



HAL
open science

Étude numérique de la prédiction de la pression pariétale dans le sillage d'un obstacle en vue d'un calcul d'interaction fluide-structure

Yann Marchesse, Nicolas Totaro

► To cite this version:

Yann Marchesse, Nicolas Totaro. Étude numérique de la prédiction de la pression pariétale dans le sillage d'un obstacle en vue d'un calcul d'interaction fluide-structure. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. <hal-03422841>

HAL Id: hal-03422841

<https://hal.science/hal-03422841v1>

Submitted on 9 Nov 2021

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.



HAL Authorization

Étude numérique de la prédiction de la pression pariétale dans le sillage d'un obstacle en vue d'un calcul d'interaction fluide–structure

Y. Marchesse^a, N. Totaro^b

a. Laboratoire d'Énergétique, ECAM Lyon, Université de Lyon, 40 montée St-Barthélemy, 69005 LYON

b. Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA Lyon, Bât. St-Exupéry, 20 avenue Albert Einstein, F69621 Villeurbanne Cedex

Résumé :

Les travaux présentés s'inscrivent dans le contexte du bruit intérieur des transports soumis à des écoulements turbulents. Dans un premier temps, l'étude s'intéresse à la qualité de la prédiction numérique du champ de pression pariétale dans le sillage d'un obstacle sur une surface rigide à partir de la méthode RANS. Les résultats obtenus sont comparés à des simulations numériques et des mesures expérimentales de la littérature en termes de champ moyen et de fluctuations de pression pariétale. Dans un second temps, la réponse d'une plaque déformable soumise à cet écoulement derrière l'obstacle est aussi présentée dans le cadre d'une étude d'interaction fluide-structure.

Abstract :

This paper broadly concerns the acoustic ambiance in vehicle surrounded by turbulent flows. Within this context the present study aims at investigating the quality of wall pressure fluctuation predictions in the wake of surface-mounted obstacle when using numerical approach. The numerical prediction of both time-averaged flow and wall pressure fluctuations are compared with numerical and experimental data which have been obtained in similar configurations. Furthermore the vibration of a thin plate which is located in the wake of the surface-mounted obstacle is analyzed in the context of a fluid structure interaction computation.

Mots clefs : interaction fluide–structure ; CFD ; fluctuations de pression pariétale

1 Introduction

L'écoulement turbulent généré par les éléments extérieurs aux véhicules de transport sollicite grandement les structures déformables telles que les vitres. Les vibrations ainsi créées sont une source importante du rayonnement acoustique au sein du véhicule, et l'interaction fluide-structure mis en jeu dans ce cas doit alors être suffisamment comprise pour améliorer le confort intérieur. Cette amélioration repose fortement sur la compréhension de l'écoulement généré par l'élément extérieur qui peut correspondre en première approximation à un obstacle simple de forme cubique. Malgré la simplicité de cette forme l'écoulement en absence d'interaction est complexe et a fait l'objet de nombreuses études, expérimentales [5, 7] ou numériques [1, 4, 6, 11]. Néanmoins celles-ci ne s'intéressent pas au champ de pressions contrairement aux études [2, 10] pour lesquelles seules les fluctuations de pression pariétale sur la surface supérieure d'un cube sont observées. L'étude présentée ici s'intéresse quant à elle à la capacité d'une approche numérique de type URANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier Stokes*), moins coûteuse en temps de calculs que les méthodes LES (*Large Eddy Simulation*) ou DNS (*Direct Numerical Simulation*), à prédire correctement les fluctuations de pression pariétale dans le sillage d'un obstacle prismatique posé au sol. La qualité de cette prédiction est d'un grand intérêt par exemple pour la réponse d'une plaque sollicitée dans un calcul d'interaction fluide-structure.

