



**HAL**  
open science

## Structures tourbillonnaires engendrées par l'interaction entre une couche limite laminaire et une cavité

Thierry M. Faure, Philippe Debesse, François Lusseyran, Pierre Gougat

### ► To cite this version:

Thierry M. Faure, Philippe Debesse, François Lusseyran, Pierre Gougat. Structures tourbillonnaires engendrées par l'interaction entre une couche limite laminaire et une cavité. Colloque FLUVISU 11, 2005, Ecully, France. hal-00091826

**HAL Id: hal-00091826**

**<https://hal.science/hal-00091826v1>**

Submitted on 7 Sep 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Structures tourbillonnaires engendrées par l'interaction entre une couche limite laminaire et une cavité

Th. M. Faure<sup>1,2</sup>, Ph. Debesse<sup>1,2</sup>, F. Lusseyran<sup>1</sup>, P. Gougat<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, Unité Propre de Recherche 3251, Centre National de la Recherche Scientifique, B.P. 133, 91403 Orsay Cedex, France.

<sup>2</sup> Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France.

## MOTS-CLEFS :

**Sujet principal :** *Couche de cisaillement*

**Fluide :** *Aérodynamique*

**Méthodes de mesure :** *Vélocimétrie par images de particules, Visualisation par émission de fumée, Vélocimétrie laser Doppler*

**RÉSUMÉ :** L'interaction entre une couche limite laminaire et une cavité ouverte est étudiée expérimentalement pour des nombres de Reynolds modérés. Les techniques mises en œuvre sont la vélocimétrie par images de particules (PIV), la vélocimétrie laser Doppler (LDV) et la visualisation dans deux plans parallèles éclairés avec des longueurs d'onde différentes afin de mettre en évidence les structures tridimensionnelles de l'écoulement. La dynamique d'une couche de cisaillement est ainsi présentée et l'analyse spectrale de l'évolution temporelle de la vitesse fait apparaître des modes caractéristiques. La représentation par spectrogramme permet d'identifier ces modes et de déterminer leur caractère intermittent.

## 1. Introduction

L'interaction entre un écoulement et une cavité est une configuration qui se rencontre dans des applications environnementales (écoulement d'air dans une rue bordée d'immeubles), aéronautiques (cavités de train d'atterrissage, cavités de stockage de bombes), ou concernant les véhicules terrestres (interaction entre l'écoulement et un ouvrant), ... configurations dans lesquelles la vitesse est assez faible. Ce type d'écoulement est principalement gouverné par le développement d'une couche de cisaillement (Rockwell & Naudascher, 1978). Cependant, la plupart des publications disponibles traitent d'écoulements compressibles à haute vitesse. L'objectif de cette étude est de présenter la dynamique d'un écoulement à nombre de Reynolds modéré résultant de l'interaction entre une couche limite laminaire et une cavité de rapport de forme (longueur sur hauteur) égal à 2.

## 2. Dispositif expérimental

### 2-1 Banc d'essais

Un ventilateur génère un écoulement qui est rendu homogène à travers un caisson de tranquillisation puis accéléré avant d'atteindre la veine d'expériences (Fig. 1). Celle-ci comporte une plaque plane munie d'un bord d'attaque elliptique, permettant de fixer l'origine de la couche limite qui s'y développe, suivie d'une cavité rectangulaire de 10 cm de longueur et de 5 cm de hauteur, l'envergure de la soufflerie est de 30 cm. Le nombre de Reynolds, déterminé sur la longueur de la cavité et la vitesse de l'écoulement extérieur  $U_e$ , varie entre 4000 et 22300.

