

## Réponse d'un jet plan à des excitations sinusoïdales

Mohamed Ali Knani<sup>\*,a</sup>, Henri -Claude Boisson<sup>\*\*,b</sup> André Giovannini<sup>\*\*,c</sup> & Taieb Lili<sup>\*,d</sup>

(\*) LMF : Laboratoire de Mécanique des Fluides –Département de Physique, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis el Manar - Campus Universitaire el Menzeh, 1060 Tunis, Tunisie.

(\*\*) IMFT : Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, UMR 5502 CNRS/INPT/UPS, Avenue Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse, France.

(a) [mohamedali.knani@ipeit.rnu.tn](mailto:mohamedali.knani@ipeit.rnu.tn) (b) [boisson@imft.fr](mailto:boisson@imft.fr) (c) [giova@imft.fr](mailto:giova@imft.fr) (d) [taieb.lili@fst.rnu.tn](mailto:taieb.lili@fst.rnu.tn)

### Résumé :

Le forçage fréquentiel au mode naturel est utilisé pour stabiliser les structures tourbillonnaires d'un écoulement cisailé. Dans une étude précédente, nous avons soumis un jet plan à des excitations sinusoïdales monochromatiques à la fréquence naturelle en utilisant la simulation numérique. Dans cette étude, nous présentons pour la même configuration de jet, les résultats obtenus en faisant varier la fréquence d'excitation. L'objectif est déterminer la réponse du jet et de la comparer à celle de couches de mélange et de jets en mettant en évidence les phénomènes d'appariement. On étudie les jets à profil d'entrée uniforme et à profil d'entrée parabolique. Les simulations numériques montrent que la fréquence de réponse est identique à la fréquence d'excitation dans un intervalle assez large comprenant la fréquence naturelle pour les deux cas. Au delà d'une certaine fréquence d'excitation, les fréquences de réponses sont plus faibles que la fréquence d'excitation et sont liées à la fréquence naturelle. On observe des appariements des structures tourbillonnaires traduits sur le spectre par l'apparition de fréquences sub-harmoniques.

### Abstract :

Periodic forcing at the natural mode is often use for stabilizing vortex structures in shear flows. In a previous work we have submitted a plane jet to monochromatic sinusoidal excitations at the natural frequency using numerical simulation. In the present study, we present the results obtained varying the excitation frequency for the same jet configuration. The goal is to determine the jet response and to compare it to the results of mixing layers and jets evidencing the pairing phenomena. We study jets with uniform and parabolic entry profiles. Numerical simulations show that the response frequency is equal to the excitation frequency in a large range around the natural frequency for both cases. Over a given value, the response frequencies are lower than the excitation frequency and linked to the natural frequency. Vortex pairing is observed corresponding to a sub-harmonic frequency in the spectra.

**Mots-clefs :** jet ; excitation ; fréquence

## 1 Introduction

L'interaction des structures de différentes échelles crée des instabilités qui produisent la rupture des symétries. Ces interactions donne naissance aux phénomènes de développement et de dissipation des tourbillons. Il était alors intéressant de réaliser des expériences numériques permettant de fixer les moyens de contrôle des tourbillons en agissant sur leurs amplifications. La technique adoptée est l'excitation de l'écoulement de jet, qui est une procédure appliquée dans des travaux expérimentaux et numériques pour des écoulements cisailés. On étudie les caractéristiques du jet à travers le développement des instabilités de l'onde la plus amplifiée. L'excitation de l'écoulement par des perturbations sinusoïdales monochromatiques à fréquences diverses, situées autour de la fréquence d'instabilité naturelle, permet de déterminer les modes de réponse.

Cet article présente les résultats obtenus par simulations numériques 2D pour la détermination des modes de réponse à des excitations monochromatiques sinusoïdales des écoulements de jet plan libre.

L'étude a concerné la gamme des nombres de Reynolds entre 100 et 1000 basés sur la vitesse uniforme à l'entrée et la largeur de l'orifice. Elle porte sur la caractérisation des structures et leur développement.