2 Configurations étudiées

La **configuration 1** correspond à celle réalisée expérimentalement par Martinuzzi et Tropea [7] dans laquelle un cube de hauteur $H = 25$ mm est placé dans un canal de hauteur $2H$ et caractérisé par des distances transversales au cube très importantes. Des profils de vitesse de l'écoulement ont été mesurés pour un nombre de Reynolds $Re_H = 8,0 \times 10^4$ dans la région proche du cube par ces deux auteurs permettant ainsi une validation quantitative des résultats numériques obtenus dans notre étude. La **configuration 2** s'intéresse à un pavé de dimension $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$, 6 cm étant la hauteur du pavé, placé dans une veine d'essais de section $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ dans la soufflerie anéchoïque du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA) de l'École Centrale de Lyon dans le cadre du projet Carnot I@L iP² [3]. Des mesures de pressions pariétales dans le sillage de l'obstacle ont été effectuées à l'aide d'une antenne de 45 microphones déplacée de façon régulière en aval du pavé sur une zone rectangulaire dont les extrémités opposées ont pour coordonnées $(1,5H; -1,75H; 0)$ et $(8H; 1,75H; 0)$. Les densités spectrales mesurées ont une résolution valant 5 Hz. Ces mesures permettent de réaliser des comparaisons des pressions pariétales numériques et expérimentales. Le nombre de Reynolds, basé sur la largeur du pavé H , vaut $Re_H = 1,2 \times 10^5$. La **configuration 3** est similaire à la précédente avec cette fois la prise en compte d'une interaction possible entre l'écoulement d'air et une plaque posée au sol dans le sillage du pavé et dans son prolongement. Les propriétés physiques de la plaque sont les suivantes $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$ et $E = 69\,000 \text{ MPa}$ et ses dimensions valent $80 \text{ cm} \times 48 \text{ cm} \times 0,8 \text{ mm}$. Les surfaces latérales de cette plaque sont fixées et les autres surfaces sont libres de se déplacer en fonction du champ aérodynamique dans le sillage du pavé.

3 Approche numérique

Des études tridimensionnelles instationnaires sont menées ici à partir d'une approche statistique URANS à l'aide du code commercial ANSYS-CFX 12.1. Deux modèles de turbulence bas-Reynolds sont utilisés pour fermer les équations de Navier-Stokes moyennées : les modèles (i) *Shear Stress Transport* (SST) $k-\omega$ [8], et (ii) *Scale-Adaptive Simulation* (SAS) [9]. Les dimensions des domaines de calculs selon les directions longitudinale, transversale, et perpendiculaire au sol valent $20H \times 9H \times 2H$ pour la configuration du cube, et $20H \times 5H \times 5H$ pour la configuration du pavé. L'entrée du domaine placée à une distance $4H$ de la face avant de l'obstacle accueille le profil expérimental de la vitesse longitudinale pour la configuration 1 et un profil parfaitement développé obtenu à partir d'un calcul annexe pour le domaine considérant le pavé. Les équations de mouvement du fluide sont résolues sur des maillages de type non-structuré dans la plus grande partie du domaine de calcul avec une densité de mailles plus importante dans le sillage proche de l'obstacle considéré, et de type structuré dans la région très proche de l'obstacle avec un resserrement des mailles pour tenir compte au mieux de la région turbulente proche des parois ($y^+ < 3$ pour les premiers nœuds des parois). Les propriétés de l'air sont celles considérées à une température 20°C ($\rho = 1,185 \text{ kg/m}^3$ et $\mu = 1,831 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$). Les calculs transitoires sont réalisés à partir d'un pas de temps Δt tel que $\widetilde{\Delta t} = \Delta t \times U/H = 0,045$ pour la configuration 1, $\widetilde{\Delta t} = 0,045; 0,010; 0,005$ dans la configuration 2 et, $\widetilde{\Delta t} = 0,045$ en présence d'une interaction fluide structure. La résolution du calcul en interaction fluide-structure est effectuée par le code ANSYS pour les déplacements de la plaque. Les transferts des solutions (déplacements et pressions pariétales) sont réalisés par le solveur externe MFX (Multifield) et dans ce cas la pression pariétale obtenue à partir d'ANSYS-CFX est appliquée en condition limite du calcul de déplacement (ANSYS). Une fois les déplacements de la plaque estimés, le maillage du domaine fluide est actualisé en tenant compte de ces déplacements et une nouvelle solution du champ aérodynamique est ensuite atteinte. Le domaine fluide est initialisé à partir de la solution atteinte dans la configuration 2 et caractérisée par la présence d'instabilités dans le sillage.