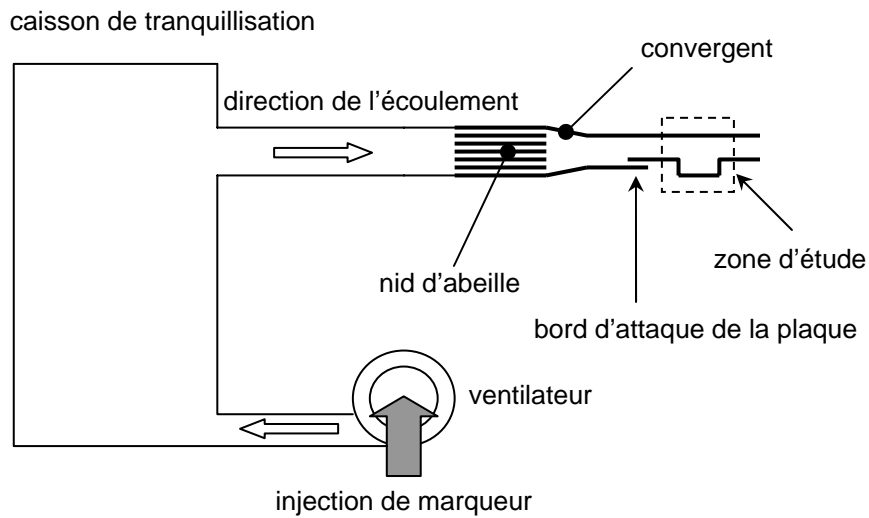


Fig. 1 Dispositif expérimental

## 2-2 Méthodes expérimentales

Pour les mesures PIV, l'éclairage est réalisé avec un laser Yag Quantel Twins Ultra, qui émet des impulsions lumineuses de 30 mJ d'une durée de 6 ns dans la longueur d'onde 532 nm (Fig. 2). Un ensemble optique situé en sortie de la tête d'émission génère une nappe laser qui est dirigée vers la zone d'étude au moyen d'un miroir plan. L'épaisseur de la nappe au-dessus de la cavité est d'environ 0,25 mm. Le système de prise de vue consiste en une caméra 8 bits de 768x484 pixels, Pulnix TM9700. La synchronisation entre l'émission laser et la caméra est réalisée à l'aide d'un boîtier à impulsions et d'un module de synchronisation Quantel DPS 01 qui permet de faire varier le retard entre deux impulsions. Les visualisations dans deux plans parallèles sont réalisées à l'aide des deux longueurs d'ondes bleue 488 nm et verte 514,5 nm d'un laser Ar<sup>++</sup> (Fig. 3). Deux caméras sont utilisées dans ce cas, chacune étant munie d'un filtre bleu ou vert, ce qui permet l'enregistrement des visualisations dans l'un et l'autre des plans. Deux types de particules sont utilisés :

- des gouttelettes de di-n-octyle phtalate vaporisées par un nébuliseur à air comprimé, d'une taille moyenne de 1  $\mu\text{m}$  afin d'obtenir un ensemencement uniforme dans toute la veine d'essais avec des particules de taille bien définie, pour les mesures LDV et PIV,
- de la fumée de spectacle à faible densité avec un générateur Starway Puffer One pour obtenir des visualisations des structures dynamiques présentes dans l'écoulement.

