



**HAL**  
open science

# Méthodes expérimentales instationnaires et leurs applications en mécanique des fluides

Thierry M. Faure

► **To cite this version:**

Thierry M. Faure. Méthodes expérimentales instationnaires et leurs applications en mécanique des fluides. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2009. tel-00911074v1

**HAL Id: tel-00911074**

**<https://theses.hal.science/tel-00911074v1>**

Submitted on 28 Nov 2013 (v1), last revised 27 Apr 2018 (v2)

**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.

# **HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES**

**présentée devant l'Université Pierre et Marie Curie – Paris VI**

**par**

**Thierry M. FAURE**

## **MÉTHODES EXPÉRIMENTALES INSTATIONNAIRES ET LEURS APPLICATIONS EN MÉCANIQUE DES FLUIDES**

**Soutenue le 9 décembre 2009 devant la Commission d'Examen**

### **JURY**

<b>G. BOIS</b>	<b>ENSAM Lille (rapporteur)</b>
<b>J. BORÉE</b>	<b>ENSMA Futuroscope (rapporteur)</b>
<b>J. N. GENCE</b>	<b>Université Claude Bernard Lyon I (président)</b>
<b>B. LECORDIER</b>	<b>CORIA Rouen</b>
<b>P. LE QUÉRE</b>	<b>LIMSI Orsay (invité)</b>
<b>F. LUSSEYRAN</b>	<b>LIMSI Orsay</b>
<b>M. RIETHMULLER</b>	<b>Institut Von Kármán Rhode St Genèse (rapporteur)</b>
<b>P. SGAUT</b>	<b>Université Pierre et Marie Curie Paris VI</b>



## Résumé

Cette synthèse porte sur plusieurs thématiques de mécanique des fluides et s'articule autour d'une approche par des méthodes expérimentales instationnaires. Les domaines successivement abordés sont la turbulence, l'aérodynamique compressible, les machines tournantes, l'hydrodynamique et les instabilités, tandis que les techniques expérimentales mises en œuvre comprennent les sondes directionnelles de pression, l'anémométrie fil/film chaud, la vélocimétrie laser Doppler, la visualisation par injection de traceur et la vélocimétrie par images de particules. Dans la plupart des cas, on développe des techniques multi-composantes, afin d'obtenir les trois composantes du champ de vitesse. Lorsqu'un phénomène périodique est présent dans l'écoulement, des traitements par moyennes de phase permettent de reconstruire, à partir d'un maillage de mesures ponctuelles, une information globale dans un plan ou dans un volume, et son évolution temporelle moyenne. Il est aussi possible de reconstituer une dynamique en fonction du temps à partir d'une mesure dans un plan, non résolue en temps, synchronisée avec une mesure ponctuelle, résolue en temps. L'ensemble des configurations étudiées par ces méthodes expérimentales constitue des bases de données, utiles notamment pour une comparaison avec des résultats de simulations numériques.

## Abstract

This synthesis is about different topics in fluid mechanics, linked by an approach with unsteady experimental methods. The following domains are successively considered: turbulence, compressible aerodynamics, rotating machinery, hydrodynamics and instabilities. The experimental techniques used include directional pressure probes, hot wire/film anemometry, laser Doppler velocimetry, flow visualization by tracer injection and particle image velocimetry. Most of the time, multi-component techniques are developed to get the three components of the velocity field. If a periodic phenomenon exists in the flow, phase-average analysis allows building, from a mesh of measurement points, global information within a plane or a volume, and its averaged time development. The establishment of the time dynamics is also possible from non time-resolved plane measurements, synchronized with a time-resolved measurement acquired at one position. All the cases considered in the report and their experimental approaches are data bases, useful, for instance, for comparison with numerical simulations results.



## Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude à l'ensemble des membres du jury, Gérard Bois, Jacques Borée, Jean-Noël Gence, Bertrand Lecordier, Patrick Le Quéré, François Lusseyran, Michel Riethmuller et Pierre Sagaut.

Ma reconnaissance s'adresse également à l'ensemble des collègues avec lesquels j'ai eu l'opportunité de participer à de nombreux échanges scientifiques au cours de ces années, dans différents laboratoires.

Enfin, ce travail n'aurait pas pu se faire sans la contribution de tous les étudiants que j'ai encadrés, qu'ils en soient ici remerciés.



# Table des matières

<b>A. RAPPORT D'ACTIVITE .....</b>	<b>1</b>
I CURRICULUM VITAE .....	3
I-1 Formation .....	3
I-2 Expérience professionnelle .....	3
II LISTE DES TRAVAUX .....	5
II-1 Publications .....	5
II-1-1 Mémoires .....	5
II-1-2 Livre .....	5
II-1-3 Articles dans des revues à comité de lecture .....	5
II-2 Communications .....	6
II-2-1 Congrès avec comité de lecture et actes publiés .....	6
II-2-2 Communication comme invité à une conférence .....	8
II-2-3 Congrès divers et séminaires .....	8
II-2-4 Supports de cours .....	9
II-3 Rapports de contrats .....	9
III ENSEIGNEMENT ET RESPONSABILITES SCIENTIFIQUES .....	11
III-1 Enseignement .....	11
III-2 Direction de recherches .....	12
III-2-1 Stages de 2 <sup>ème</sup> cycle .....	12
III-2-2 Thèse de doctorat et stages de DEA (3 <sup>ème</sup> cycle) .....	13
III-2-3 Programme de formation permanente .....	13
III-3 Responsabilités administratives et scientifiques .....	13
III-4 Collaborations extérieures .....	14
IV RESUME DES TRAVAUX DE RECHERCHE .....	17
V PROJET DE RECHERCHES A QUATRE ANS .....	19
<b>B. SYNTHESE SCIENTIFIQUE .....</b>	<b>21</b>
NOMENCLATURE .....	23
INTRODUCTION .....	25
I APERÇU SUR LES METHODES DE MESURE INSTATIONNAIRES EN MECANIQUE DES FLUIDES .....	27
I-1 Mesure de la vitesse .....	27
I-2 Domaines d'application .....	28
I-3 Références .....	29
II ÉTUDE DU SILLAGE TURBULENT D'UN CORPS A SYMETRIE DE REVOLUTION AUTOPROPULSE PAR HELICE .....	31
II-1 Introduction .....	31
II-2 Dispositif expérimental .....	31
II-2-1 Banc expérimental .....	31
II-2-2 Instrumentation .....	33
II-3 Principaux résultats .....	35
II-3-1 Affinité du sillage lointain .....	35
II-3-2 Bilans d'énergie cinétique turbulente et de tensions de Reynolds .....	36
II-3-3 Analyse spectrale .....	37
II-3-4 Moyennes de phase .....	38
II-4 Conclusion .....	38
II-5 Références .....	39
III DEVELOPPEMENT DE L'ANEMOMETRIE FIL CHAUD A TENSION CONSTANTE ET APPLICATION A UNE COUCHE LIMITE SUPERSONIQUE .....	41
III-1 Introduction .....	41
III-2 Dispositif expérimental .....	41
III-2-1 Soufflerie expérimentale .....	41
III-2-2 Instrumentation .....	41
III-3 Principaux résultats .....	42
III-3-1 Constante de temps .....	42
III-3-2 Comparaison des spectres mesurés par CCA, CTA et CVA .....	44
III-3-3 Caractérisation de la couche limite turbulente .....	45
III-4 Conclusion .....	46
III-5 Références .....	46
IV ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT DANS UN MODELE DE TURBOPOMPE CENTRIFUGE .....	49
IV-1 Introduction .....	49

IV-2 Dispositif expérimental .....	49
IV-2-1 Banc d'essais .....	49
IV-2-2 Instrumentation .....	49
IV-3 Principaux résultats .....	50
IV-3-1 Recirculation amont .....	50
IV-3-2 Moyennes de phase .....	51
IV-4 Conclusion .....	52
IV-5 Références .....	52
V ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT DANS UN ETAGE DE COMPRESSEUR AXIAL .....	53
V-1 Introduction .....	53
V-2 Dispositif expérimental .....	53
V-2-1 Banc d'essais .....	53
V-2-2 Instrumentation .....	53
V-3 Principaux résultats .....	54
V-3-1 Champ de vitesse dans le rotor .....	54
V-3-2 Vitesse instationnaire dans un canal inter-aubes stator .....	55
V-3-3 Interaction rotor-stator .....	56
V-3-4 LDV trois composantes en coïncidence .....	57
V-3-5 Évaluation du tenseur de Reynolds par LDV trois composantes non coïncidente .....	57
V-4 Conclusion .....	59
V-5 Références .....	60
VI ÉCOULEMENT DANS UN MODELE D'ÉCHANGEUR THERMIQUE .....	61
VI-1 Introduction .....	61
VI-2 Dispositif expérimental .....	61
VI-2-1 Banc d'essais .....	61
VI-2-2 Instrumentation .....	62
VI-2-3 Algorithme PIV .....	62
VI-3 Principaux résultats .....	63
VI-3-1 Champ moyen de vitesse .....	63
VI-3-2 Comparaison mesure / simulation numérique .....	64
VI-3-3 Moments d'ordre 2 des fluctuations de vitesse .....	65
VI-4 Conclusion .....	66
VI-5 Références .....	67
VII ÉCOULEMENT CISAILLE AU-DESSUS D'UNE CAVITE PARALLELEPIPEDIQUE OUVERTE .....	69
VII-1 Introduction .....	69
VII-2 Dispositif expérimental .....	69
VII-2-1 Banc d'essais .....	69
VII-2-2 Instrumentation .....	70
VII-2-3 Algorithme PIV .....	71
VII-3 Principaux résultats .....	72
VII-3-1 Morphologie de l'écoulement .....	72
VII-3-2 Instabilité de la couche de cisaillement .....	73
VII-3-3 Instabilités centrifuges .....	75
VII-3-4 Champ moyen en phase par rapport à l'instabilité de Kelvin-Helmholtz .....	80
VII-3-5 PIV stéréoscopique .....	81
VII-4 Conclusion .....	82
VII-5 Références .....	83
CONCLUSION .....	85
PERSPECTIVES .....	87
<b>C. PUBLICATIONS .....</b>	<b>91</b>

## **A. Rapport d'activité**



# I Curriculum vitae

## I-1 Formation

- 1995**            **Doctorat spécialité Acoustique**, mention très honorable  
École Centrale de Lyon
- 1991**            **Diplôme d'Études Approfondies d'Acoustique**, mention très bien  
École Centrale de Lyon et Université Claude Bernard Lyon I  
**Diplôme Universitaire de Post-Maîtrise de Mécanique**  
Université Claude Bernard Lyon I
- 1990**            **Maîtrise de Mécanique**, mention assez bien  
Université Claude Bernard Lyon I
- 1989**            **Licence de Mécanique**, mention assez bien  
Université Claude Bernard Lyon I
- 1988**            **DEUG A - Mathématiques, Mécanique et Physique**  
Université Claude Bernard Lyon I
- 1986**            **Baccalauréat C**, mention assez bien  
Académie de Grenoble

## I-2 Expérience professionnelle

- depuis septembre 1997**            **Maître de Conférences à l'Université Pierre et Marie Curie Paris VI**
- depuis septembre 2002*            *Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur*
- septembre 1997-août 2002*            *Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique des Fluides Interne*
- septembre 1996 / août 1997**            **Ingénieur**  
*Société METRAFLU*
- septembre 1994 / août 1996**            **Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'École Centrale de Lyon et à l'Université Lyon I (IUT B)**  
*Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique*
- septembre 1991 / août 1994**            **Allocataire de Recherche DRET / DGA**  
*Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique*
- avril / août 1991**            **Stage de DEA réalisé à l'École Centrale de Lyon**  
*Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique*



## II Liste des travaux

### II-1 Publications

#### II-1-1 Mémoires

**FAURE, Th. M.** (1995) *Étude expérimentale du sillage turbulent d'un corps à symétrie de révolution autopropulsé par hélice*, Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, n°95-01

**FAURE, Th. M.** (1991) *Automatisation d'une technique de mesure par anémométrie à films chauds croisés*, Rapport de DEA, École Centrale de Lyon

#### II-1-2 Livre

**FAURE, Th.** (2008) *Dynamique des fluides appliquée, Applications à l'aérodynamique*, Dunod, Paris, 304 pages

#### II-1-3 Articles dans des revues à comité de lecture

**FAURE, Th. M., PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FRAIGNEAU, Y., BISCH, D** (2009) Three-dimensional centrifugal instabilities development inside a parallelepipedic open cavity of various shape, *Experiments in Fluids*, Vol. 47, No. 3, pp. 395–410

**PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., FRAIGNEAU, Y., PETHIEU, R., DEBESSE, Ph.** (2008) Quantifying the non-linear mode competition in the flow over an open cavity at medium Reynolds number, *Experiments in Fluids*, Vol. 44, No. 4, pp. 597–608

**FAURE, Th. M., ADRIANOS, P., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R.** (2007) Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers, *Experiments in Fluids*, Vol. 42, No. 2, pp. 169–184

**FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P., LAUNAY, F.** (2006) Experimental investigation of the flow distribution inside a tubular heat exchanger, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 128, No. 6, pp. 1218–1227

**FAURE, Th. M., MITON, H., VASSILIEFF, N.** (2004) A laser Doppler anemometry technique for Reynolds stresses measurement, *Experiments in Fluids*, Vol. 37, No. 3, pp. 465–467

**BARIO, F., FAURE, Th. M., JONDEAU, E., NORMAND, J. L., N'GUYEN DUC J. M.** (2003) Analysis of inducer recirculating flow, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 4, pp. 521–528

**FAURE, Th. M., MICHON, G. J., MITON, H., VASSILIEFF, N.** (2001) Laser Doppler anemometry measurements in an axial compressor stage, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 3, pp. 481–491

**SHARMA, V. C., FAURE, Th. M.** (2000) Indian launchers aim at commercial market, *Aerospace America*, January 2000, pp. 14–19

**SARMA, G. R., COMTE-BELLOT, G., FAURE, Th. M.** (1998) Software corrected hot wire thermal lag for the constant voltage anemometer featuring a constant bandwidth at the selected compensation setting, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 69, No. 9, pp. 3223–3231

**FAURE, Th. M.** (1997) The Reynolds stress transport equations in a momentumless wake: experiments and models, *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 2, pp. 281–287

**FAURE, Th. M., ROBERT, G.** (1997) Spectral analysis of the turbulent structure in the momentumless wake of a propeller-driven body, *European Journal of Mechanics / B Fluids*, Vol. 16, No. 2, pp. 211–226

**FAURE, Th. M., ROBERT, G.** (1996) Turbulent kinetic energy balance in the wake of a self-propelled body, *Experiments in Fluids*, Vol. 21, No. 4, pp. 268–274

**FAURE, Th. M., ROBERT, G.** (1995) Bilan des tensions de Reynolds dans un sillage de traînée et dans un sillage de corps autopropulsé par une hélice, *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, série II b, tome 321, n°11, pp. 455–461

## II-2 Communications

### II-2-1 Congrès avec comité de lecture et actes publiés

**FAURE, Th. M., LEFÈVRE, G., PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F.** (2009) Identification de structures tourbillonnaires par PIV dans un écoulement de cavité, *13<sup>ème</sup> Colloque de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides*, Reims (France), 16-20 Novembre 2009

**LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R., DEBESSE, Ph., BALTEAN, D., FAURE, Th. M.** (2009) Self referenced phase averaging and flow complexity, *14<sup>th</sup> International Conference on Fluid Flow Technologies*, Budapest (Hungary), September 9-12, 2009

**PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., LETELLIER, Ch.** (2009) Investigating a mode-switching regime in an oscillating flow by means of symbolic dynamics, *14<sup>th</sup> International Conference on Fluid Flow Technologies*, Budapest (Hungary), September 9-12, 2009

**BASLEY, J., PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., DELPRAT, N.** (2009) Investigation of the spatial organization of spectral dynamics in an incompressible cavity flow using time-resolved high-speed PIV, *8<sup>th</sup> International Symposium on Particle Image Velocimetry*, Melbourne (Australia), August 25-28 2009

**FAURE, Th. M., LEFÈVRE, G., PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F.** (2009) Critères d'apparition d'instabilités centrifuges dans une cavité ouverte, *19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Marseille (France), 24-28 Août 2009, article n°131-S09

**PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., LETELLIER, Ch.** (2009) Intermittent regime in flow oscillations investigated by means of symbolic dynamics, *3<sup>rd</sup> International Conference on Complex Systems and Applications*, Le Havre (France), 29 June-2 July 2009

**FAURE, Th. M., DEFRASNE, A., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R., FRAIGNEAU, Y.** (2008) Structure 3D d'un écoulement de cavité ouverte de forme variable, *11<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Techniques Laser*, Futuroscope (France), 15-19 Septembre 2008, pp. 433–440

**LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R., FAURE, Th. M., LETELLIER Ch.** (2008) Poincaré section analysis of an experimental frequency intermittency in an open cavity flow, *22<sup>nd</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, Adelaide (Australia), August 25-29, 2008, paper ID 11329

**FAURE, Th. M., DEFRASNE, A., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R.** (2008) Flow instabilities development inside an open cavity, *13<sup>th</sup> International Symposium on Flow Visualization*, Nice (France), July 1-4 2008, paper ID 81

**PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., PODVIN, B., FRAIGNEAU, Y.** (2008) POD-based technique for 3D flow reconstruction using 2D data set, *13<sup>th</sup> International Symposium on Flow Visualization*, Nice (France), July 1-4 2008, paper ID 223

**PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., LETELLIER, Ch.** (2008) Analyse déterministe de la compétition non-linéaire de modes dans un écoulement en cavité, *11<sup>ème</sup> Rencontre du Non-Linéaire*, Paris (France), 25-27 Mars 2008, pp. 137–142

**FAURE, Th. M., PECHLIVANIAN, N., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R.** (2007) Apparition de structures tourbillonnaires de type Görtler dans une cavité parallélepédique ouverte de forme variable, *Actes du 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Grenoble (France), 27-31 Août 2007, CFM2007-0008

- LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R., FAURE, Th. M., PETHIEU, R.** (2007) Structures tourbillonnaires cohérentes et intermittence des modes fréquentiels dans un écoulement en cavité ouverte, *Actes du 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Grenoble (France), 27-31 Août 2007, CFM2007-1197
- PETHIEU, R., PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., DEBESSE, Ph., FAURE, Th. M.** (2007) Caractérisation expérimentale de la compétition non-linéaire de modes de Kelvin-Helmholtz dans un écoulement en cavité, *10<sup>ème</sup> Rencontre du Non-Linéaire*, Paris (France), 14-16 Mars 2007, pp. 143–148
- FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R., PETHIEU, R., DEBESSE, Ph.** (2006) Développement d'instabilités dans un écoulement subsonique se développant au-dessus d'une cavité : mesures synchronisées PIV-LDV, *10<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Techniques Laser*, Toulouse (France), 19-22 Septembre 2006, pp. 577–584
- LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R., DEBESSE, Ph., FAURE, Th. M.** (2005) Dynamique locale de l'écoulement dans une cavité ouverte, *5<sup>ème</sup> Colloque de Chaos Temporel et de Chaos Spatio-temporel*, Le Havre (France), 12-13 Décembre 2005, pp. 63–68
- LAUNAY, F., FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P.** (2005) Investigations expérimentales et numériques d'un écoulement tridimensionnel dans une structure d'échangeur thermique pour le RQF d'IPHI, *Journées Accélérateurs de la SFP*, Roscoff (France), 10-12 Octobre 2005
- QUÉNOT, G. M., FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F.** (2005) Synchronous orthogonal dynamic programming for 3C vector field evaluation, *Worldwide PIV Challenge 2005*, Pasadena (USA), September 19-20, 2005
- PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., FRAIGNEAU, Y., GOUGAT, P.** (2005) Dynamical reduction of a subsonic flow over a cavity with an aim of control, *6<sup>th</sup> SIAM Conference on Control and its Applications*, New Orleans (USA), July 11-14, 2005
- FAURE, Th. M., DEBESSE, Ph., LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P.** (2005) Structures tourbillonnaires engendrées par l'interaction entre une couche limite laminaire et une cavité, *11<sup>ème</sup> Colloque de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides*, Lyon (France), 6-9 Juin 2005
- FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P., LAUNAY, F.** (2004) Exploration de l'écoulement dans un échangeur de chaleur tubulaire par vélocimétrie par images de particules, *9<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser*, Bruxelles (Belgique), 14-17 Septembre 2004, pp. K.4.1-K.4.8
- LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., ESCHENBRENNER, C., FRAIGNEAU, Y.** (2004) Shear layer instability and frequency modes inside an open cavity, *21<sup>st</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, Warsaw (Poland), August 15-21, 2004, FM13S\_10188
- FAURE, Th. M., MITON, H., VASSILIEFF, N.** (2002) Applications de la vélocimétrie laser Doppler tridimensionnelle aux machines tournantes, *8<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser*, Orsay (France), 17-20 septembre 2002, pp. 369–372
- COMTE-BELLOT, G., SARMA, G. R., FAURE, Th. M., DUSSAUGE, J. P., DUPONT, P., DEBIÈVE, J. F.** (1999) Performance studies of the constant voltage anemometer in a Mach 2.3 boundary layer, *18<sup>th</sup> International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*, Toulouse (France), June 14-17 1999, pp. 40.1–40.9
- BÉRA, J. C., CASSAM-SULLIMAN, Y. S., FAURE, Th. M., NICOT, C., SUNYACH, M.** (1997) Contrôle par un jet synthétique pariétal de l'échappement tourbillonnaire derrière un cylindre, *Actes du 13<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Mini-Colloque Mécanique des Fluides Active, Poitiers (France), 4 septembre 1997, pp. 56–59

**FAURE, Th. M.** (1996) The Reynolds stress transport equations in a momentumless wake: experiments and models, *27<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics Conference*, New Orleans (USA), June 17-20 1996, AIAA paper 96-2037

**FAURE, Th. M.** (1996) The boundary layer approximation: an application to energy transport in wakes, in *Advances in Turbulence VI*, Eds. S. Gavrilakis, L. Machiels & P. A. Monkewitz, Lausanne (Switzerland), July 2-5 1996, pp. 517–518

**FAURE, Th. M.** (1995) Analyse des structures cohérentes dans un sillage de corps autopropulsé par hélice, *Actes du 12<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Strasbourg (France), 4-8 septembre 1995, vol. 3, pp. 357–360

**FAURE, Th. M., ROBERT, G.** (1993) Étude expérimentale des lois de similitude dans un sillage autopropulsé par hélice, *Actes du 11<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Lille-Villeneuve d'Ascq (France), 6-10 septembre 1993, vol. 2, pp. 273–276

### ***II-2-2 Communication comme invité à une conférence***

**FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R., FRAIGNEAU, Y.** (2008) Détection de structures tourbillonnaires dans un écoulement de cavité, *24<sup>ème</sup> Journée Thématique de l'AFVL*, Meudon (France), 20 Novembre 2008

### ***II-2-3 Congrès divers et séminaires***

**FAURE, Th. M.** (2008) Développement et identification de structures tourbillonnaires dans un écoulement de cavité, *Séminaire groupe Aérodynamique Instationnaire*, LIMSIS, Orsay (France), 12 Décembre 2008

**TRAN, T., SICOT, Ch., BORÉE, J., ALT, J., PASTUR, L., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M.** (2008) Développement de méthodes lagrangiennes pour l'analyse d'écoulements instationnaires, *Séminaire GdR Bruit des Transports*, Paris (France), 6 Novembre 2008

**LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R., FAURE, Th. M., DEBESSE, Ph., BALTEAN, D., FRANÇOIS, M. X.** (2006) Mesure synchronisée PIV – grandeur scalaire locale : la moyenne de phase et ses possibles évolutions, *20<sup>ème</sup> Journée Thématique de l'Association Francophone de Vélocimétrie Laser*, Meudon (France), 14 Décembre 2006

**FAURE, Th. M., ADRIANOS, P., DEBESSE, Ph., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R.** (2005) Dynamique tourbillonnaire 3D dans une cavité ouverte de rapport de forme variable, *6<sup>ème</sup> Journée de Dynamique des Fluides sur le Plateau*, Université Paris XI, Orsay (France), 14 Novembre 2005

**FAURE, Th. M., ADRIANOS, P., DEBESSE, Ph., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R.** (2005) Structures tourbillonnaires engendrées par l'interaction d'une couche limite laminaire avec une cavité ouverte, *Séminaire*, Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, UPR 3251, Orsay (France), 20 Octobre 2005

**LAUNAY, F., FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P.** (2004) Écoulement tridimensionnel dans une structure d'échangeur – Collaboration IPN-LIMSIS, *Séminaire Division Accélérateurs*, Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, UMR CNRS 8608, Orsay (France), 16 Novembre 2004

**FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P., ESCHENBRENNER, C.** (2004) PIV par flot optique : applications à l'étude d'une couche de mélange et à l'écoulement dans un échangeur thermique, *Séminaire*, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, UMR CNRS 5509, Lyon (France), 27 Février 2004

**FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., QUÉNOT, G.** (2003) Vélocimétrie par images de particules : flot optique par programmation dynamique, *Journées du Département Mécanique-Energétique*, Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, UPR CNRS 3251, Orsay (France), 20-21 Novembre 2003

- LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P., FAURE, Th. M., FRAIGNEAU, Y., PODVIN, B.** (2003) Structures spatiales et modes de Fourier dans une cavité en interaction avec une couche limite, *5<sup>ème</sup> Journée de Dynamique des Fluides sur le Plateau*, Université Paris XI, Orsay (France), 24 Avril 2003
- FAURE, Th. M.** (2001) Vélocimétrie laser Doppler 3-D : application aux écoulements internes, *Séminaire*, Laboratoire Fluides Automatique et Systèmes Thermiques, UMR CNRS 7608, Orsay (France), 10 Octobre 2001
- FAURE, Th. M.** (1997) Anémométrie à films chauds triples : application à un sillage de corps autopropulsé, *Séminaire*, Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique des Fluides Interne, URA CNRS 1504, Orsay (France), 10 Juin 1997
- FAURE, Th. M.** (1996) Étude expérimentale d'un sillage de corps autopropulsé, *Séminaire*, Laboratoire d'Études Aérodynamiques, URA CNRS 191, Poitiers (France), 22 Avril 1996
- FAURE, Th. M.** (1992) Mesures du champ cinématique à l'aval d'un corps autopropulsé par hélice, *1<sup>er</sup> Colloque des Jeunes Chercheurs de l'Inter groupe des Écoles Centrales*, Nantes (France), 25-26 Novembre 1992

#### **II-2-4 Supports de cours**

- FAURE, Th. M.** (2004) *Aérodynamique appliquée*, cours de Master Sciences de l'Ingénieur 1<sup>o</sup> année, parcours Mécanique et Ingénierie des Systèmes, Université Pierre et Marie Curie et ENS Cachan (204 pages)
- FAURE, Th. M.** (1999) *Méthodes expérimentales et méthodes de visualisation en mécanique des fluides*, cours de DEA de Conversion de l'Énergie et de DESS de Propulsion Aéronautique et Terrestre, Université Pierre et Marie Curie (80 pages)

#### **II-3 Rapports de contrats**

- Coll.** (2008) *Développement d'outils quantitatifs pour l'analyse couplée pression-vitesse en aérodynamique instationnaire. Phénomènes acoustiques associés, D.I.B.*, Rapport à 6 mois, Projet A.N.R.-07-BLAN-0177-03, Juin 2008
- HONORÉ, D., LECORDIER, B., TRINITÉ, M., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., SUSSET, A., QUÉNOT, G.** (2005) *PLIV : Particle Large Image Velocimetry – Développement de méthodes de traitement avancées adaptées à la réalisation de mesures PIV grand champ*, Rapport final, contrat CNRT / 2004 / 061, Juillet 2005
- LAUNAY, F., FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P.** (2004) *Écoulement 3D dans une structure d'échangeur – Confrontation mesures simulations*, Rapport de synthèse, contrat IPNO-04-02, Collaboration Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur - Institut de Physique Nucléaire d'Orsay
- FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F.** (2004) *PLIV : Particle Large Image Velocimetry – Développement de méthodes de traitement avancées adaptées à la réalisation de mesures PIV grand champ*, Rapport intermédiaire, contrat CNRT / 2004 / 061, Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, Juin 2004
- FAURE, Th. M.** (2004) *Caractérisation par PIV de l'écoulement dans un échangeur thermique – mesures PIV dans chacun des tubes de l'échangeur*, Rapport d'essais, contrat IPNO-04-02, Collaboration Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur - Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, Avril 2004
- FAURE, Th. M.** (2004) *Caractérisation par PIV de l'écoulement dans un échangeur thermique – mesures de pression et mesures PIV sur un tube isolé*, Rapport d'essais, contrat IPNO-04-02, Collaboration Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur - Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, Janvier 2004
- FAURE, Th. M., SATO, M., LECOQ, Y.** (2003) *Mesures PIV par flot optique dans deux types d'écoulements turbulents*, Rapport interne LIMSI-CNRS 2003-17

- FAURE, Th. M., MICHON, G. J., MITON, H., VASSILIEFF, N.** (2000) *Convention spécifique au projet CME-2 : banque expérimentale de données pour la validation de codes de calcul*, Rapport d'avancement, contrat Consortium Industrie Recherche en Turbomachines
- FAURE, Th. M., GEROLYMOS, G. A., HANISCH, C., MICHON, G. J., MITON, H., VALLET, I., VASSILIEFF, N.** (1998) *Création et validation de codes d'écoulements instationnaires en turbomachines*, Rapport de synthèse Université Pierre et Marie Curie, contrat SNECMA-TM-EDF 764 488 Rc
- FAURE, Th. M., BARIO, F.** (1997) *Analyse de l'écoulement dans un modèle à l'air de turbopompe centrifuge : Influence du calage inducteur-roue centrifuge*, Rapport de synthèse METRAFLU, contrat SEP 865.586
- FAURE, Th. M., BARIO, F.** (1997) *Analyse de l'écoulement dans un modèle à l'air de turbopompe centrifuge : Bilan et étude comparative de calages*, Rapport d'essais METRAFLU, contrat SEP 865.586
- FAURE, Th. M., BARIO, F., BOIS, G.** (1997) *Analyse de l'écoulement dans un modèle à l'air de turbopompe centrifuge : Caractérisation stationnaire de l'écoulement*, Rapport de synthèse METRAFLU, contrat SEP 865.586
- FAURE, Th. M., BARIO, F., BOIS, G.** (1997) *Analyse de l'écoulement dans un modèle à l'air de turbopompe centrifuge : Caractérisation globale du BCA à différentes vitesses de rotation et Sondages à calages imposés*, Rapport d'essais METRAFLU, contrat SEP 865.586
- FAURE, Th. M., ROBERT, G., BENARROUS, E.** (1995) *Mesure de sillage turbulent en soufflerie aérodynamique / Rapport final de synthèse*, Rapport METRAFLU, contrat DRET 92 524
- ROBERT, G., FAURE, Th. M.** (1994) *Analyse spectrale et structures cohérentes dans un sillage autopropulsé par hélice*, Rapport d'étude METRAFLU, contrat DRET 92 524
- ROBERT, G., FAURE, Th. M.** (1994) *Évaluations radiales et axiales des caractéristiques cinématiques moyennes et turbulentes d'un sillage autopropulsé par hélice*, Rapport d'étude METRAFLU, contrat DRET 92 524
- ROBERT, G., FAURE, Th. M., BENARROUS, E.** (1992) *Mesure de sillage turbulent / Rapport final de synthèse*, Rapport METRAFLU, contrat DRET 89 537
- FAURE, Th. M., BENARROUS, E., ROBERT, G., ROLAND, P.** (1992) *Étude de sillage turbulent de corps autopropulsé / Caractérisation de l'écoulement turbulent et du champ acoustique*, Rapport d'étude METRAFLU, contrat DRET 89 537

### III Enseignement et responsabilités scientifiques

#### III-1 Enseignement

depuis 1997 **Maître de Conférences à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI**  
**Chargé de Cours à l'École Normale Supérieure de Cachan**

##### *1<sup>er</sup> cycle*

- **2009–présent** : **Cours et Travaux Dirigés** d'Initiation aux Techniques Expérimentales, Licence d'Ingénierie Mécanique, 2<sup>e</sup> année (Université Paris VI)

##### *2<sup>ème</sup> cycle*

- **1997–2009** : **Cours et Travaux Dirigés** d'Aérodynamique Appliquée du **Master Sciences de l'Ingénieur**, parcours Mécanique et Ingénierie des Systèmes, 1<sup>e</sup> année (ENS Cachan)

- **2008–2009** : **Cours et Travaux Dirigés** d'Aérodynamique Externe du **Master Sciences de l'Ingénieur**, parcours Mécanique des Fluides et Énergétique (Université Paris VI)