On présente uniquement les résultats obtenus pour des jets pour un nombre de Reynolds 500 et comparés à ceux de plusieurs auteurs issus des travaux sur des configurations variées et par des approches différentes.

L'étude théorique de Michalke (1995), qui a permis de déterminer la fréquence dominante, était la base pour la comparaison des nombres de Strouhal. En fait, c'est ce nombre qui représente la fréquence adimensionnelle caractéristique de l'instabilité.

Dans le domaine des couches de mélange, nos résultats sont comparés avec ceux de Ho *et al.* (1982) obtenus par des expériences et ceux d'Astruc (1993) et de Sers (1995) obtenus par une approche numérique.

## 2 Méthodologie

Deux codes de calcul ont été utilisés pour résoudre les équations adimensionnelles de conservation dans les travaux que nous avons réalisés (Knani *et al.* (2001), (2006)).

Le premier code utilise une formulation en variables (U,V,P) c'est-à-dire les deux composantes de la vitesse et la pression. Les équations sont discrétisées par la technique des volumes finis sur un maillage décalé avec un schéma semi implicite de prédiction et correction. Le calcul est effectué sur une configuration de jet de tuyère comme le montre la figure (Fig.1-a).

Le second basé sur la méthode des tourbillons en cellules « Vortex In Cells » est développé dans une formulation vorticitée - fonction de courant ( $\omega, \psi$ ). L'application en est réalisée pour un jet de canal (Fig.1-b).

Le domaine d'étude est un jet plan issu de mur et s'écoulant dans un domaine infini rempli par le même fluide. L'écoulement est incompressible isotherme et considéré comme bidimensionnel.

Des expériences numériques que nous avons effectuées (Knani *et al.* (2001)) sur le jet naturel ont montré que la fréquence naturelle  $f_n$  est de l'ordre de 0.168 pour le jet de tuyère. Cette valeur est en accord avec celles déterminées par Michalke (1995), et Sers (1995). Les excitations imposées utilisent comme conditions initiales les champs obtenus au dernier pas de temps du jet non perturbé.

Des perturbations sinusoïdales, à fréquence d'excitation  $f_e$  dans l'intervalle  $[0.2f_n ; 6f_n]$  ont été appliquées aux profils de la vitesse longitudinale à l'entrée du jet et maintenues pendant toute la durée de la simulation égale au temps adimensionnel 200. L'excitation est sinusoïdale monochromatique sous la forme :

$$U(0, y, t) = U_0 [1 + \beta \sin(2\pi f_e t)] \quad , \quad 0 \leq y \leq \frac{H}{2}$$

où  $\beta$  est l'amplitude et  $f_e$  est la fréquence de l'excitation.

Ces conditions correspondent aux études expérimentales effectuées par Faghani (1999) et Meyer (1989), (1990) sur la configuration du jet. Dans leurs travaux, ces auteurs ont signalé que les modes variés sont dominants dans ce type d'écoulement. Pour cette raison, nous avons considéré l'hypothèse de symétrie axiale en 2D et notre étude a été restreinte à la moitié du domaine du jet pour les simulations. L'étendue latérale du jet est  $D=3$  contenant l'ouverture du jet  $H=1$ . La longueur totale  $L=20$  du domaine dans la direction longitudinale est adaptée à la largeur  $D$  du jet. La longueur du canal a été fixée à  $l=20$ . Les paramètres de simulation sont indiqués, pour chaque configuration, sur la figure (Fig.1).

### 3 Résultats

On présente sur la figure (Fig.2) les signaux et spectres des composantes de la vitesse et de la pression relatifs à la méthode des volumes finis pour deux fréquences de forçage.