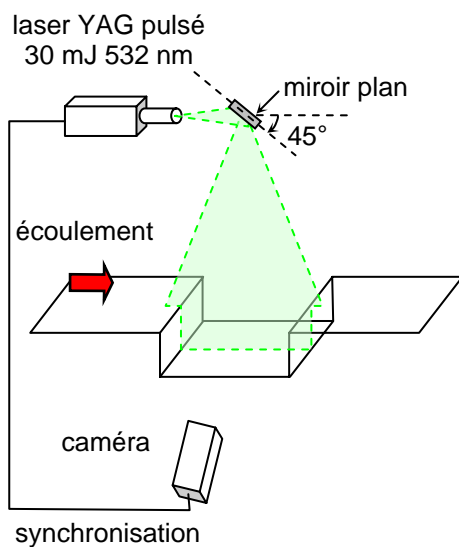


Fig. 2 Dispositif de mesure PIV

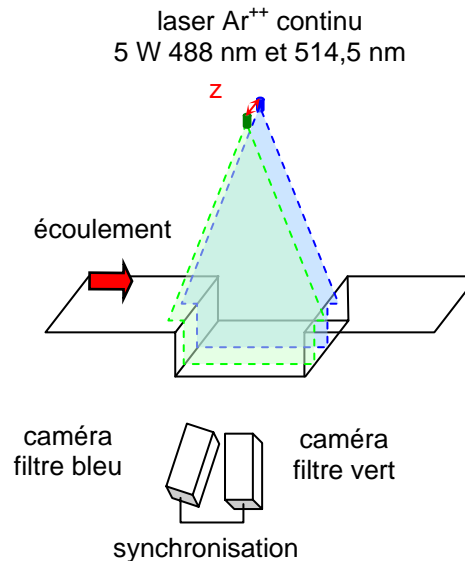


Fig. 3 Dispositif de visualisation spatiale

### 3. Resultats et discussion

#### 3-1 Structures dynamiques de l'écoulement

On observe (figure 4) la couche de cisaillement créée par l'interaction entre la couche limite laminaire amont et la cavité. Contrairement aux écoulements à grande vitesse, il n'y a pas de génération d'une allée tourbillonnaire dans la couche de cisaillement dès le début de la cavité (Forestier *et al.*, 2003), mais cette couche de cisaillement présente plutôt des oscillations d'amplitude croissant exponentiellement selon la direction de l'écoulement et interagit avec le bord aval de la cavité. Ce battement a pour conséquence l'entraînement de l'écoulement extérieur dans la cavité et la création d'un tourbillon principal dans la partie aval de celle-ci. Ces observations qualitatives sont confortées par le champ de vitesse (figure 5), obtenu par un algorithme PIV de flot optique utilisant la programmation dynamique (Quénot, 1992, Quénot *et al.*, 1998).

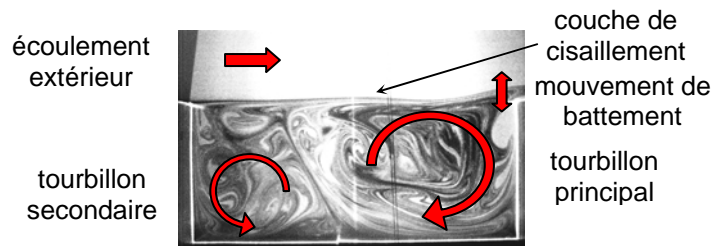


Fig. 4 Structures dynamiques à l'intérieur de la cavité pour  $U_e = 0,85 \text{ m.s}^{-1}$

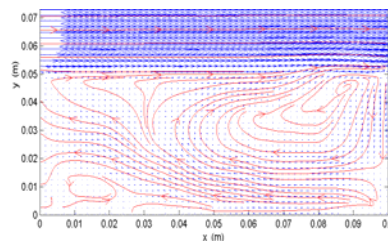


Fig. 5 Champ PIV instantané pour  $U_e = 0,85 \text{ m.s}^{-1}$

Les visualisations synchronisées dans les deux plans parallèles séparés d'une distance  $z$  mettent en évidence les structures de l'écoulement qui gardent une cohérence pour  $z = 5 \text{ mm}$  (figures 6, 7 et 8) mais qui présentent un aspect tridimensionnel pour des distances supérieures.

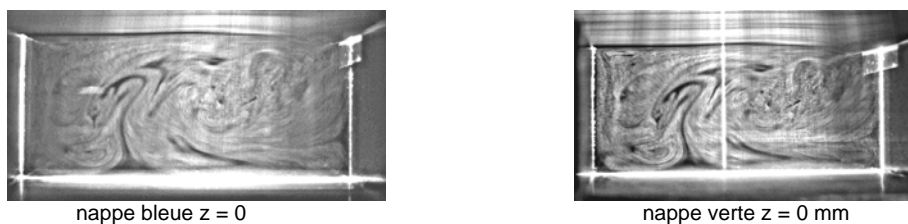


Fig. 6 Visualisation à un même instant de deux plans distants de 0 mm pour  $U_e = 1 \text{ m.s}^{-1}$

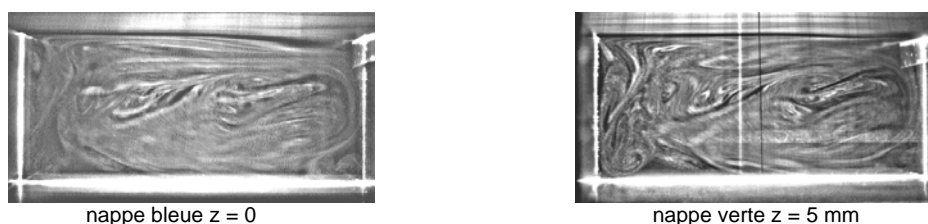


Fig. 7 Visualisation à un même instant de deux plans distants de 5 mm pour  $U_e = 1 \text{ m.s}^{-1}$