- **2009– présent** : **Cours et Travaux Dirigés** d'Aérodynamique et Aéronautique du **Master Sciences de l'Ingénieur**, parcours Mécanique des Fluides Fondamentale et Appliquée, 1<sup>e</sup> année (Université Paris VI)

- **1997–2002** : **Travaux Dirigés** de Bases de la Mécanique de **Licence** de Mécanique, parcours Mécanique et Technologies (Université Paris VI / ENS Cachan)

- **2009–présent** : **Travaux Pratiques** d'Aérodynamique et Aéronautique du **Master Sciences de l'Ingénieur**, parcours Mécanique des Fluides Fondamentale et Appliquée, 1<sup>e</sup> année (Université Paris VI) : *écoulement autour d'une aile, tuyère de Laval*

- **1997–2009** : **Travaux Pratiques** d'Aérodynamique Appliquée du **Master Sciences de l'Ingénieur**, parcours Mécanique et Ingénierie des Systèmes (ENS Cachan) : *étude de l'écoulement autour d'une maquette d'automobile, calcul de l'écoulement autour d'un profil par la méthode des panneaux, écoulement autour d'une aile*

- **1997–présent** : **Travaux Pratiques** de Modélisation des Structures et des Écoulements de **Licence** de Mécanique, parcours Mécanique et Technologies (Université Paris VI / ENS Cachan) : *écoulement laminaire, écoulement turbulent, mesures de débits, rhéologie, réaction d'un jet*

- **1997–2003** : **Travaux Pratiques** d'Écoulements Compressibles de **Licence** de Mécanique, parcours Mécanique et Technologies (Université Paris VI / ENS Cachan) : *tuyère de Laval, écoulement autour d'un cylindre*

- **2001–présent** : **Travaux Pratiques** de Mécanique des Milieux Continus de **Licence** de Mécanique, parcours Mécanique et Modélisation (Université Paris VI) : *écoulement laminaire, écoulement autour d'un cylindre, rhéologie, réaction d'un jet*

- **Tutorat de stages** du **Master Sciences de l'Ingénieur** (ENS Cachan) : encadrement pédagogique d'étudiants de la formation en stage en entreprise

##### *3<sup>ème</sup> cycle*

- **1997–2001** : **Cours** de Méthodes Expérimentales et Méthodes de Visualisation en Mécanique des Fluides du **DEA** de Conversion de l'Énergie et du **DESS** de Propulsion Aéronautique et Terrestre (Université Paris VI)

**1995-1996** **Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'École Centrale de Lyon**

##### *2<sup>ème</sup> cycle*

- **1995–1996** : **Travaux Pratiques** d'Ordre et Chaos de **3<sup>e</sup> année** cycle ingénieur (ECL) : *étude du pendule de Moon*

- **1995–1996 : Encadrement de projets de 1<sup>e</sup> année cycle ingénieur (ECL) :** *étude d'un jet plan turbulent, caractérisation expérimentale des transferts énergétiques turbulents dans un jet plan*
- 3<sup>ème</sup> cycle
- **1995–1996 : Travaux Pratiques de Turbulence du DEA de Mécanique (ECL) :** *étalonnage d'une sonde à fil chaud, mesure de corrélations spatiales dans un jet libre*
  - **1995–1996 : Travaux Pratiques et Bureaux d'Études d'Acoustique du DEA d'Acoustique (ECL) :** *propagation acoustique dans les conduits en présence de singularité, puissance d'une source, mesure de temps de réverbération, propagation acoustique en présence d'un gradient de célérité*
  - **1995–1996 : Travaux Pratiques d'Acoustique du DESS Techniques et Applications de la Physique (Université Joseph Fourier Grenoble I) :** *intensimétrie acoustique, mesure de coefficients d'absorption*

**1994-1995 Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'Université Claude Bernard Lyon I, IUT B**

1<sup>er</sup> cycle

- **1994–1995 : Travaux Dirigés de Mécanique de 1<sup>e</sup> année** du département de Maintenance Industrielle : *cinématique, dynamique et cinétique des systèmes de solides*
- **1994–1995 : Travaux Pratiques de Mécanique de 2<sup>e</sup> année** du département de Génie Mécanique et Productique : *pertes de charge dans une conduite, utilisation d'un tube de Venturi, équilibrage d'un système en rotation, pendule de torsion, étude du gyroscope, oscillations forcées d'une poutre rigide*

**1992-1994 Vacations d'enseignement à l'École Centrale de Lyon**

3<sup>ème</sup> cycle

- **1992–1994 : Travaux Pratiques de Turbulence du DEA de Mécanique (ECL, Université Claude Bernard, Lyon I) :** *étalonnage d'une sonde à fil chaud, mesure de corrélations spatiales dans un jet libre*

**III-2 Direction de recherches**

**III-2-1 Stages de 2<sup>ème</sup> cycle**

**THACH, H.** (2009) *Analyse de stabilité d'un écoulement confiné à partir de mesures PIV résolues en temps*, Rapport de Master de Mécanique Physique 1<sup>e</sup> année, Université Paris-Sud XI

**MOCHKI, S.** (2009) *PIV stéréoscopique et application à un écoulement confiné*, Rapport de Master de Sciences de l'Ingénieur, parcours Mécanique des Fluides et Énergétique, 1<sup>e</sup> année, Université Pierre et Marie Curie Paris VI

**LEFÈVRE, G.** (2009) *Traitement et analyse des caractéristiques d'un écoulement de cavité à partir de mesures PIV*, Rapport de Licence de Physique Mécanique 3<sup>e</sup> année, Université Paris-Sud XI

**HABABOU, S.** (2008) *Analyse de mesures PIV : détermination d'épaisseur de couche limite*, Rapport de Licence de Physique Mécanique 3<sup>e</sup> année, Université Paris-Sud XI

**DEFRASNE, A.** (2007) *Évolution du champ de vitesse dans une allée de tourbillons de type Görtler prenant naissance dans une cavité ouverte*, Rapport de Master de Mécanique Physique 1<sup>e</sup> année, Université Paris-Sud XI

**PECHLIVANIAN, N.** (2006) *Détermination des seuils d'apparition d'instabilités aérodynamiques en fonction de la géométrie d'une cavité rectangulaire affleurant un*

*écoulement*, Rapport de Master de Mécanique Physique 1<sup>e</sup> année, Université Paris-Sud XI  
**SATO, M.** (2003) *Étude de l'écoulement par PIV dans un tube d'échangeur thermique*, Rapport de Maîtrise de Technologie Mécanique, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI  
**LECOCQ, Y.** (2003) *Étude par PIV de l'interaction d'un écoulement avec une cavité*, Rapport de Maîtrise de Technologie Mécanique, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI  
**RAZAFY, N.** (1999) *Étude et analyse de systèmes éoliens*, Rapport de Maîtrise de Technologie Mécanique, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI  
**KASIELSKI, T.** (1996) *Étude expérimentale d'un nouveau type d'anémomètre à fil chaud*, Rapport de Fin d'Études, Institut Polytechnique de Lodz (Pologne)  
**COUVE, P., GRENOUILLAT, R., MARQUET, F., MARTY, L., MASFRAND, V.** (1995) *Caractérisation expérimentale des transferts énergétiques turbulents dans un jet plan*, Projet de 1<sup>e</sup> année d'Ingénieur, Département Acoustique, École Centrale de Lyon  
**GAIRE, J., GUYOT, X., MASSON, C., SUTTER, P., VAUTHERIN, N.** (1994) *Étude d'un jet plan turbulent*, Projet de 1<sup>e</sup> année d'Ingénieur, Département Acoustique, École Centrale de Lyon

### **III-2-2 Thèse de doctorat et stages de DEA (3<sup>ème</sup> cycle)**

**ADRIANOS, P.** (2005) *Interaction d'un écoulement avec une cavité ouverte : étude spatio-temporelle*, Rapport de Master de Sciences de l'Ingénieur (DEA) 2<sup>e</sup> année, spécialité Mécanique des Fluides et Énergétique, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI  
**DEBESSE, Ph.** (2004) *Étude de l'intermittence d'une couche de cisaillement générée par un écoulement affleurant une cavité*, Rapport de DEA de Dynamique des Fluides et Transferts, Université Paris-Sud XI  
**VASSILIEFF, N.** (2001) *Analyse de l'écoulement dans un compresseur axial par vélocimétrie laser tridimensionnelle*, Thèse de Doctorat de Mécanique de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI (en collaboration avec H. MITON)  
**BARTHET, S.** (1997) *Contribution à la compréhension et à la connaissance de l'écoulement au sein d'une turbopompe de type cryogénique*, Rapport de DEA de Thermique et Énergétique, École Centrale de Lyon (en collaboration avec F. BARIO)

### **III-2-3 Programme de formation permanente**

**BLASZCZAK, J.** (1993) *Technique de mesure avec une sonde à films chauds triples*, Rapport de Stage de Formation Permanente, Institut Polytechnique de Lodz (Pologne)

### **III-3 Responsabilités administratives et scientifiques**

**1993-1996** **Représentant élu** dans le collège Chercheurs et Assimilés au Conseil de Département Acoustique de l'École Centrale de Lyon.  
**2000-2002** **Représentant élu** dans le collège Chercheurs au Conseil de Laboratoire du Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique des Fluides Interne de l'Université Paris VI.  
**Depuis 2004** **Représentant nommé** à l'Équipe de Formation Universitaire de la Licence de Mécanique de l'Université Paris VI.  
**Depuis 1998** **Responsable du module Aérodynamique Appliquée** du Master Sciences de l'Ingénieur, parcours Mécanique et Ingénierie des Systèmes (Université Paris VI et ENS Cachan).  
**2002-2004** **Président du jury et responsable de la Licence de Technologie Mécanique**, formation commune à l'Université Paris VI et l'ENS Cachan.  
**Depuis 2002** **Responsable de la plate-forme de Travaux Pratiques Fluides**, gestion d'un parc de vingt installations de TP, de dix postes informatiques et organisation des enseignements pratiques en Mécanique des Fluides effectués par les étudiants de Licence et Master de Mécanique (Université Paris VI) de Licence

et Master de Mécanique-Physique (Université Paris XI), de Licence de Mécanique et Technologies et de Master de Mécanique et Ingénierie des Systèmes (Université Paris VI et ENS Cachan), et de Licence de Physique et Applications (Université Paris XI).

**2007** **Membre du jury** du concours de recrutement de personnels Ingénieurs Techniques, Administratifs de Recherche et de Formation de Technicien d'expérimentation et d'exploitation en techniques expérimentales, Branche d'Activité Professionnelle C (10 postes au concours).

**Participation à l'organisation de congrès :**

**1993** 13<sup>ème</sup> Colloque d'Aéro et Hydroacoustique organisé par la Société Française d'Acoustique et l'École Centrale de Lyon, 9-11 juin 1993.

**1994** Flows Acoustics: A Technology Audit, École Centrale de Lyon, 11-13 July 1994.

**1996** 7<sup>th</sup> International Symposium on Long Range Sound Propagation, École Centrale de Lyon, 24-26 July 1996.

**Organisation de congrès :**

**2009** 25<sup>ème</sup> Journée Thématique de l'AFVL en partenariat avec FLUVISU : « Techniques d'Imagerie à la visualisation 3D d'écoulements », LIMSI, Orsay, 9 avril 2009.

**Recteur d'articles** pour des revues scientifiques à comité de lecture :

**1997** AIAA Journal

**1997** Comptes-Rendus à l'Académie des Sciences, Paris, Série II-b

**2004** The European Physical Journal – Applied Physics

**2007** Journal of Fluids Engineering, ASME

**2008** Experiments in Fluids

**2009** Comptes-Rendus de Mécanique, Académie des Sciences, Paris

**2009** Comptes-Rendus de Mécanique, Académie des Sciences, Paris

**Membre de sociétés savantes :**

American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)

Association Francophone de Vélocimétrie Laser (AFVL)

Association Française de Mécanique (AFM)

Association Aéronautique et Astronautique de France (AAAF)

**III-4 Collaborations extérieures**

**1991-1994** Dans le cadre de ma thèse portant sur les sillages de corps autopropulsés, deux contrats de recherche de la Direction Générale de l'Armement ont été menés en collaboration avec J. P. Borleteau de la société SIREHNA (Nantes).

**1996-1997** L'étude d'une nouvelle version de turbopompe à hydrogène liquide équipant le lanceur Ariane V, dans le cadre de partenariats avec la Société Européenne de Propulsion et le Centre National d'Études Spatiales, avec J. L. Normand et J. M. Nguyen Duc.

**1996-1999** La validation expérimentale en écoulement supersonique de l'anémométrie fil chaud à tension constante, a fait l'objet d'une collaboration avec G. R. Sarma et S. M. Mangalam de la société Tao Systems Inc. (Williamsburg, Va, USA).

**1997-2001** Le projet Turbo-3D pour le développement de la LDV 2 composantes et l'étude du compresseur CME-2 dans le cadre d'un soutien par la SNECMA, Turboméca, EDF et le CNRS.

**1998-2001** Le Consortium Industrie Recherche en Turbomachine pour l'extension de la LDV à 3 composantes et l'étude du compresseur CME-2 dans le cadre de la thèse de N. Vassilieff.

- 2003** Le développement de la PIV par flot optique utilisant une programmation dynamique fait l'objet d'une collaboration avec G. Quénot du laboratoire CLIPS-IMAG (Grenoble).
- 2003-2004** L'étude par PIV du champ de vitesse dans un modèle d'échangeur de chaleur fut l'objet d'une collaboration avec F. Launay de l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay.
- 2004-2005** Le développement de la PIV Grand Champ dans le cadre du CNRT Aérodynamique, Aéroacoustique des Véhicules Terrestres a fait l'objet d'une collaboration avec D. Honoré, B. Lecordier et M. Trinité du CORIA (Rouen) ainsi qu'avec A. Susset de la société R&D Vision (Paris).
- 2007-2010** ANR blanche Dynamique-Instationnarité-Bruit (DIB) associant le LEA (Poitiers), le LIMSI (Orsay) et PSA (Vélizy).
- 2008-2011** ANR blanche Contrôle Optimal et Robuste par Modèles d'Ordre Réduits d'Écoulements Décollés (CORMORED) associant le LEA (Poitiers), l'IMFT (Toulouse), le LIMSI et le laboratoire SIMUNEF (ENSAM Paris).



## IV Résumé des travaux de recherche

Dans le cadre de mes activités de recherche, la vitesse a toujours été la quantité fondamentale pour la caractérisation expérimentale des écoulements. Pour mesurer cette quantité, j'ai été amené à employer les techniques suivantes. L'enregistrement d'une différence de pression avec une sonde directionnelle à cinq trous est la méthode la plus simple et s'avère utile pour la caractérisation du champ moyen. L'anémométrie fil / film chaud permet d'accéder aux fluctuations jusqu'à des fréquences de plusieurs dizaines de kilohertz et reste donc adaptée à l'étude des écoulements turbulents. La vélocimétrie laser Doppler (LDV), permet également la caractérisation d'un écoulement à des fréquences élevées mais présente l'avantage de ne pas avoir à introduire de sonde dans le milieu. Il en est de même de la visualisation par émission de fumée, pour les écoulements basse vitesse, qui ne fournit qu'une information qualitative dans un plan, mais présente un intérêt pour la caractérisation de zones décollées ou l'identification de structures tourbillonnaires. La visualisation par images de particules (PIV) est une technique de visualisation quantitative qui fournit la répartition de vitesse dans un plan. Malgré la faible résolution en fréquence des premiers systèmes, l'évolution des lasers pulsés vers de hautes cadences, couplée à l'utilisation de caméras rapides, permet désormais de mettre en œuvre une PIV résolue en temps.

J'ai été conduit, au cours de ma carrière, à aborder différentes thématiques qui couvrent l'aérodynamique compressible et incompressible, l'aérodynamique interne des machines tournantes et l'hydraulique. L'étude du sillage turbulent d'un corps autopropulsé par hélice, par anémométrie à films chauds triples, a permis de caractériser l'écoulement et les échanges énergétiques à travers des bilans de tensions de Reynolds. Un autre axe d'étude a consisté à mettre en place un nouveau type d'anémomètre à fil chaud à tension constante, dans une couche limite supersonique, qui montre une fréquence de coupure plus élevée par rapport aux anémomètres à température constante et courant constant. Un troisième domaine d'application concerne l'aérodynamique interne des machines tournantes. L'utilisation de l'anémométrie fil chaud sur un nouveau modèle expérimental de turbopompe centrifuge m'a permis de reconstruire une mesure dans un plan, en effectuant des moyennes en phase avec la rotation. Ces données ont caractérisé les performances du modèle d'essais et les zones décollées, pour différents points de fonctionnement. Une autre application aux machines tournantes a consisté à développer une LDV tridimensionnelle, pour explorer l'écoulement dans un étage de compresseur axial à partir d'un maillage volumique de points de mesure et en effectuant un traitement en phase avec la rotation du rotor. Ces résultats ont permis d'appréhender la dynamique instationnaire de l'écoulement et notamment le tourbillon de jeu, créé par le gradient de pression sur les pales du rotor. Une application à l'hydraulique a eu pour objet la mise en place d'une PIV sur un modèle d'échangeur thermique composé de cinq canaux parallèles. L'étude a permis de connaître la répartition de débit et d'intensité de turbulence, afin de constituer une base de données en vue d'une confrontation à une simulation numérique. Enfin, un algorithme avancé de PIV par flot optique a été mis en œuvre pour caractériser un écoulement de cavité ouverte, pour une gamme de nombre de Reynolds modérés. L'analyse de la morphologie de l'écoulement, en fonction des paramètres géométriques et du nombre de Reynolds, a permis de caractériser différentes structures et dynamiques tourbillonnaires. En particulier, il a été possible d'établir le domaine d'existence d'instabilités centrifuges créées par la recirculation. L'origine des instabilités centrifuges a été analysée et a mis en évidence un seuil unique d'apparition de ces instabilités. La comparaison entre un entraînement par un cisaillement avec l'extérieur, ou par un couvercle mobile, a montré que l'écoulement dans la cavité est plus instable en présence d'une couche de cisaillement.



## V Projet de recherches à quatre ans

Les bases de mon projet de recherche à quatre ans ont été posées par les études conduites jusqu'à présent sur l'écoulement de cavité, dans le cadre de deux ANR blanches débutées récemment.

Dans un premier temps, la mise en place de la PIV stéréoscopique par flot optique devra être poursuivie pour obtenir les trois composantes de vitesse en fonction des paramètres géométriques de la cavité et du nombre de Reynolds. L'analyse de mesures PIV résolues en temps, par moyennes en phase par rapport au passage d'un tourbillon de la couche de cisaillement, devrait permettre de mieux comprendre les interactions entre l'instabilité de Kelvin-Helmholtz et les instabilités centrifuges, internes à la cavité. Des mesures synchronisées entre la PIV et un capteur de pression, permettront d'étudier le couplage entre vitesse et pression afin d'identifier des critères sur la dynamique de l'écoulement à partir d'une mesure localisée. Une signature propre des instabilités sera recherchée dans le signal de pression. L'objectif de ces mesures à plus long terme, sera la mise en place d'un contrôle en boucle fermée. Des méthodes d'identification de structures tourbillonnaires seront développées et évaluées dans ce cadre. Ce projet s'inscrit dans l'ANR DIB.

Un deuxième axe de recherche portera sur le développement de méthodes expérimentales utilisant l'algorithme de PIV par flot optique. Il consistera à mettre en place une ébauche de PIV stéréoscopique tomographique, éventuellement résolue en temps, qui est une voie vers une mesure spatiale instationnaire. Un système de deux nappes lasers perpendiculaires entre elles et utilisant deux lasers YAG en polarisation croisée, pour caractériser le plan de la recirculation et le plan des instabilités centrifuges, pourra être détecté par  $2 \times 2$  caméras, chaque caméra possédant un filtre passe-bande en longueur d'onde. Ce montage permettra d'obtenir des champs de vitesse corrélés dans les deux plans pour améliorer la compréhension du couplage dynamique entre les structures de la couche de cisaillement et les instabilités centrifuges. Par ailleurs, ces données fourniront davantage d'information pour la mise en place de modèles réduits, et rendre le contrôle plus pertinent.

Enfin, la perspective à plus long terme de ce projet est le développement du contrôle en boucle fermée, qui s'inscrit dans le cadre de l'ANR CORMORED. Une série de capteurs de pression seront placés en aval de la cavité, tandis qu'un système d'actionneurs, fixé en amont, permettra de transmettre l'action définie en temps réel par le modèle de contrôle, modèle développé au sein de l'équipe Aérodynamique du LIMSI. Le contrôle envisagé aura pour but la diminution ou l'augmentation des instabilités selon l'objectif recherché, afin de piloter l'échange entre la cavité et l'écoulement extérieur. Ce projet diffère par ce point de la plupart des projets de contrôle qui s'attachent au rayonnement acoustique de la cavité. Le montage au LIMSI d'un second dispositif expérimental, à savoir un canal en eau, viendra en renfort à la soufflerie basse vitesse actuelle, pour une implantation de différents types d'actionneurs et de capteurs. Ce canal hydraulique permettra de mesurer la pression sur une plage dynamique plus grande, et d'identifier plus facilement un signal d'activation du contrôle. De plus, des moyens électrolytiques pourront être mis en œuvre en eau et permettront une évaluation quantitative du transfert d'un scalaire.



## **B. Synthèse scientifique**







## **Introduction**

Cette synthèse de mes activités porte sur les différentes thématiques de recherche que j'ai traitées, en mécanique des fluides, et s'articule autour de la mise en œuvre de méthodes expérimentales instationnaires. Les applications sont essentiellement liées à l'exploration du champ de vitesse en aérodynamique.

Après un aperçu des méthodes de mesures de la vitesse utilisées dans ces travaux, chacun des chapitres de cette thèse fait l'objet d'une application sur un thème particulier, où, après une présentation des techniques mises en œuvre, l'exposé s'oriente vers l'analyse des résultats et la physique des phénomènes.

L'ensemble de ces travaux est réalisé dans le cadre d'actions contractuelles en partenariat industriel ou de programmes de recherche (CNRT, ANR blanches, ...) et font l'objet de publications dans des revues internationales à comité de lecture.



# I Aperçu sur les méthodes de mesure instationnaires en mécanique des fluides

## I-1 Mesure de la vitesse

La connaissance de la vitesse dans un domaine fluide est fondamentale pour caractériser un écoulement. Le vecteur vitesse présente trois composantes dans l'espace à trois dimensions, et dépend du temps. Sa mesure peut être réalisée à partir de plusieurs techniques fournissant tout ou partie de ces informations. Il est ainsi possible de classer les renseignements fournis par ces techniques selon les critères suivants :

- mesure qualitative (lignes d'émission, décollements, ...) ou quantitative ;
- mesure de la composante moyenne ou mesure de la composante fluctuante au cours du temps ;
- mesure d'une composante, de deux composantes, ou de trois composantes de vitesse ;
- mesure ponctuelle, mesure globale ;
- mesure invasive (introduction d'une sonde dans le milieu sans modifier sensiblement l'écoulement) ou mesure non invasive (essentiellement optique).

On peut donc citer les techniques de mesure de vitesse suivantes, qui ont été utilisées dans le cadre de ces travaux, selon leur apparition historique et leur degré de complexité, ainsi que leurs possibles développements futurs (Figure 1) :

- Le tube de Pitot (une composante) et la sonde clinométrique à cinq trous (trois composantes) où la vitesse s'obtient à partir d'une différence de pressions (Pitot, 1732).
- La visualisation des lignes d'émission par émission de fumée convectée par l'écoulement (Marey, 1901).
- L'anémométrie fil / film chaud (une à trois composantes) où la mesure de la vitesse se déduit de transferts thermiques (King, 1914).
- La vélocimétrie laser Doppler (LDV), méthode optique où la grandeur mesurée est le décalage Doppler d'une lumière monochromatique (Yeh & Cummins, 1964, Rolfe & Huffaker, 1967).
- La vélocimétrie par images de particules, méthode optique qui est la technique la plus intuitive dans son principe puisqu'elle mesure le déplacement de particules pendant un intervalle de temps (Dudderar & Simpkins, 1977, Adrian, 1984). Son application pratique aux écoulements bénéficie des développements de l'informatique et des méthodes de traitement d'images.

Pour les techniques optiques (visualisations, LDV, PIV), le choix des traceurs et leur moyen d'introduction dans l'écoulement sont prépondérants. En effet, l'ensemencement doit présenter les propriétés suivantes :

- il doit suivre parfaitement l'écoulement sans le perturber ;
- il ne doit pas sédimenter ;
- il doit avoir de bonnes propriétés de réflexion de la lumière ;
- son introduction doit être uniforme dans tout le volume fluide d'étude ;
- l'encrassement des parois de la veine d'essais en cours d'expérience doit être résolu.

D'autres techniques expérimentales n'ont pas été mises en œuvre dans le cadre de mes activités de recherche. On peut citer, à titre d'exemples, parmi les méthodes qualitatives, l'ombroscopie, la strioscopie, l'interférométrie, qui mesurent respectivement la dérivée seconde, la dérivée première de l'indice de réfraction ou directement l'indice de réfraction du milieu. Ces méthodes sont particulièrement adaptées aux écoulements présentant des gradients de masse volumique (écoulements compressibles, combustion, ...). Comme

méthodes quantitatives, on peut mentionner la vélocimétrie Doppler globale (DGV) et l'holographie double exposition laser qui nécessitent souvent de lourds montages expérimentaux.

L'évolution actuelle des capacités de stockage d'information, de traitement et de représentation spatiale des données conduit au développement de techniques de mesure tridimensionnelles et résolues en temps (vélocimétrie par images de particules tomographique résolue en temps, holographie cinématographique, ...) qui relèvent encore du domaine de la recherche et d'applications limitées à certains types d'écoulements. Cependant, on verra dans la suite qu'il est possible de reconstruire une information 2D ou 3D à partir de mesures ponctuelles (sonde de pression, fil chaud, LDV) en effectuant un maillage spatial du domaine, dans le cas d'un écoulement ergodique (Figure 10), ou à partir de moyennes en phase par rapport à un phénomène périodique de l'écoulement (Figure 15, Figure 25, Figure 26, Figure 30).

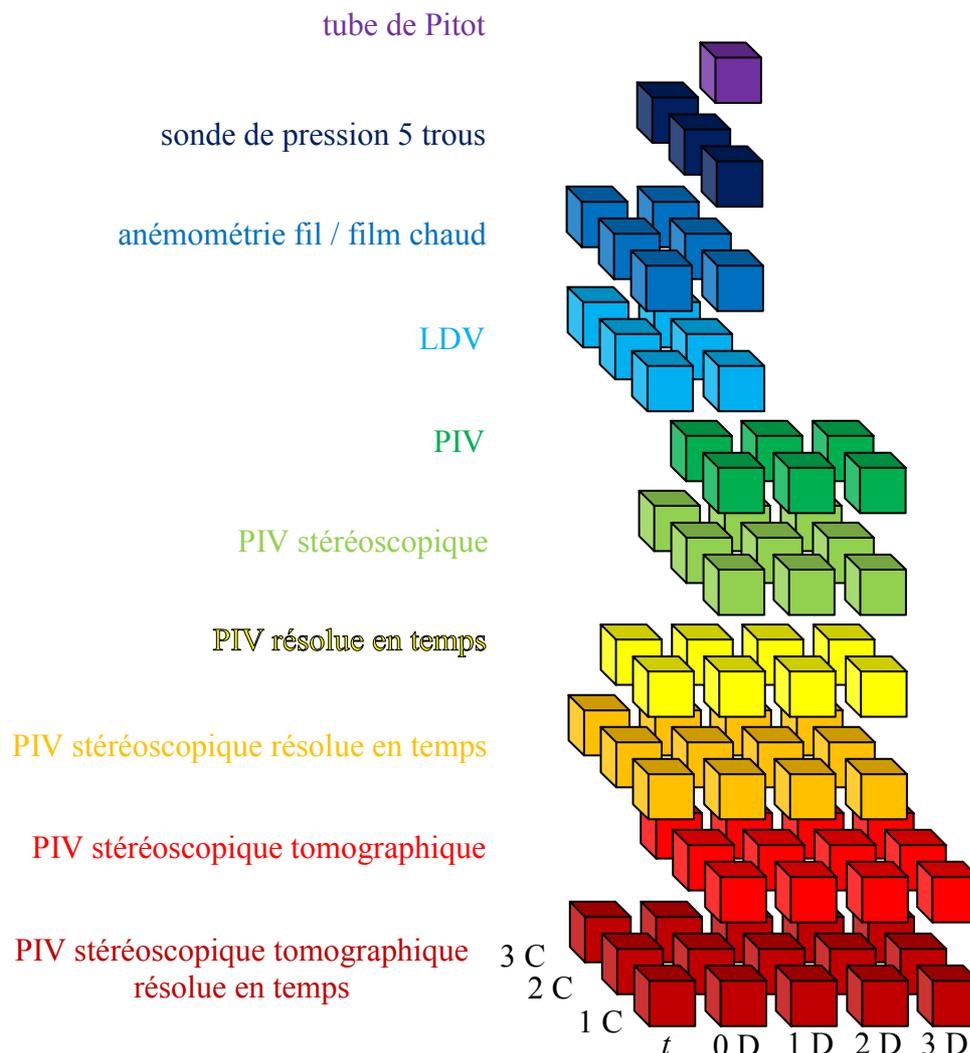


Figure 1 : Différentes techniques de mesure de la vitesse.

## I-2 Domaines d'application

Dans le cadre des travaux présentés par la suite, on abordera différents domaines de la mécanique des fluides. L'aérodynamique instationnaire est le cadre de la plupart de ces études. La turbulence est l'objet des deux chapitres suivants, à travers respectivement l'étude d'un sillage de corps autopropulsé et la caractérisation d'une couche limite supersonique.

L'aérodynamique interne des machines tournantes est l'objet des chapitres IV et V qui traitent successivement de l'étude d'une turbopompe centrifuge et du couplage rotor-stator dans un étage de compresseur axial. L'hydraulique est abordée par une application à la thermique et l'étude de l'écoulement dans un échangeur de chaleur. Enfin, la thématique des instabilités est développée dans le dernier chapitre qui traite de l'écoulement de cavité engendré par une couche de cisaillement qui présente une instabilité de Kelvin-Helmholtz et, dans certaines configurations, des instabilités centrifuges.

### I-3 Références

**ADRIAN, R. J.** (1984) Scattering particle characteristics and their effects on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry versus particle image velocimetry, *Appl. Opt.*, Vol. 23, pp. 1690–1691

**DUDDERAR, T. D., SIMPKINS, P. G.** (1977) Laser speckle photography in a fluid medium, *Nature*, No. 270, pp. 45–47

**KING, L. V.** (1914) On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: determination of the convective constants of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry, *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 214 A, No. 14, pp. 373–432

**MAREY, É. J.** (1901) Les mouvements de l'air étudiés par la chronophotographie, *La Nature – Revue des Sciences*, 2<sup>nd</sup> semestre, p. 232

**PITOT, H.** (1732) Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 363–376

**ROLFE, E., HUFFAKER, R. M.** (1967) Laser Doppler velocity instrument for wind tunnel turbulence and velocity measurements, *NASA Report N68-18099*

**YEH, Y., CUMMINS, H. Z.** (1964) Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer, *Appl Phys. Lett.*, Vol. 4, pp. 176–178



## **II Étude du sillage turbulent d'un corps à symétrie de révolution autopropulsé par hélice**

### **II-1 Introduction**

Ce thème de recherche constitue mon sujet de thèse de doctorat (Faure, 1995), proposé par la Direction Générale de l'Armement, et a pour objectif de caractériser et de comprendre les phénomènes physiques présents dans le sillage turbulent d'un corps autopropulsé par hélice. L'intérêt de cette configuration résulte du possible développement d'une méthode de détection passive d'un sillage lointain de sous-marin en immersion profonde, où la forte pression rencontrée empêche l'apparition de la cavitation. En parallèle à la thèse, ce sujet de recherche fait l'objet de deux contrats de la Direction Générale de l'Armement (DRET 89 537 et DRET 92 524) et d'une collaboration avec la société SIREHNA (contrat DRET 92 522).

Une expérience est mise en place dans la grande soufflerie anéchoïde de l'École Centrale de Lyon, dans des conditions de similitude de Reynolds. Une maquette motorisée permet de générer un sillage autopropulsé à quantité de mouvement nulle. La même maquette, sans système de propulsion, est étudiée pour avoir en référence le sillage à déficit de quantité de mouvement. Un système d'anémométrie à films chauds triples, entièrement automatisé, a été spécialement développé afin d'explorer différentes sections du sillage.

