
Microphone 4 (bord aval)  
L=150 mm, D=150 mm, W=150 mm

- ▶ Modes hydrodynamiques à nombre de Strouhal quasi constant
- ▶ Apparition de couplages fluide-résonants normaux

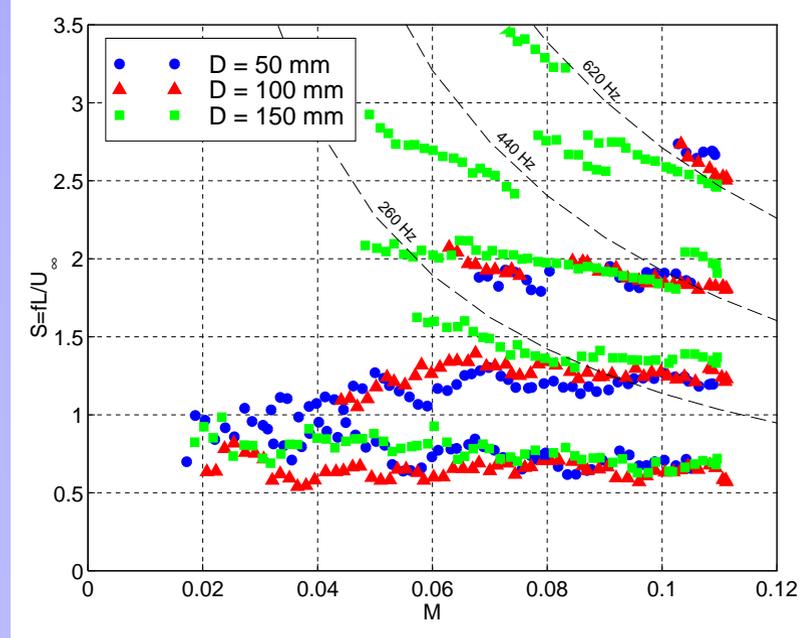
# Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité

## Distribution des modes d'instabilité

Influence de l'envergure (L=D=150 mm)



Influence de la profondeur (L=150 mm, W=780 mm)



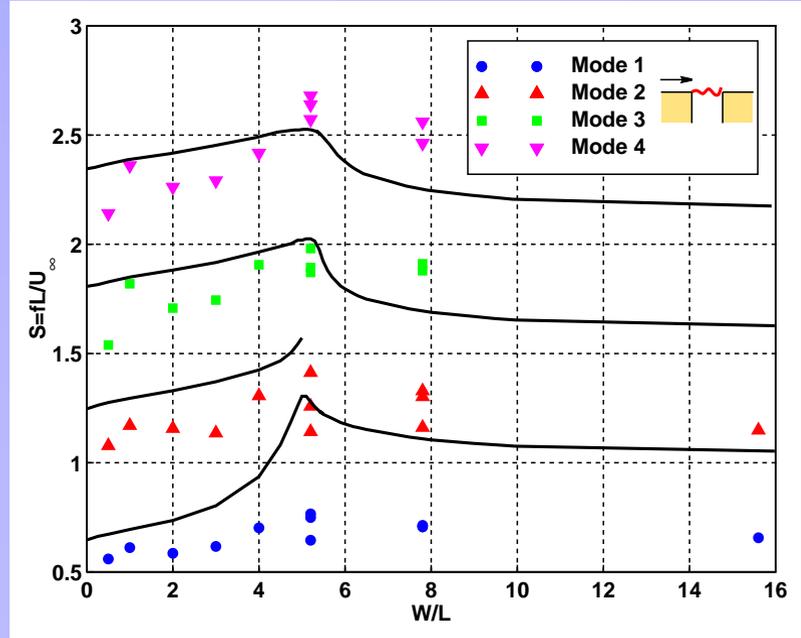
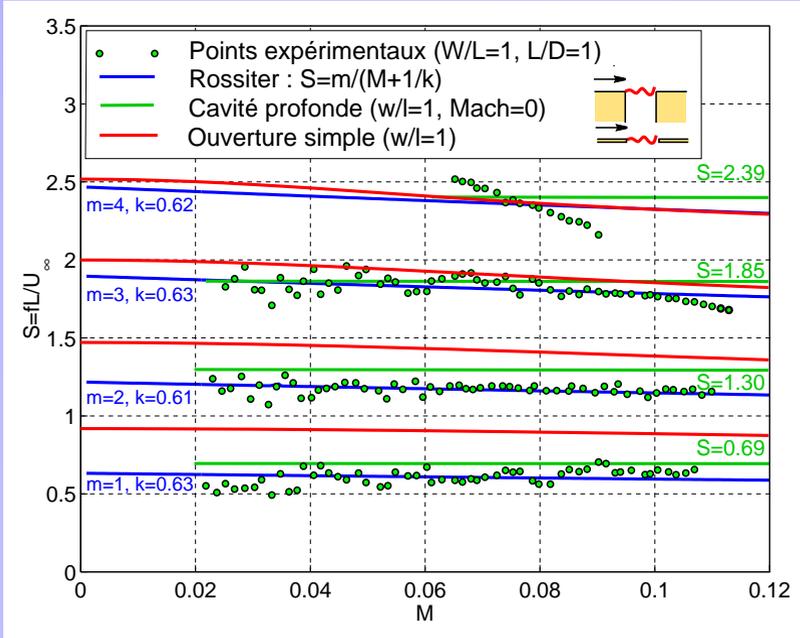
1 paramètre principal → S  
M  
3 paramètres secondaires → W/L  
L/D

# Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité

## Pertinence du modèle de stabilité

Effet du nombre de Mach

Effet de l'allongement longitudinal



Validation partielle :

- Cavité profonde →  $W/L$
- Ouverture simple →  $M$

# Contrôle actif des modes d'instabilité

- Généralités sur l'écoulement de cavité
- Modèle de stabilité
- Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité
- Contrôle actif des modes d'instabilité
- Dynamique de la couche de mélange
- Conclusions
- Perspectives

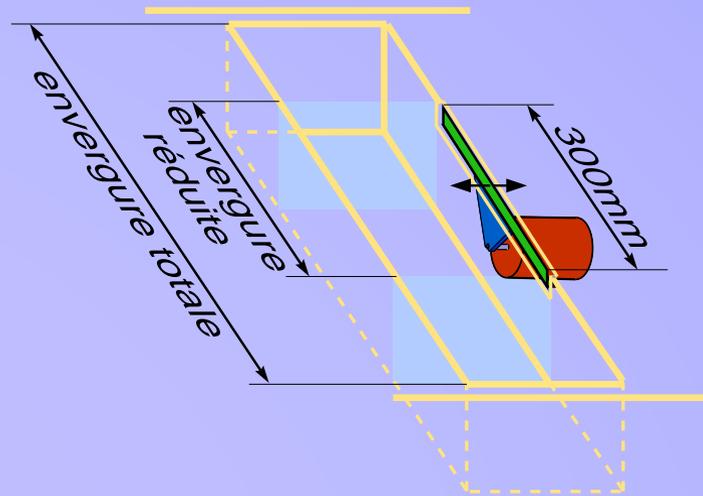
## Action sur l'interaction fluide-structure

- Modification des conditions aux limites
  - Recherche du couplage *fluide-élastique*
- ▶ Amplification / Atténuation

# Contrôle actif des modes d'instabilité

## Contrôle depuis le bord aval

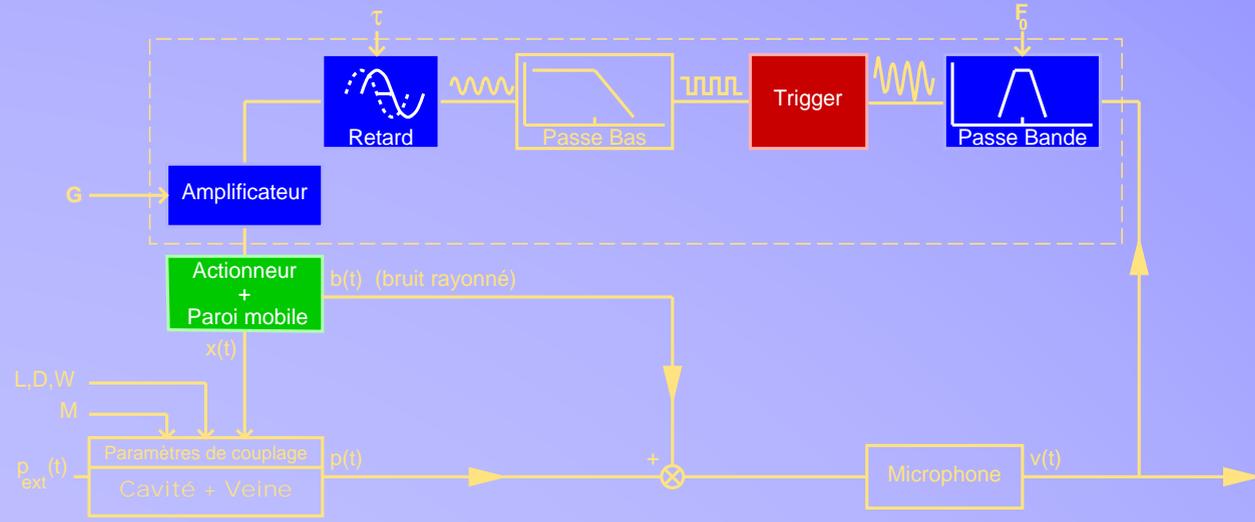
- Objectifs** : amplifier/atténuer les oscillations de la couche de mélange
- Méthode** : couplage *fluide-élastique*  
déphasage bord aval/onde convective
- Actionneur** : lame rigide montée sur un vibreur électromagnétique
- Commande** : suivi de fréquence  
ajustement des phase et amplitude