Fig. 8 Visualisation à un même instant de deux plans distants de 10 mm pour  $U_e = 1 \text{ m.s}^{-1}$

La configuration étudiée correspond à une cavité peu profonde, où des ondes longitudinales se développent. D'après Mendoza & Ahuja (1995) pour un rapport longueur sur largeur inférieur à 1, même si l'écoulement à une structure tridimensionnelle, il présente des ondes de cisaillement bidimensionnelles. Le critère de Sarohia (1977) permet de déterminer la vitesse en dessous de laquelle il n'y a pas d'oscillation au-dessus de la cavité et donne une valeur de  $1 \text{ m.s}^{-1}$  pour cette étude. Une autre visualisation de l'écoulement à l'intérieur de la cavité est présentée figure 9. Pour cet instant particulier, la couche de cisaillement présente un comportement instationnaire avec deux structures correspondant à l'injection de fumée de l'écoulement extérieur dans la cavité et à l'éjection d'écoulement à partir de la cavité. La première de ces deux structures passe au-dessus du bord aval de la cavité avec une extension verticale de 15 mm, ce qui représente un tiers de la profondeur de la cavité. Ces ondes sont associées à une vitesse inférieure à la vitesse de l'écoulement extérieur, et influencent l'écoulement qui se développe en aval de la cavité. La principale différence avec les observations pour des vitesses plus élevées où apparaissent des effets de compressibilité (Forestier *et al.*, 2003) est le fait que les oscillations ne semblent pas apparaître à partir du bord amont de la cavité mais à partir d'une position située à approximativement un tiers de la largeur de la cavité. L'autre différence notable est que ces structures ondulatoires ne sont pas présentes à tous les instants dans la couche de cisaillement.

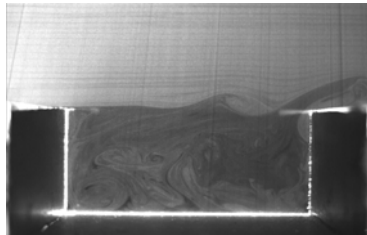


Fig. 9 Visualisation par le laser Yag de l'écoulement dans la cavité pour  $U_e = 1,8 \text{ m.s}^{-1}$

Le champ de vitesse à l'intérieur et au-dessus de la cavité est présenté sur la figure 10 pour quatre instants successifs avec un intervalle de temps de  $\Delta t = 33 \text{ ms}$ . Seul un vecteur vitesse sur 10 est représenté afin de ne pas surcharger la figure, car l'algorithme de PIV par flot optique avec programmation dynamique fournit un champ très dense d'un vecteur par pixel de l'image. Aucun de ces champs ne correspond à la visualisation de la figure 9, car les images originales pour le calcul du champ de vitesse sont obtenues avec un ensemencement de gouttelettes d'huile et non pas de fumée, il y a ainsi deux séries temporelles d'images enregistrées avec les mêmes conditions d'écoulement. Néanmoins, les oscillations de deux ondes identifiées sur le premier champ de vecteur sont similaires à ce que l'on observe sur la figure 9. L'écoulement extérieur est caractérisé par des vitesses 10 fois supérieures à celles observées à l'intérieur de la cavité, et par un profil de couche limite laminaire en début de cavité ( $x = 0 \text{ m}$ ,  $y > 0,05 \text{ m}$ ) d'épaisseur 8 mm. Comme précédemment observé sur les visualisations, l'écoulement dans la cavité est principalement marqué par un tourbillon principal instationnaire qui tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et qui se développe dans la seconde moitié de la cavité. Un second tourbillon plus petit tourne dans le sens opposé et se développe dans le tiers amont de la cavité. Pour ces instants particuliers, la couche de cisaillement est fortement dépendante du temps près du bord aval, avec des vitesses alternativement dirigées vers l'intérieur ou l'extérieur de la cavité. L'interaction de la couche de cisaillement avec la paroi aval est le phénomène source de génération du tourbillon principal.