L'excitation à la fréquence naturelle  $f_n$  montre que la réponse s'effectue au même mode dans la région potentielle du jet (Fig.2-a). Ce résultat confirme ceux de Ho et Huang (1982). La perturbation permet d'introduire une instabilité d'amplitude assez forte et qui se développe en suivant le même processus que le jet naturel. L'effet important de cette perturbation est la mise en évidence des sous harmoniques qui marquent plus nettement les phénomènes d'appariements.

La simulation à la fréquence sous harmonique, dans la zone initiale du jet, permet de constater que la fréquence de réponse  $f_r$  est celle de l'excitation (Fig.2-b).

Nous avons remarqué, qu'au delà de la région linéaire, la fréquence la plus amplifiée correspond à la première sous harmonique de la fréquence dominante.

Une série de simulation a été réalisée pour des fréquences de perturbation comprises entre  $0.2f_n$  et  $6f_n$ . Les fréquences de réponses  $f_r$  correspondent aux pics d'amplitudes, dans la région initiale de l'écoulement. Les valeurs relevées de ces fréquences dominantes ont permis de représenter, en échelle logarithmique, l'évolution de la fréquence de réponse en fonction de la fréquence de forçage comme le montre la figure (Fig.3).

L'analyse de la figure (Fig.3-a), dans le cas de la technique des volumes finis, montre que dans l'intervalle des fréquences d'excitation  $0.2f_n < f_e < 2f_n$ , le jet répond à la fréquence de perturbation imposée. On retrouve ainsi qualitativement les résultats de Ho et Huang (1982) et Astruc (1993) dans le cas de couches de mélange. Au-delà de la fréquence  $2f_n$  la courbe devient linéaire et l'écoulement répond à la fréquence naturelle. Les travaux de Sers (1995) sur un jet isotherme ont montré que le jet répond à la fréquence d'excitation dans l'intervalle  $0.82f_n < f_e < 1.13f_n$ , et ailleurs à la fréquence naturelle ou à l'une de ses multiples ou sous multiples. Ho et Huang (1982) trouvent des fréquences de réponse multiples pour des excitations inférieures à  $0.5f_n$ .

La réponse à la fréquence d'excitation est située entre  $0.4f_n$  et  $2.5f_n$  pour les perturbations testées au cas du jet de canal (Fig.3-b). Pour les fréquences élevées, on constate que la réponse à l'excitation est à une fréquence supérieure à la fréquence naturelle.

L'apparition des sous harmoniques dans la zone à noyau potentiel est un signe d'appariement des tourbillons. La figure (Fig.4) présente les tracés des iso - vorticités pour une fréquence de forçage égale à la première sous harmonique du mode fondamental et pour quatre phases différentes du mouvement. On met clairement en évidence le développement des structures tourbillonnaires.

### 4 Conclusions

Les simulations numériques que nous avons menées ont montré que la réponse à l'excitation s'effectue à la fréquence naturelle, dans le domaine des fréquences de perturbation supérieures au double de la fréquence naturelle.

Le jet répond à la fréquence de perturbation pour des forçages à fréquences inférieures ou proches de la fréquence dominante. A des fréquences d'excitation élevées, l'instabilité a tendance de retrouver sa fréquence naturelle en décrochant la fréquence d'excitation.

La présence de fréquences sous harmoniques et harmoniques correspondant aux maximums d'amplitudes de l'onde d'instabilité a permis de mettre en évidence des phénomènes non linéaires que la théorie de la stabilité linéaire n'a pas pris en compte. L'écoulement amplifie les impulsions imposées à l'entrée, puis elles sont advectées vers l'extérieur. Cette étude de la réponse du jet à des perturbations sinusoïdales monochromatiques confirme que l'écoulement est convectivement instable. C'est une caractéristique essentielle de ce type d'écoulement.

Le comportement de l'écoulement est semblable pour des fréquences proches ou inférieures à la fréquence naturelle. Par contre, la réponse au forçage est différente pour les deux configurations.