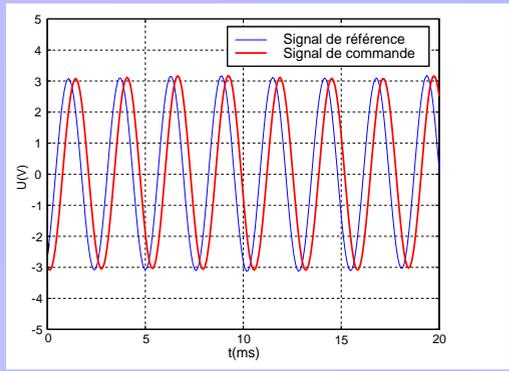
**Contrainte expérimentale** : existence des couplages *fluide-résonants*

# Contrôle actif des modes d'instabilité

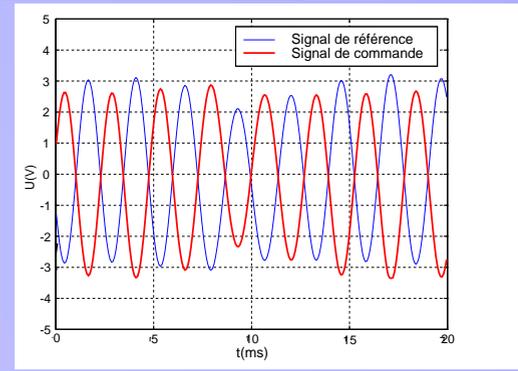
## Circuit de commande



## Ajustement du signal de commande



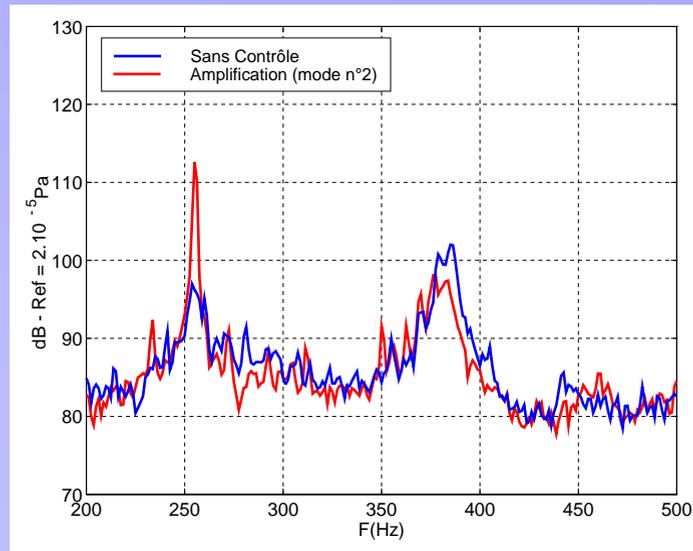
Amplification



Atténuation

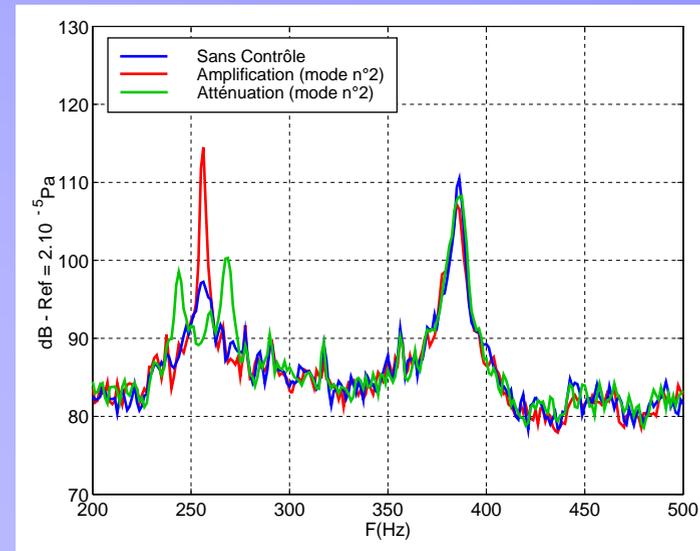
# Contrôle actif des modes d'instabilité

## Application au second mode



$U_\infty = 29,8$  m/s : pas de couplage

Régime d'apparition du couplage *fluide-résonant* ( $W/L=5,2$ ,  $L/D=1$ )