L'analyse porte d'abord sur la caractérisation statistique du champ de vitesse et la recherche d'une affinité en sillage lointain. Le sillage autopropulsé est comparé au sillage à déficit de quantité de mouvement, au niveau des transferts énergétiques, par des bilans d'énergie cinétique turbulente et de tensions de Reynolds. En particulier, on montre par l'analyse dimensionnelle du problème, que le terme de production est négligeable dans le cas autopropulsé. Différents modèles des termes de corrélation pression/déformations sont également confrontés aux résultats expérimentaux. Une analyse spectrale du champ de vitesse met en évidence une composante large bande, avec des raies spectrales dans la zone de sillage proche où les structures organisées de l'écoulement sont caractérisées par des moyennes en phase par rapport à la rotation de l'hélice.

### **II-2 Dispositif expérimental**

#### ***II-2-1 Banc expérimental***

La veine d'essais, de six mètres de longueur et de section carrée  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ , comporte des parois supérieures et inférieures modulables qui permettent son instrumentation et son exploration axiale (Figure 2). Pour les conditions d'essais, l'uniformité de la vitesse dans une section est de  $\pm 2\%$  en début de veine et  $\pm 3\%$  en fin de veine, avec une intensité de turbulence résiduelle maximale de  $0,7\%$  pratiquement constante de l'amont à l'aval.

La maquette à symétrie axiale, de 50 cm de longueur et de diamètre maximum  $D = 8 \text{ cm}$ , comporte une partie amont ellipsoïdale, une partie centrale cylindrique de section constante, et une partie aval profilée (Figure 3-a). Pour l'étude du sillage autopropulsé, on utilise une partie terminale contenant un moteur électrique à courant continu sans collecteur (Minimotor SA type 3556 K BL 1) d'alimentation variable de 12 à 56 V, qui entraîne une hélice tripale de 4 cm de diamètre à  $15\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$  (Figure 3-b). Une carte de commande (Minimotor SA type BLD 568) implantée dans le boîtier d'alimentation permet une régulation de la rotation. Un capteur à effet Hall intégré génère à chaque tour un signal carré de 5 V de tension de sortie. Le refroidissement du moteur, rendu nécessaire par l'endommagement du câblage électrique pour des températures supérieures à  $80^\circ\text{C}$ , est réalisé par la convection forcée de l'écoulement intérieur à la maquette au moyen d'un ventilateur. Pour améliorer l'échange thermique entre la maquette et l'extérieur, celle-ci a été réalisée en aluminium.

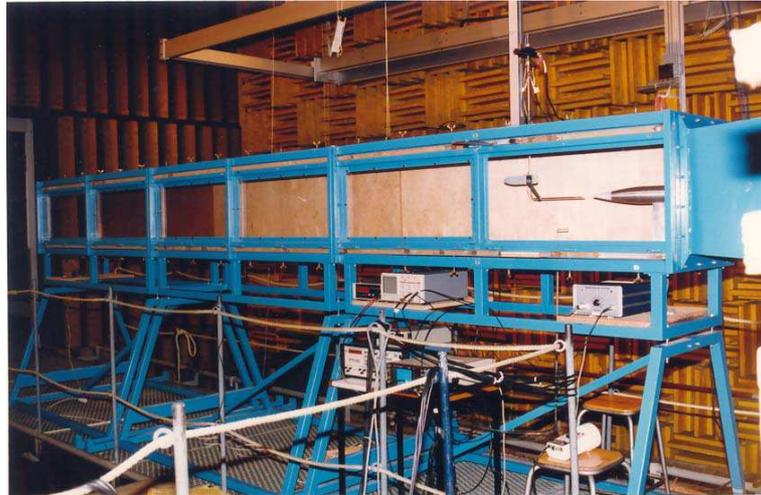
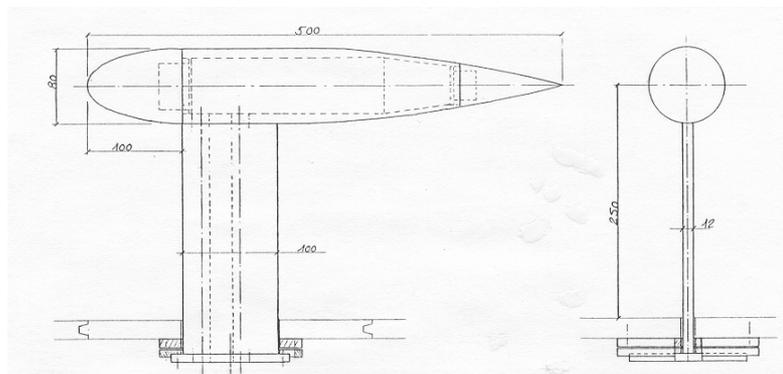


Figure 2 : Dispositif expérimental : veine d'essais avec la maquette (configuration de sillage à déficit de quantité de mouvement) et le système de déplacement de la sonde à films chauds triples.



a)



b)

Figure 3 : Maquette d'essais : a) vues latérale et de face, b) parties terminales avec et sans propulseur.

L'expression de la différence entre le coefficient de poussée  $F_P$  et le coefficient de traînée  $F_T$  s'obtient par un bilan de quantité de mouvement, sur un volume de contrôle entourant la maquette (Figure 4) :

$$F_P - F_T = \rho \int_{\Sigma_2} \bar{U}_x^2 dS - \rho U_e^2 S + \int_{\Sigma_2} \bar{P} dS - P_e S$$

Les deux paramètres qui peuvent varier pour annuler l'équation précédente sont la vitesse de rotation de l'hélice  $N$  et la vitesse de l'écoulement extérieur  $U_e$ . Pour obtenir un rapport signal sur bruit optimum, nous avons fixé la vitesse de rotation à sa valeur maximum et fait varier la vitesse de l'écoulement. Tous les termes de l'équation sont mesurés à l'aide d'une sonde à cinq prises de pression. La configuration de sillage de corps autopropulsé est obtenue lorsque la différence entre la poussée et la traînée est nulle (Figure 5). On retient finalement comme paramètres pour l'autopropulsion, une vitesse d'écoulement  $U_e = 11,6 \pm 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et une vitesse de rotation du propulseur  $N = 15\,000 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ .

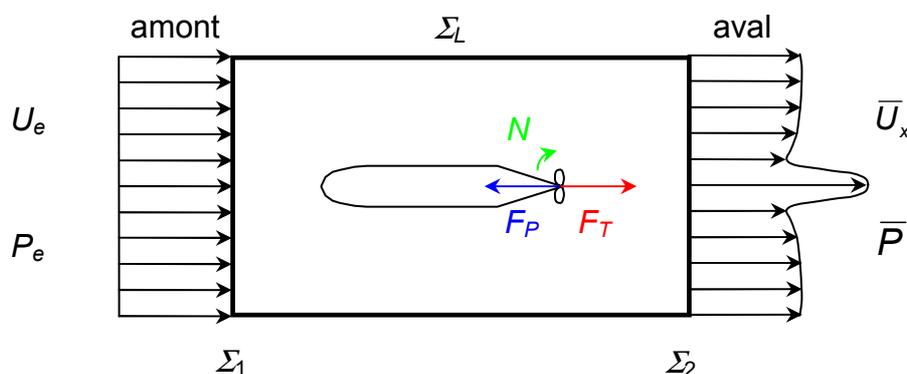


Figure 4 : Volume de contrôle autour d'un corps autopropulsé par hélice pour le calcul d'un bilan de quantité de mouvement.

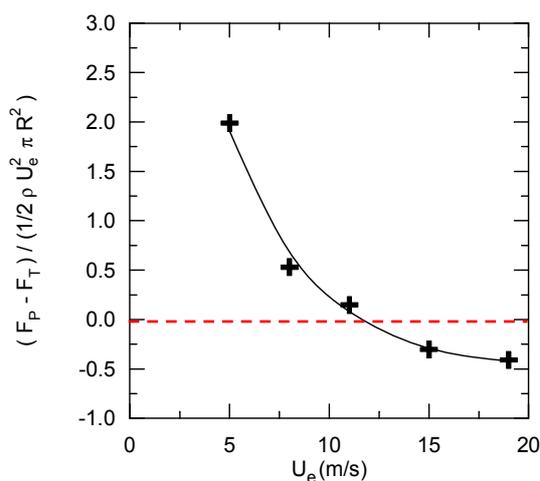


Figure 5 : Différence entre le coefficient de poussée et le coefficient de traînée, mesurée par un bilan de quantité de mouvement, en fonction de la vitesse de l'écoulement extérieur  $U_e$ , pour  $N = 15\,000 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### II-2-2 Instrumentation

La sonde utilisée est une sonde triple à films chauds orthogonaux DANTEC 55R91. Chaque capteur est constitué d'un cylindre de quartz de  $70 \mu\text{m}$  de diamètre et de  $1,25 \text{ mm}$  de long sur lequel est déposé un film de nickel, l'ensemble est protégé par un revêtement de quartz de  $0,5 \mu\text{m}$  d'épaisseur. Les trois capteurs sont perpendiculaires entre eux et contenus dans une sphère de  $3 \text{ mm}$  de diamètre (Figure 6). La gamme de vitesse de la sonde, d'après le constructeur, est  $0,2 - 350 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dans l'air, et sa limite de réponse en fréquence est  $175 \text{ kHz}$ . La résistance des capteurs est d'environ  $6 \Omega$  et ils sont utilisés dans un montage d'anémométrie à température constante (CTA) avec un coefficient de surchauffe défini par  $a_w = (R_w - R_c) / R_c = 0,7$  (Figure 7). L'étalonnage de la sonde consiste à établir trois lois de

King (1914) pour chacun des capteurs. La sonde est ensuite ajustée avec soin par rapport à l'écoulement afin d'utiliser les relations de projection géométrique de Jorgensen (1971).

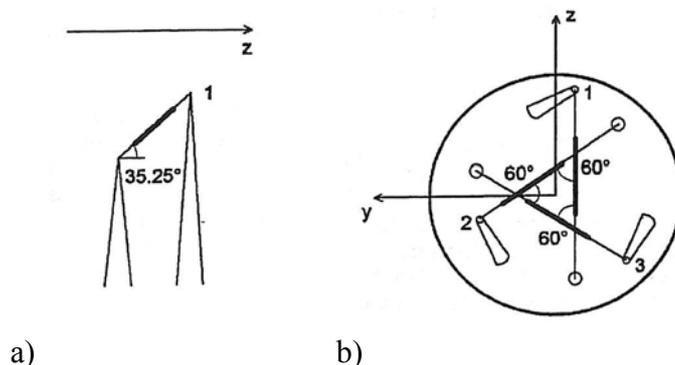


Figure 6 : Géométrie de la sonde triple à films chauds : a) vue latérale d'un film, b) vue de face.

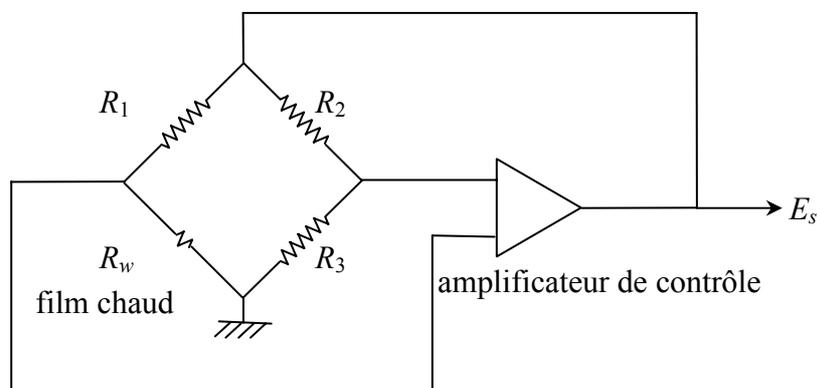


Figure 7 : Schéma de principe de l'anémomètre à température constante (CTA).

Par ailleurs, les conditions d'utilisation d'une sonde à films chauds peuvent varier au cours d'une campagne de mesure de plusieurs heures, principalement du fait de la variation de la température ambiante. Afin de s'affranchir de cette contrainte, un recalage des signaux en température est réalisé en cours d'acquisition dans l'écoulement extérieur (Figure 8).

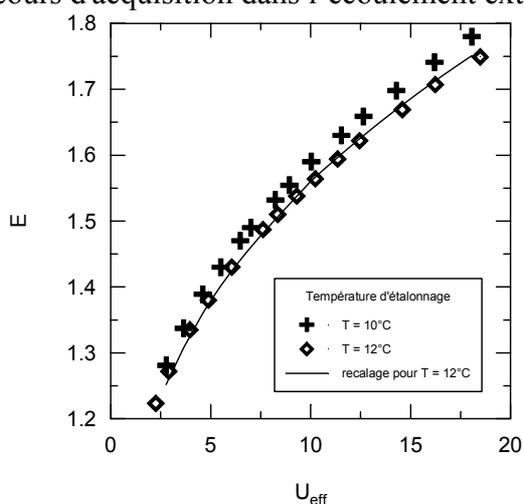


Figure 8 : Étalonnage d'un film chaud et recalage en température pour une dérive de 2°C.

La chaîne de mesure complète comprend :

- la sonde triple à films chauds DANTEC 55R91 décrite précédemment ;
- l'anémomètre TSI IFA 100 à 3 voies, chaque voie est constituée par un module anémomètre 150 et par un module conditionneur de signal 157 ;
- une carte d'acquisition 12 bits 8 voies 200 kHz ;
- un chariot de déplacement deux axes et rotation associé à un boîtier de commande Dynapar.

La précision des déplacements est de  $\pm 0,1$  mm. L'ensemble de ces composants est piloté à partir d'un micro-ordinateur 80 386 16 MHz par liaisons RS 232 (Figure 9).

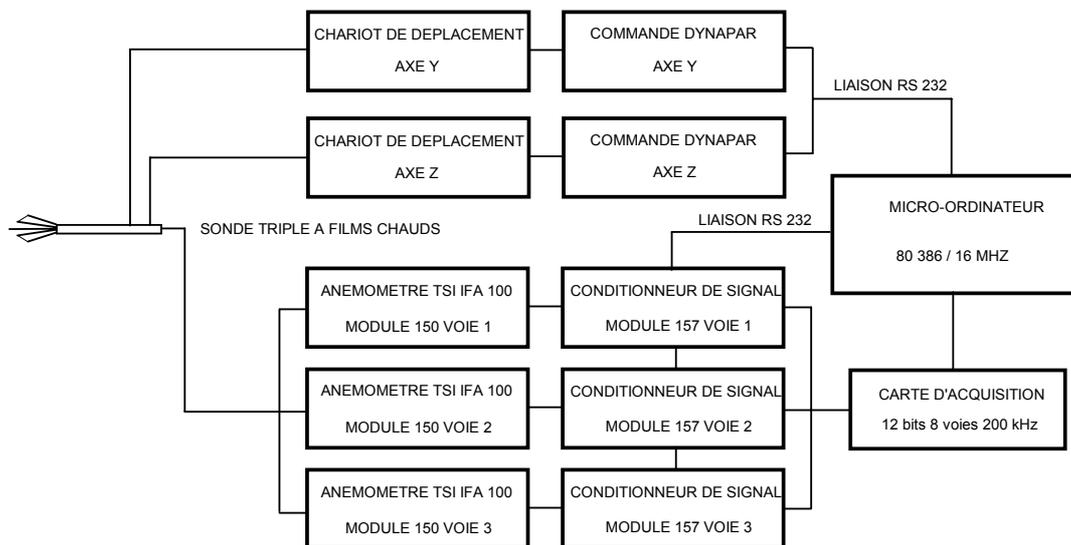


Figure 9 : Système de mesure, déplacement et acquisition.

Trois types d'acquisition sont effectués pour chaque configuration de sillage et chaque distance d'exploration :

- une acquisition dans une section complète de la veine d'essais (400 points,  $f_{acq} = 4$  kHz,  $t_{acq} = 5$  s), afin d'obtenir les vitesses moyennes et quadratiques moyennes ;
- une acquisition « basse fréquence » selon un rayon à partir de l'axe du sillage (30 points,  $f_{acq} = 7,5$  kHz,  $t_{acq} = 20$  s), pour assurer la convergence des moments de vitesse d'ordre 3 et le calcul de spectres de vitesse « basse fréquence » ;
- une acquisition « haute fréquence » selon le même rayon que précédemment (30 points,  $f_{acq} = 50$  kHz,  $t_{acq} = 3$  s), pour recueillir un signal échantillonné très finement et réaliser un traitement périodique du signal calé sur la rotation de l'hélice. De plus, cette acquisition permet le calcul de spectres de vitesse « haute fréquence ».

Avec ces paramètres, l'incertitude de mesure est estimée :

- pour les valeurs moyennes (moments d'ordre 1) à 0,43% ;
- pour les moments d'ordre 2 à 1,4% ;
- pour les moments d'ordre 3 à 2,7%.

## II-3 Principaux résultats

### II-3-1 Affinité du sillage lointain

On explore différentes positions axiales dans le sillage (Figure 10). L'ensemble des résultats obtenus constitue une base de données originale, compte tenu du faible nombre de publications sur ce sujet (Naudascher 1965, Schetz & Jakubowski 1975, Cimbalá & Park 1990 et Park & Cimbalá 1991). Un résultat de cette étude est la mise en évidence de l'affinité des vitesses moyennes et des écarts-types des fluctuations, observé à partir de  $x/D = 17,5$ , pour le sillage lointain de corps autopropulsé (Faure 1995, Figure 11). La vitesse moyenne

mesurée correspond au profil de similitude déterminé analytiquement pour  $x / D = 17,5$ , mais la similitude n'est pas observée plus en aval du fait de la croissance du rapport signal sur bruit de l'écoulement dans la soufflerie. Cependant, les lois d'évolution fournies par l'analyse des équations du mouvement et reposant sur la distinction entre deux régimes extrêmes d'écoulement (Ferry & Piquet 1987) ne paraissent pas justifiées expérimentalement.

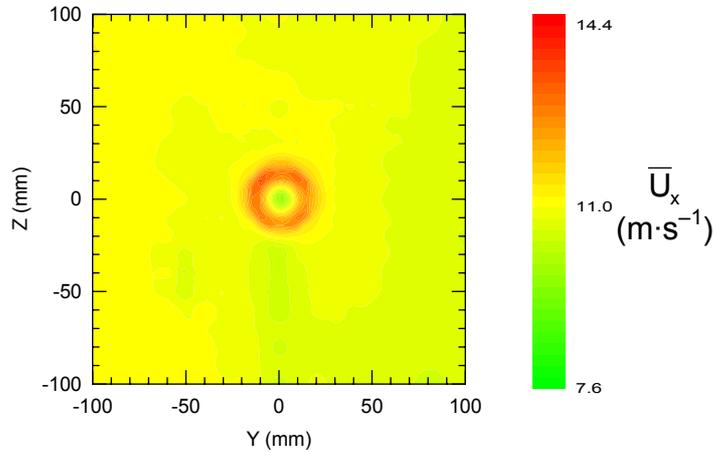


Figure 10 : Champ de vitesse moyenne axiale pour et  $x/D = 1$ .

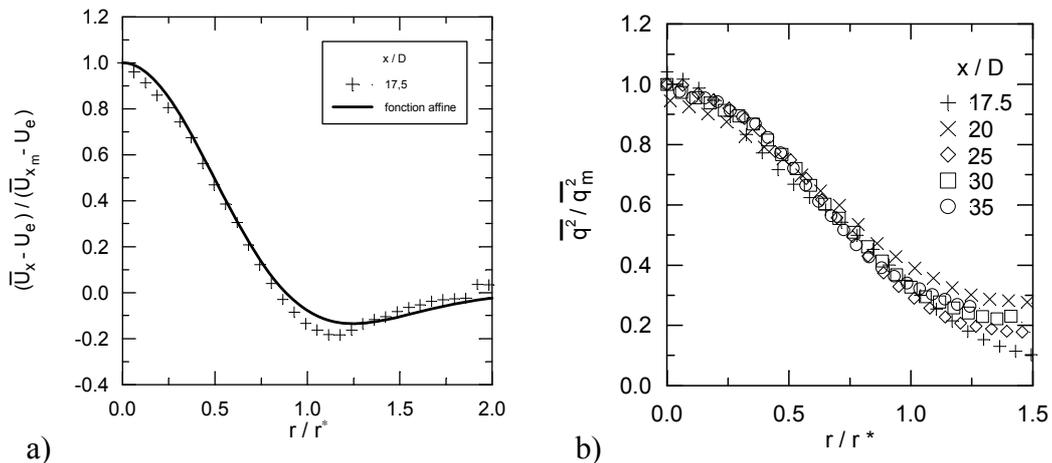


Figure 11 : Affinité du champ de vitesse en sillage autopropulsé lointain : a) vitesse moyenne axiale, b) énergie cinétique turbulente.

### II-3-2 Bilans d'énergie cinétique turbulente et de tensions de Reynolds

Tous les termes de l'équation d'énergie cinétique turbulente accessibles à la mesure ont été déterminés (Faure & Robert 1995, Faure & Robert 1996). Cette équation peut se réduire à l'expression suivante, pour un sillage à symétrie de révolution axiale, dans le cadre de l'approximation de « couche limite » valable en sillage lointain :

$$\bar{U}_x \frac{\partial \bar{q}^2}{\partial x} = -\overline{u_x u_r} \frac{\partial \bar{U}_x}{\partial r} - \overline{u_r u_\theta} \left( \frac{\partial \bar{U}_\theta}{\partial r} - \frac{\bar{U}_\theta}{r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \overline{q^2 u_r} \right) - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \overline{p u_r} \right) - \bar{\epsilon}$$

On montre l'affinité des échanges turbulents en champ lointain (Figure 12). Il faut remarquer que le terme de production est négligeable par rapport aux autres types de transfert, ce qui n'est pas le cas du sillage à déficit de quantité de mouvement.

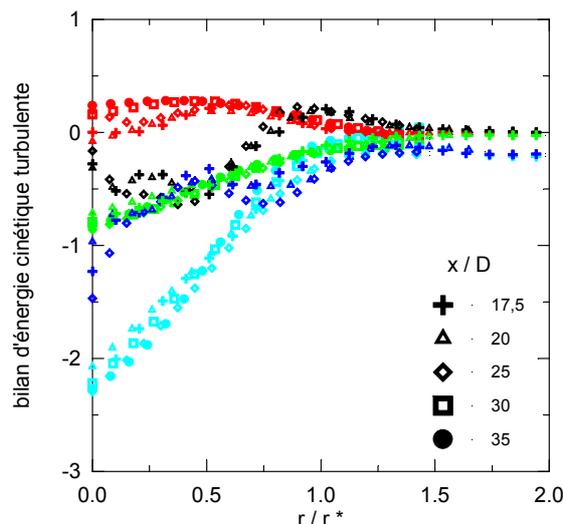


Figure 12 : Évolution affine de chacun des termes du bilan d'énergie cinétique turbulente en sillage autopropulsé pour 5 distances en aval de la maquette (bleu clair : convection, rouge : production, noir : transfert cinétique, vert : transfert pression, bleu foncé : dissipation isotrope).

Une détermination expérimentale de chacun des termes des équations de transport des tensions de Reynolds est également effectuée (Faure 1997). De tels bilans ont un intérêt certain car ils sont pris en compte par les codes numériques dans l'utilisation de fermetures au second ordre. Ainsi, il est possible de comparer plusieurs modèles du terme pression-déformations (Launder *et al.* 1975 modèles d'isotropisation de la production IP et quasi-isotrope QI, Gibson & Younis 1986, Fu *et al.* 1987) avec les évolutions fournies par les mesures (Figure 13). Le modèle de Fu *et al.* 1987, calibré pour un jet tournant avec recirculation, donne des évolutions assez proches des évolutions mesurées.

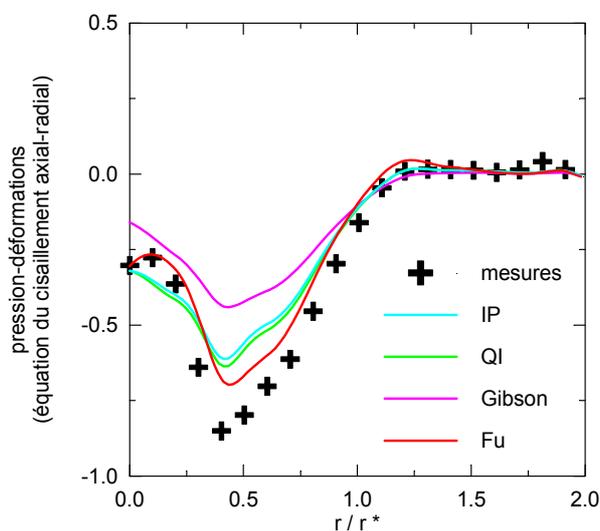


Figure 13 : Comparaisons entre le terme pression-déformations mesuré et modélisé pour l'équation du cisaillement axial-radial.

### II-3-3 Analyse spectrale

Une analyse spectrale est également menée (Faure & Robert 1997, Figure 14). Les raies spectrales associées à la rotation de l'hélice ainsi qu'au passage périodique des pales sont identifiées. On remarque que la seconde raie présente un niveau plus élevé que la première dans une zone initiale ; cependant, elle disparaît rapidement et seule la raie caractéristique de

la rotation du propulseur persiste jusqu'à 10 diamètres d'hélice en aval du bord de fuite de la maquette. Les propriétés d'affinité des densités spectrales de puissance sont établies dans une zone lointaine du sillage. En particulier, on note sur la partie large bande du spectre de vitesse radiale, un maximum à la frontière du sillage, que l'on peut associer à l'émission de grosses structures turbulentes.

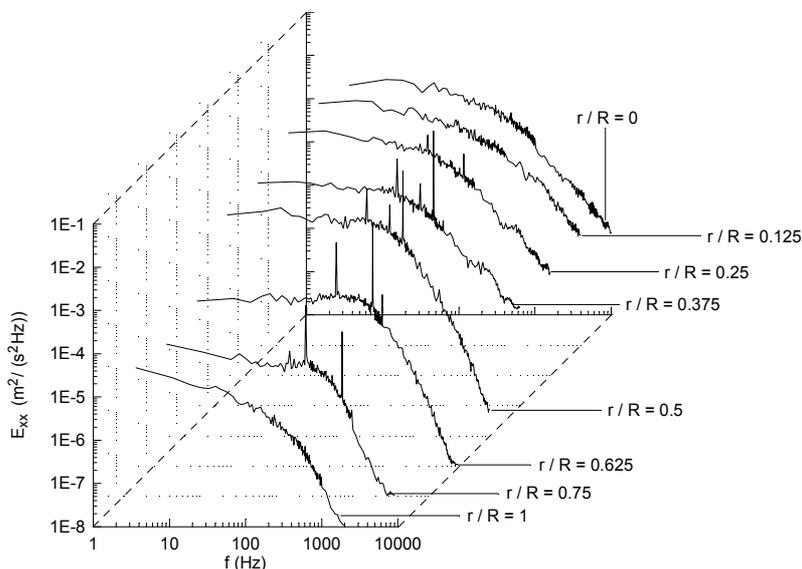


Figure 14 : Évolution radiale de la densité spectrale de puissance des fluctuations de vitesse axiale pour  $x/D = 1$ .

### II-3-4 Moyennes de phase

Un traitement conditionnel des signaux permet de mettre en évidence les structures organisées de l'écoulement, par rapport à la rotation de l'hélice, jusqu'à une distance de 4 diamètres d'hélice en aval de celle-ci (Figure 15). Les processus d'émission et d'aspiration de fluide au passage des pales sont clairement identifiés. Il faut aussi noter, sur la composante axiale moyenne de la vorticité, les tourbillons de bout de pale contrarotatifs.

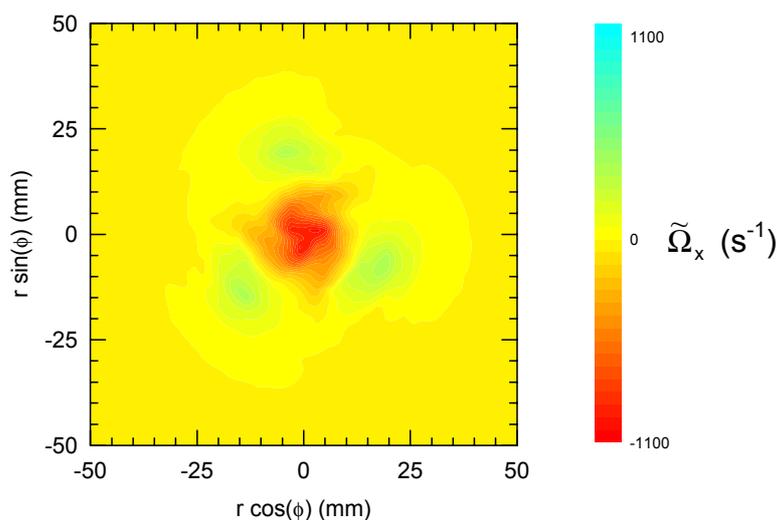


Figure 15 : Moyenne de la vorticité axiale en phase avec la rotation de l'hélice pour  $x/D = 0,4$ .

## II-4 Conclusion

Un système automatisé en déplacement et acquisition, utilisant l'anémométrie films chauds à trois composantes, permet l'exploration d'un sillage autopropulsé de son origine

jusqu'à une distance aval de 50 diamètres du corps. Cette technique expérimentale, faiblement invasive, est bien adaptée à l'étude de cet écoulement libre turbulent tridimensionnel. La configuration de sillage à déficit de quantité de mouvement permet de retrouver les résultats classiques concernant l'affinité des profils de vitesse ainsi que les lois axiales d'évolution prédites par l'analyse des équations du problème. Ces mesures sont également en accord avec les quelques expériences disponibles sur le sujet. La configuration de sillage autopropulsé par hélice, à quantité de mouvement nulle, montre un certain nombre de résultats originaux. Différentes zones d'évolution axiale sont identifiées :

- le sillage proche pour  $x / D < 5$ , marqué par la signature spectrale de l'hélice ;
- une région intermédiaire d'établissement pour  $5 < x / D < 20$  ;
- le sillage lointain pour  $x / D > 20$ , qui présente des propriétés d'affinité des champs moyens, turbulents et des échanges énergétiques.

La mesure de tous les termes de l'équation d'énergie cinétique turbulente met en évidence que la production est négligeable dans la zone affine, pour le sillage autopropulsé, ce qui est différent par rapport à un sillage à déficit de quantité de mouvement. Les lois d'évolution axiales d'un sillage de corps autopropulsé, reposant sur une séparation entre un régime axial dominant, dans le cas d'une propulsion par jet, et un régime de rotation dominante, pour une propulsion par hélice, ne sont pas validées expérimentalement. Une fermeture du problème pourrait être envisagée en prenant en compte le fait que la production d'énergie cinétique turbulente est négligeable.

## II-5 Références

- CIMBALA, J. M., PARK, W. J.** (1990) An experimental investigation of the turbulent structure in a two-dimensional momentumless wake, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 213, pp. 479–509
- FAURE, Th. M.** (1995) *Étude expérimentale du sillage turbulent d'un corps à symétrie de révolution autopropulsé par hélice*, Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, n°95-01
- FAURE, Th. M., ROBERT, G.** (1995) Bilan des tensions de Reynolds dans un sillage de traînée et dans un sillage de corps autopropulsé par une hélice, *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, série II b, tome 321, n°11, pp. 455–461
- FAURE, Th. M., ROBERT, G.** (1996) Turbulent kinetic energy balance in the wake of a self-propelled body, *Experiments in Fluids*, Vol. 21, No. 4, pp. 268–274
- FAURE, Th. M., ROBERT, G.** (1997) Spectral analysis of the turbulent structure in the momentumless wake of a propeller-driven body, *European Journal of Mechanics / B Fluids*, Vol. 16, No. 2, pp. 211–226
- FAURE, Th. M.** (1997) The Reynolds stress transport equations in a momentumless wake: experiments and models, *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 2, pp. 281–287
- FERRY, M., PIQUET, J.** (1987) *Sillage visqueux lointain d'un corps sous-marin autopropulsé*, Rapport d'étude SIREHNA, contrat DRET 86 1201
- FU, S., LAUNDER, B. E., LESCHZINER, M. A.** (1987) Modelling strongly recirculating jet flow with Reynolds-stress transport closures, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Symposium on Turbulent Shear Flows*, Toulouse, France
- GIBSON, M. M., YOUNIS, B. A.** (1986) Calculation of swirling jets with a Reynolds stress closure, *Physics of Fluids*, Vol. 29, No. 1, pp. 38–48
- JORGENSEN, F. E.** (1971) Directional sensitivity of wire and fiber film probes, *DISA Information*, No. 11, pp. 31–37
- LAUNDER, B. E., REECE, G. J., RODI, W.** (1975) Progress in the development of Reynolds-stress turbulence closure, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 68, No. 3, pp. 537–566

- KING, L. V.** (1914) On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: determination of the convective constants of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry, *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 214 A, No. 14, pp. 373–432
- NAUDASCHER, E.** (1965) Flow in the wake of self-propelled bodies and related sources of turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 22, Part 4, pp. 625–656
- PARK, W. J., CIMBALA, J. M.** (1991) The effect of jet injection geometry on two-dimensional momentumless wakes, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 224, pp. 29–47
- SCHETZ, J. A., JAKUBOWSKI, A. K.** (1975) Experimental studies of the turbulent wake behind self-propelled slender bodies, *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 12, pp. 1568–1575

## **III Développement de l'anémométrie fil chaud à tension constante et application à une couche limite supersonique**

### **III-1 Introduction**

Cette étude est menée dans le cadre du développement de l'anémomètre à tension constante (CVA, constant voltage anemometry, Sarma, 1991) en collaboration avec la société Tao Systems Incorporated et fait l'objet d'un partenariat avec le LEA (CEAT) à Poitiers et l'IRPHE à Marseille pour l'utilisation de souffleries supersoniques. L'analyse préliminaire de l'utilisation du CVA est le sujet du stage de fin d'étude de Tomasz Kasiarski (1996). La mesure prenant en compte la compensation du circuit électronique avec la constante de temps mesurée dans l'écoulement, ou la mesure avec une constante de temps arbitraire et une correction a posteriori de la constante de temps, sont deux possibilités d'utilisation du CVA. Une comparaison avec les montages classiques d'anémométrie fil chaud termine l'analyse (anémomètre à courant constant, CCA et anémomètre à température constante, CTA).