D'autre part, on peut relever un accord entre nos résultats et ceux existants dans la littérature dans certains intervalles de fréquences de perturbation. D'une manière générale, les résultats de nos simulations sont en accord avec ceux issus de travaux de certains auteurs. Néanmoins, la détermination des limites des intervalles des fréquences reste un problème à examiner.

Enfin, une simulation numérique en 3D et du domaine complet, en cours de développement par les deux techniques, permettra dans un premier temps de comparer les deux codes et vérifier l'hypothèse de symétrie, et puis analyser les phénomènes de développement des instabilités.

## Références

- Astruc, D. 1993 Instabilité de Kelvin Helmholtz en régime subsonique : développement spatial et conditions aux limites ouvertes. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.*
- Faghani, D., Sevrain, A. & Boisson, H.C., 1999 Physical eddy recovery through bi-orthogonal decomposition in an acoustically forced plane jet. *Flow Turbulence and Combustion*, **62**, 69-88.
- Ho, C.M. & Huang, L. 1982 Subharmonics and vortex merging in mixing layers. *Journal of Fluid Mechanics*, **119**, 443-473.
- Sers, F. 1995 Contribution à l'étude des instabilités dans les jets plans par simulation numérique. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.*
- Knani, M.A., Boisson, H.C. & Lili, T. 2001 Response of plane viscous jet to entrance flow rate perturbation. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **37**, 361-374.
- Knani, M.A., Boisson, H.C., Giovannini, A. & Lili, T. 2006 Study of a plane free jet exhausting from a channel by vortex in cell method. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **52**, 529-543.
- Meyer, J., Sevrain, A., Boisson, H.C. & Ha Minh, H. 1990 Organized structures and transition in the near field of a plane jet. *Edited by A. GYR, Springer Verlag.*
- Meyer, J. 1989 Structures organisées et transition dans la zone proche du jet plan : synthèse d'analyse expérimentale, visuelle et numérique. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.*
- Michalke, A. 1995 On spatially growing disturbances in an inviscid shear layer. *Journal of Fluid Mechanics*, **23**, 521-544.

## Figures

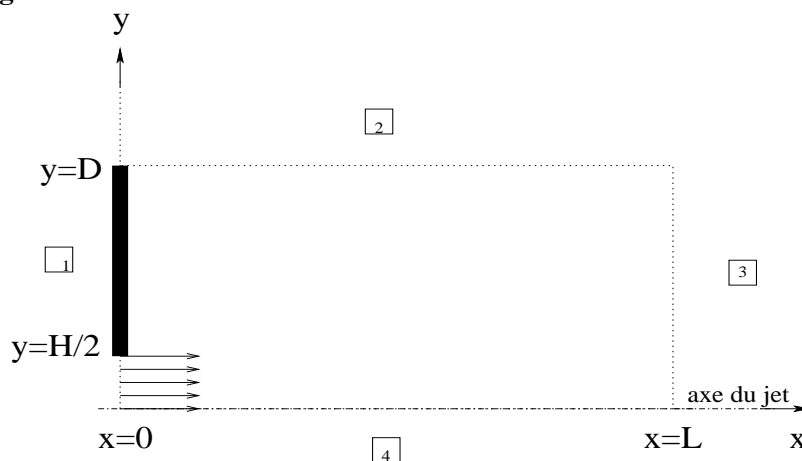


FIG. 1-a – Jet de tuyère :  $L=20$  ;  $D=3$  ;  $H=1$  ;  $\Delta x= \Delta y=0.1$  ;  $\Delta t=0.01$  ;  $\beta=0.025$ .