$U_\infty = 30,1$  m/s : couplage faible

**Amplification** : initiation d'un couplage *fluide-élastique*

► déclenchement du couplage *fluide-résonant*

**Atténuation** : couplage *fluide-élastique* en déphasage perpétuel

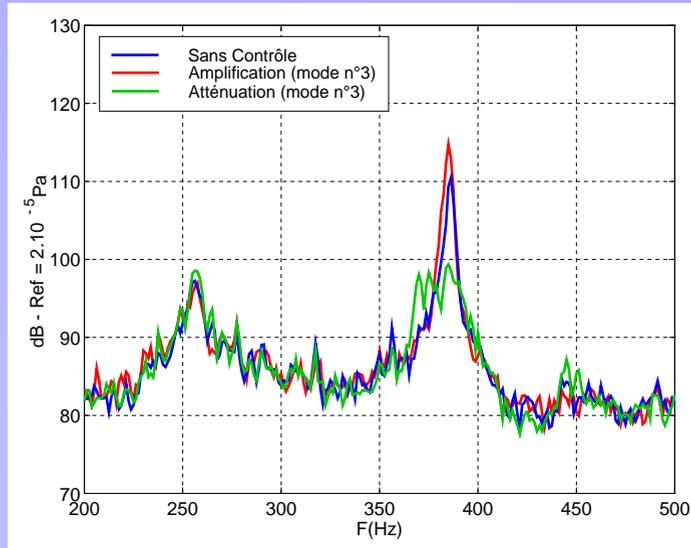
déplacement de la fréquence des oscillations

altération du signal de référence

Phénomène d'hysteresis dans les deux cas: seuil contrôle inopérant / vibreur quasi-saturé

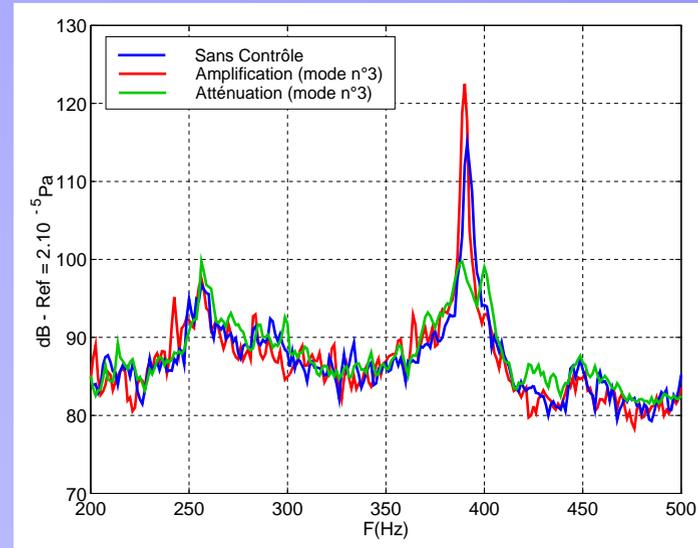
# Contrôle actif des modes d'instabilité

## Application au troisième mode



$U_\infty = 30,1$  m/s : couplage faible

Régime d'intensification du couplage *fluide-résonant* ( $W/L=5,2$ ,  $L/D=1$ )



$U_\infty = 31$  m/s : couplage fort

**Amplification :** facilitée par le couplage *fluide-résonant*

saturation de l'actionneur

**Atténuation :** signal de référence stable

suivi de l'éventuel déplacement en fréquence

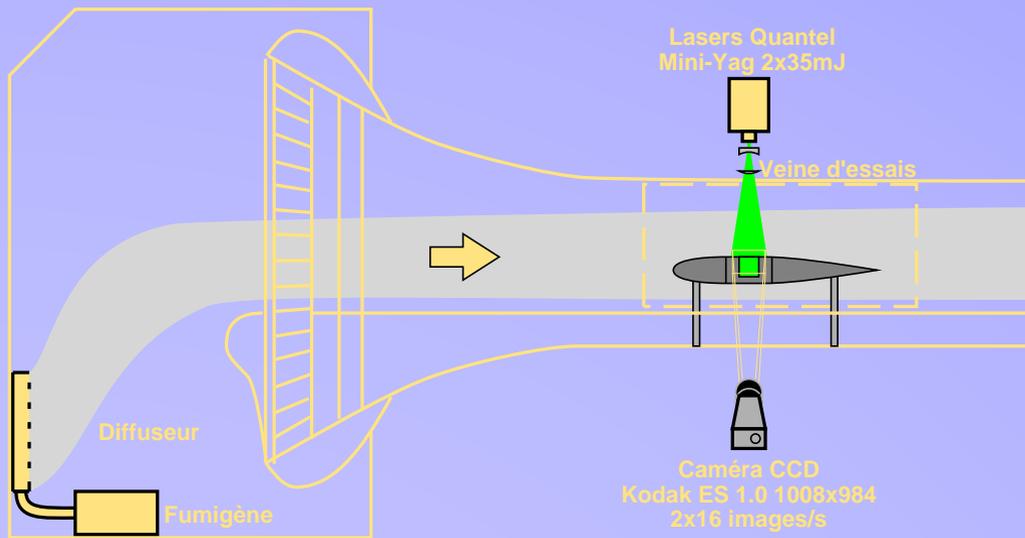
► Atténuation sur une bande élargie

- Généralités sur l'écoulement de cavité
- Modèle de stabilité
- Caractérisation de l'aéroacoustique de la cavité
- Contrôle actif des modes d'instabilité
- **Dynamique de la couche de mélange**
- Conclusions
- Perspectives