### **III-2 Dispositif expérimental**

#### ***III-2-1 Soufflerie expérimentale***

La soufflerie à rafale du CEAT présente une section d'essais de 150 mm × 150 mm. Les conditions à l'extérieur de la couche limite sont une température de 158 K et une pression de  $0,122 \cdot 10^5$  Pa. Le nombre de Mach extérieur à la couche limite est de 2. L'épaisseur de la couche limite à l'abscisse de mesure est  $\delta = 15,7$  mm. Deux fils chauds en tungstène de diamètres respectifs 2,5  $\mu\text{m}$  et 5  $\mu\text{m}$  sont placés à deux positions relatives  $y / \delta = 0,32$  et 0,64 de la paroi.

La soufflerie continue de l'IRPHE permet l'étude d'une couche limite sans gradient de pression extérieure de nombre de Mach 2,3. Elle est utilisée pour trois pressions de  $0,163 \cdot 10^5$  Pa,  $0,492 \cdot 10^5$  Pa et  $0,746 \cdot 10^5$  Pa. La position de mesure est située à 0,75 m en aval du col de la soufflerie, où la couche limite présente une épaisseur  $\delta = 15$  mm. Un fil chaud en tungstène avec un plaquage de platine de 2,5  $\mu\text{m}$  de diamètre est placé à  $y / \delta = 0,27$ . Les essais sont réalisés pour différentes valeurs du coefficient de surchauffe  $a_w = (R_w - R_c) / R_c$ .

#### ***III-2-2 Instrumentation***

Le CVA (Figure 16) peut être utilisé de deux manières : soit en effectuant la compensation du circuit électronique avec la constante de temps mesurée pour les conditions d'essais, soit avec une compensation thermique arbitraire, la correction par la vraie valeur de la constante de temps s'effectuant a posteriori. Ce second processus opératoire permet une plus grande productivité dans les mesures. La compensation thermique du circuit est réalisée par la combinaison des résistances et de la capacité ( $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_d$ ,  $C$ ). Les signaux sont enregistrés à une fréquence d'acquisition de 1 MHz par un système LeCroy 8007 sous la forme de 127 segments de 4096 échantillons.

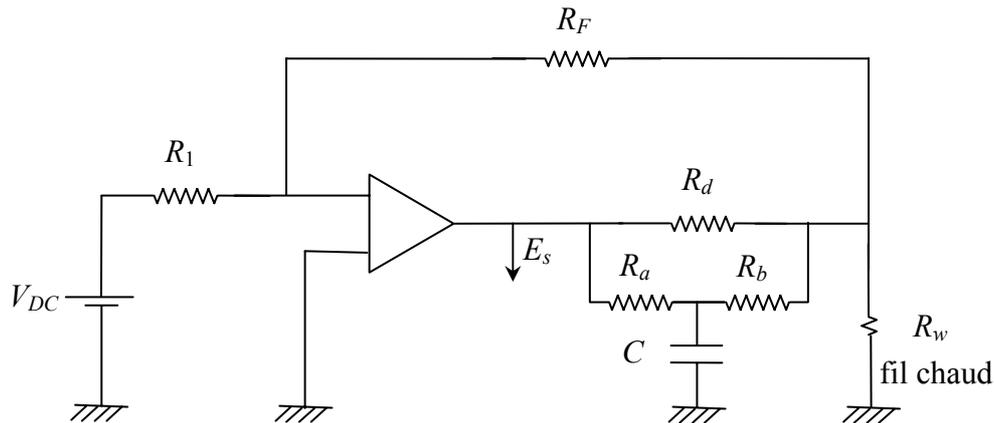
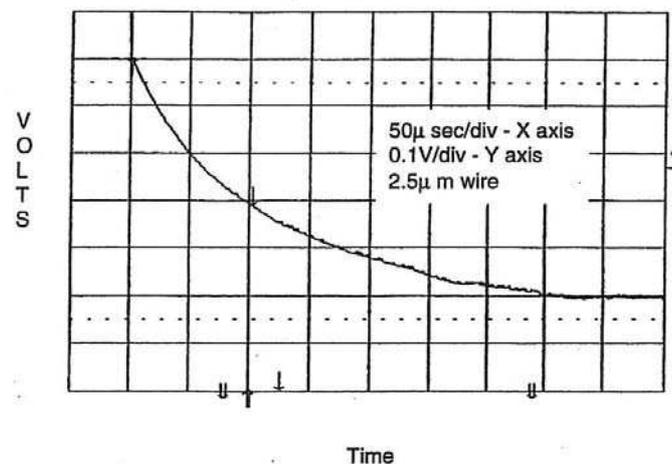


Figure 16 : Schéma de principe de l'anémomètre à tension constante (CVA)

### III-3 Principaux résultats

#### III-3-1 Constante de temps

La mesure de la constante de temps  $M_w$  est réalisée par l'injection d'un signal carré de 20 Hz à la jonction entre les résistances  $R_1$  et  $R_F$  (Figure 16). La réponse de l'anémomètre est présentée sur la Figure 17 (Sarma *et al.*, 1998). La constante de temps mesurée  $M_w$  correspond au temps nécessaire pour une décroissance en amplitude de 63 %, elle est ici de 0,1 ms.

Figure 17 : Réponse moyenne d'un fil chaud de 2,5 μm dans un montage CVA pour une surchauffe  $a_w = 0,5$  et  $Re = 19$ .

La comparaison entre les constantes de temps mesurées par CVA et CCA est présentée sur la Figure 18. Pour le CVA, la constante de temps décroît avec la surchauffe et reste inférieure à la constante de temps du CCA. Ces résultats sont en accord avec l'approximation (Comte-Bellot, 1998) :

$$M_{w,CVA} = \frac{M_{w,CCA}}{1 + 2a_w}$$

Les petites valeurs de  $M_{w,CVA}$  permettent une correction plus aisée de la compensation thermique de l'anémomètre par un post-traitement, avec un bruit de fond plus faible et une plus grande bande-passante du circuit électronique, par rapport à une compensation thermique effectuée avant la mesure.

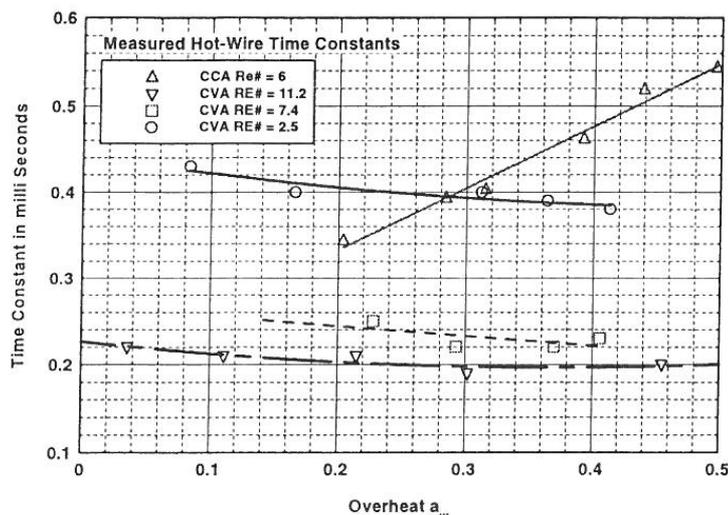


Figure 18 : Constantes de temps  $M_w$  en fonction de la surchauffe  $a_w$  mesurées pour le CVA et le CCA autour d'un fil de 2,5  $\mu\text{m}$  pour différents nombres de Reynolds.

La compensation thermique par post-traitement du signal est réalisée par l'équation (Sarma, 1998) :

$$e_{cor} + T_c \frac{de_{cor}}{dt} = e_{mes} + M_{w,CVA} \frac{de_{mes}}{dt}$$

où  $e_{mes}$  est la tension mesurée,  $e_{cor}$  la tension corrigée par post-traitement,  $T_c$  la constante de temps arbitrairement imposée au circuit électronique avant la mesure et  $M_{w,CVA}$  la constante de temps du circuit mesurée dans l'écoulement. Au-delà de 10 kHz, la relation précédent se réduit asymptotiquement à :

$$e_{cor} = \frac{M_{w,CVA}}{T_c} e_{mes}$$

Le comportement du circuit électronique est parfaitement défini et n'est pas modifié par les effets de capacitance des câbles de connexion au fil chaud. Les spectres des fluctuations de vitesse sont présentés Figure 19 pour une position dans la couche limite  $y/\delta = 0,27$  et deux coefficients de surchauffe  $a_w = 0,15$  et  $a_w = 0,59$ . La représentation  $fE(f)$  permet d'identifier la gamme de fréquences qui contribue le plus à la turbulence puisque l'énergie du signal est :

$$\overline{e^2} = \int_0^{\infty} E(f) df = \int_0^{\infty} f E(f) d(\ln f)$$

On observe, sur les trois séries de spectres, un plateau particulièrement identifiable pour les grandes surchauffes et la présence de raies vers 150 kHz et 250 kHz, interprétées comme les vibrations des broches de soudure du fil (Dussauge *et al.*, 1996). Pour le circuit électronique compensé par la constante de temps mesurée (Figure 19-a), le plateau s'étend jusqu'à environ 100 kHz du fait de la bande passante réduite du CVA dans ce cas. Les spectres bruts (Figure 19-b) montrent un plateau bien plus long, mais avec une amplitude trop faible. Les spectres corrigés par post-traitement (Figure 19-c) retrouvent le niveau du spectre obtenu avec le circuit compensé, mais avec une plage en fréquence supérieure s'étendant jusqu'à 300 kHz. Ce dernier mode opératoire est donc préféré pour obtenir la bande-passante la plus étendue.

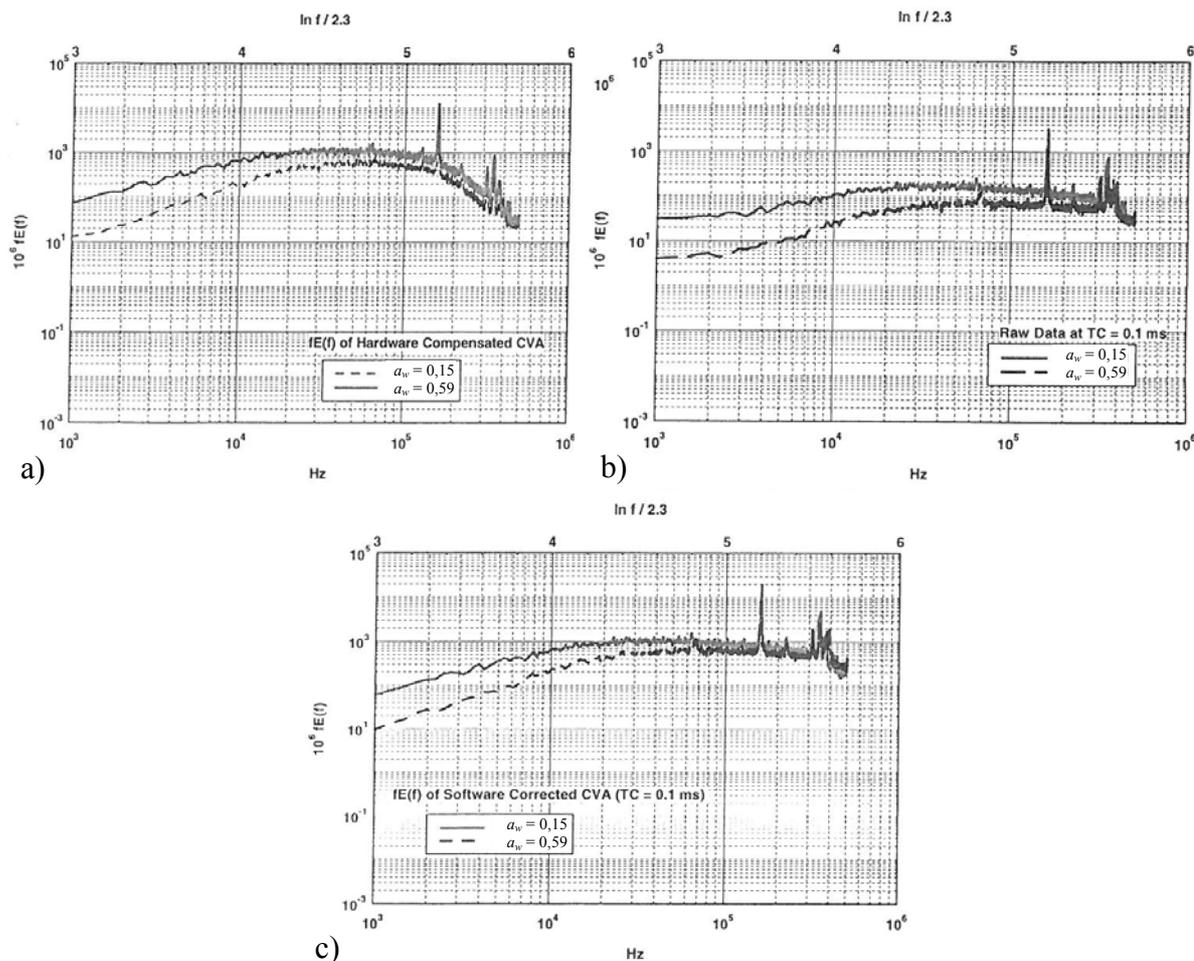


Figure 19 : Spectre  $fE(f)$  en fonction de  $\ln f$  pour deux surchauffes  $a_w = 0,15$  (trait plein) et  $a_w = 0,60$  (tirets) avec a) compensation du circuit du CVA, b) mesure avec une compensation de 0,1 ms, c) correction par post-traitement du spectre mesuré avec  $M_{w,CVA} = 0,25$  ms pour  $a_w = 0,15$  et  $M_{w,CVA} = 0,20$  ms pour  $a_w = 0,60$ .

### III-3-2 Comparaison des spectres mesurés par CCA, CTA et CVA

La comparaison entre les trois types de circuit d'anémométrie fil chaud, CCA, CTA et CVA, est réalisée au même point de mesure dans la couche limite avec un fil de  $2,5 \mu\text{m}$  (Comte-Bellot *et al.*, 1999). Le CCA est un DISA 56C02, la compensation thermique de son circuit électronique est réalisée avant la mesure en deux étapes à travers un préamplificateur puis un conditionneur. Le coefficient de surchauffe du fil est  $a_w = 0,5$ . Le CTA est un DANTEC Streamline 90C10 qui fonctionne avec un pont symétrique et un coefficient de surchauffe  $a_w = 0,6$ . Le CVA opère avec une surchauffe  $a_w = 0,6$  et une compensation du circuit électronique à  $T_c = 0,1$  ms corrigée par post-traitement avec la valeur mesurée  $M_{w,CVA} = 0,2$  ms. Les spectres sont présentés Figure 20 et mettent en évidence une fréquence de coupure vers 70 kHz pour le CTA, 200 kHz pour le CCA et 300 kHz pour le CVA. La réponse en fréquence du CCA est limitée par la valeur élevée de la constante de temps et la présence d'un filtre passe-bas à 400 kHz. Le CTA sous-estime les hautes fréquences par la présence du filtre passe-bas introduit dans son circuit pour assurer la stabilité de la boucle de rétroaction. Seul le CVA, utilisé avec correction de la constante de temps lors du post-traitement, est capable de reproduire le plateau qui s'étend jusqu'à 300 kHz.

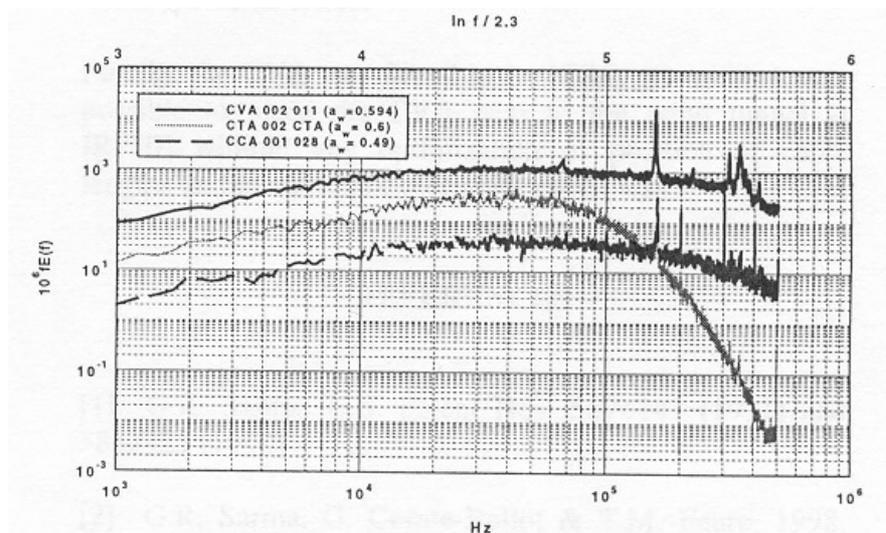


Figure 20 : Comparaison entre les spectres mesurés par CVA, CTA et CCA dans une couche limite supersonique de nombre de Mach extérieur 2 avec un fil chaud de  $2,5 \mu\text{m}$  placé à  $0,27$  épaisseur de couche limite (les trois spectres sont arbitrairement décalés pour identifier leur fréquence de coupure respective).

### III-3-3 Caractérisation de la couche limite turbulente

La réponse d'un fil chaud dépend à la fois des fluctuations de flux de masse et de température totale et peut s'écrire (Sarma *et al.*, 1998) :

$$\frac{e}{E} = S_{\rho u, CVA} \frac{\rho u}{\rho U} + S_{\theta_t, CVA} \frac{\theta_t}{\Theta_t}$$

L'expression des coefficients de sensibilité étant (Comte-Bellot, 1998) :

$$S_{\rho u, CVA} = S_{\rho u, CTA} \frac{2a_w}{1 + 2a_w} \quad S_{\rho u, CTA} \approx 0,25$$

$$S_{\theta_t, CVA} = -S_{\theta_t, CTA} \frac{1}{1 + 2a_w} \quad S_{\theta_t, CTA} \approx 1$$

on obtient :

$$\frac{\overline{e^2}}{\overline{E^2}} = (S_{\rho u, CVA})^2 \frac{\overline{(\rho u)^2}}{\overline{\rho^2 U^2}} + 2 S_{\rho u, CVA} S_{\theta_t, CVA} \frac{\overline{(\rho u) \theta_t}}{\overline{\rho U \Theta_t}} + (S_{\theta_t, CVA})^2 \frac{\overline{\theta_t^2}}{\overline{\Theta_t^2}}$$

L'application de cette équation à trois inconnues, pour trois coefficients de surchauffe différents ( $a_w = 0,30, 0,45$  et  $0,62$ ) conduit à un système que l'on peut résoudre (point noté CVA 3 Eq. Figure 21). En négligeant les fluctuations de température, on obtient alors la forme simplifiée (utilisée pour les autres positions de mesure, Figure 21) :

$$\frac{\overline{e^2}}{\overline{E^2}} = (S_{\rho u, CVA})^2 \frac{\overline{(\rho u)^2}}{\overline{\rho^2 U^2}}$$

Le CVA permet de retrouver le flux de masse, rapporté à la contrainte de cisaillement à la paroi, pour  $y/\delta = 0,3$  et  $0,6$  (Figure 21). Ces résultats présentent un bon accord avec les précédentes mesures (Smits *et al.*, 1983).

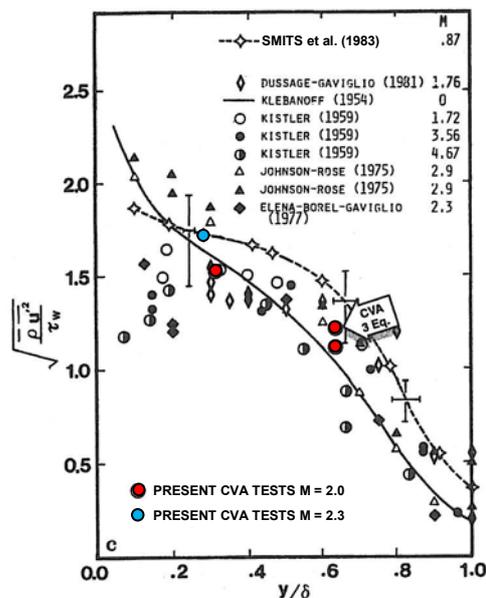


Figure 21 : Flux de masse rapporté à la contrainte de cisaillement à la paroi dans une couche limite en écoulement supersonique (en rouge mesures CEAT, en bleu mesure IRPHE).

### III-4 Conclusion

La mise en œuvre du CVA dans une couche limite supersonique, avec une constante de temps du circuit électronique différente de celle mesurée in situ, suivie de la correction du signal lors d'un post-traitement, permet d'obtenir une réponse en fréquence supérieure à celle donnée par le circuit électronique compensé par la constante de temps effectivement mesurée avant l'enregistrement du signal. Cette correction est possible du fait de la fonction de transfert de l'anémomètre qui est parfaitement définie. De plus, il n'est pas nécessaire de modifier la constante de temps avant chaque acquisition, ce qui assure une meilleure productivité des mesures. La comparaison, dans les mêmes conditions d'essais, de la réponse en fréquence du CCA, du CTA et du CVA, montre que ce dernier possède la fréquence de coupure la plus élevée. L'utilisation de trois coefficients de surchauffe du fil permet de discriminer les variances des fluctuations de flux de masse et de température totale. Le flux de masse ainsi mesuré, pour plusieurs positions dans la couche limite supersonique, présente un bon accord avec de précédentes réalisations.

### III-5 Références

- COMTE-BELLOT, G. (1998) Hot-wire anemometry, in *The Handbook of Fluid Dynamics*, Edited by R. W. Johnson, CRC Press, Boca Raton, pp. 34-1–34-29
- COMTE-BELLOT, G., SARMA, G. R., FAURE, Th. M., DUSSAUGE, J. P., DUPONT, P., DEBIÈVE, J. F. (1999) Performance studies of the constant voltage anemometer in a Mach 2.3 boundary layer, *18<sup>th</sup> International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*, Toulouse (France), June 14-17 1999, pp. 40.1–40.9
- DUSSAUGE, J. P., SMITH, R. W., SMITS, A. J., FERNHOLZ, H., FINLEY, P. J., SPINA, E. F. (1996) *Turbulent boundary layers in subsonic and supersonic flows*, Edited by W. S. Saric, AGARDograph 335
- KASIERSKI, T. (1996) *Étude expérimentale d'un nouveau type d'anémomètre à fil chaud*, Travail de Fin d'Études, Institut Polytechnique de Lodz (Pologne)
- SARMA, G. R. (1991) *Flow rate measuring apparatus*, U.S. Patent No. 5074147

**SARMA, G. R.** (1998) Transfer function analysis of the constant voltage anemometer, *Review of Scientific Instruments*, Vol 69, No. 6, pp. 2385–2391

**SARMA, G. R., COMTE-BELLOT, G., FAURE, Th. M.** (1998) Software corrected hot wire thermal lag for the constant voltage anemometer featuring a constant bandwidth at the selected compensation setting, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 69, No. 9, pp. 3223–3231

**SMITS, A. J., HAYAKAWA, K., MUCK, K. C.** (1983) Constant temperature hot-wire anemometer practice in supersonic flows, *Experiments in Fluids*, Vol. 1, pp. 83– 92



## IV Analyse de l'écoulement dans un modèle de turbopompe centrifuge

### IV-1 Introduction

Cette étude a pour objectif de caractériser l'écoulement dans une évolution technologique, à un seul étage, de la turbopompe d'alimentation en hydrogène liquide du moteur Vulcain, équipant le lanceur Ariane V. Elle fait l'objet d'une action contractuelle avec la Société Européenne de Propulsion (contrat SEP 865.586) et le Centre National d'Études Spatiales. Un modèle à l'air de la turbopompe à l'échelle 1 est caractérisé par plusieurs techniques de mesures stationnaires (sonde cinq trous, capteurs de pression pariétale) et instationnaires (anémométrie à fils chauds croisés, capteurs de pression instationnaire). Ce projet constitue le sujet de stage de DEA de Sylvain Barthet (1997).

L'objectif de cette campagne est double. Dans un premier temps, il s'agit de valider le concept de ce nouveau type de turbopompe. Dans une seconde phase, il s'agit d'affiner la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu, en particulier en ce qui concerne l'écoulement en amont de l'inducteur.

### IV-2 Dispositif expérimental

#### IV-2-1 Banc d'essais

Le modèle, nommé Boîtier Composant à l'Air (BCA), est constitué d'une conduite circulaire d'entrée, d'un inducteur axial à 4 aubes, d'une roue centrifuge, comprenant 8 aubes principales et 8 aubes intercalaires, et d'un diffuseur à 11 aubes (Figure 22-a). Le rôle de l'inducteur, utilisé en entrée de pompe, est de protéger les étages haute-pression de l'instationnarité due à la cavitation (Lakshminarayana, 1982). Le BCA est intégré à un banc d'essais en circuit ouvert (Figure 22-b). Une roue dentée est montée sur l'arbre, couplée à un codeur optique, elle fournit un signal carré de 0–5 V d'une période par tour, qui sert à la synchronisation des mesures avec la rotation. L'étude porte principalement sur le débit nominal  $Q_n$ , un débit réduit  $0,7 Q_n$  et un sur-débit  $1,3 Q_n$ .

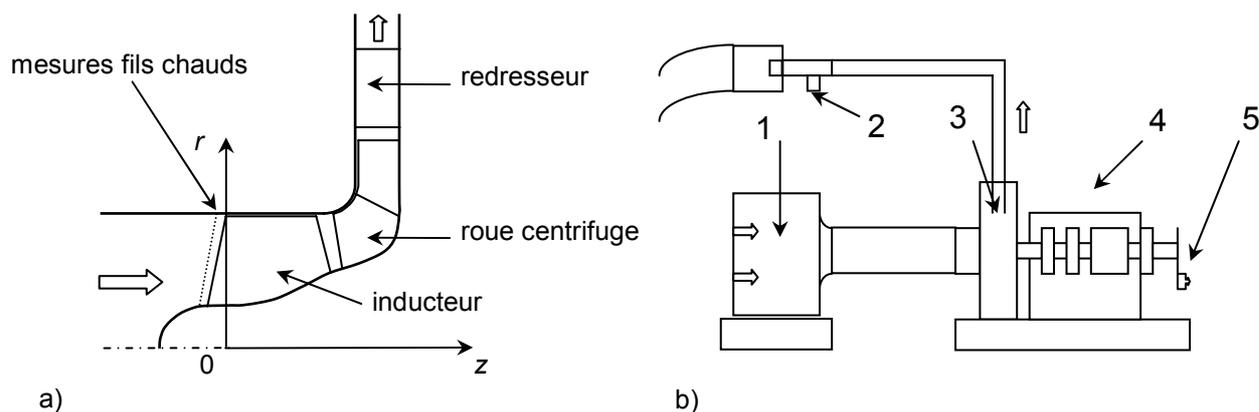


Figure 22 : Banc expérimental : a) composants du BCA et position de mesure par anémométrie à fils chauds croisés, b) vue d'ensemble : 1 - caisson de tranquillisation, 2 - sortie et tube de Venturi, 3 - BCA, 4 - moteur d'entraînement, couple-mètre, arbre et paliers, 5 - système de synchronisation par codeur optique.

#### IV-2-2 Instrumentation

Une sonde directionnelle à cinq trous, de 1 mm de diamètre, permet d'explorer les trois composantes du champ moyen de vitesse. Elle est commandée en translation et en

rotation autour de son axe par un système de déplacement. Les pressions sont mesurées par des capteurs de pression différentielle de 10 Pa de précision. Sept positions axiales sont prévues pour l'exploration de l'écoulement en amont de l'inducteur. Une sonde à fils chauds croisés permet d'obtenir deux composantes de vitesse instantanée pour une position en amont du bord d'attaque de l'inducteur. Cette sonde est étalonnée angulairement et en amplitude (Browne *et al.*, 1989) et produit une erreur maximum de 0,5% sur la vitesse.

### IV-3 Principaux résultats

#### IV-3-1 Recirculation amont

La pression totale relative pour le débit réduit  $0,7 Q_n$  est présentée sur la Figure 23 en amont de l'inducteur, en fonction de la hauteur de veine  $H = (r - r_h) / (r_t - r_h)$ . Pour les positions les plus en amont, la pression totale est presque constante selon la direction radiale, et légèrement négative, du fait des pertes causées par la chambre de tranquillisation. Plus près de l'inducteur ( $z/D \geq -1,5$ ), on observe une zone de pression totale négative vers 50% de hauteur de veine, due aux pertes générées en amont de l'inducteur et qui sont causées par un décollement de forte énergie. Cette recirculation présente de fortes vitesses axiales et tangentielles au voisinage du carter, elle fait barrage à l'écoulement incident et induit le décollement côté moyeu. La région de transition, entre la zone de basse pression totale et la zone d'écoulement de retour, correspond à un écoulement provenant de l'inducteur et y retournant, sous l'effet de l'écoulement principal (Yokota *et al.* 1999). L'origine de cet écoulement de retour est un tourbillon non-visqueux qui provient de l'inducteur. Ce tourbillon n'est pas lié à un tourbillon de jeu d'extrémité de pale. Cette explication purement potentielle est validée par un calcul d'Euler tridimensionnel (El Ghazzani *et al.* 1992). Cet effet tridimensionnel est fortement couplé à un effet d'incidence le long de l'envergure du bord d'attaque des pales de l'inducteur.

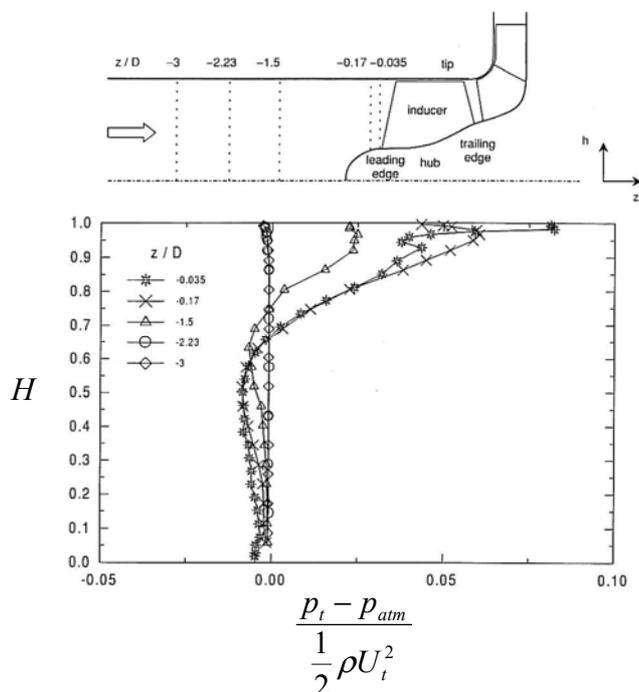


Figure 23 : Répartition de pression totale relative selon la hauteur de veine en amont de l'inducteur pour un débit réduit  $0,7 Q_n$ .

La limite de la zone de recirculation correspond à la position axiale où la vitesse axiale s'annule pour la première fois à partir du carter (Figure 24). La limite de pré-rotation

correspond à la position où une vitesse tangentielle, sans vitesse axiale négative, est mesurée pour la première fois près du carter. Pour  $0,7 Q_n$ , la zone de pré-rotation s'étend jusqu'à 1,85 diamètre en amont de l'inducteur. Par extrapolation des mesures, on peut estimer que la zone de pré-rotation atteint 4 à 5 diamètres en amont de l'inducteur pour  $0,4 Q_n$ . Très près de l'inducteur, il faut également remarquer la présence d'une zone de recirculation jusqu'à  $1,2 Q_n$ .