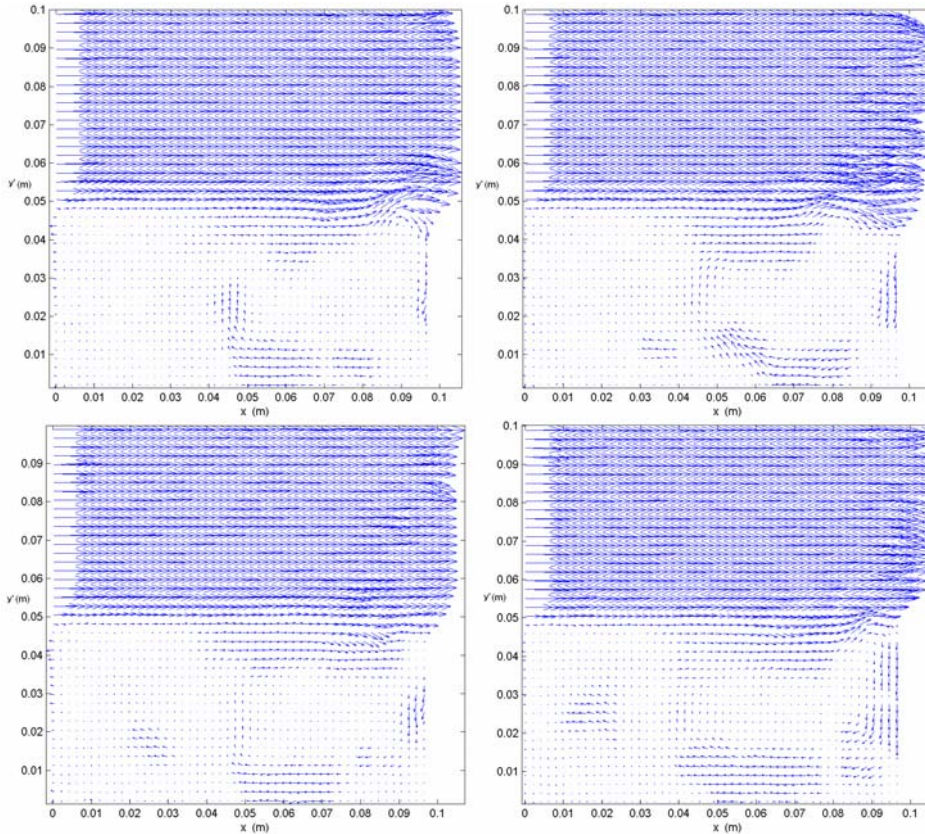


Fig. 10 Mesures PIV à quatre instants successifs ( $\Delta t = 33 \text{ ms}$ ) pour  $U_e = 1,8 \text{ m.s}^{-1}$

### 3-2 Identification de modes spatiaux

Des mesures LDV résolues en temps en un point situé 15 mm derrière le bord aval de la cavité et 15 mm au-dessus de la paroi permettent de caractériser l'évolution du spectre de puissance de la vitesse axiale  $U_x$  en fonction de la vitesse de l'écoulement incident  $U_e$  (figure 11). Ces mesures font apparaître différents modes caractéristiques du cisaillement, certains pouvant être présents simultanément. On remarque également sur cette figure l'harmonique du mode 2 qui évolue, selon la vitesse  $U_e$ , entre 20 et 40 Hz. Malgré l'absence d'une allée tourbillonnaire, la comparaison avec la formule de Rossiter (1964), établie pour des vitesses bien supérieures, montre également un bon accord avec les fréquences mesurées.