4 Résultats numériques

4.1 Configuration 1 : validation de l'approche numérique

L'écoulement au passage du cube présente comme on s'y attendait des lâchers de tourbillons générant un sillage turbulent et des régions de recirculation du fluide dans les régions amont et aval de l'obstacle.

Les prédictions numériques de l'écoulement moyen concernant d'une part la forme et les longueurs des régions de recirculation, et d'autre part le coefficient de traînée sont satisfaisantes quel que soit le modèle de turbulence (FIG. 1 et TAB. 1). Ceci est d'autre part confirmé par les comparaisons des profils de vitesse longitudinale d'origine numérique et expérimentale (FIG. 2). On note généralement pour ces grandeurs des prédictions numériques satisfaisantes dans le plan de symétrie (i.e. $y/H = 0$) alors que des écarts plus importants sont observés dans les régions latérales (par exemple $y/H = 1$). Enfin la génération d'instabilités est réalisée à des fréquences satisfaisantes, les nombres de Strouhal ainsi estimés ($St = f \times H/U = 0,114$ et $0,123$ respectivement pour les modèles SST $k - \omega$ et SAS) sont très proches de ceux obtenus numériquement ($St = 0,117$ pour Iaccarino *et al.* [6] et $St = 0,104$ pour Yakhot *et al.* [11]) et inférieurs à celui mesuré ($St = 0,145$ pour Martinuzzi et Tropea [7]). Ces résultats valident donc l'approche numérique sur laquelle sont basés les calculs numériques de notre étude.

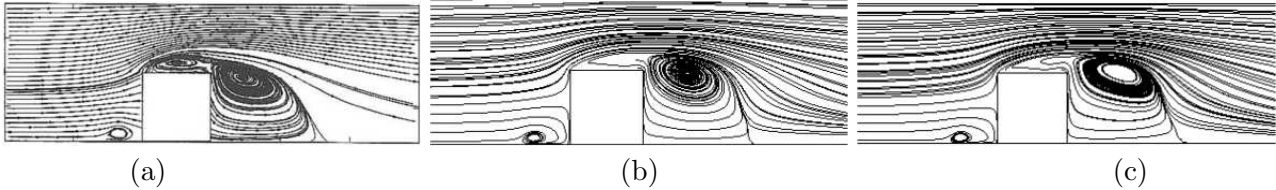
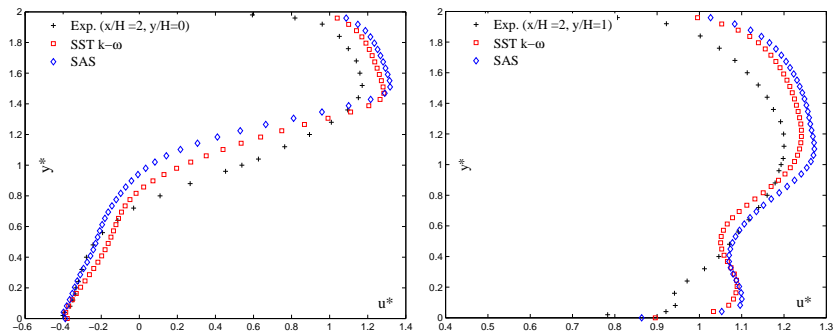


FIG. 1 – Lignes de courant dans le plan de symétrie du cube (a, Exp. [5], b, SST $k - \omega$; c, SAS).