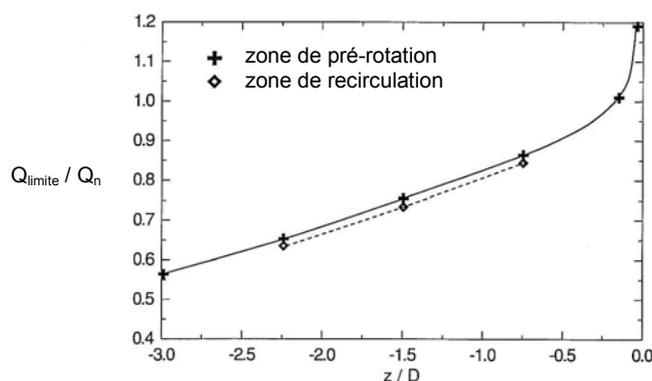


Figure 24 : Longueur axiale de la zone de recirculation en fonction du débit.

#### IV-3-2 Moyennes de phase

L'exploration, à l'aide d'une sonde à fils chauds croisés, d'une direction radiale juste en amont de l'inducteur, permet de reconstituer le champ de vitesse en effectuant des moyennes en phase avec le signal de synchronisation délivré par le codeur optique (Figure 25 et Figure 26). Pour  $1,3 Q_n$  (Figure 25-c), il n'y a pas de vitesse méridienne négative et les quatre aubes de l'inducteur sont clairement identifiées par un déficit de vitesse. La vitesse relative est uniforme (Figure 26-c), les gradients azimuthaux de vitesse méridienne étant corrélés aux angles relatifs  $\beta$  (Bario *et al.*, 2003). Il n'y a donc pas de blocage en termes de vitesse relative. Pour le débit nominal  $Q_n$  (Figure 25-b), la vitesse méridienne présente une région quasi-annulaire de vitesse négative au voisinage du carter, la recirculation atteint entre 8% et 10% de la hauteur de veine selon l'azimut. Le débit réduit  $0,7 Q_n$  (Figure 25-a) présente un fort gradient de vitesse méridienne selon la direction circonférentielle. La recirculation atteint alors entre 8% et 20% de la hauteur de veine selon l'azimut. Les variances des fluctuations de vitesse tangentielle sont plus fortes que les variances des fluctuations de vitesse méridienne et les plus forts niveaux sont relevés près de la tête des aubes (Bario *et al.*, 2003). De même, la tension de cisaillement est très élevée à la frontière de la zone de recirculation. Cette zone correspond au point de cavitation dans un inducteur d'une pompe à liquide.

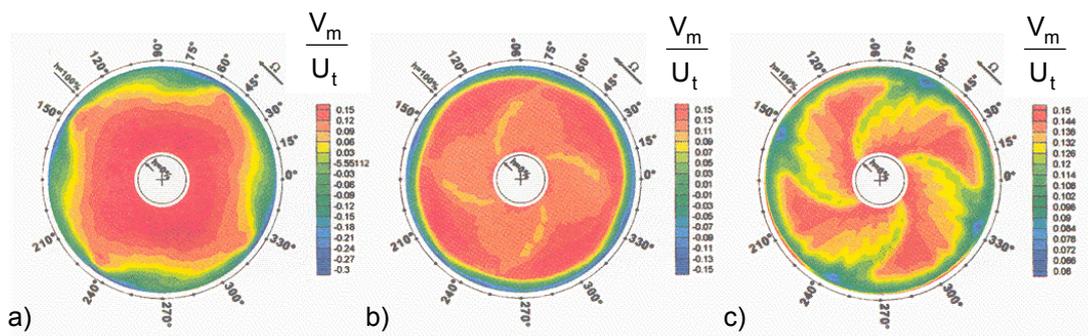


Figure 25 : Vitesse méridienne adimensionnée mesurée en amont du rotor pour 3 débits : a)  $0,7 Q_n$ , b)  $Q_n$ , c)  $1,3 Q_n$ .

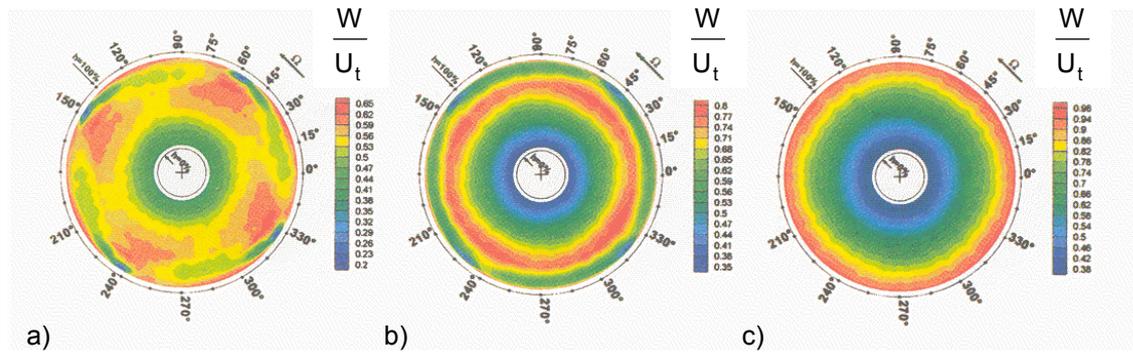


Figure 26 : Vitesse azimutale adimensionnée mesurée en amont du rotor pour 3 débits : a)  $0,7 Q_n$ , b)  $Q_n$ , c)  $1,3 Q_n$ .

#### IV-4 Conclusion

L'utilisation de sondes directionnelles, stationnaires ou instationnaires, permet de comprendre les phénomènes physiques qui ont lieu en amont de l'inducteur, et de valider ce nouveau modèle de turbopompe. Un écoulement de retour, marqué par de fortes vitesses tangentielles, affecte la zone proche du carter et agit comme un obstacle à l'écoulement axial incident. Une zone de pré-rotation de l'écoulement est aussi présente en amont de l'inducteur, et sa longueur est supérieure à celle de la recirculation. Cette dernière n'est pas due à un écoulement de jeu de pale, mais trouve son origine dans sa nature tridimensionnelle couplée à un effet d'incidence le long de l'envergure du bord d'attaque des pales de l'inducteur. Il n'y a pas d'effet de blocage en termes de réduction de la vitesse relative. Les écarts-types des fluctuations de vitesse azimutale sont supérieurs à ceux de vitesse méridienne, particulièrement au voisinage du carter. Il semble également qu'une remontée de l'information aval, provenant du rouet ou du diffuseur de sortie, affecte la vitesse tangentielle au débit  $1,3 Q_n$ .

#### IV-5 Références

- BARIO, F., FAURE, Th. M., JONDEAU, E., NORMAND, J. L., N'GUYEN DUC J. M.** (2003) Analysis of inducer recirculating flow, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 4, pp. 521–528
- BARTHET, S.** (1997) *Contribution à la compréhension et à la connaissance de l'écoulement au sein d'une turbopompe de type cryogénique*, Rapport de DEA de Thermique et Énergétique, École Centrale de Lyon
- BROWNE, L. W. B., ANTONIA, R. A., CHUA, L. P.** (1989) Calibrating of X-probes for turbulent flow measurements, *Experiments in Fluids*, Vol. 7, No. 3, pp. 201–208
- EL GHAZZANI, E. M., BOIS, G., GEAI, P., LEBŒUF, F.** (1992) Three-dimensional inviscid flow computations in a spatial turbopump inducer using a distributed loss model, *37<sup>th</sup> International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, Cologne, Germany, June 1-4, 1992, ASME Paper 92GT65, 9 p.
- LAKSHMINARAYANA, B.** (1982) Fluid dynamics of inducers—A review, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 104, No. 4, pp. 411–427
- YOKOTA, K., KURAHARA, K., KATAOKA, D., TSUJIMOTO, Y., ACOSTA, A. J.** (1999) A study of swirling backflow and vortex structure at the inlet of an inducer, *Japanese Society of Mechanical Engineers International Journal, Series B*, Vol. 42, No. 3, pp. 451–459

## V Analyse de l'écoulement dans un étage de compresseur axial

### V-1 Introduction

L'objectif de cette étude est d'obtenir des données expérimentales de l'écoulement dans une configuration de référence d'étage de compresseur axial, afin d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. L'exploration est d'abord menée avec un vélocimètre laser Doppler (LDV) bi-composantes. L'extension du système à une troisième composante est réalisée dans un second temps pour permettre des mesures coïncidentes. Une méthode permettant l'estimation du tenseur de Reynolds à partir de mesures non coïncidentes est développée dans le cadre de ce projet.

Cette étude est menée dans le cadre du Consortium Industrie Recherche en Turbomachines (CIRT) et la thèse de Nicolas Vassilieff (2001) ainsi que du contrat SNECMA-TM-EDF 764 488 Rc.

### V-2 Dispositif expérimental

#### V-2-1 Banc d'essais

Le compresseur axial mono-étage (CME2) est constitué d'un rotor de 30 aubes et d'un stator de 40 aubes. La vitesse de rotation du rotor est de  $6\,330 \pm 14 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$  et le débit nominal du compresseur est de  $10,5 \pm 0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , il fournit un rapport de pression totale  $p_{t,2} / p_{t,1} = 1,15$ . Les différents éléments du banc d'essais sont présentés sur la Figure 27. La position d'une aube est obtenue au moyen d'un codeur optique placé sur l'arbre de rotation, qui délivre un signal périodique d'amplitude comprise entre 0 et 5 V.

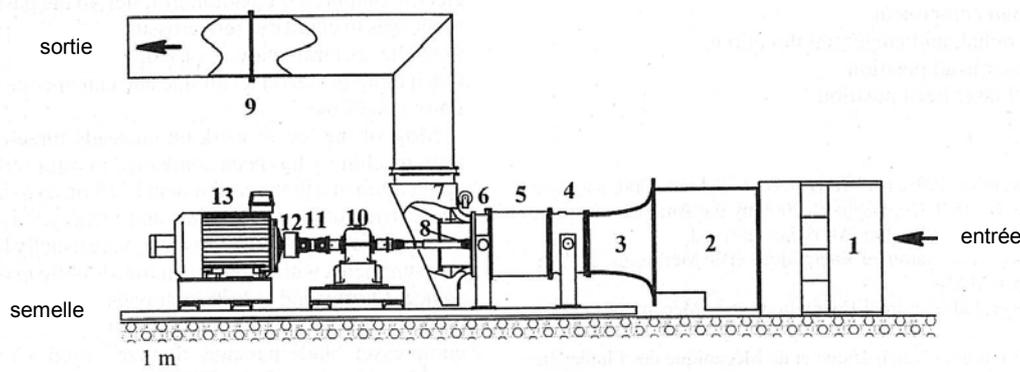


Figure 27 : Banc d'essais : 1 - filtres d'entrée, 2 - chambre de tranquillisation, 3 - convergent, 4 - palier amont, 5 - étage de compresseur, 6 - palier aval, 7 - vanne de réglage du débit, 8 - cardan haute-vitesse, 9 - diaphragme, 10 - multiplicateur, 11 - cardan basse vitesse, 12 - limiteur de couple, 13 - moteur d'entraînement (180 kW).

#### V-2-2 Instrumentation

Un vélocimètre laser Doppler à deux composantes utilise les longueurs d'onde bleue (488 nm) et verte (514,5 nm) d'un laser argon-ion Spectra Physics Innova 300 de 5 W de puissance. Il fonctionne en rétrodiffusion. Pour chaque composante couleur, un faisceau est décalé en fréquence à 40 MHz, le demi-angle au sommet formé par chaque paire de faisceaux est de  $6,77^\circ$  et le volume de mesure a une longueur de 0,8 mm et un diamètre et de 0,1 mm. Afin d'explorer un canal inter-aubes, la tête laser est placée sur un bras robotisé Staübli à 6 degrés de liberté, qui permet d'atteindre n'importe quel point dans le compresseur (Figure

28). Les limitations imposées par le masquage de certains points de mesure par les aubages sont résolues en adaptant l'orientation de la tête laser. L'ensemencement s'effectue dans le caisson de tranquillisation 20 cm en amont du convergent, avec un générateur de fumée qui produit des gouttelettes de diamètre moyen  $1,068 \mu\text{m}$ . Deux mesures successives, suivant deux orientations différentes de la tête laser, permettent de reconstruire les trois composantes du champ de vitesse (Faure *et al.*, 2001). Les signaux laser sont échantillonnés par une carte 14 bits jusqu'à une fréquence de 10 000 bursts par seconde, l'analyse de la fréquence Doppler s'effectuant avec des analyseurs à transformée de Fourier rapide (burst signal analyzer, BSA). Les deux composantes de vitesse ne sont pas enregistrées en filtre de coïncidence et le nombre de données validées est de 3 000, ce qui donne une erreur de mesure relative de 0,72% sur le champ moyen (Strazisar, 1986). L'enregistrement synchronisé du signal de rotation permet d'identifier la phase de chaque mesure.

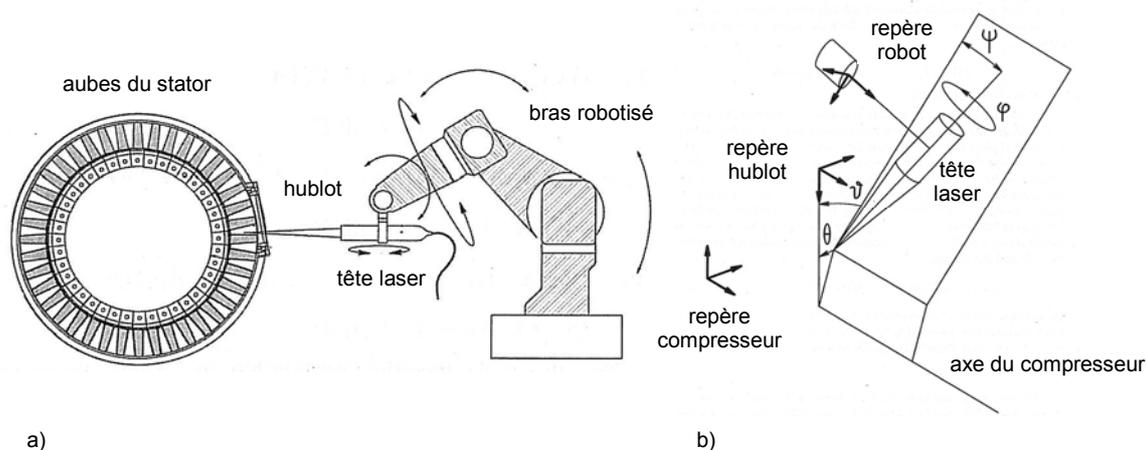


Figure 28 : Orientation du laser : a) montage du bras robotisé sur le banc d'essais, b) repérage de la tête laser par rapport au repère compresseur.

### V-3 Principaux résultats

#### V-3-1 Champ de vitesse dans le rotor

Le champ de vitesse est complètement accessible à l'intérieur du rotor, du fait de la forte vitesse de rotation et l'utilisation de BSA, qui n'engendrent pas de détection de vitesses erronées. En effet, l'éclairement dû au passage des pales est rejeté par les analyseurs. Le champ moyen de vitesse relative, en phase avec la rotation du rotor, est présenté sur la Figure 29 dans un canal inter-aubes, pour différentes hauteurs de veine  $H$ . On observe le blocage potentiel des pales du rotor à  $x/c_r = -0,059$  ainsi qu'une augmentation régulière de la vitesse avec l'envergure, causée par l'augmentation de la vitesse d'entraînement selon la hauteur de pale. À l'intérieur du rotor, à  $x/c_r = 0,12$ , la vitesse relative  $W$  augmente linéairement entre l'intrados et l'extrados. La vitesse devient pratiquement linéaire entre l'intrados et l'extrados pour  $x/c_r = 0,63$  et on observe le sillage des pales en sortie du rotor à  $x/c_r = 0,80$ . Le plus large sillage observé, pour  $H = 0,90$ , est probablement dû à la présence d'un tourbillon de jeu, crée côté extrados par le gradient de pression et convecté en aval. Une analyse similaire de l'écoulement dans un repère fixe à l'intérieur du stator met en évidence la décélération entre l'entrée et la sortie (Faure *et al.*, 2001).

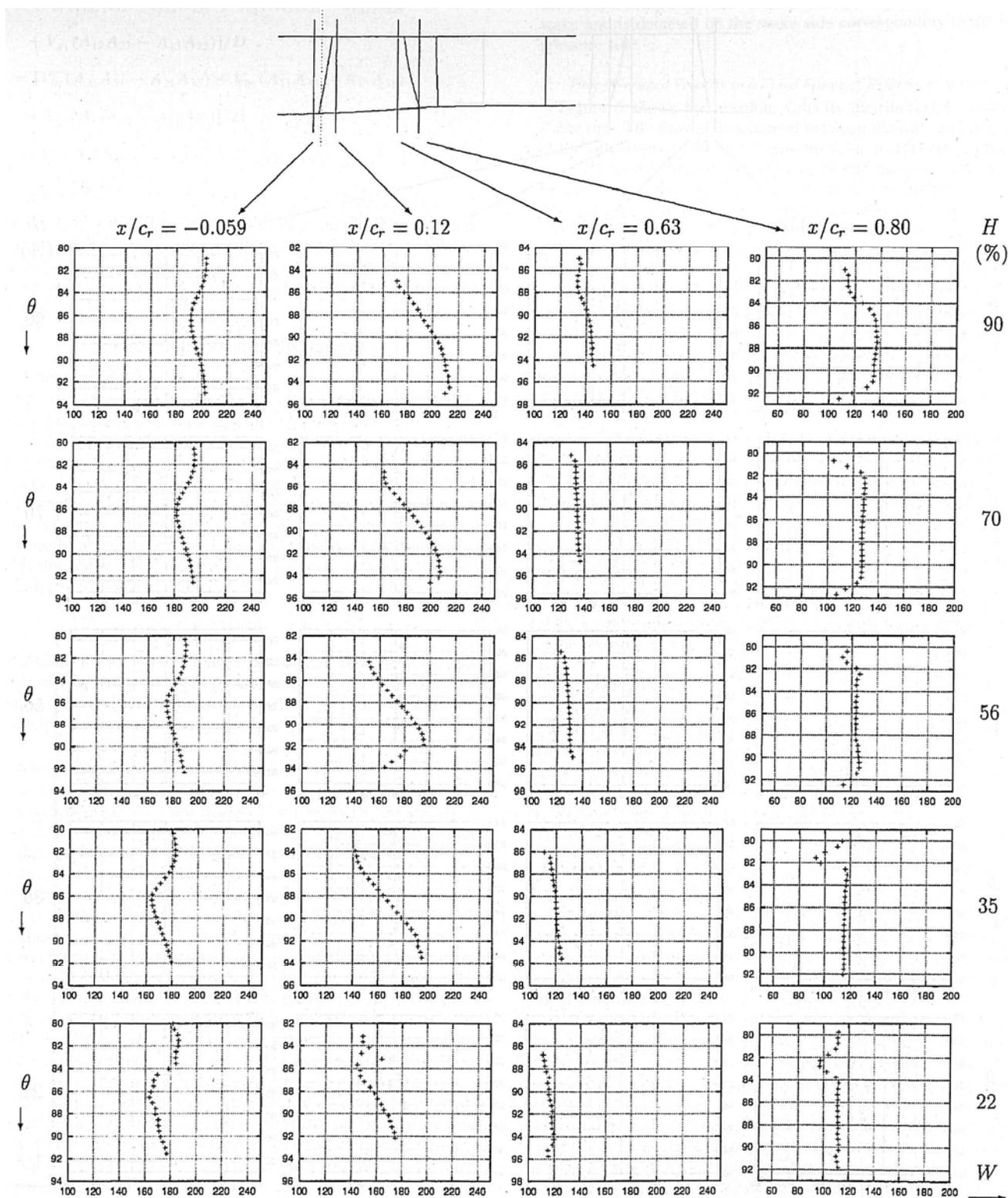


Figure 29 : Répartition tangentielle (en degrés) de la vitesse relative  $W$  dans un repère tournant, pour quatre positions axiales dans le rotor et cinq positions selon l'envergure.

### V-3-2 Vitesse instationnaire dans un canal inter-aubes stator

Afin de quantifier l'instationnarité globale de l'écoulement, le canal inter-aubes du rotor est décomposé en 24 phases successives, ce qui fournit un intervalle de temps de  $1,32 \cdot 10^{-5}$  s et une précision angulaire de  $0,5^\circ$ . Afin de visualiser les aspects tridimensionnels

de l'écoulement, trois plans sont définis dans l'étage de compression (Figure 30) : un plan A qui s'étend du moyeu au carter et de l'entrée du rotor à la sortie du stator en suivant la cambrure du stator, un plan B entre le rotor et le stator à  $x / c_r = 0,87$  et couvrant un passage aube à aube du stator, et un plan C situé à 0,31 hauteur de veine. Six phases successives permettent l'observation de l'évolution temporelle de la vitesse axiale lors du passage d'un canal inter-aubes du rotor. La région bleue dans le plan A du stator correspond à l'accélération de l'écoulement côté extrados. On observe dans le plan B l'évolution du sillage d'une aube du rotor, correspondant à un déficit de vitesse à  $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ainsi que la dynamique du tourbillon de passage en tête du rotor. Il y a une forte interaction entre ce tourbillon et le sillage d'une aube du rotor.

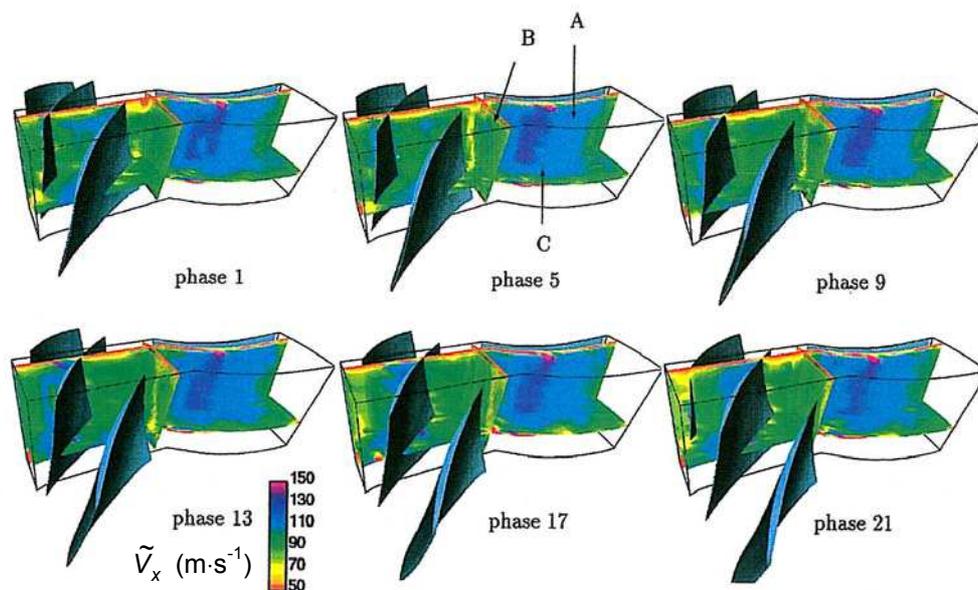


Figure 30 : Répartition de la vitesse axiale absolue pour six phases différentes de passage d'un canal inter-aubes du rotor.

### V-3-3 Interaction rotor-stator

Les sillages des aubes du rotor sont convectés par l'écoulement et hachés par les aubes du stator. Ils demeurent cependant visibles jusqu'à la sortie du stator. On observe, dans un plan aube à aube du stator situé à 50% de hauteur de veine, trois sillages pour chaque phase (Figure 31, flèches 1, 2 et 3 pour la phase 5). Leur interaction avec les couches limites des aubes du stator créent de fortes structures instationnaires dans l'écoulement, qui entraînent des déphasages entre les sillages du rotor et la sortie du stator, et une variation périodique de la charge aérodynamique du stator. La zone orange de vitesse négative correspond à un décollement quasi-stationnaire côté extrados au voisinage du bord de fuite.

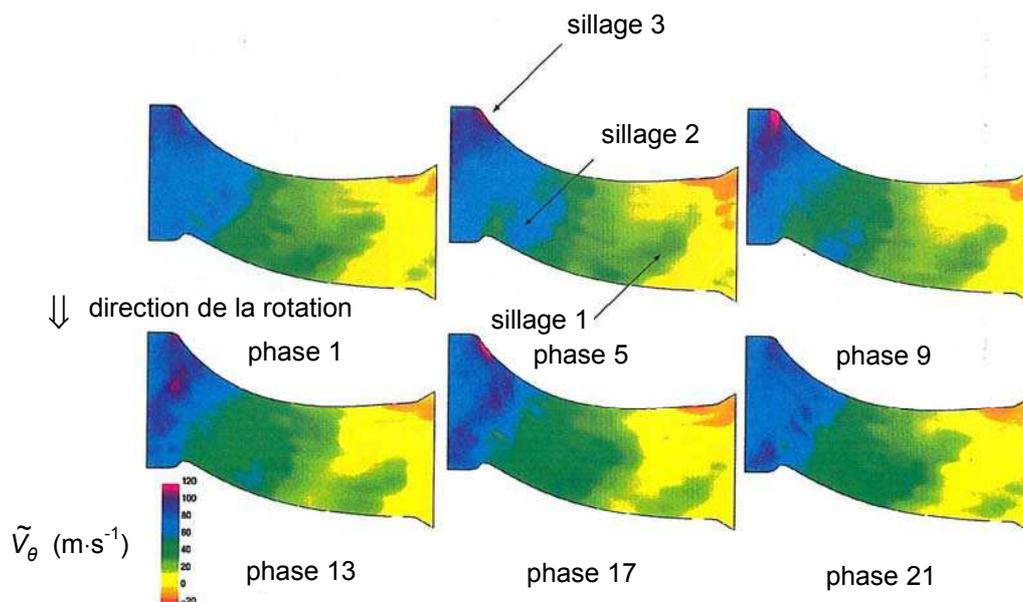


Figure 31 : Répartition de la vitesse azimutale en phase avec la rotation du rotor à l'intérieur du stator dans un plan situé à  $H = 0,50$  pour six phases différentes.

#### V-3-4 LDV trois composantes en coïncidence

L'intégration d'une seconde tête, utilisant la longueur d'onde jaune-verte (532 nm) d'un laser YAG continu Coherent Millennia de puissance 5 W, constitue un système LDV à trois composantes. Les deux têtes sont montées sur un bras robotisé, l'angle formé entre leurs axes optiques  $2\chi = 30^\circ$  (Figure 32) permet d'obtenir une bonne résolution de la vitesse radiale pour les applications aux turbomachines (Ristic *et al.*, 1999). La superposition du volume de mesure de cette troisième composante, aux volumes de mesure des deux composantes du laser argon-ion, permet l'acquisition de données coïncidentes. Cependant, ce réglage est particulièrement délicat et le taux de validation des données chute rapidement. Certaines parties de l'écoulement deviennent complètement inaccessibles à la mesure et il est pratiquement impossible d'explorer le rotor. Dans le stator, les résultats obtenus par une unique mesure coïncidente sont en accord avec ceux obtenus par la LDV deux composantes avec deux orientations de la tête laser (Vassiliev, 2001).

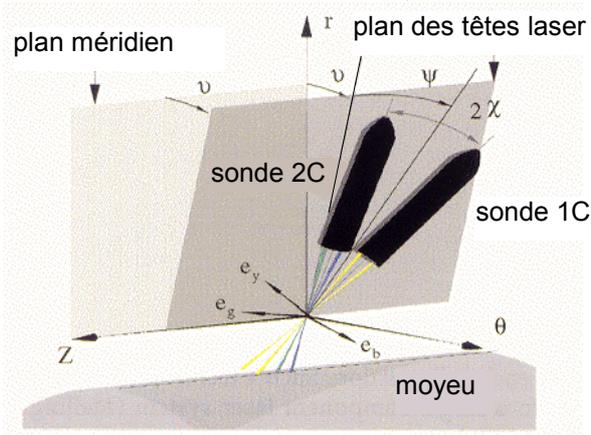


Figure 32 : Montage de vélocimétrie laser Doppler à 3 composantes

#### V-3-5 Évaluation du tenseur de Reynolds par LDV trois composantes non coïncidente

La confrontation de résultats expérimentaux à des codes de simulation numérique turbulents repose sur la comparaison du champ moyen et des six composantes du tenseur de

Reynolds. Du point de vu des applications expérimentales en turbomachines, comme nous l'avons observé précédemment, il est souvent difficile d'obtenir des mesures coïncidentes sur les trois composantes de vitesse dans toute la veine. C'est pour cela qu'une méthode d'évaluation de ce tenseur reposant sur quatre mesures tridimensionnelles non-coïncidente est spécialement développée dans le cadre de cette étude (Faure *et al.* 2004). Les quatre positions de la tête laser sont :

- position 1 :  $\vartheta=0$        $\psi=-\chi$        $\varphi=0$
- position 2 :  $\vartheta=0$        $\psi=\chi$        $\varphi=0$
- position 3 :  $\vartheta=-\chi$        $\psi=-\chi$        $\varphi=0$
- position 4 :  $\vartheta=\chi$        $\psi=-\chi$        $\varphi=0$

Comme les axes des composantes couleurs ne sont pas des axes orthogonaux entre eux, les orientations successives fournissent une résolution angulaire maximum dans le positionnement de la sonde, et une erreur minimale dans l'estimation de la vitesse. Si l'on décompose la vitesse en une valeur moyenne (stationnaire ou en phase avec la rotation du rotor) et une valeur fluctuante, il est alors possible d'écrire les composantes du tenseur de Reynolds en fonction des variances des fluctuations dans le repère couleur. Chaque position de mesure fournit les trois composantes de la vitesse moyenne. Néanmoins, pour minimiser l'incertitude, les composantes moyennes n'utilisent que les deux premières positions de la sonde laser :

$$\bar{U}_z = \frac{\bar{U}_{v,1} + \bar{U}_{j,2}}{2} \quad \bar{U}_\theta = \frac{\bar{U}_{b,1} + \bar{U}_{b,2}}{2} \quad \bar{U}_r = \frac{\bar{U}_{v,2} + \bar{U}_{j,1}}{2 \sin 2\chi}$$

Les composantes du tenseur de Reynolds sont alors :

$$\begin{aligned} \overline{u_z^2} &= \frac{\overline{u_{v,1}^2} + \overline{u_{j,1}^2}}{2} & \overline{u_\theta^2} &= \frac{\overline{u_{b,1}^2} + \overline{u_{b,2}^2}}{2} & \overline{u_r^2} &= \frac{\overline{u_{j,1}^2} + \overline{u_{v,2}^2} - \cos^2 2\chi (\overline{u_{v,1}^2} + \overline{u_{j,2}^2})}{2 \sin^2 2\chi} \\ \overline{u_z u_r} &= \frac{\overline{u_{v,2}^2} - \overline{u_{j,1}^2}}{4 \sin 2\chi \cos 2\chi} & \overline{u_r u_\theta} &= \frac{\overline{u_{b,4}^2} - \overline{u_{b,3}^2}}{4 \sin \chi \cos \chi} & \overline{u_\theta u_z} &= \frac{\overline{u_{j,4}^2} - \overline{u_{j,3}^2} + 4 \cos^2 \chi \sin^2 \chi (\overline{u_{b,4}^2} - \overline{u_{b,3}^2})}{8 \cos \chi \sin^2 \chi (\cos^2 \chi - \sin^2 \chi)} \end{aligned}$$

Si l'incertitude de mesure sur la vitesse moyenne des composantes couleurs est constante et vaut  $\eta$ , et que l'incertitude de la variance des composantes couleurs vaut  $\varepsilon^2$ , alors il est possible de calculer l'erreur de mesure absolue (Tableau 1).

Tableau 1 : Erreurs de mesure absolues des composantes de la vitesse moyenne et du tenseur de Reynolds.

quantité	$\bar{U}_z$	$\bar{U}_\theta$	$\bar{U}_r$	$\overline{u_z^2}$	$\overline{u_\theta^2}$	$\overline{u_r^2}$	$\overline{u_z u_r}$	$\overline{u_r u_\theta}$	$\overline{u_\theta u_z}$
erreur	$\eta$	$\eta$	$2\eta$	$\varepsilon^2$	$\varepsilon^2$	$7\varepsilon^2$	$1,15\varepsilon^2$	$2\varepsilon^2$	$5,58\varepsilon^2$

La comparaison de la vitesse axiale moyenne et des variances des fluctuations de vitesse axiale est présentée Figure 33 et Figure 34.