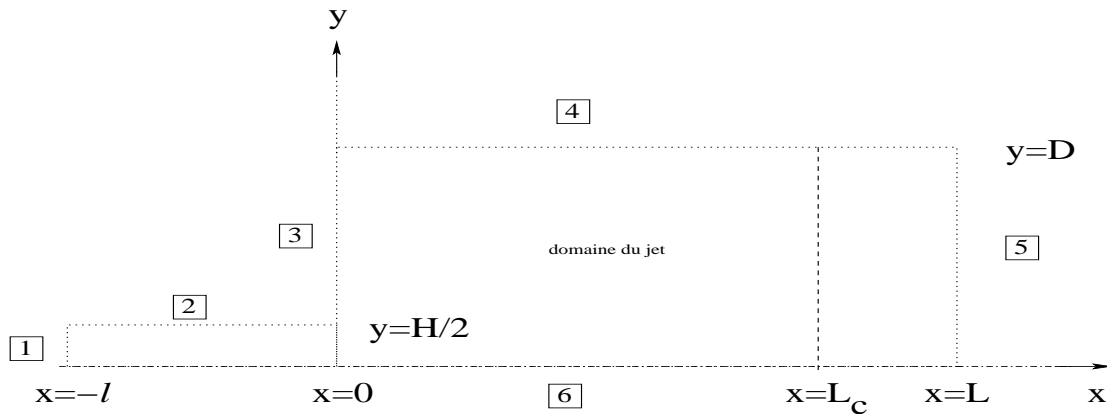
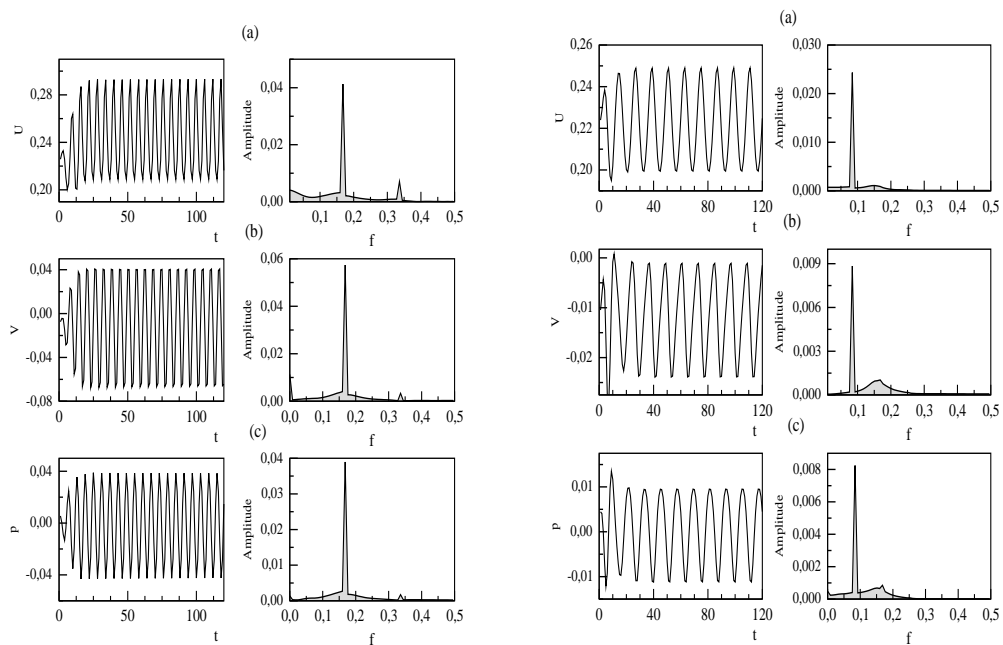


FIG. 1-b – Jet de canal :  $L=20$  ;  $D=3$  ;  $H=1$  ;  $l=20$  ;  $\Delta x= \Delta y=0.05$  ;  $\Delta t=0.1$  ;  $\beta=0.25$ .

FIG. 1 – Configurations utilisées pour les simulations numériques



(a) Excitation à la fréquence naturelle  $f_n$

(b) Excitation à une fréquence sous-harmonique  $f_n/2$

FIG. 2 – Jet de tuyère : signaux et spectres correspondants des composantes de la vitesse (U,V) et de la pression P.