Étude	Modèle	x_F/H	x_R/H	$\overline{C_D}$	St
Martinuzzi et Tropea [7]	Expérience	1,04	1,61		0,145
Iaccarino <i>et al.</i> [6]	$v^2 - f$	0,73	1,88		0,117
Yakhot <i>et al.</i> [11]	DNS	1,21			0,104
Buijssen [1]	DNS			1,42	
Hoffman [4]	Adaptive LES/DNS			1,50	
Étude présente	SST $k - \omega$	0,67	1,50	1,34	0,114
Étude présente	SAS	0,72	1,69	1,50	0,123

TAB. 1 – Longueurs des recirculations amont x_F/H et aval x_R/H , coefficient de traînée $\overline{C_D}$, et nombre de Strouhal St (Configuration 1).

FIG. 2 – Profils des vitesses longitudinales dans le sillage du cube ($y^* = y/H$ et $u^* = u(y)/U$). Comparaison des prédictions numériques avec les mesures de Martinuzzi et Tropea [7].



4.2 Configuration 2 : étude de la pression pariétale

Les prédictions numériques de l'écoulement au passage du pavé sont semblables à celles obtenues plus haut, les obstacles étant très similaires. On note néanmoins une hauteur relative à celle du pavé de la région de recirculation amont plus importante dans cette configuration entraînant un coefficient de traînée plus faible dans ce cas (TAB. 2). Le nombre de Strouhal estimé à partir de la largeur du pavé reste quant à lui proche de la valeur prédite dans le cas du cube, la valeur de produit sans dimension étant essentiellement liée à la forme de l'obstacle. Les mesures et les prédictions numériques du spectre moyen de la densité spectrale des fluctuations de pression évalué sur la surface présentée au paragraphe 2 sont rassemblées sur la figure 3.a avec une influence non significative de la valeur du pas de temps. Des différences notables sont observées entre les spectres expérimentaux et numériques. Ainsi contrairement aux données numériques les densités spectrales expérimentales ne font pas apparaître

de raie à la fréquence associée au nombre de Strouhal du tableau 2. Ceci est consécutif à la résolution spectrale trop importante ici pour pouvoir observer distinctement ces raies. Concernant les prédictions numériques, on observe d'une part un spectre de raies très marquées lors de l'utilisation du modèle de fermeture SST $k - \omega$ ce qui est moins le cas avec le modèle SAS. Pour ce dernier le spectre est plus proche de celui atteint expérimentalement avec cependant des différences de niveaux notables pour les hautes fréquences liées à une décroissance de ces niveaux trop importante dans l'approche numérique. Le modèle SST $k - \omega$ est basé sur le concept de viscosité turbulente et la dynamique de la turbulence peut alors être faussée. Une possible surestimation de la production de la turbulence dans ce cas serait alors à l'origine d'une dissipation trop importante des structures cohérentes aux faibles échelles. Cet inconvénient est *a priori* levé lors de l'utilisation du modèle SAS qui utilise un terme source dans l'équation de transport de l'échelle de longueur. Ce principe consiste à adapter les échelles du modèle vis à vis de la courbure du profil de vitesse facilitant alors la génération de structures dans les régions de profil de vitesse inflexionnel. Ceci est néanmoins insuffisant dans la configuration 2 pour retrouver les niveaux de pressions pariétales mesurés en hautes fréquences. La décroissance des niveaux en haute fréquence n'est pas liée d'autre part à une dissipation trop élevée des petites structures associées à ces fréquences au cours de leur trajet dans le sillage. En effet si le sillage est maintenant décomposé en différentes régions rectangulaires de mêmes dimensions $1,5H \times 3,5H$ et localisées de façon consécutive à partir de la face arrière du pavé, on observe pour des fréquences proches de 100 Hz d'une part des prédictions numériques proches des valeurs mesurées et d'autre part des décroissances similaires lors du passage des régions 2 à 5 (FIGS. 3.b et 3.c, et TAB. 3). Si on s'intéresse maintenant à des fréquences plus élevées et proches de 500 Hz les prédictions numériques sousestiment très grandement les niveaux alors que les décroissances observées numériquement et expérimentalement sont cette fois-ci similaires (6,6 dB et 7,9 dB respectivement pour les approches expérimentale et numérique).