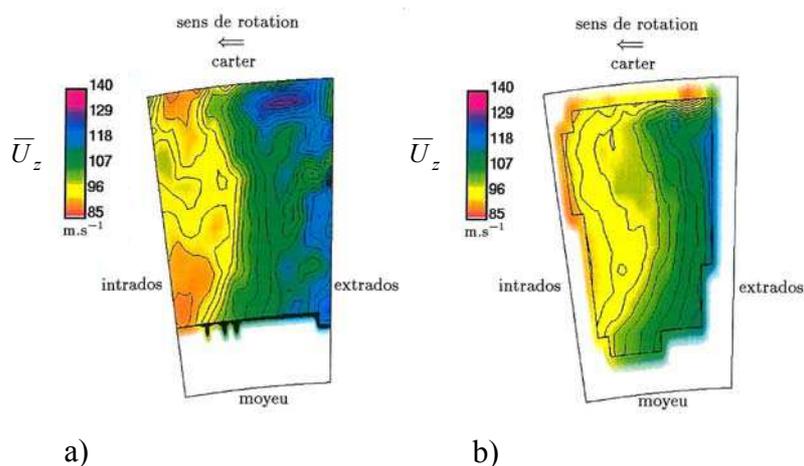


Figure 33 : Comparaison de la vitesse axiale moyenne obtenue sans filtre de coïncidence par a) une double mesure 2D et b) une quadruple mesure 3D.

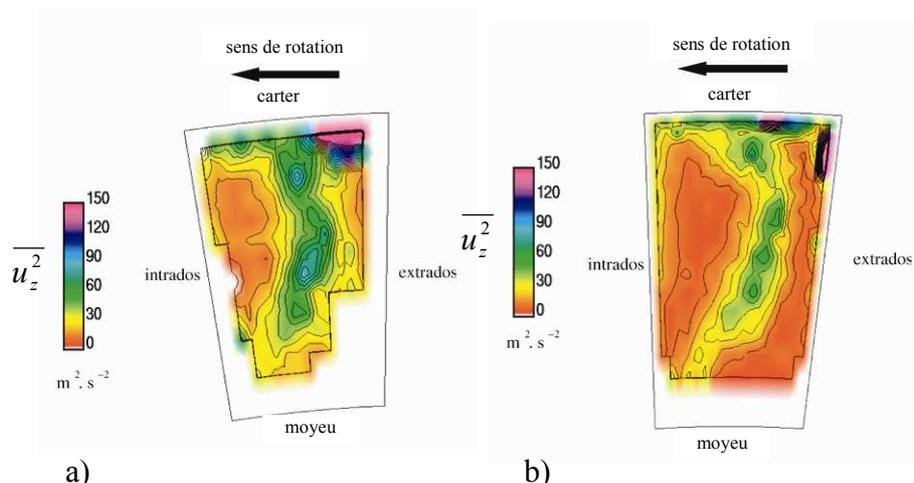


Figure 34 : Comparaison de la variance des fluctuations de vitesse axiale obtenue par a) une quadruple mesure sans filtre de coïncidence et b) une mesure avec filtre de coïncidence.

#### V-4 Conclusion

Un système LDV deux composantes, implanté sur un bras robotisé à six degrés de liberté, permet, par une double acquisition selon deux directions, la mesure des trois composantes de vitesse dans l'étage de compresseur, en limitant les contraintes du masquage des aubes. L'utilisation des BSA est intéressante dans le sens où il n'est pas nécessaire de couper les faisceaux laser pendant le passage des pales. L'extension de la LDV à une troisième composante fournit, en une seule mesure, les trois composantes de vitesse et le tenseur de Reynolds lors de l'acquisition des bursts Doppler en filtre de coïncidence. La réalisation de mesures coïncidentes étant souvent difficiles en environnement turbomachine, une méthode est développée pour obtenir les mêmes quantités sans filtre de coïncidence, mais en effectuant quatre mesures successives selon quatre angles différents.

Ces résultats permettent d'appréhender la dynamique instationnaire de l'écoulement en phase avec la rotation du rotor. Les couches limites du carter sont observées dans tout l'étage. Le tourbillon de jeu créé par le gradient de pression sur les pales du rotor est défléchi et interagit avec les sillages des aubes. Ces sillages sont convectés par l'écoulement à l'intérieur du stator. Pour une phase donnée, trois sillages sont identifiés dans le canal inter-

aubes du stator et leur interaction avec les parois engendre des variations périodiques de la charge aérodynamique du stator. La vélocimétrie laser Doppler à trois composantes reste donc une méthode de mesure performante pour les applications en turbomachine.

#### **V-5 Références**

**FAURE, Th. M., MICHON, G. J., MITON, H., VASSILIEFF, N.** (2001) Laser Doppler anemometry measurements in an axial compressor stage, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No .3, pp. 481–491

**FAURE, Th. M., MITON, H., VASSILIEFF, N.** (2004) A laser Doppler anemometry technique for Reynolds stresses measurement, *Experiments in Fluids*, Vol. 37, No. 3, pp. 465–467

**STRAZISAR, A. J.** (1986) Laser fringe anemometry for aero engine components, *Advanced Instrumentation for Aero Engine Components*, CP-399, AGARD, pp. 6.1–6.32

**RISTIC, D., LAKSHMINARAYANA, B., CHU, S.** (1999) Three-dimensional flowfield downstream of an axial-flow turbine rotor, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, pp. 334–344

**VASSILIEFF, N.** (2001) *Analyse de l'écoulement dans un compresseur axial par vélocimétrie laser tridimensionnelle*, Thèse de Doctorat de Mécanique de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI

## VI Écoulement dans un modèle d'échangeur thermique

### VI-1 Introduction

L'objectif général de cette étude, menée en collaboration avec l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO), porte sur les problèmes de comportement thermomécanique des structures soumises à des flux de puissance élevés. Elle a pour cadre la caractérisation de l'écoulement tridimensionnel dans un nouveau concept de composant d'échangeur thermique, conçu pour le développement du Radio Frequency Quadrupole (RFQ) de l'Injecteur de Protons à Haute Intensité (IPHI). L'échangeur doit évacuer une puissance totale de 1 MW. Ce projet est également le thème du stage de maîtrise de Magali Sato (2003).

### VI-2 Dispositif expérimental

#### VI-2-1 Banc d'essais

Le modèle d'échangeur présente une géométrie tridimensionnelle (Figure 35-a) avec un conduit d'entrée, un collecteur d'entrée permettant l'alimentation de six canaux parallèles de 44 mm de longueur, un collecteur de sortie et un conduit de sortie. Le diamètre intérieur des canaux parallèles est de 4 mm et celui des conduits et des collecteurs est de 8 mm. Les canaux et les collecteurs sont dans un même plan, tandis que le conduit d'entrée forme un angle de  $25^\circ$  et le conduit de sortie un angle de  $155^\circ$  par rapport à ce plan. Une maquette à l'échelle 1 est réalisée afin d'explorer chacun des canaux et de déterminer la répartition de débit et les caractéristiques turbulentes (Figure 35-b). L'écoulement dans l'échangeur correspond à un nombre de Reynolds, construit sur la vitesse débitante et le diamètre d'entrée, compris entre 7 960 et 39 790. La structure de la maquette est en aluminium et les canaux sont réalisés en verre de 1 mm d'épaisseur pour permettre un accès optique aisé. Un canal supplémentaire contient une mire pour l'étalonnage de la caméra et le calcul de son grandissement (Figure 35-b, à gauche). Un second canal isolé (Figure 35-b, à droite) permet d'effectuer les réglages préliminaires du circuit hydraulique et de tester l'ensemencement (Sato, 2003). La maquette est alimentée par une pompe radiale mono-étage de vitesse de rotation nominale de  $2\,850\text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$  permettant d'obtenir un débit maximum de  $15\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ . Deux rotamètres permettent de régler le débit d'alimentation.

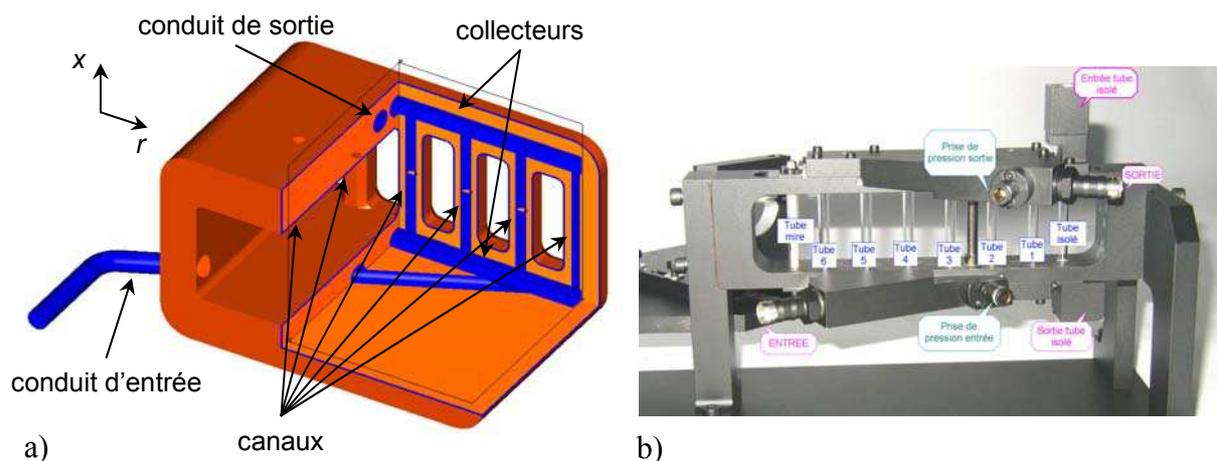


Figure 35 : a) Écorché du modèle de composant d'échangeur thermique (la veine fluide est en bleu), b) vue de la maquette permettant l'exploration des six canaux par PIV.

### VI-2-2 Instrumentation

Un laser YAG Quantel Twins Ultra à deux sources, qui émettent des éclairs d'une durée de 6 ns à 532 nm et de 30 mJ par impulsion, génère une nappe laser de 0,25 mm d'épaisseur. L'enregistrement des images s'effectue avec une caméra 8 bits de résolution 768×484 pixels et de distance focale 25 mm. L'ensemble est monté sur une platine de déplacement et permet l'exploration successive des six canaux, en maintenant la nappe laser perpendiculaire au plan d'observation, avec une précision de 1  $\mu\text{m}$  dans le déplacement axial (Figure 36). Ce plan laser forme un angle de 45° par rapport au plan de six canaux. La synchronisation entre l'émission laser et l'enregistrement des images de la caméra s'effectue par un boîtier Quantel DPS 01 qui permet de gérer l'intervalle de temps  $\delta t$  entre les deux impulsions laser. L'ensemencement de l'écoulement est réalisé avec des sphères de verre creuses argentées de 10  $\mu\text{m}$  de diamètre.

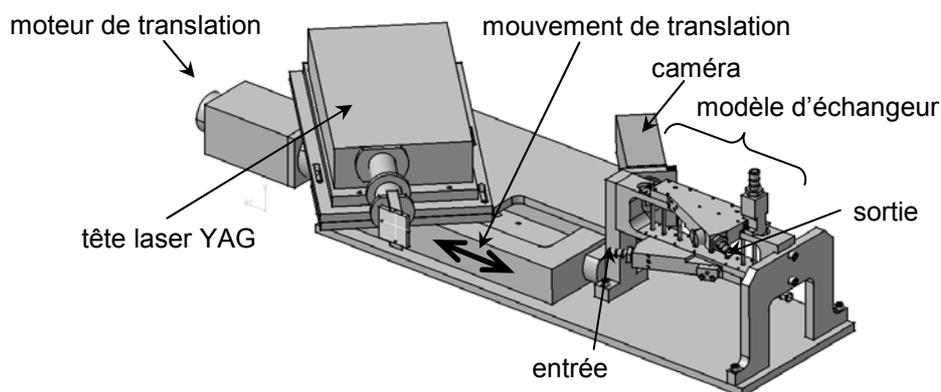


Figure 36 : Montage du laser YAG et de la caméra sur la platine de déplacement de la maquette d'essais.

### VI-2-3 Algorithme PIV

Une attention particulière est portée à la qualité des images utilisées pour le traitement par l'algorithme de PIV. On applique ainsi, un prétraitement des images qui permet d'éliminer toute réflexion parasite sur la paroi ou liée au dépôt de particules. Différentes méthodes de soustraction d'une image de référence sont testées (Faure *et al.*, 2003, Figure 37). Par ailleurs, la présence d'un double dioptré entre, d'une part l'air et le verre, puis entre le verre et l'eau, induit une distorsion des distances et des déplacements de particules selon la direction radiale, qui est corrigée lors du post-traitement des données (Sato, 2003).

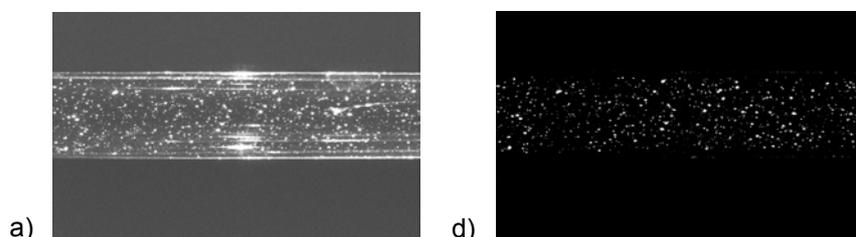


Figure 37 : Prétraitement des images : a) image brute et b) image après soustraction d'une image de référence.

Le traitement PIV des images utilise un algorithme avancé, le flot optique par programmation dynamique orthogonal (Quénot, 1992, Quénot *et al.*, 1998). Cette méthode est fondée sur la recherche itérative d'un alignement global d'images sous contraintes de régularités et de continuités (minimisation d'une norme de Minkowski). Pour cela, le

problème est ramené à un problème monodimensionnel et ne considère le déplacement que selon une direction dans une bande d'analyse. La solution en deux dimensions s'effectue par résolution successive et itérative dans des bandes d'analyse orthogonales de plus en plus petites. Les principaux avantages de cette méthode précise et robuste sont les suivants :

- elle peut être utilisée sur des séquences de deux ou plusieurs images ;
- elle permet d'obtenir un champ de déplacement dense avec une résolution d'un vecteur par pixel d'image ;
- elle fournit un champ de vitesse continu et différentiable spatialement, particulièrement adapté aux écoulements qui présentent de forts gradients ;
- elle peut être généralisée à la PIV stéréoscopique à trois composantes.

Ses inconvénients principaux sont :

- compte-tenu de la densité d'information, le temps de calcul et la capacité de stockage des données ;
- le nombre important de paramètres à ajuster en fonction du type de configuration.

Afin d'optimiser les mesures PIV, on choisit un déplacement moyen de 10 pixels entre deux images, ce qui correspond, selon les débits, à des intervalles de temps entre deux éclairagements laser compris entre 84 et 422  $\mu\text{s}$ . Le choix des paramètres retenus, dans l'algorithme de flot optique par programmation dynamique orthogonale, conduit à une interrogation sub-pixel et une incertitude sur les déplacements de  $1/32^\circ$  de pixel, soit une erreur relative en vitesse de 0,31%. Les résultats expérimentaux sont obtenus à partir de l'enregistrement de 600 images qui fournissent 300 champs de vitesse dans chacun des canaux. La précision sur le champ moyen de vitesse est alors de  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ce qui correspond à un maximum d'erreur relative de 2,5%. Pour les moments statistiques d'ordre 2, la précision est estimée à  $0,015 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$  et correspond à un maximum d'erreur relative de 5%.

### **VI-3 Principaux résultats**

#### ***VI-3-1 Champ moyen de vitesse***

La caméra permet l'observation de la partie centrale de chaque canal (21 mm). Dans les figures suivantes l'origine de l'axe des abscisses est donc fixée à 11 mm en aval du raccordement entre le collecteur d'entrée et chacun des canaux, l'origine radiale étant fixée au centre de ceux-ci. Compte-tenu de la géométrie tridimensionnelle de l'échangeur, la répartition de vitesse axiale n'est pas uniforme et présente une forte asymétrie radiale entre les six canaux (Figure 38). Les plus grandes vitesses sont mesurées dans le canal 2, situé en face du conduit d'entrée, et les plus faibles dans le canal 3. On note une augmentation relative de la vitesse dans le canal 5, situé face au conduit de sortie. Le fort gradient de vitesse axial dans le canal 2 montre que l'écoulement n'est pas établi (Faure *et al.*, 2006). Comme le coefficient de transfert thermique est proportionnel au gradient de vitesse axial en paroi, et comme par ailleurs la vitesse est nulle à la paroi, au plus la vitesse est forte, au plus son gradient est important. Par conséquent le canal 2 présente le plus fort transfert thermique.

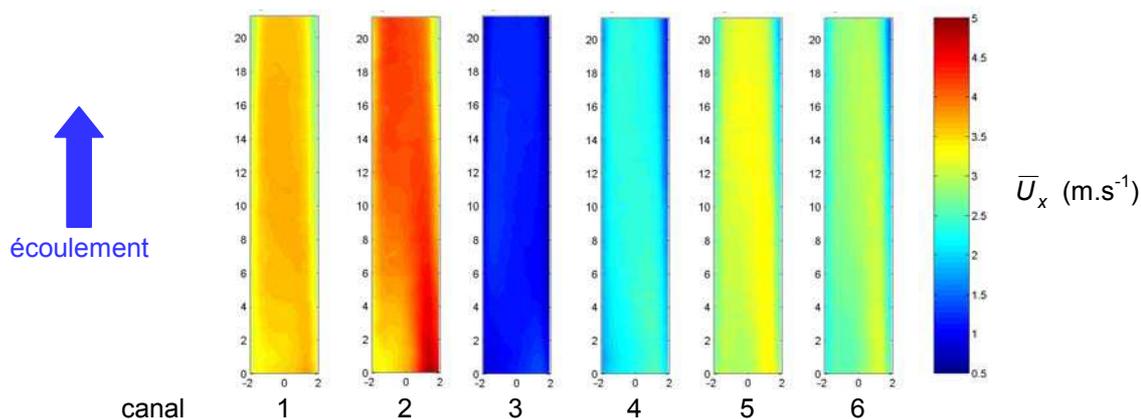


Figure 38 : Vitesse moyenne axiale mesurée par PIV dans chacun des canaux pour un débit de  $12 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $Re = 31\,830$ ).

### VI-3-2 Comparaison mesure / simulation numérique

L'un des objectifs de l'étude expérimentale est de comparer les résultats des mesures aux calculs issus du logiciel du commerce I-DEAS (Launay *et al.*, 2004). L'ensemble du volume de l'échangeur, du canal d'entrée au canal de sortie, est maillé avec 123 571 éléments tétraédriques du premier ordre, les surfaces extérieures enveloppant les volumes étant maillées avec des éléments triangulaires. Les calculs sont de type linéaire, réalisés en régime établi. Pour les cas présentés, le solveur d'écoulement utilise le modèle de longueur de mélange avec un schéma d'advection du deuxième ordre. Une comparaison entre mesure et simulation est présentée Figure 39 pour la vitesse moyenne axiale dans le plan laser pour le canal 2 et un débit de  $12 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $Re = 31\,830$ ). La comparaison montre un accord global même si la simulation sous-estime la vitesse dans la partie gauche du plan de mesure du canal. De façon générale, les écarts relatifs entre mesure et simulation sont compris dans une plage de 17%. De plus, la résolution spatiale du modèle numérique n'atteint pas l'échelle de résolution de la mesure PIV.

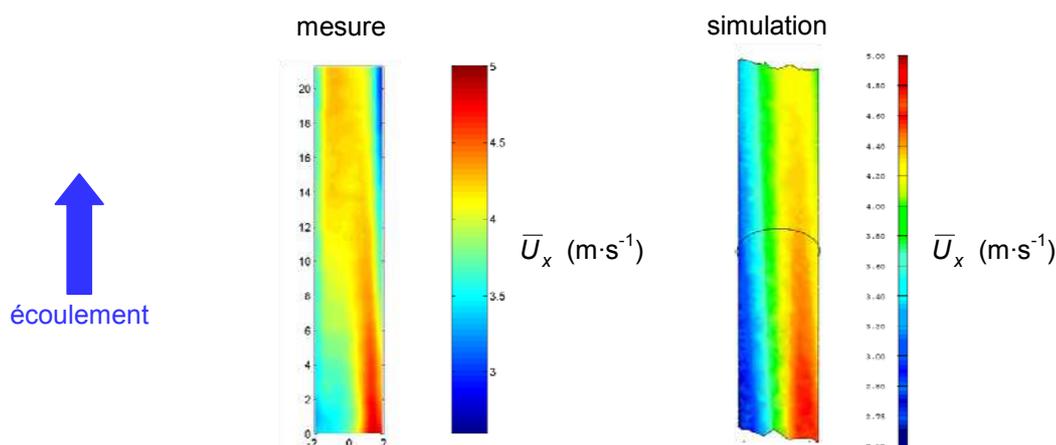


Figure 39 : Comparaison de la vitesse moyenne axiale issue de la mesure et de la simulation pour le canal 2 et un débit de  $12 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $Re = 31\,830$ ).

La comparaison de la répartition de vitesse débitante  $U_q$  entre chacun des canaux montre un bon accord entre expérience et simulation (Figure 40). On retrouve par intégration de  $U_q$  entre les six canaux, une valeur proche de la vitesse débitante en entrée de l'échangeur, mesurée par rotamètre. Quelque soit le débit d'alimentation de l'échangeur, on observe un

maximum dans le canal 2, situé face au conduit d'entrée, un minimum dans le canal 3 et un maximum local dans le canal 5, situé face au conduit de sortie.

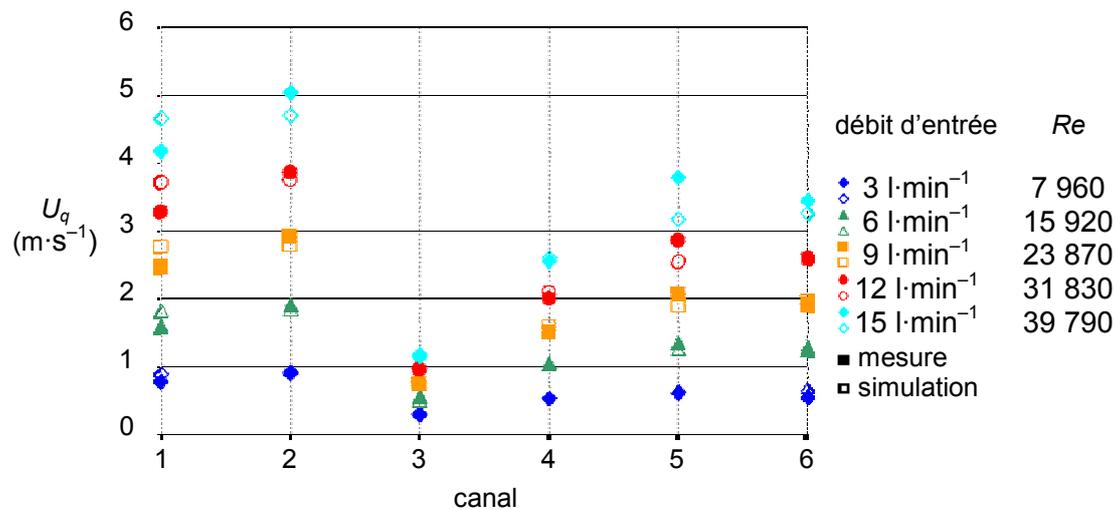


Figure 40 : Répartition de la vitesse débitante mesurée dans chacun des six canaux pour cinq débits d'entrée.

### VI-3-3 Moments d'ordre 2 des fluctuations de vitesse

Les variances de fluctuations de vitesse axiale présentent des valeurs élevées au début de la zone de mesure, où l'écoulement est plus fortement inhomogène, et dans les canaux où la vitesse moyenne axiale est la plus forte (Figure 41). Une forte dissymétrie est observée dans le canal 2, preuve d'une recirculation importante en aval du raccordement entre le collecteur d'entrée et ce canal. La variance des fluctuations de vitesse radiale présente une plus grande symétrie dans le canal 2 (Figure 42). Une forte anisotropie est observée dans le canal 2 à travers la covariance des fluctuations de vitesse axiale et radiale qui montre une zone centrale négative caractéristique d'une recirculation en amont de la zone de mesure (Figure 43).

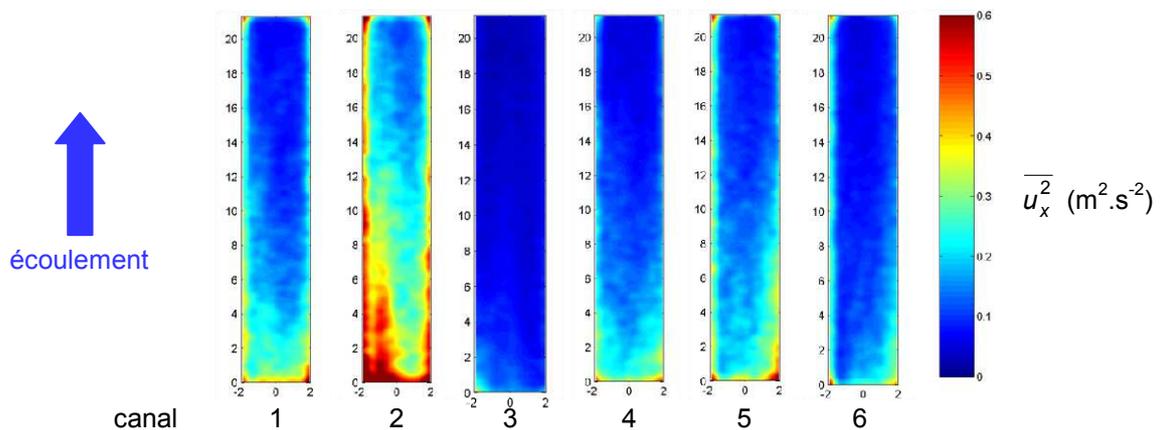


Figure 41 : Variance des fluctuations de vitesse axiale mesurée par PIV dans chacun des canaux pour un débit de 12 l·min<sup>-1</sup> ( $Re = 31\,830$ ).

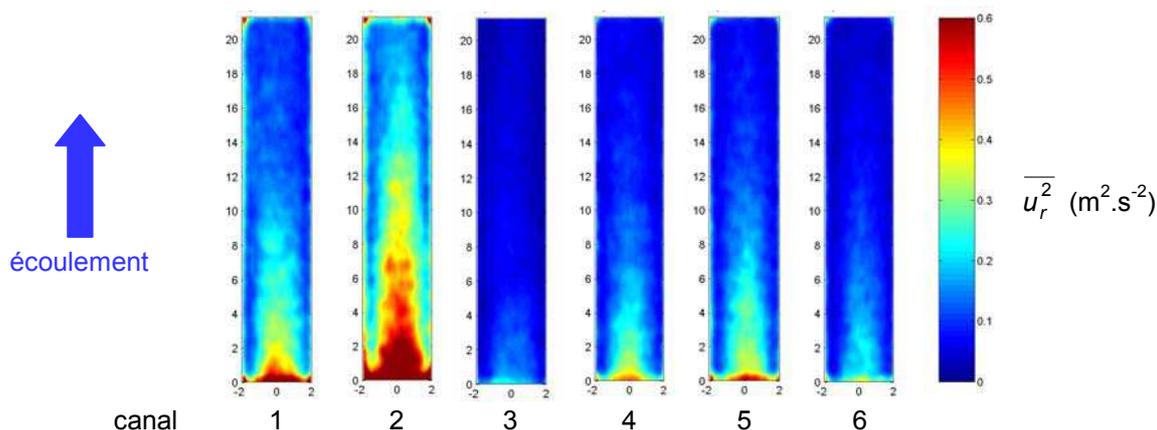


Figure 42 : Variance des fluctuations de vitesse radiale mesurée par PIV dans chacun des canaux pour un débit de  $12 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $Re = 31\,830$ ).

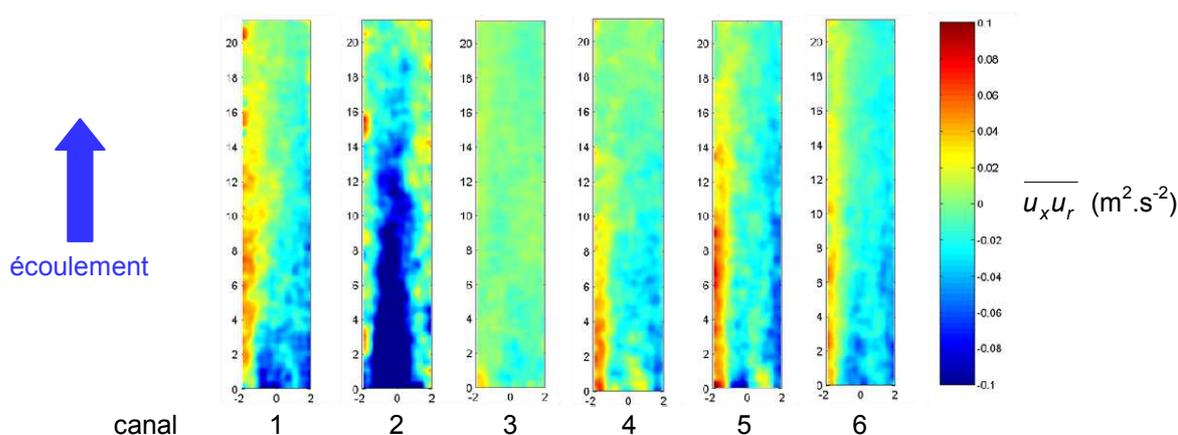


Figure 43 : Covariance des fluctuations de vitesse axiale et radiale mesurée par PIV dans chacun des canaux pour un débit de  $12 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $Re = 31\,830$ ).

#### VI-4 Conclusion

Une PIV est mise en place sur une maquette d'échangeur thermique présentant une géométrie tridimensionnelle, à l'intérieur de laquelle se développe un écoulement inhomogène avec plusieurs zones décollées. Les corrections des réflexions lumineuses sur les parois de chacun des canaux sont effectuées par soustraction d'une image de référence. Les réfractions induites par la présence d'un double dioptre courbe sont également prises en compte dans le calcul des positions radiales et des déplacements de particules. La mise en œuvre d'un algorithme avancé de PIV, le flot optique utilisant une programmation dynamique orthogonale, offre une grande résolution spatiale et permet de caractériser les gradients de vitesse à l'intérieur de chacun des canaux.

L'analyse des mesures montre que la forme de la répartition de vitesse entre les différents canaux est indépendante du débit d'entrée, le canal 2 étant toujours marqué par les plus fortes vitesses axiales. La confrontation de ces résultats à une simulation utilisant un code commercial permet de valider le calcul numérique. Les moments d'ordre 2 des fluctuations de vitesse corroborent l'analyse du champ moyen et mettent en évidence une forte anisotropie de l'écoulement et la présence de décollements au niveau des raccordements entre le collecteur amont et chacun des canaux. Enfin, cette étude montre que le canal 2 est celui où le transfert thermique entre le fluide et la paroi est le plus important.

## VI-5 Références

- FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P., LAUNAY, F.** (2006) Experimental investigation of the flow distribution inside a tubular heat exchanger, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 128, No. 6, pp. 1218–1227
- FAURE, Th. M., SATO, M., LECOCQ, Y.** (2003) *Mesures PIV par flot optique dans deux types d'écoulements turbulents*, Rapport interne LIMSI-CNRS 2003-17
- LAUNAY, F., FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P.** (2004) *Écoulement 3D dans une structure d'échangeur – Confrontation mesures simulations*, Rapport de synthèse, contrat IPNO-04-02, Collaboration Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur - Institut de Physique Nucléaire d'Orsay
- QUÉNOT, G. M.** (1992) The orthogonal algorithm for optical flow detection using dynamic programming, *Proceedings IEEE*, Vol. III, pp. 249–252
- QUÉNOT, G. M., PAKLEZA, J., KOWALEWSKI, T. A.** (1998) Particle image velocimetry with optical flow, *Experiments in Fluids*, Vol. 25, No. 3, pp. 177–189
- SATO, M.** (2003) *Étude de l'écoulement par PIV dans un tube d'échangeur thermique*, Stage de Maîtrise de Technologie Mécanique, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI



## VII Écoulement cisailé au-dessus d'une cavité parallélépipédique ouverte

### VII-1 Introduction

Les écoulements de cavité se rencontrent dans de nombreuses applications industrielles (transport aérien de polluants, refroidissement de composants électroniques, césures de portières automobiles, système hypersustentateurs et riblets en aéronautiques, anévrisme sanguin, paliers hydrodynamiques, ...). L'objectif de cette étude est de fournir une configuration de référence d'écoulement de cavité engendré par une couche de cisaillement, pour une gamme de nombre de Reynolds modérés. Les objectifs suivants seront exposés :

- la description générale de l'écoulement selon la géométrie de la cavité et le nombre de Reynolds ;
- la caractérisation de la couche de cisaillement et du développement de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz ;
- la caractérisation de l'écoulement dans la cavité et du développement d'instabilités centrifuges.

Les activités menées dans ce cadre font l'objet de plusieurs actions de recherche :

- le CNRT Aéroacoustique et Aérodynamique des Véhicules ;
- l'ANR Dynamique Instationnarité Bruit (DIB) ;
- l'ANR Contrôle Optimal et Robuste par Modèles d'Ordre Réduits d'Écoulements Décollés (CORMORED).