## Synchronisation d'un système de PIV

- Suivi des modes d'instabilité
  - Identification des oscillations hydrodynamiques
  - Caractérisation de l'onde convective
- 
- ▶ Validation du modèle
  - ▶ Qualité du contrôle

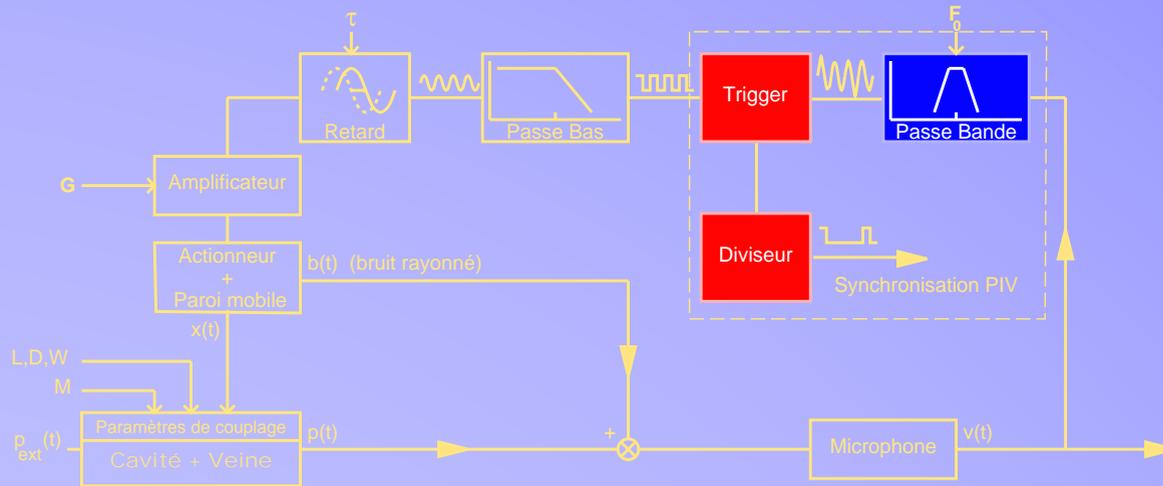
## Vélocimétrie par images de particules



- Mesure sur un domaine étendu ( $\simeq 20 \text{ cm} \times 19 \text{ cm}$ )
- Brouillard de particules ( $5 \mu\text{m}$  max.)
  - ▶ Densité importante
  - ▶ Laser Speckle Velocimetry (LSV)

# Dynamique de la couche de mélange

## Circuit de synchronisation



Suivi des modes 2 et 3: 10 instants équirépartis par période

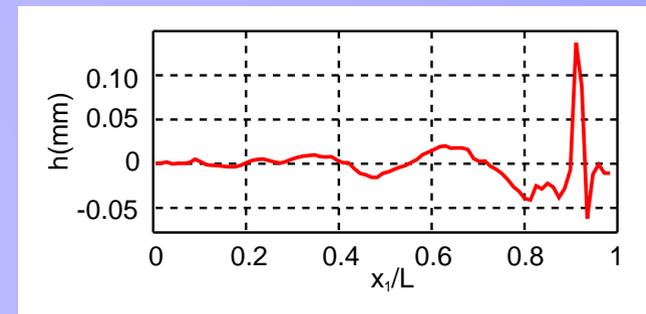
Reconstitution et identification des oscillations de la couche de mélange

Déplacement de l'interface fluide :

$$v_3(x_1, t) \simeq \frac{\partial}{\partial t} h(x_1, t) + v_1(x_1, t) \frac{\partial}{\partial x_1} h(x_1, t)$$

⇒ Construction et inversion d'un système linéaire

$$v_3 = D_r \cdot \mathbf{h} + \text{Diag}(v_1) \cdot D_x \cdot \mathbf{h} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{h}$$



Mode 3:  $U_\infty = 30,1 \text{ m/s}$  ( $W/L = 5,2$ ,  $L/D = 1$ )