Modèle	x_F/H	x_R/H	$\overline{C_D}$	St
SST $k - \omega$	0,69	1,44	1,11	0,113
SAS	0,76	1,51	1,25	0,113

TAB. 2 – Longueurs des recirculations amont x_F/H et aval x_R/H , coefficient de traînée $\overline{C_D}$, et nombre de Strouhal St (Configuration 2).

	p^2 (dB – Réf. 1 Pa ² /Hz).					
	100 Hz			500 Hz		
	Région 2	Région 5	$\Delta_{2,5}$	Région 2	Région 5	$\Delta_{2,5}$
Exp.	-4,3	-12,3	8	-15,4	-22,0	6,6
Num.	-2,1	-13,5	11,4	-44,3	-52,2	7,9
$ \Delta_{E,N} $	2,2	1,2		28,9	30,2	

TAB. 3 – Densités spectrales des fluctuations de la pression pariétale ($\Delta_{2,5}$ représente la décroissance de niveau de densité spectrale observée entre les régions 2 et 5, et $\Delta_{E,N}$ la différence de niveau entre les prédictions numériques et les mesures).

4.3 Configuration 3 : interaction fluide-structure

Cette partie s'intéresse essentiellement à la prédiction numérique des amplitudes de déplacement vertical des points de la plaque. On observe d'une part des déplacements de l'ordre de l'épaisseur de la plaque. Par exemple les maximums de ces amplitudes atteignent $-0,86$ mm et $0,26$ mm respectivement pour les points placés dans les régions proches du centre de la plaque et ceux près de la face arrière du pavé (FIG 4.a). D'autre part une réponse dynamique des déplacements de la plaque est atteinte, des modes de vibrations étant en effet observés, par exemple à la fréquence 55 Hz pour laquelle le mode de vibration (3, 1) apparaît (FIG 4.b). Néanmoins la comparaison des densités spectrales des déplacements moyennées sur la plaque, mesurées et estimées numériquement, met encore une fois en évidence une sous-estimation des niveaux, d'amplitude de déplacement cette fois, dans les hautes fréquences (FIG. 5). Pour des fréquences proches de 100 Hz on note une prédiction numérique 15 dB en-dessous des densités spectrales mesurées, et cet écart devient plus important pour des fréquences proches de 500 Hz et vaut 80 dB. Cet écart croissant avec les fréquences entre les deux approches s'explique probablement par une sollicitation trop faible de la plaque pour les hautes fréquences car