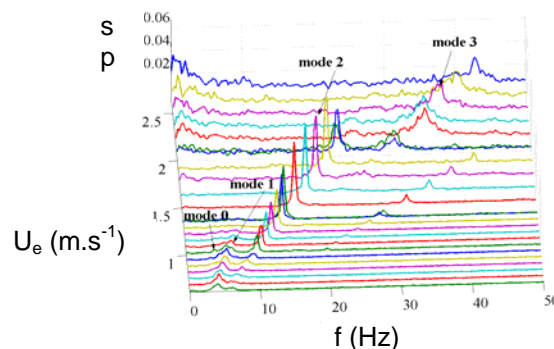


Fig. 11 Modes spatiaux de la couche de cisaillement

L'évolution de l'amplitude du spectre de puissance pour chacun des trois modes identifiés en fonction de la vitesse extérieure est présentée figure 12. Pour les faibles vitesses, le mode 1 est le plus énergétique mais décroît lorsque le mode 2 apparaît. Pour des vitesses comprises entre  $1,4$  et  $2 \text{ m.s}^{-1}$ , le mode 2 est le seul mode émergent avec une amplitude presque constante. Il décroît à son tour à l'apparition du mode 3 et disparaît pour  $U_e = 2,3 \text{ m.s}^{-1}$ . Pour les vitesses supérieures, le mode 3 est le seul à persister avec une amplitude presque constante. Un autre moyen d'identifier les modes est le spectrogramme qui est une représentation temps–fréquence réalisée à partir d'une transformée de



Fourier discrète autour d'un instant. Il permet ainsi d'observer l'évolution temporelle du contenu en fréquence du signal de vitesse axiale (figure 13), l'échelle de couleur correspondant à la racine carrée de l'amplitude de la transformée de Fourier discrète. Les modes 2 et 3 du cisaillement apparaissent clairement pour  $U_e = 1,8 \text{ m.s}^{-1}$ . On constate l'intermittence de ceux-ci, avec la possibilité de la présence où de l'absence simultanée des deux modes. Ainsi pour cette vitesse le mode 2 est le plus présent. Par contre pour  $U_e = 2,3 \text{ m.s}^{-1}$  le rapport s'inverse avec un mode 3 plus présent que le mode 2 (figure 14).

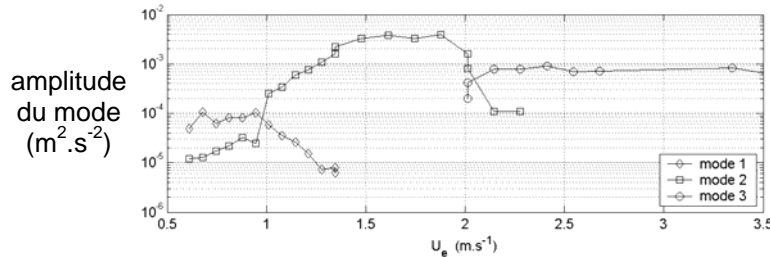


Fig. 12 Amplitude des modes en fonction de la vitesse de l'écoulement extérieur

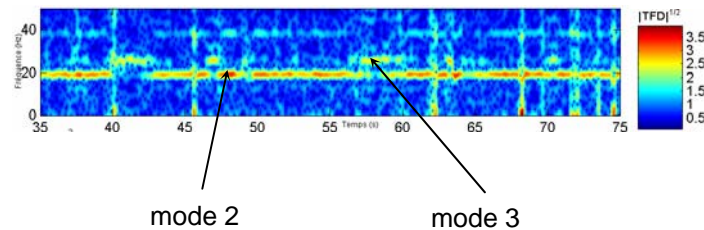


Fig. 13 Spectrogramme de la couche de cisaillement pour  $U_e = 1,8 \text{ m.s}^{-1}$

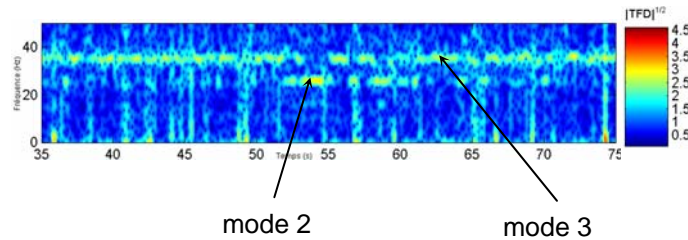


Fig. 14 Spectrogramme de la couche de cisaillement pour  $U_e = 2,3 \text{ m.s}^{-1}$

Afin de quantifier la présence d'un mode, on définit une fonction d'intermittence  $\gamma$  comme le rapport entre le temps de présence du mode considéré et la durée totale du signal enregistré. Il est alors nécessaire de trouver un critère de seuil pour l'existence ou l'absence du mode, qui est choisi comme étant la valeur moyenne entre le maximum et le minimum de l'amplitude spectrale sur l'ensemble du spectrogramme :

$$\frac{1}{2} \left[ \max_{\forall t, f} \sqrt{\left| \text{FFT} \left( \frac{U_x - \bar{U}_x}{U_e} \right) \right|} - \min_{\forall t, f} \sqrt{\left| \text{FFT} \left( \frac{U_x - \bar{U}_x}{U_e} \right) \right|} \right]$$