# Dynamique de la couche de mélange

## Paramétrage des modes hydrodynamiques

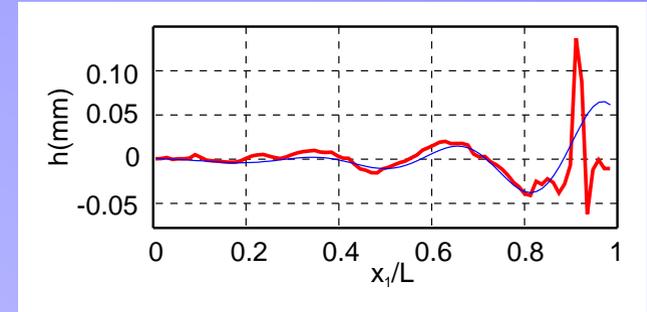
Onde convective donnée par modèle de stabilité:

$$h(x_1) \propto \zeta(\xi) e^{-2i\sigma U/l}$$

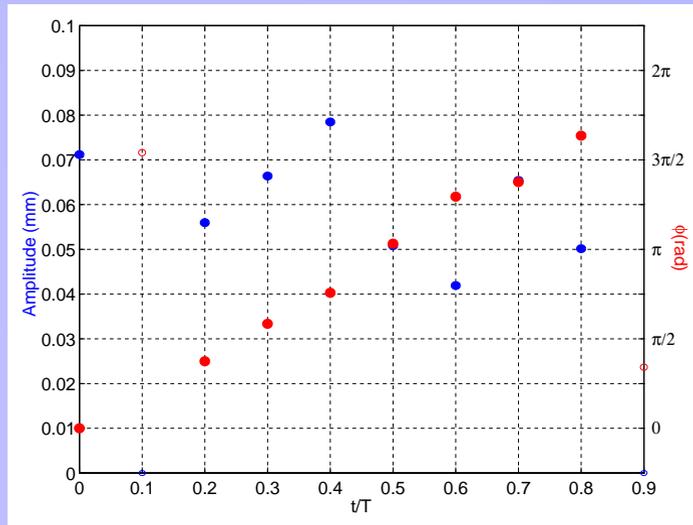
Transposition aux données expérimentales:

$$h(x_1) = A \operatorname{Re} \left( \tilde{\zeta}(x_1) e^{-i(2\operatorname{Re}(\sigma)U/l)t + \phi_0} \right)$$

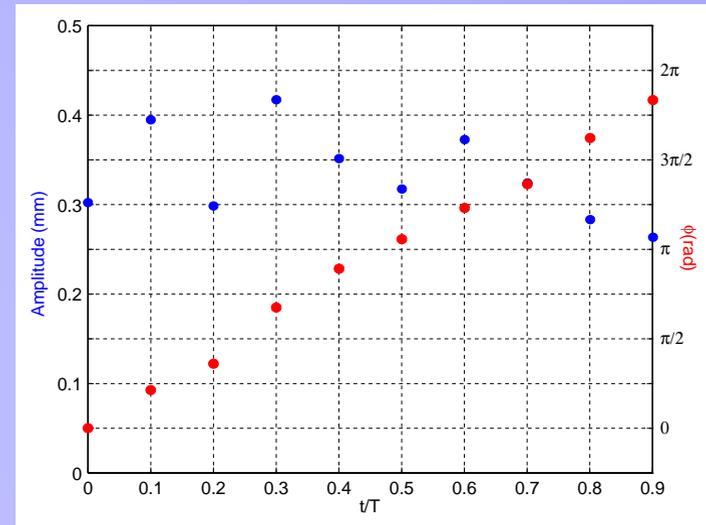
- $\tilde{\zeta} \propto \zeta$  avec  $|\tilde{\zeta}|_{\max} = 1$
- $\phi_0 \in [0, 2\pi]$



Mode 3:  $U_\infty=30,1$  m/s ( $W/L=5,2$ ,  $L/D=1$ )

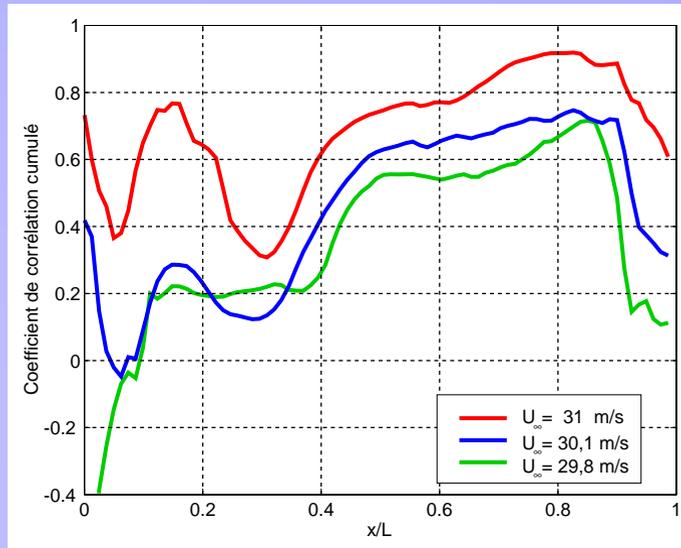


Mode 3:  $U_\infty=30,1$  m/s ( $W/L=5,2$ ,  $L/D=1$ )