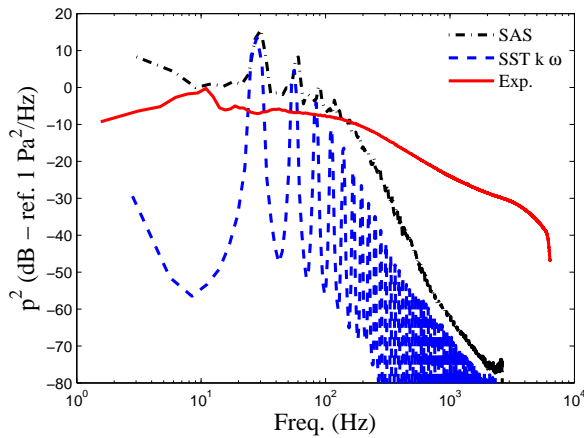
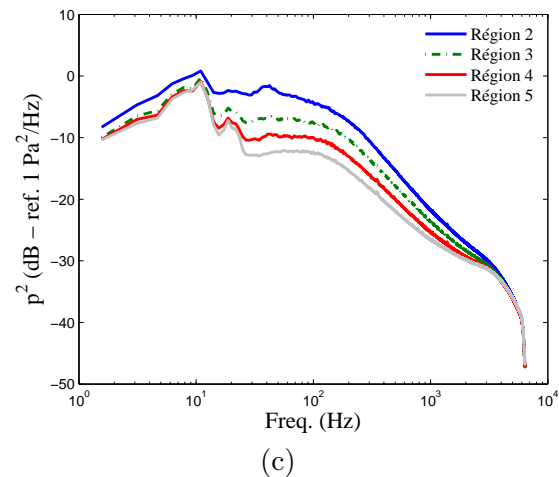
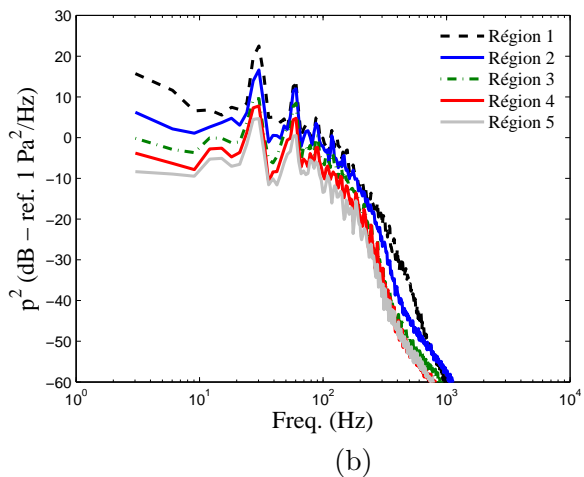


FIG. 3 – a, densités spectrales des fluctuations des pressions pariétales estimées expérimentalement et numériquement à l'aide des modèles SAS et SST; influence de la région dans le sillage du pavé sur les densités spectrales des fluctuations des pressions pariétales estimées numériquement (b) et expérimentalement (c).



non représentée dans le spectre des fluctuations de pression pariétale (FIG. 3.a) et conduisant alors à des déplacements non significatifs.

5 Conclusion et discussion

Cette étude s'est intéressée à la prédiction numérique d'un écoulement d'air au passage d'obstacles prismatiques à partir de la méthode URANS. Il apparaît que les modèles de turbulence utilisés ici ont une influence très faible sur la prédiction du champ aérodynamique moyen. Ceci n'est plus le cas dès lors qu'on s'intéresse aux fluctuations de la pression pariétale dans le sillage de l'obstacle. On note que l'utilisation du modèle de turbulence *SAS* conduit à un spectre de densité spectrale des fluctuations de pression pariétale de forme plus proche de celui mesuré que lors de l'utilisation du modèle *SST*. Néanmoins, on remarque une sous-estimation des amplitudes des densités spectrales ceci essentiellement pour les hautes fréquences. Cela semble avoir une influence sur les déplacements des points de la plaque déformable et soumise au sillage turbulent cette fois dans le cadre d'un calcul d'interaction fluide–structure car les amplitudes de déplacement deviennent très faibles pour ces fréquences.

Références

- [1] Buijssen S., Turek S 2004 Direct numerical FEM-simulation of turbulent flow on linux clusters. *Preprint, University of Dortmund*.
- [2] Da-Hai Y., Ashan Kareem 1997 Numerical simulation of flow around rectangular prism. *J. of Wind Engineering* **67** & **68** 195-208
- [3] Chevillotte F. 2009 Compte-rendu de mesures - Identification de pression pariétale. *Rapport projet carnot I@L iP²*