Cette configuration expérimentale fait aussi l'objet de plusieurs stages de licence (Gaëlle Lefèvre, 2009), maîtrise ou master 1 (Yannick Lecocq, 2003, Nicolas Pechlivanian, 2006, Sépass Mochki, 2009, Hélène Thach, 2009) et de DEA ou master 2 (Philippe Debesse, 2004, Panayotis Adrianos, 2005).

### VII-2 Dispositif expérimental

#### VII-2-1 Banc d'essais

L'écoulement est engendré par une soufflerie basse vitesse en circuit ouvert (Figure 44-a). La section d'essais est entièrement réalisée en verre antireflet de 2 mm d'épaisseur, ce qui rend possible son exploration par des méthodes optiques. Les extrémités de la cavité, selon son envergure  $S = 300$  mm, sont les parois latérales fixes de la soufflerie (Figure 44-b). La cavité est modulaire, sa longueur  $L$  et sa hauteur  $H$  sont variables ce qui permet de considérer plusieurs rapports de forme  $L/H$  entre 0,25 et 2,5 et plusieurs rapports d'envergure  $S/H$  entre 2 et 12. L'origine du repère  $(x,y,z)$  est fixée au bord amont de la cavité à mi-envergure. La vitesse caractéristique de l'écoulement est la vitesse extérieure à la couche limite amont  $U_e$ . Le nombre de Reynolds  $Re_L = U_e L / \nu$  est compris entre 860 et 37 000.

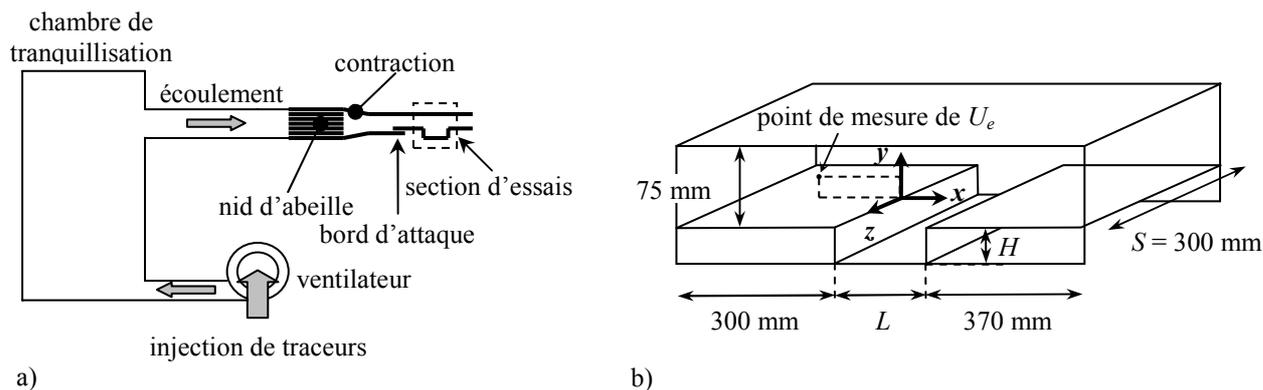


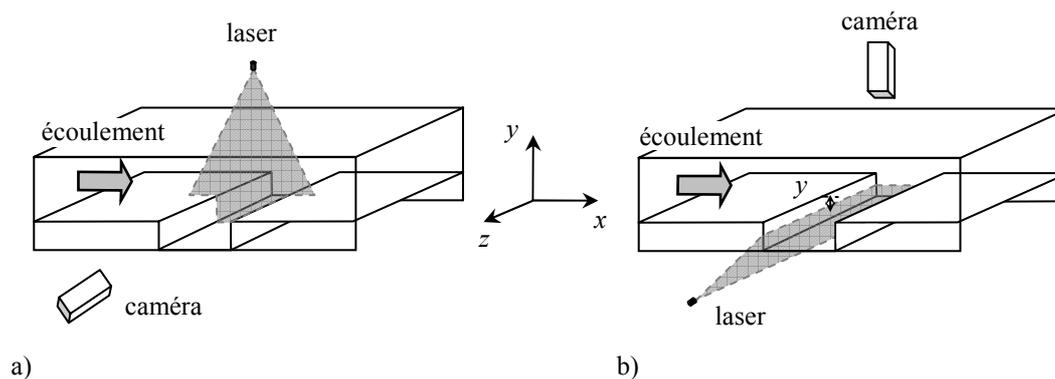
Figure 44 : Dispositif expérimental : a) soufflerie basse vitesse, b) section d'essais.

### VII-2-2 Instrumentation

Les visualisations sont obtenues à l'aide d'un laser argon-ion Aerometrics de 5 W dont on utilise les longueurs d'onde bleue (488 nm) et verte (514,5 nm). Chaque faisceau est conduit par fibre optique jusqu'à une lentille cylindrique et fournit une nappe lumineuse de 0,25 mm d'épaisseur. Un enregistrement synchronisé de l'écoulement dans deux plans est obtenu en utilisant ces deux nappes lumineuses, en plaçant sur chacune des caméras un filtre passe-bande qui correspond à la longueur d'onde souhaitée. La composante bleue du laser est également employée pour la LDV. L'ensemencement est réalisé par de la fumée de spectacle faible densité, injectée en amont du caisson de tranquillisation de la soufflerie. Les lignes d'émission qui proviennent du développement de la couche de cisaillement, permettent de visualiser les structures dynamiques de l'écoulement dans la cavité.

Les mesures PIV sont effectuées avec deux paires de sources lasers YAG pulsés, d'énergie respectives 30 mJ ou 200 mJ par impulsion, qui émettent à 532 nm une nappe lumineuse de 0,25 mm d'épaisseur maximum. L'ensemencement est réalisé par des gouttelettes de DEHS (di-éthyl-héxyl-sébacate). Leur taille moyenne est d'environ  $1 \mu\text{m}$ , elles sont nébulisées en amont de la soufflerie par air comprimé. Pour les mesures synchronisées PIV/LDV, la LDV utilise la longueur d'onde bleue (488 nm) du laser continu Argon-ion et fonctionne en mode de diffusion avant. Elle permet d'acquérir la composante axiale de vitesse à une fréquence d'environ 1 500 Hz. Afin de s'affranchir de la longueur d'onde 488 nm sur les images PIV, un filtre passe-bande, centré sur la longueur d'onde du YAG et d'une largeur de bande de 10 nm, est monté sur l'objectif de la caméra. Les séquences d'images sont enregistrées par une caméra 10 bits de résolution  $1\,032 \times 778$  pixels à une fréquence de 20 Hz.

Deux plans d'observation sont utilisés pour les visualisations et les mesures PIV : un plan  $(x,y)$ , pour appréhender la morphologie de l'écoulement principal, et un plan  $(x,z)$ , pour décrire le développement des instabilités qui se superposent à cet écoulement (Figure 45). Dans chaque cas, la caméra a une vue complète de la cavité, selon sa longueur ou son envergure. Dans le premier cas, le plan  $(x,y)$  est placé à mi-envergure de la cavité. Dans le second cas, le plan  $(x,z)$  est placé à une position verticale relative  $y/H < 0$ .

Figure 45 : Plans d'observation : a) plan  $(x,y)$ , b) plan  $(x,z)$ .

### VII-2-3 Algorithme PIV

Compte-tenu de la présence des parois de la cavité, de nombreuses réflexions sont présentes sur les images. Un prétraitement consiste à retrancher une image de bruit de fond, enregistrée avec la nappe laser à la même puissance que lors des mesures mais en l'absence d'ensemencement. Un masque correspondant aux parties qui ne sont pas situées dans l'écoulement est aussi appliqué. Enfin, le contraste des particules entre les différentes régions de l'image peut être amélioré grâce à une renormalisation locale de la dynamique de l'image, en effectuant un filtrage passe-haut (Quénot *et al.*, 1998, Figure 46). Le calcul PIV des champs de vitesse utilise un algorithme de flot optique par programmation dynamique orthogonale (Quénot, 1992, cf. VI-2-3).

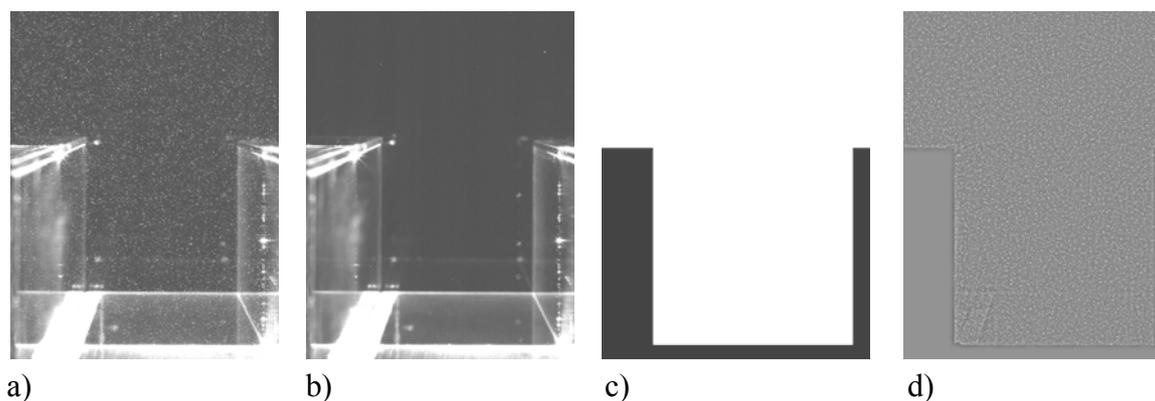


Figure 46 : Prétraitement des images avant application de l'algorithme de PIV : a) image brute, b) image de bruit de fond, c) masque de la cavité, d) image filtrée après renormalisation dynamique.

Afin d'optimiser les mesures PIV, on choisit un déplacement moyen de 10 pixels entre deux images pour les mesures dans le plan  $(x,y)$ , ce qui correspond, selon la vitesse de l'écoulement extérieur, à des intervalles de temps entre deux éclairagements laser compris entre 1 461 et 7 812  $\mu\text{s}$  (Adrianos, 2005). Pour obtenir une meilleure résolution à l'intérieur de la cavité, certaines séries de mesures considèrent un déplacement moyen de 10 pixels dans la cavité, ce qui donne des intervalles de temps compris entre 2 198 et 14 244  $\mu\text{s}$  (Defrasne, 2007). Pour les mesures PIV dans le plan  $(x,z)$ , et compte-tenu des très faibles vitesses dans ce plan, l'intervalle de temps en deux éclairagements est fixé à la cadence d'acquisition de la caméra, soit 50 000  $\mu\text{s}$ . Le choix des paramètres retenus dans l'algorithme de flot optique par programmation dynamique orthogonale, conduit à une interrogation sub-pixel et une incertitude sur les déplacements de  $1/32^{\text{e}}$  de pixel, soit une erreur relative en vitesse de 0,15%. Les résultats expérimentaux sont obtenus à partir de l'enregistrement de 2 200 images qui

fournissent 1 100 champs de vitesse. Une étude de la convergence statistique pour le plus grand nombre de Reynolds, montre que l'acquisition de 200 champs assure une convergence inférieure à 1% d'erreur pour le champ moyen et que 600 champs fournissent la même précision pour les moments d'ordre 2.

### VII-3 Principaux résultats

#### VII-3-1 Morphologie de l'écoulement

La morphologie de l'écoulement en fonction du rapport de forme  $L/H$  (Faure *et al.*, 2007) met en évidence la présence d'un tourbillon principal d'axe transverse qui est le moteur du mouvement au cœur de la recirculation, et dont la dimension est fixée par la hauteur  $H$  de la cavité (Figure 47). Ce tourbillon principal se situe vers la paroi aval pour  $L/H = 2$ , avec un tourbillon contrarotatif secondaire dans la partie amont. Pour  $L/H = 1,5$ , ce tourbillon secondaire tend à diminuer et il est réduit à un tourbillon de coin pour  $L/H = 1$ . Dans ce cas, le tourbillon principal s'inscrit parfaitement dans la cavité. Pour une cavité profonde, par exemple pour  $L/H = 0,5$ , le tourbillon principal s'inscrit dans la partie supérieure, son diamètre est imposé par la longueur de la cavité. L'analyse temporelle des visualisations dans deux plans parallèles met en évidence que l'écoulement dans la cavité est tridimensionnel mais que cette nature tridimensionnelle n'est pas due aux instabilités secondaires de la couche de cisaillement, cette dernière se présente en effet comme un phénomène essentiellement bidimensionnel (Figure 48). On remarque également que l'instationnarité de l'écoulement dans la cavité augmente avec le nombre de Reynolds mais aussi avec le rapport de forme  $L/H$ .

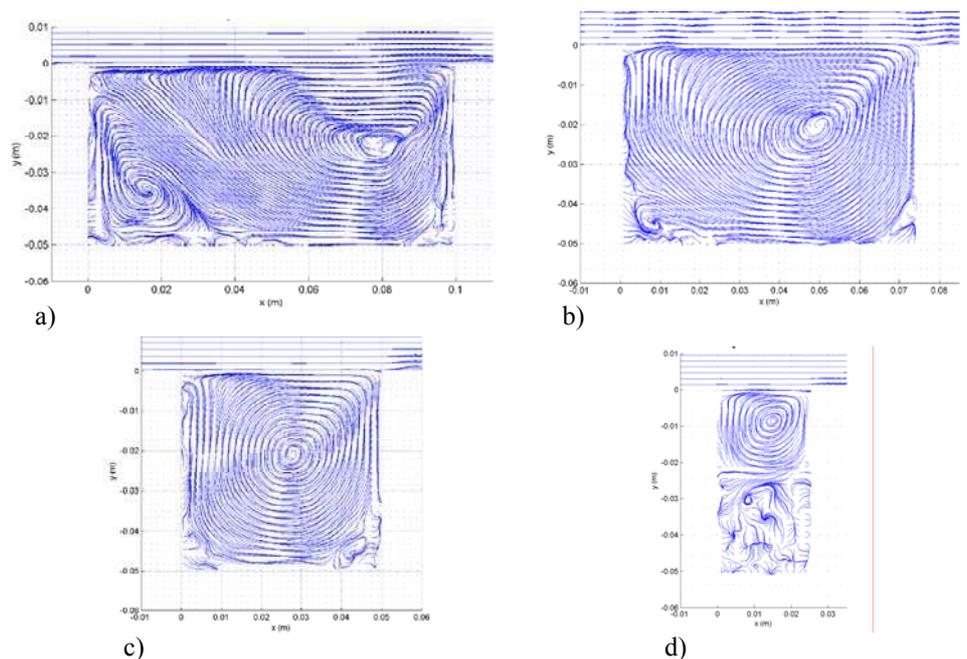


Figure 47 : Lignes de courant moyennes pour un rapport d'envergure  $S/H = 6$ ,  $Re_H = 4230$  et a)  $L/H = 2$ , b)  $L/H = 1,5$ , c)  $L/H = 1$  and d)  $L/H = 0,5$ .

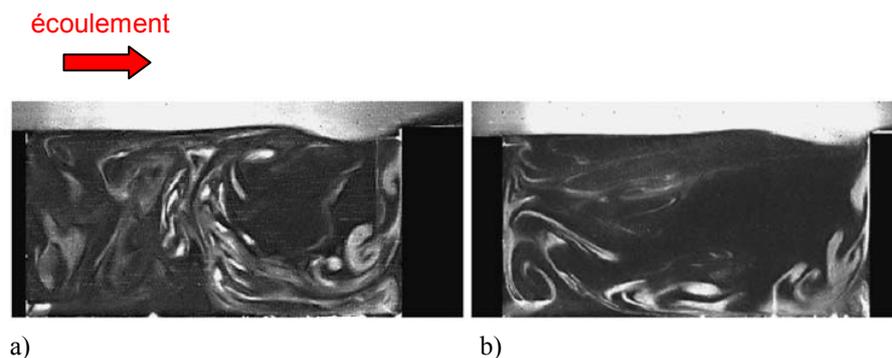


Figure 48 : Visualisation dans deux plans parallèles au même instant pour  $S/H = 6$ ,  $Re_H = 4230$ ,  $L/H = 2$  a)  $z/H = 0$  (longueur d'onde 514,5 nm), b)  $z/H = 0,6$  (longueur d'onde 488 nm).

### VII-3-2 Instabilité de la couche de cisaillement

Des mesures LDV, effectuées en aval de la couche de cisaillement à  $x/L = 1,15$  et  $y/H = 0,3$ , permettent de caractériser les différents modes de l'instabilité de la couche de cisaillement en fonction de la vitesse de l'écoulement incident et de la géométrie (Figure 49). Si, pour certaines vitesses, on n'observe qu'un seul mode associé à l'instabilité, certains cas présentent deux fréquences non-harmoniques. Afin de mesurer l'évolution temporelle de chacune de ces fréquences au cours du temps, on opte pour une représentation par spectrogramme, qui met clairement en évidence l'intermittence de chaque mode (Figure 50). Une étude de l'évolution des oscillations de la couche de cisaillement montre qu'elle est essentiellement dominée par un basculement de mode (Pastur *et al.*, 2008). Le changement du nombre de Reynolds, construit sur la longueur de la cavité  $Re_L$ , modifie les fréquences d'excitation de la couche de cisaillement, l'amplitude relative de leur densité spectrale de puissance ainsi que leur taux d'existence et de co-existence (Faure *et al.*, 2005). La structure spatiale de l'écoulement étant imposée par la géométrie de la cavité, on suspecte que les parois latérales selon l'envergure jouent un rôle dans la compétition non-linéaire de modes, mais une étude complémentaire est nécessaire pour confirmer cette interprétation.

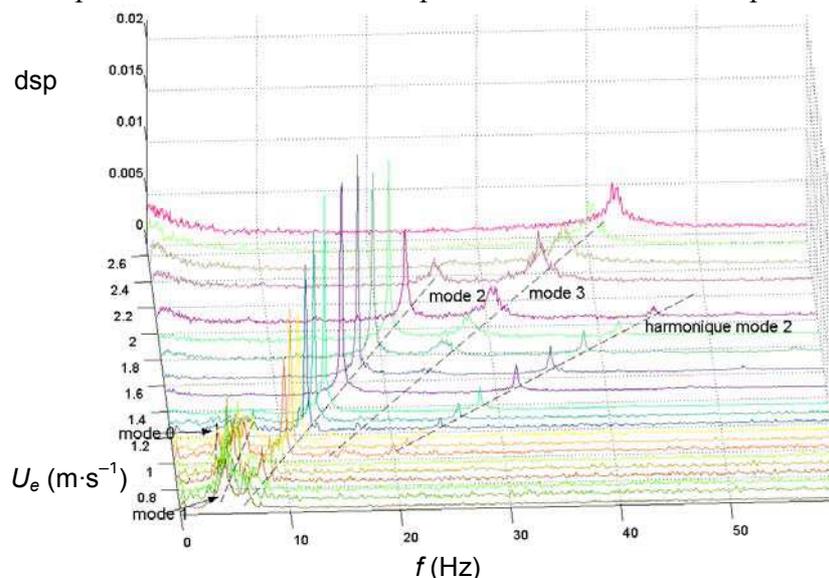


Figure 49 : Densités spectrales de puissance de la vitesse axiale mesurée en aval de la couche de cisaillement en fonction de la vitesse  $U_e$  pour  $L/H = 2$ .

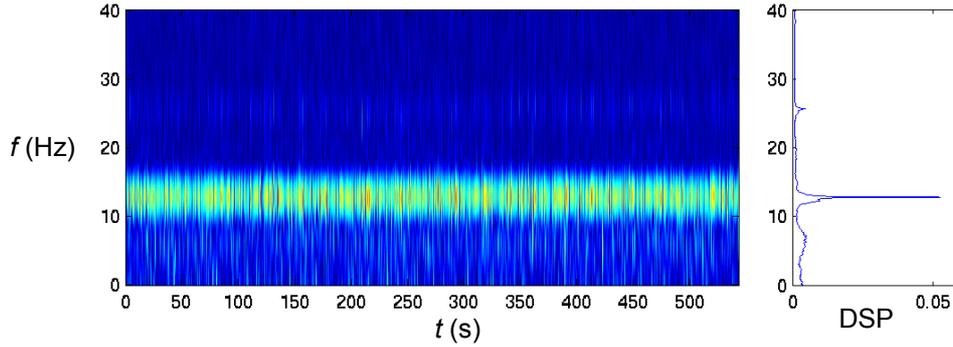


Figure 50 : Spectrogramme de la vitesse axiale mesurée en aval de la couche de cisaillement pour  $L / H = 2$  et  $Re_L = 8\,470$  (à droite la densité spectrale de puissance correspondante).

À partir des mesures synchronisées PIV/LDV, la moyenne par phase des champs spatiaux PIV, non résolus en temps, est effectuée par rapport au signal ponctuel LDV, résolu en temps (Faure *et al.*, 2006, Pastur *et al.*, 2008). Cette analyse est réalisée à partir du portrait de phase du signal LDV obtenu par une décomposition en valeurs singulières (SVD). Le signal LDV  $U_x(t)$  est tout d'abord ré-échantillonné à une fréquence multiple de la fréquence des champs PIV. Il est ensuite filtré au moyen d'un filtre passe-bande, de largeur de bande 1 Hz autour de la fréquence correspondant au mode caractéristique de la couche de cisaillement. Ce signal sert à la construction de la matrice des retards  $S$  définie, pour  $N$  échantillons temporels, par :

$$S = \begin{pmatrix} U_x(t_1) & U_x(t_2) & \cdots & U_x(t_m) \\ U_x(t_2) & U_x(t_3) & \cdots & U_x(t_{m+1}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ U_x(t_{N-m+1}) & U_x(t_{N-m+2}) & \cdots & U_x(t_N) \end{pmatrix}$$

La décomposition aux valeurs singulières consiste alors à écrire cette matrice sous la forme :

$$S = A_S \cdot D_S \cdot B_S^T$$

où  $D_S$  est la matrice des valeurs singulières, rangées de la plus grande à la plus petite. La matrice des retards est projetée sur sa base  $B_S$ , qui est une matrice orthogonale, telle que :

$$B_S^T \cdot S \cdot B_S = I$$

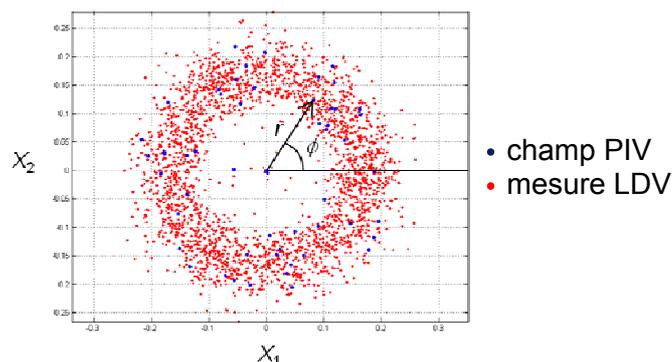
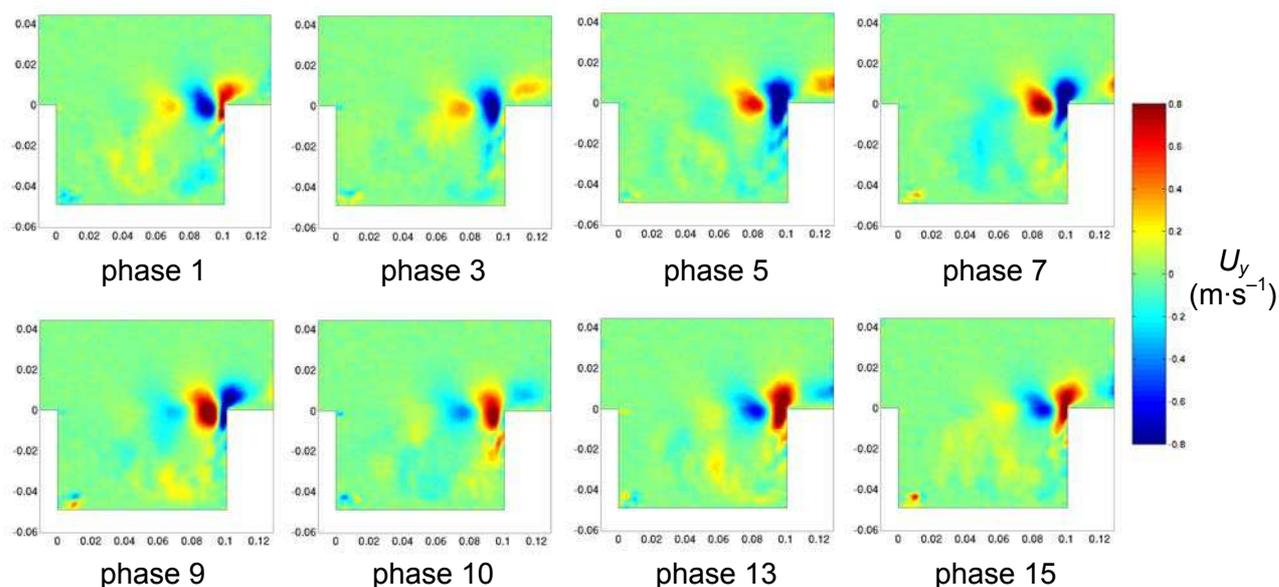
avec  $I$  la matrice identité et la base  $A_S$ , telle que :

$$S \cdot B_S = A_S \cdot D_S$$

L'espace des phases est alors déterminé par les colonnes de la matrice  $X$  définie par :

$$X = A_S \cdot D_S$$

Les deux premières colonnes de cette matrice  $X$  constituent le portrait de phase ( $X_1, X_2$ ), chaque point de mesure pouvant être aussi repéré par son rayon  $r$  et sa phase  $\phi$  (Figure 51). On effectue la moyenne des champs PIV correspondants, par secteurs en 16 phases de résolution angulaire  $22,5^\circ$  (Figure 52). Ce traitement permet de reconstituer les oscillations de la couche de cisaillement au-dessus de la cavité à travers la composante  $U_y$ , qui présente une alternance de zones positives (injections) et négatives (éjections) évoluant au cours d'un cycle. Le même traitement est appliqué aux cas présentant deux modes caractéristiques, en choisissant d'effectuer la moyenne par rapport au premier ou au second mode.

Figure 51 : Portrait de phase du signal LDV pour  $L / H = 2$  et  $Re_L = 13\,930$ .Figure 52 : Composante verticale de vitesse mesurée par PIV en phase avec le signal LDV pour  $L / H = 2$  et  $Re_L = 8\,470$ .

### VII-3-3 Instabilités centrifuges

L'écoulement à l'intérieur de la cavité est dominé par un tourbillon principal d'axe transverse, et le confinement entre le fond de la cavité et la couche de cisaillement. Un autre nombre de Reynolds  $Re_H$ , construit sur la hauteur  $H$  de la cavité, est alors plus adapté pour décrire l'écoulement interne (Brès & Colonius, 2008). La recirculation peut engendrer, selon les paramètres, l'absence d'instabilité (Figure 53-a), l'apparition d'instabilités centrifuges selon l'envergure (Figure 53-b) ou la présence d'instabilités isolées (Figure 53-c, Faure *et al.*, 2009).

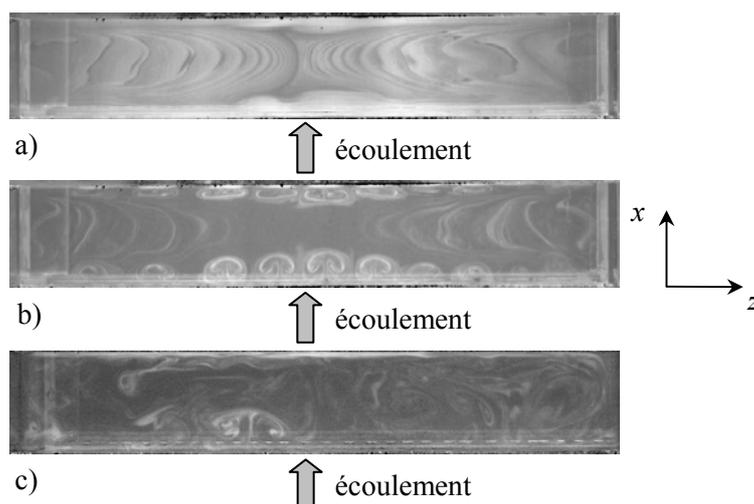


Figure 53 : Visualisation dans un plan horizontal situé à  $y/H = -0,3$  pour : a)  $L/H = 1$ ,  $S/H = 6$  et  $Re_H = 2\,970$ , b)  $L/H = 1$ ,  $S/H = 6$  et  $Re_H = 4\,230$ , c)  $L/H = 0,5$ ,  $S/H = 3$  et  $Re_H = 15\,000$ .

Une simulation numérique directe (DNS) instationnaire est réalisée pour  $S/H = 6$ ,  $L/H = 1$  et  $Re_H = 4\,230$ , à l'aide d'un code Olorin volumes finis, comportant un maillage de  $256 \times 128 \times 128$  nœuds et un resserrement des points à proximité des parois et dans la couche de cisaillement (Faure *et al.*, 2009). Des conditions aux limites de parois rigides sont également imposées selon les parois latérales. La simulation correspond à 40 s après la convergence statistique du calcul, à une fréquence d'enregistrement de 30 Hz. La Figure 54 présente l'hélicité du champ de vitesse définie par :

$$\mathcal{H} = \vec{V} \cdot \vec{\Omega}$$

où  $\vec{V}$  est le vecteur vitesse et  $\vec{\Omega} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{V}$  la vorticité. On observe, tout comme sur les visualisations (Figure 53-b), la nature quasi-annulaire des paires d'instabilités centrifuges qui se répartissent, selon l'envergure de la cavité, en zones d'iso-hélicité négatives (bleues) et positives (jaunes).

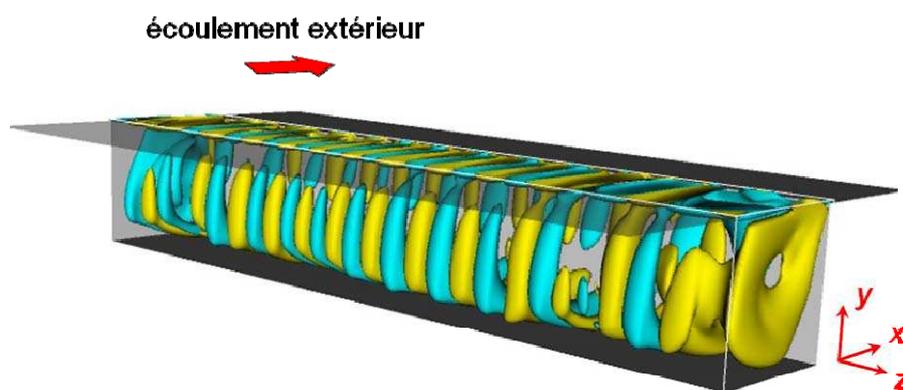


Figure 54 : Représentation de l'hélicité obtenue par DNS pour  $S/H = 6$ ,  $L/H = 1$  et  $Re_H = 4\,230$ .

Le domaine d'existence des instabilités centrifuges montre la présence d'un seuil d'apparition et d'un seuil de transition vers la turbulence, indépendant du rapport d'envergure pour  $S/H \geq 3$  (Figure 55).

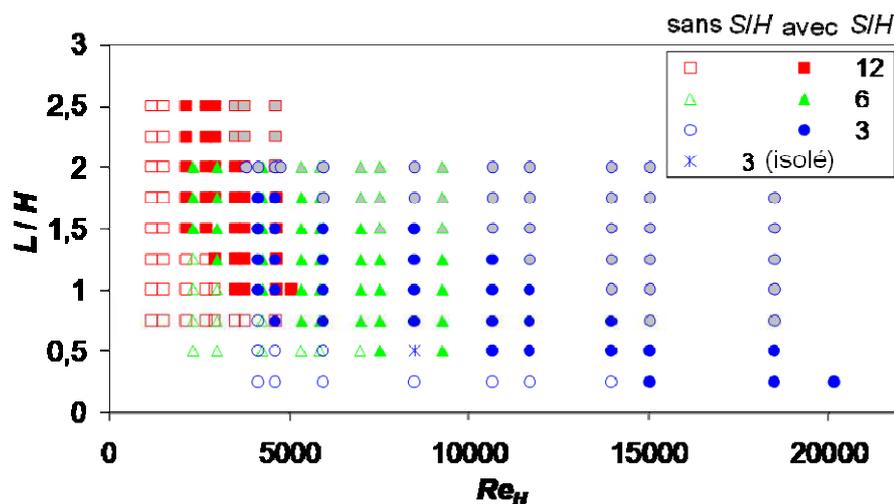


Figure 55 : Diagramme d'existence d'instabilités centrifuges en fonction du rapport  $L/H$  et du nombre de Reynolds  $Re_H$  pour  $S/H = 12, 6, \text{ et } 3$  : symboles creux : absence, symboles pleins : présence, symboles gris : écoulement transitionnel et croix : instabilité isolée.