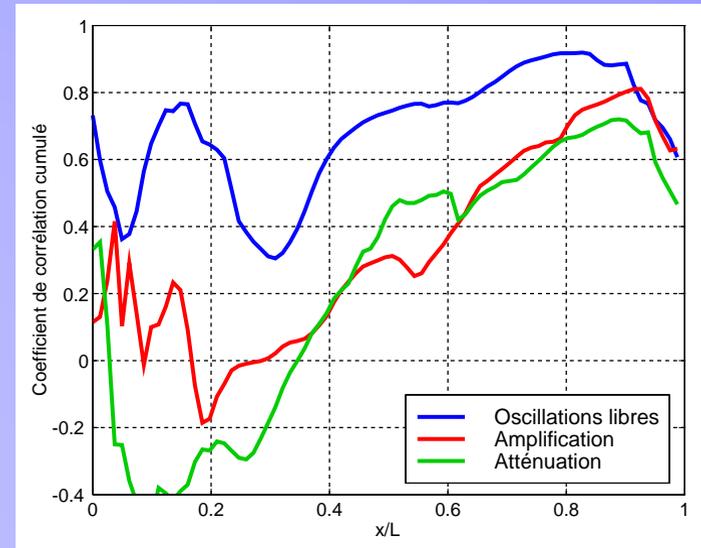


Mode 3:  $U_\infty=31$  m/s ( $W/L=5,2$ ,  $L/D=1$ )

## Corrélation entre théorie et mesure



Mode 3 - oscillations libres

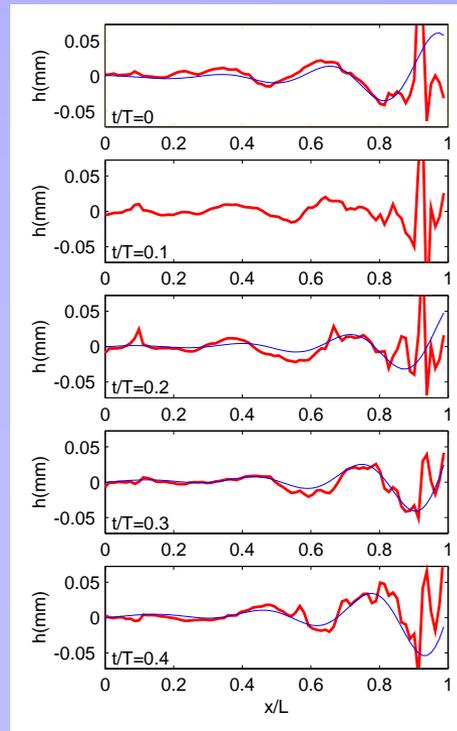


Mode 3 - oscillations contrôlées

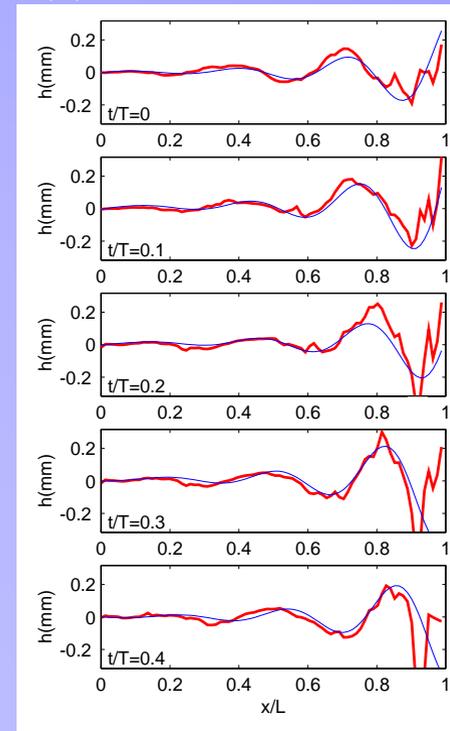
- Etendue de la singularité au niveau du bord aval
- Localisation de zones altérées