Pour un instant et un mode donnés, si l'amplitude est inférieure à ce seuil alors le mode est considéré absent, si elle est supérieure alors le mode est présent. La fonction d'intermittence est obtenue en faisant le rapport entre le temps de présence et la durée totale de l'échantillon de vitesse, et sa valeur est comprise entre 0 et 1. La figure 15 présente l'intermittence des modes 1, 2 et 3 en fonction de la vitesse extérieure. Cette fonction décroît pour le mode 1 tandis qu'elle augmente pour le mode 2, qui atteint une valeur maximum proche de 1 dès que le mode 1 disparaît. L'intermittence du mode 2 diminue à l'apparition du mode 3. Cette évolution est semblable à la description de l'évolution de l'amplitude des modes en fonction de la vitesse représentée figure 12, ce qui prouve que l'amplitude spectrale de ces différents modes est liée au caractère intermittent de la couche de cisaillement. On remarque également que le mode 3 est très difficile à identifier sur les spectres pour des vitesses  $U_e < 2 \text{ m.s}^{-1}$  mais il est bien reconnaissable par l'analyse du spectrogramme avec une fonction d'intermittence non nulle pour  $U_e > 1,5 \text{ m.s}^{-1}$ .

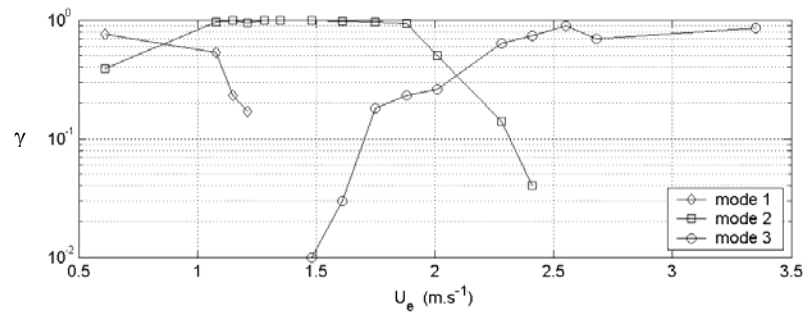


Fig. 15 Évolution de l'intermittence  $\gamma$  pour chacun des trois modes en fonction de la vitesse extérieure

#### 4. Conclusion

À partir de visualisations de l'interaction entre une couche limite laminaire et une cavité, cette étude a mis en évidence la dynamique de l'écoulement et son aspect fortement instationnaire. Bien que se développant sur une géométrie bidimensionnelle, la couche de cisaillement et les tourbillons à l'intérieur de la cavité présentent néanmoins une nature tridimensionnelle. Les différents modes présents dans la vitesse ont pu être associés à la couche de cisaillement et leur caractère intermittent a été mis en évidence. Le lien entre les intermittences temporelles et les structures spatiales reste à établir.

#### Références

- Forestier N., Jacquin L., Geffroy Ph. The mixing layer over a deep cavity at high-subsonic speed, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 475, pp. 101-145, 2003
- Mendoza J.M., Ahuja K.K. The effect of width on cavity noise, *Journal of Aircraft*, vol. 14, no. 9, pp. 833-837, 1995.
- Quénot G.M. The Orthogonal Algorithm for Optical Flow Detection Using Dynamic Programming, Proc. IEEE ICASSP, vol. III, pp. 249-252, 1992.
- Quénot G.M., Pakleza J., Kowalewski T.A. Particle Image Velocimetry with Optical Flow, *Experiments in Fluids*, vol. 25 : pp. 177-189, 1998.
- Rockwell D., Naudascher, E. Review self-sustained oscillations of flow past cavities, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 100, pp. 152-165, 1978
- Rossiter J.E. *Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds*, A.R.C. Reports and Memoranda No. 3438, 1964.
- Sarohia V. Experimental investigation of oscillations in flows over shallow cavities, *AIAA Journal*, vol. 15, no. 7, pp. 984-991, 1977