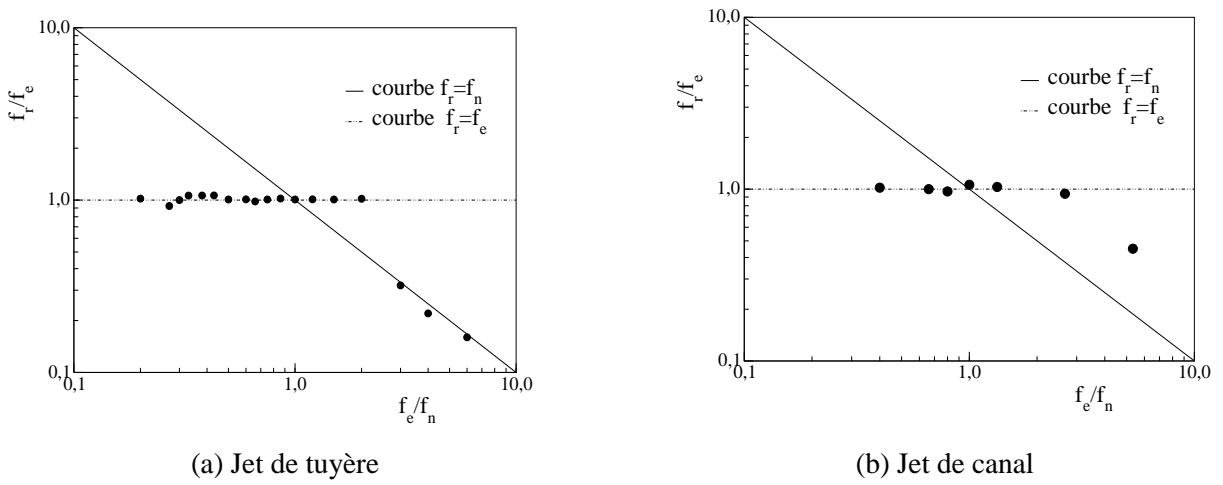


FIG. 3 – Modes de réponse à une excitation sinusoïdale

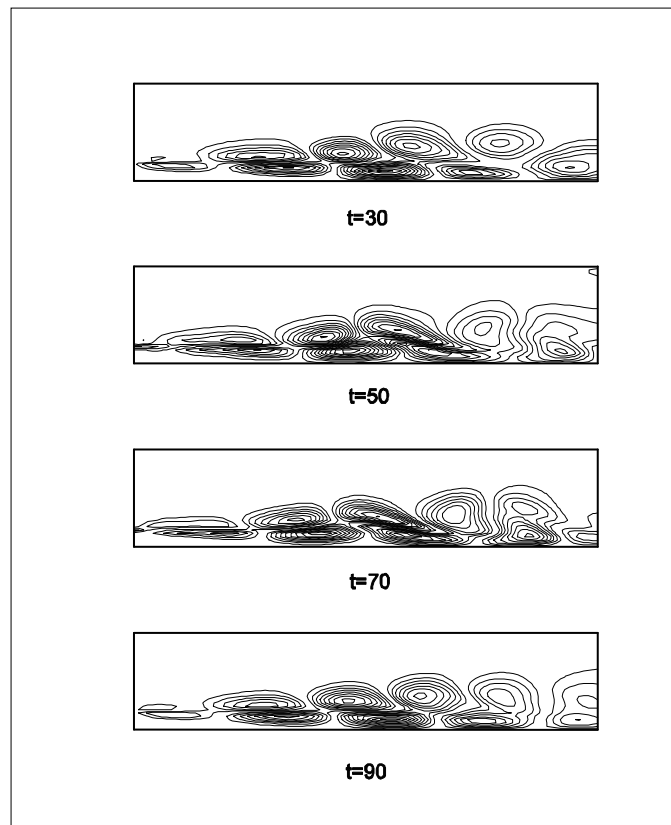


FIG. 4 – Jet de tuyère : champ du rotationnel pour quatre valeurs du temps, 20 lignes de niveaux (min= -1.2, max= 1.0)