## Régime d'intensification du couplage *fluide-résonant*

Mode 3:  $W/L=5,2$ ,  $L/D=1$



$U_\infty=30,1$  m/s, couplage faible



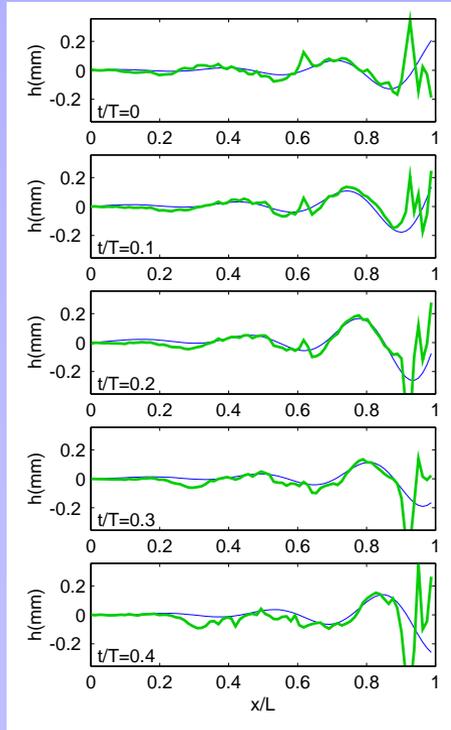
$U_\infty=31$  m/s, couplage fort

- Modèle de stabilité  $\Leftrightarrow$  outil de caractérisation de l'onde convective
- Quantifie l'amplification des oscillations due au couplage (ici rapport 4)

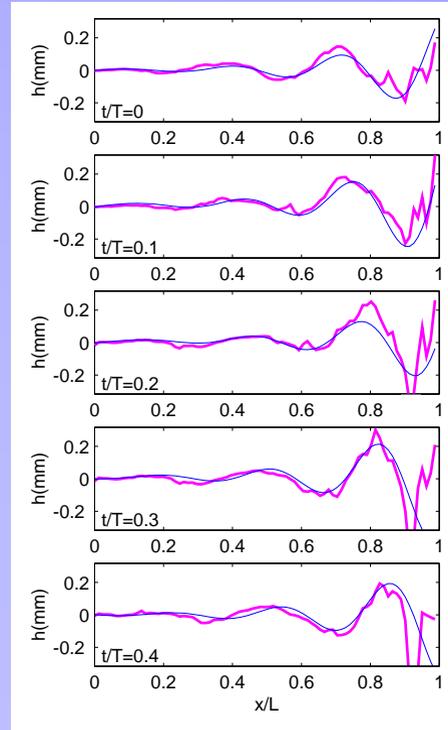
# Dynamique de la couche de mélange

## Caractérisation des performances du contrôle

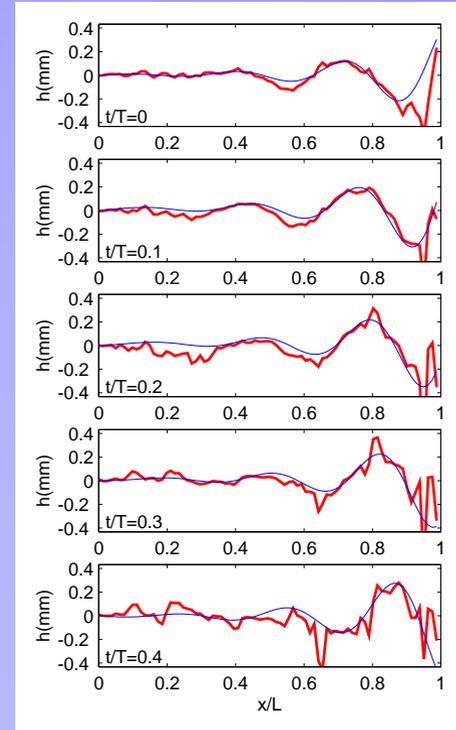
Mode 3:  $U_\infty=31$  m/s,  $W/L=5,2$ ,  $L/D=1$  - Couplage *fluide-résonant* fort



Atténuation



Oscillations libres



Amplification

- Modulation sensible de l'amplitude des oscillations
- Dégradations locales de l'onde convective ( $x/L > 0.9$ ,  $x/L \simeq 0.6$ )
  - ▶ limite d'influence de l'actionneur
  - ▶ résurgence du mode naturel lors de l'atténuation

- Dispositif expérimental**
  - Adapté aux phénomènes recherchés
  - Géométrie modulable
- Physique de l'écoulement**
  - Modes hydrodynamiques en régime turbulent
  - Paramètres secondaires ( $M$ ,  $W/L$ ,  $L/D$ )
  - Sensible aux couplages fluide-résonants/élastiques
- Possibilités de contrôle**
  - Modulation basée sur le couplage fluide-élastique
  - Action localisée au lieu de l'interaction fluide-structure
- Modélisation**
  - Etude de stabilité d'une interface infiniment mince
  - Introduction d'un paramètre supplémentaire
  - Accord satisfaisant avec les résultats expérimentaux

- **Etude approfondie des paramètres secondaires**
  - Contourner les couplages fluide-résonants
  - Adapter l'instrumentation
- **Evolution du système de contrôle**
  - Géométrie/orientation/localisation de l'actionneur
  - Nature de l'actionneur
  - Adaptativité
  - Grandeurs de référence / de contrôle
- **Validation du modèle**
  - Expériences dédiées
- **Développement du modèle**
  - Cas de la cavité infiniment profonde
  - Cas du résonateur de profondeur finie
  - Application à d'autres types d'écoulement