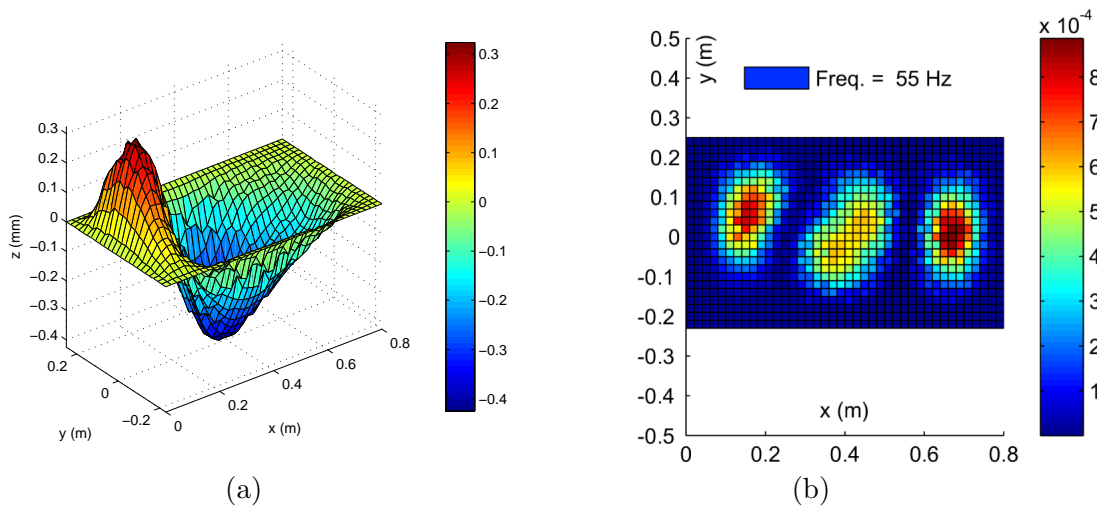


FIG. 4 – a, déplacements temporels et verticaux de la plaque ; b, densité spectrale des déplacements de la plaque à la fréquence 55 Hz.

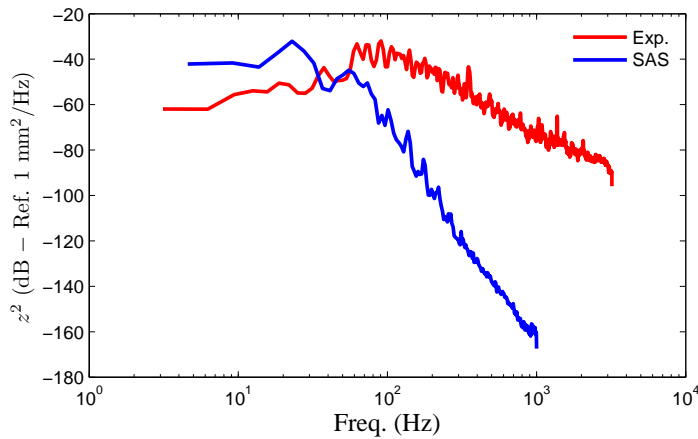


FIG. 5 – densités spectrales moyennées sur la plaque entière.

- [4] Hoffman J. 2005 Computation of mean drag for bluff body problems using adaptive DNS/LES. *SIAM J. Sci. Comput.* **27(1)** 184-207
- [5] Hussein H.J., Martinuzzi R.J. 1996 Energy balance for the turbulent flow around a surface mounted cube placed in a channel *Phys. Fluids* **8** 764-780
- [6] Iaccarino G., Ooi A., Durbin P.A., Behnia M. 2003 Reynolds averaged simulation of unsteady separated flow *Int. J. of Heat and Fluid Flow* **24** 147-156
- [7] Martinuzzi R., Tropea C. 1993 The flow around a surface-mounted prismatic obstacle placed in a fully developed channel flow *J. Fluids Eng.* **115** 85-92
- [8] Menter F.R. 1994 Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications *A.I.A.A. Journal* **32(8)** 1598-1605
- [9] Menter F.R., Egorov Y. 2005 A Scale-Adaptive simulation model using two-equation models *A.I.A.A. Paper 2005-1095, Reno/NV*
- [10] Mosfata N.H., Hajj M.R., Zeiger M.D., Ragab S.A. 2002 Space/time characteristics of pressure fluctuations in separation regions *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **90** 415-426
- [11] Yakhot A., Liu H., et Nitkin N. 2006 Turbulent flow around a wall-mounted cube : A direct numerical simulation *Int. J. of Heat and Fluid Flow* **27** 994-1009