Pour identifier les structures tourbillonnaires, à partir de mesures PIV dans un plan  $(x,z)$ , où le bruit de mesure est important compte-tenu de la forte composante de vitesse transverse, on utilise le critère  $\Gamma_2$  (Graftieaux *et al.*, 2001) défini par :

$$\Gamma_2(\bar{x}) = \frac{1}{S} \int_{\bar{x}' \in S} \frac{(\bar{x}' - \bar{x}) \wedge [\vec{U}(\bar{x}') - \vec{U}(\bar{x})]}{\|\bar{x}' - \bar{x}\| \|\vec{U}(\bar{x}') - \vec{U}(\bar{x})\|} d\bar{x}'$$

Il s'agit d'un moment cinétique normalisé pour le mouvement relatif autour d'une particule fluide donnée, qui est donc compris entre  $-1$  et  $1$ , ces deux bornes correspondant à la présence d'un tourbillon. On observe ainsi l'allée de paires de tourbillons contra-rotatifs au bord amont de la cavité sur la visualisation (Figure 56-a) et sur le critère  $\Gamma_2$  appliqué aux mesures PIV (Figure 56-b). Il est alors possible d'extraire une ligne passant par l'allée d'instabilités (lignes blanches, Figure 56) et de construire un diagramme spatio-temporel en empilant ces différentes lignes au cours du temps (Faure *et al.*, 2007). On observe alors la migration des paires de tourbillons vers les parois latérales de la cavité, à une vitesse correspondant à la pente des motifs du diagramme (Figure 57).

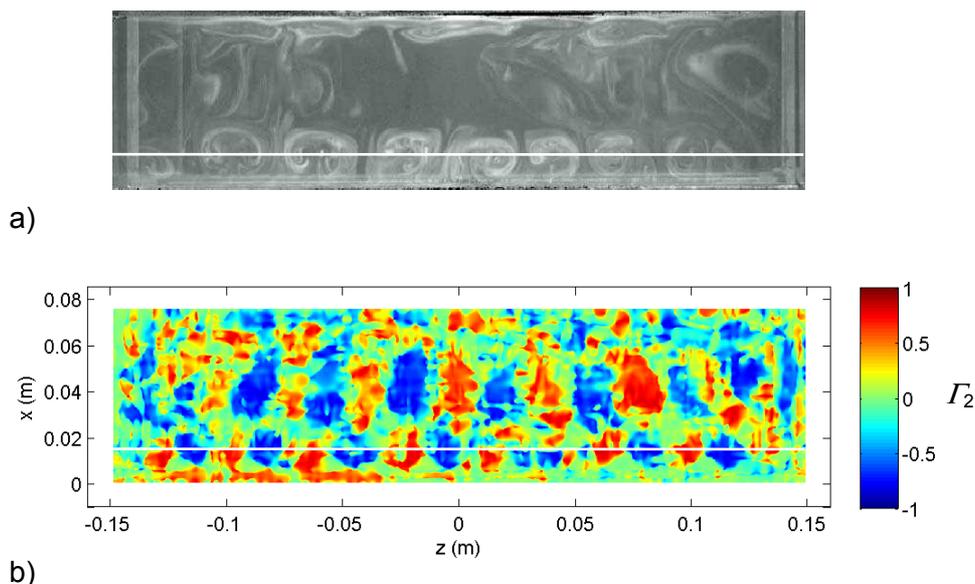


Figure 56 : Identification des instabilités centrifuges dans un plan horizontal situé à  $y/H = -0,3$  pour  $L/H = 1,5$ ,  $S/H = 6$  et  $Re_H = 2\,300$  : a) visualisation, b) mesures PIV et critère  $\Gamma_2$ .

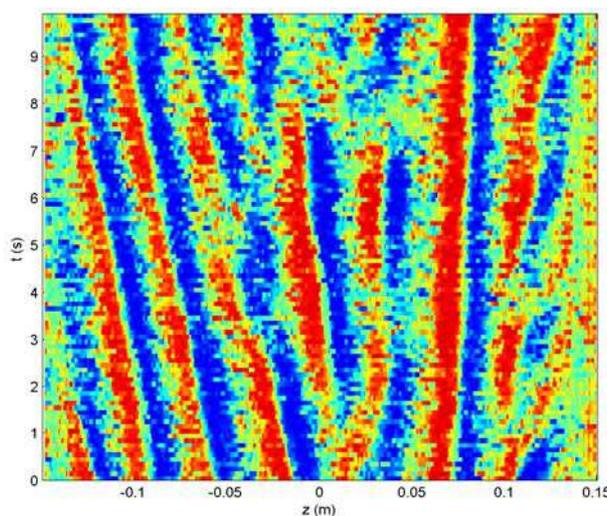


Figure 57 : Diagramme espace-temps du critère  $\Gamma_2$  pour  $L/H = 1,5$ ,  $S/H = 6$  et  $Re_H = 2\,300$ .

Afin d'analyser l'origine des instabilités centrifuges, on utilise le discriminant de Rayleigh (1916) :

$$\eta(x, y) = - \frac{\partial \left\| \vec{r}(x, y) \wedge \vec{U}(x, y) \right\|^2}{\partial r}$$

L'écoulement est stable si  $\eta < 0$  et potentiellement instable si  $\eta > 0$ . Comme l'analyse concerne la stabilité d'un état de base, on calcule ce discriminant à partir des champs PIV moyens. On observe, pour un nombre de Reynolds donné, que l'étendue et l'intensité de la zone potentiellement instable augmente avec le rapport  $L/H$  de la cavité (Figure 58). La confrontation de la valeur maximale de  $\eta$ , mesurée pour chaque configuration, aux visualisations correspondantes, montre que le seuil d'apparition des instabilités centrifuges est lié à la dimension du tourbillon principal d'axe transverse. Pour prendre en considération les effets stabilisants de la viscosité, on définit un paramètre de contrôle (Migeon, 2000) :

$$C = \frac{\text{temps de stabilisation}}{\text{temps de déstabilisation}} = \frac{\frac{d_i^2}{\nu}}{\frac{U_c d_i}{\sqrt{d_i R_c}}} = \frac{U_c d_i}{\nu} \sqrt{\frac{d_i}{R_c}}$$

où  $d_i$  est la distance instable de l'écoulement,  $R_c$  le rayon de courbure et  $U_c$  la vitesse de convection dans la recirculation. La comparaison de l'évolution de ce paramètre de contrôle  $C$  selon l'azimut  $\theta$  de l'écoulement dans la cavité, montre un comportement différent entre l'entraînement du fluide par une couche de cisaillement et par un couvercle mobile (Figure 59, Migeon, 2002). La confrontation des visualisations et des mesures PIV met en évidence les seuils d'apparition des instabilités centrifuges :

- pour une recirculation induite par une couche de cisaillement,  $C \sim 30$  ;
- pour une recirculation induite par une paroi mobile,  $C > 80$ .

L'entraînement par couche de cisaillement présente donc un caractère plus instable que l'entraînement par une paroi mobile, et facilite l'apparition d'instabilités centrifuges.

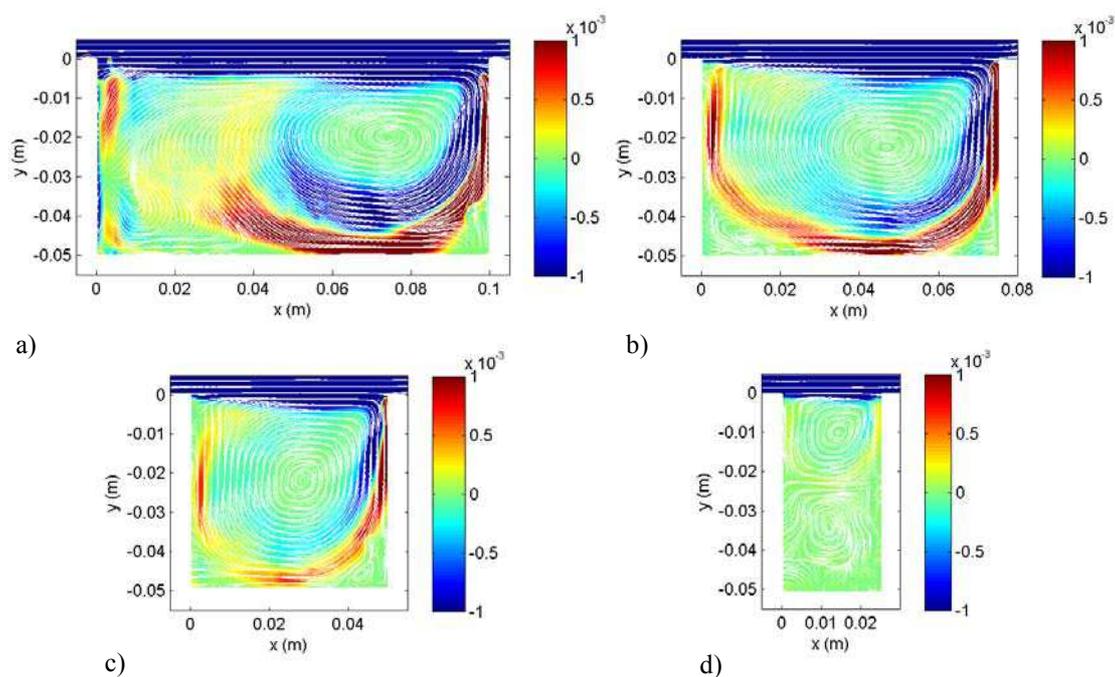


Figure 58 : Discriminant de Rayleigh  $\eta$  pour un rapport d'envergure  $S/H = 6$ ,  $Re_H = 4230$  et a)  $L/H = 2$ , b)  $L/H = 1,5$ , c)  $L/H = 1$  et d)  $L/H = 0,5$ .

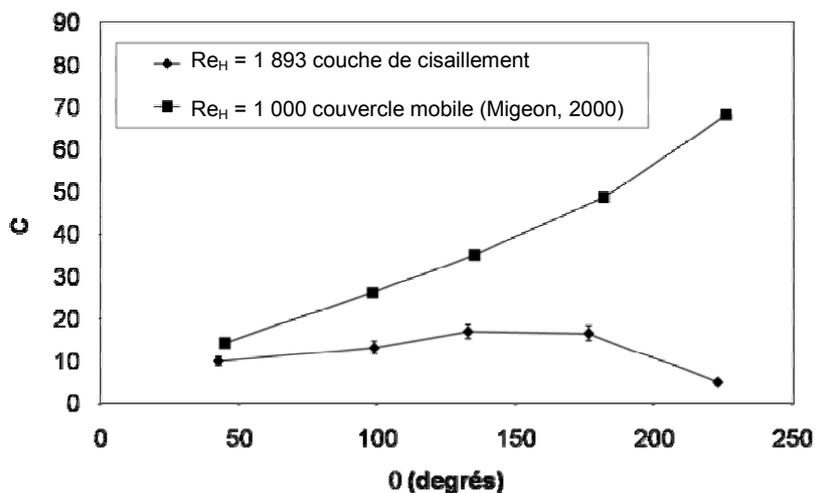


Figure 59 : Paramètre de contrôle  $C$  dans la recirculation pour  $S/H = 6$  et  $L/H = 1$  : comparaison entre un entraînement par une couche de cisaillement et par un couvercle mobile.

#### VII-3-4 Champ moyen en phase par rapport à l'instabilité de Kelvin-Helmholtz

Des mesures PIV résolues en temps sont effectuées dans un plan  $(x,y)$  situé à  $z/S = 0,07$  à l'aide d'une caméra Fastcam-APX RS de résolution  $1024 \times 1024$  pixels et de fréquence d'acquisition 500 Hz (Basley *et al.*, 2009). Ces données permettent donc de résoudre directement les oscillations de la couche de cisaillement, dont les modes caractéristiques sont à quelques dizaines de Hertz. Les 4 096 champs de vitesse calculés permettent de construire l'histogramme des périodes d'oscillation à partir du passage d'un petit tourbillon de la couche de cisaillement en une position donnée ( $x/L = 0,9$ , Thach, 2009) qui montre que la période la plus probable est de 0,05 s (Figure 60). L'analyse du critère de Rayleigh pour chacune des 12 phases d'un cycle met en évidence que les zones stables et potentiellement instables dans la recirculation ne sont pas affectées par l'instabilité de Kelvin-Helmholtz. Le caractère instable de l'écoulement au sein de la recirculation est donc global, est ne dépend pas de la phase des oscillations.

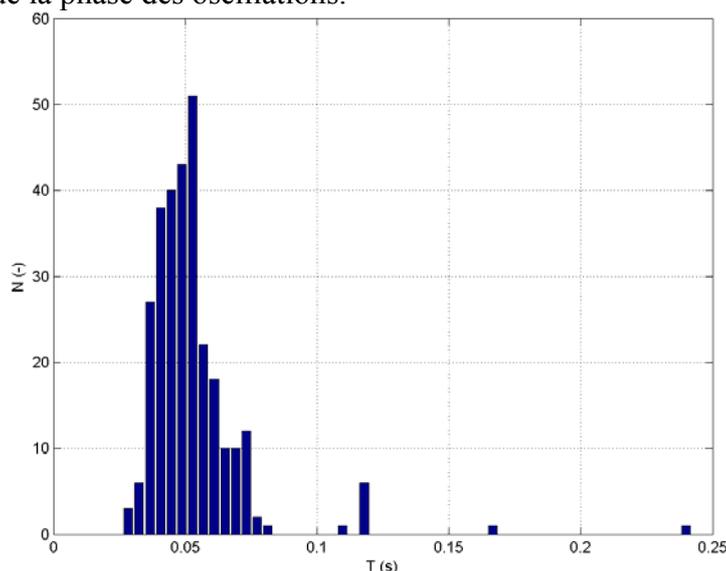


Figure 60 : Histogramme de la période de la couche de cisaillement pour  $L/H = 2$  et  $Re_L = 10\ 630$ .

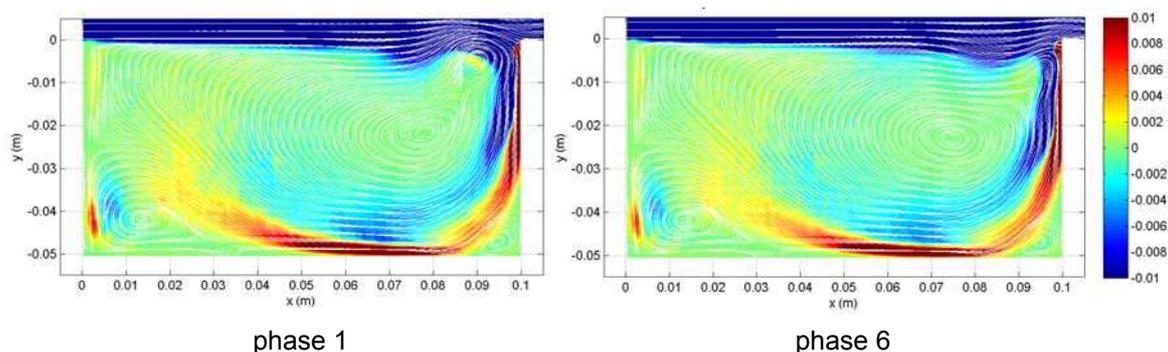


Figure 61 : Critère de Rayleigh  $\eta$  calculé à partir de la vitesse moyenne pour les phases 1 et 6, pour  $L / H = 2$  et  $Re_L = 10\,630$ .

### VII-3-5 PIV stéréoscopique

Une PIV stéréoscopique par flot optique utilisant une programmation dynamique orthogonale est mise en place (Mochki, 2009). L'avantage de cet algorithme est qu'il inclut un étalonnage de la position de chacune des caméras, par rapport à une mire positionnée dans le plan de mesure. Pour la caractérisation du plan  $(x, y)$ , une première caméra est placée selon l'axe de la cavité, et permet une confrontation du résultat avec l'algorithme de PIV-2C, tandis que la seconde caméra est placée au-dessus et forme un angle d'environ  $20^\circ$  par rapport à la première. La comparaison des deux composantes de vitesse instantanée mesurées avec les deux méthodes, montre un excellent accord dans la cavité (Figure 62).

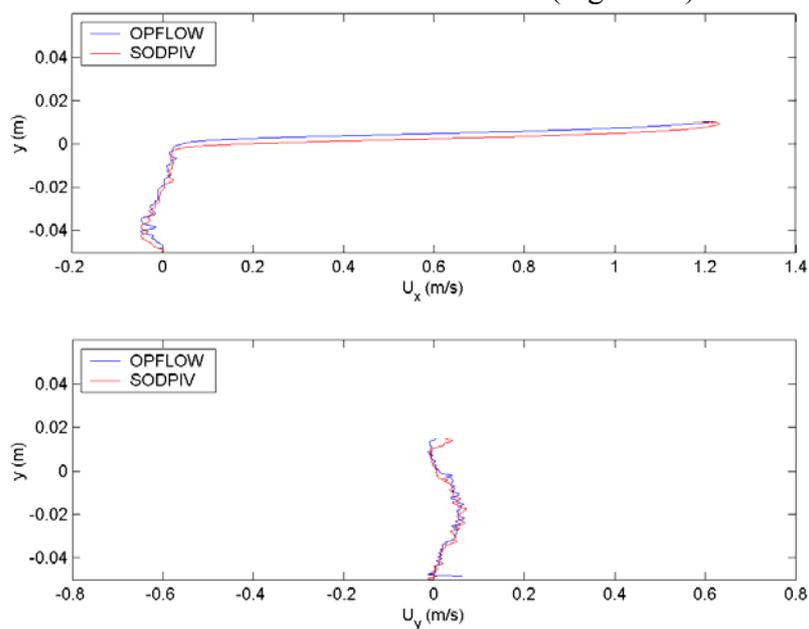


Figure 62 : Profils de vitesse  $U_x$  et  $U_y$  selon le diamètre du tourbillon principal d'axe transverse pour  $L/H = 1$  et  $Re_L = 4\,230$  : comparaison entre la PIV-2C (OPFLOW) et la PIV-3C stéréoscopique (SODPIV).

La caractérisation dans un plan  $(z, x)$  situé à l'intérieur de la cavité met en évidence, dans une même mesure, les lignes de courant associées aux instabilités centrifuges et le mouvement du tourbillon principal d'axe transverse (Figure 63). Ce dernier est identifié par des vitesses positives au bord amont de la cavité (remonté de l'écoulement) et des vitesses négatives au bord aval (descente de l'écoulement).

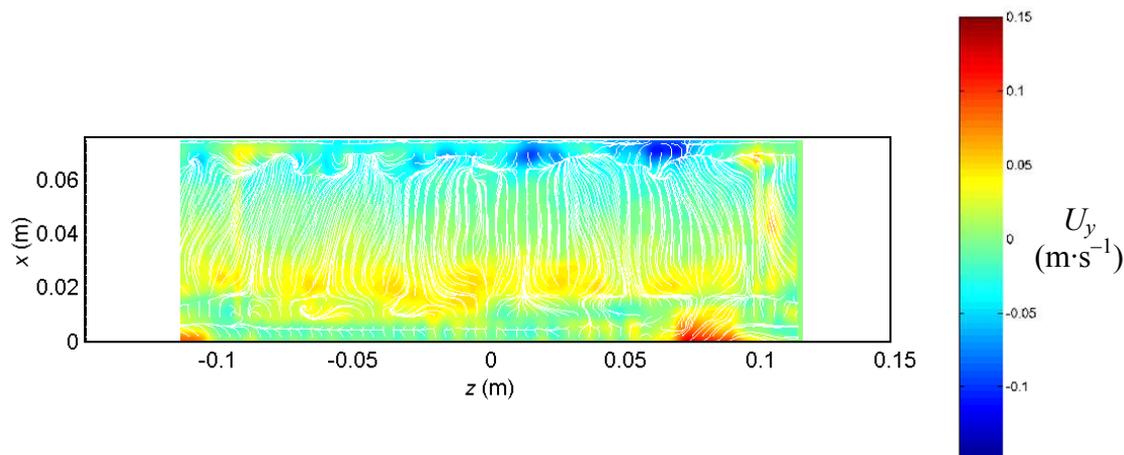


Figure 63 : Lignes de courant ( $U_x$ ,  $U_z$ ) et vitesse verticale  $U_y$  mesurées par PIV stéréoscopique pour  $L/H = 1,5$ ,  $Re_L = 4\,450$  dans un plan situé à  $y/H = -0,3$ .

#### VII-4 Conclusion

Une expérience de référence est mise en place pour l'étude d'un écoulement de cavité entraîné par une couche de cisaillement. La géométrie de la cavité est modulable et l'étude, qui concerne une gamme de nombres de Reynolds moyens (entre 860 et 37 000), est effectuée au moyen de techniques expérimentales optiques (visualisation, LDV, PIV).

La description de la morphologie de l'écoulement en fonction de la géométrie de la cavité et de nombre de Reynolds, met en évidence que la recirculation est marquée par un tourbillon principal d'axe transverse et des tourbillons secondaires. Par ailleurs, l'écoulement dans la cavité est de nature tridimensionnelle alors que la couche de cisaillement reste essentiellement bidimensionnelle.

Cette couche de cisaillement est le siège, pour certains rapports d'envergure  $L/H$ , du développement d'une instabilité de Kelvin-Helmholtz, dont la dynamique est décrite par un nombre de Reynolds  $Re_L$ , construit sur la longueur de la cavité. Un ou plusieurs modes fondamentaux sont observés en fonction de  $Re_L$ . Lorsque deux modes sont présents, chacun montre un caractère intermittent. Une décomposition en valeurs singulières des mesures synchronisées PIV / LDV permet la réalisation de moyennes en phase par rapport à un mode d'oscillation.

Le développement de l'écoulement à l'intérieur de la cavité met en évidence des instabilités centrifuges pour certains paramètres expérimentaux. La dynamique de ces dernières est décrite par un nombre de Reynolds  $Re_H$  construit sur la hauteur du tourbillon d'axe transverse, c'est-à-dire la hauteur  $H$  de la cavité. Le domaine d'existence de ces instabilités est établi, il présente un seuil d'apparition et d'évolution vers un écoulement transitionnel. Ce diagramme est indépendant du rapport d'envergure dès que  $S/H > 2$ . Les caractéristiques de ces instabilités, notamment leur nombre, leur longueur d'onde et leur vitesse de dérive transverse vers les parois latérales, sont mesurées à partir de diagrammes spatio-temporels, issus des visualisations ou du critère  $T_2$  calculé à partir des mesures PIV. L'origine des instabilités centrifuges est analysée avec le discriminant de Rayleigh, et met en évidence une valeur seuil unique pour une taille de tourbillon principal donnée. Afin d'étudier l'effet stabilisant de la viscosité, un paramètre de contrôle est mesuré au cours du mouvement au sein de la recirculation. La confrontation de ces résultats à ceux obtenus pour une cavité entraînée par un couvercle mobile indique que le développement de la couche de cisaillement a un effet déstabilisant sur l'écoulement à l'intérieur de la cavité.

Les perspectives de cette étude s'orientent selon deux directions. Tout d'abord, l'analyse de mesures PIV résolues en temps, pour réaliser directement des moyennes en phase par rapport aux oscillations de la couche de cisaillement et l'étude du couplage entre l'instabilité de Kelvin-Helmholtz et les instabilités centrifuges. Ensuite la mise en œuvre de la PIV stéréoscopique par flot optique par programmation dynamique orthogonale, pour obtenir les trois composantes de vitesse instantanée dans un plan de mesure. Pour chacun de ces points, l'analyse doit être poursuivie de façon systématique pour tous les paramètres expérimentaux (rapports de géométrie, nombre de Reynolds).

## VII-5 Références

- ADRIANOS, P.** (2005) *Interaction d'un écoulement avec une cavité ouverte : étude spatio-temporelle*, Stage de Master de Sciences de l'Ingénieur (DEA) 2<sup>e</sup> année, spécialité Mécanique des Fluides et Énergétique, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI
- BASLEY, J., PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., DELPRAT, N.** (2009) Investigation of the spatial organization of spectral dynamics in an incompressible cavity flow using time-resolved high-speed PIV, *8<sup>th</sup> International Symposium on Particle Image Velocimetry*, Melbourne (Australia), August 25-28 2009
- BRÈS, G. A., COLONIUS, T.** (2008) Three-dimensional instabilities in compressible flow over open cavities, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 599, pp. 309–339
- DEBESSE, Ph.** (2004) *Étude de l'intermittence d'une couche de cisaillement générée par un écoulement affleurant une cavité*, Stage de DEA de Dynamique des Fluides et Transferts, Université Paris-Sud XI
- DEFRASNE, A.** (2007) *Évolution du champ de vitesse dans une allée de tourbillons de type Görtler prenant naissance dans une cavité ouverte*, Stage de Master de Mécanique Physique 1<sup>e</sup> année, Université Paris-Sud XI
- FAURE, Th. M., ADRIANOS, P., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R.** (2007) Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers, *Experiments in Fluids*, Vol. 42, No. 2, pp. 169–184
- FAURE, Th. M., DEBESSE, Ph., LUSSEYRAN, F., GOUGAT, P.** (2005) Structures tourbillonnaires engendrées par l'interaction entre une couche limite laminaire et une cavité, *11<sup>ème</sup> Colloque de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides*, Lyon (France), 6-9 Juin 2005
- FAURE, Th. M., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L. R., PETHIEU, R., DEBESSE, Ph.** (2006) Développement d'instabilités dans un écoulement subsonique se développant au-dessus d'une cavité : mesures synchronisées PIV-LDV, *10<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Techniques Laser*, Toulouse (France), 19-22 Septembre 2006, pp. 577–584
- FAURE, Th. M., PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FRAIGNEAU, Y., BISCH, D.** (2009) Three-dimensional centrifugal instabilities development inside a parallelepipedic open cavity of various shape, *Experiments in Fluids*, Vol. 47, No. 3, pp. 395–410
- GRAFTIEAUX, L., MICHARD, M., GROSJEAN, N.** (2001) Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows. *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, pp. 1422–1429
- LECOCQ, Y.** (2003) *Étude par PIV de l'interaction d'un écoulement avec une cavité*, Stage de Maîtrise de Technologie Mécanique, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI
- LEFEVRE, G.** (2009) *Traitement et analyse des caractéristiques d'un écoulement de cavité à partir de mesures PIV*, Stage de Licence de Physique Mécanique 3<sup>e</sup> année, Université Paris-Sud XI
- MIGEON, Ch.** (2000) *Contribution à l'analyse de l'écoulement tridimensionnel instable s'établissant à l'intérieur de cavités cylindriques*, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers

- MIGEON, Ch.** (2002) Details on the start-up development of the Taylor-Görtler-like vortices inside a square-section lid-driven cavity for  $1,000 \leq Re \leq 3,200$ , *Experiments in Fluids*, Vol. 33, pp. 594–602
- MOCHKI, S.** (2009) *PIV stéréoscopique et application à un écoulement confiné*, Stage de Master de Sciences de l'Ingénieur, parcours Mécanique des Fluides et Énergétique, 1<sup>e</sup> année, Université Pierre et Marie Curie Paris VI
- PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FAURE, Th. M., FRAIGNEAU, Y., PETHIEU, R., DEBESSE, Ph.** (2008) Quantifying the non-linear mode competition in the flow over an open cavity at medium Reynolds number, *Experiments in Fluids*, Vol. 44, No. 4, pp. 597–608
- PECHLIVANIAN, N.** (2006) *Détermination des seuils d'apparition d'instabilités aérodynamiques en fonction de la géométrie d'une cavité rectangulaire affleurant un écoulement*, Stage de Master de Mécanique Physique 1<sup>e</sup> année, Université Paris-Sud XI
- QUÉNOT, G. M.** (1992) The orthogonal algorithm for optical flow detection using dynamic programming, *Proceedings IEEE*, Vol. III, pp. 249–252
- QUÉNOT, G. M., PAKLEZA, J., KOWALEWSKI, T. A.** (1998) Particle image velocimetry with optical flow, *Experiments in Fluids*, Vol. 25, No. 3, pp. 177–189
- RAYLEIGH, J. S.** (1916) On the dynamics of evolving fluids, *Scientific papers*, Vol. 6, pp. 447–453.
- THACH, H.** (2009) *Analyse de stabilité d'un écoulement confiné à partir de mesures PIV résolues en temps*, Stage de Master de Mécanique Physique 1<sup>e</sup> année, Université Paris-Sud XI

## Conclusion

L'ensemble de mes activités de recherche porte sur plusieurs thématiques en mécanique des fluides, qui reposent sur la mesure du champ de vitesse, à travers différentes techniques, le plus souvent multi-composantes et instationnaires.

L'anémométrie à films chauds triples à température constante (CTA) a permis de caractériser le sillage turbulent d'un corps autopropulsé par hélice. Les résultats ont montré l'affinité du champ de vitesse mais aussi des échanges énergétiques turbulents. Une analyse spectrale et des moyennes en phase avec la rotation du propulseur, ont permis d'identifier les zones marquées par des structures organisées de l'écoulement.

Le développement de l'anémométrie fil chaud à tension constante (CVA) a démontré ses performances pour l'étude d'une couche limite supersonique. Cette technique présente une fréquence de coupure du signal plus élevée par rapport aux montages à température constante (CTA) et à courant constant (CCA). L'utilisation de trois coefficients de surchauffe du fil a aussi permis de discriminer les variances des fluctuations de flux de masse et de température totale.

L'anémométrie fil chaud a également été employée pour l'exploration de l'écoulement à l'intérieur d'un nouveau concept de turbopompe centrifuge. Une recirculation et une zone de pré-rotation ont été identifiées en amont de l'inducteur, cette dernière trouvant son origine dans sa nature tridimensionnelle couplée à un effet d'incidence le long de l'envergure du bord d'attaque des pales de l'inducteur.

Une autre application aux machines tournantes a permis de mettre en place un système de vélocimétrie laser Doppler à trois composantes sur un étage de compresseur axial. Cette technique de mesure permet d'appréhender la dynamique instationnaire de l'écoulement en phase avec la rotation du rotor. En particulier, on a observé le couplage fluide-structure entre les sillages des aubes du rotor et les parois du stator, qui est alors soumis à des variations périodiques de charge aérodynamique.

Une PIV par flot optique a caractérisé l'écoulement à l'intérieur d'un échangeur de chaleur constitué de canaux parallèles. La répartition du débit entre ces différents canaux et la présence de zones décollées ont constitué une base de validation pour une simulation numérique.

L'étude de l'écoulement dans une cavité ouverte, pour des nombres de Reynolds modérés, a également été réalisée par cette technique PIV couplée à la LDV et des visualisations. L'étude des modes associés au développement de la couche de cisaillement, a révélé leur nature intermittente. L'écoulement présente, pour certains paramètres, des instabilités centrifuges, engendrées par la recirculation de la cavité, dont le domaine d'existence a été établi. La comparaison d'un écoulement entraîné par une couche de cisaillement, aux résultats obtenus pour une cavité entraînée par un couvercle mobile, a montré que cette dernière configuration est beaucoup plus stable et ne permet généralement pas l'apparition d'instabilités centrifuges.

Au cours de ces travaux de recherche, la mise en œuvre d'outils de reconstruction a permis de générer une information globale à partir d'une mesure localisée. Ainsi, il est possible de reconstruire le champ de vitesse dans un volume en effectuant un maillage de points expérimentaux, lorsqu'un phénomène ergodique ou périodique est considéré. De même, on peut obtenir une périodicité temporelle du champ de vitesse lorsqu'on dispose d'un signal de synchronisation périodique en effectuant des moyennes de phase, ou lorsque l'on sélectionne un mode propre à l'écoulement. Ce mode peut être issu d'un signal de vitesse local résolu en temps, synchronisé avec une PIV non résolue en temps, au moyen d'une décomposition en valeurs singulières. On peut également traiter directement des mesures PIV résolues en temps, en prenant comme critère de détection une structure caractéristique de

l'écoulement, comme le passage d'un tourbillon à une position donnée. Les développements futurs des techniques expérimentales s'orientent vers une mesure volumique des trois composantes de la vitesse, si possible résolue en temps, à travers des méthodes du type de la PIV stéréoscopique tomographique.

## Perspectives

Mes perspectives de recherche s'articulent autour de quatre axes principaux :

- la poursuite de la caractérisation phénoménologique de l'écoulement de cavité, selon la géométrie, et du couplage entre couche de cisaillement et instabilités centrifuges ;
- le développement d'une PIV stéréoscopique tomographique fondée sur un algorithme de flot optique ;
- le développement de méthodes d'identification de frontières et de structures de l'écoulement ;
- le contrôle en boucle fermée de l'écoulement.

La caractérisation physique de la dynamique de l'écoulement dans la cavité et du couplage entre couche de cisaillement et instabilités centrifuges, pourra faire l'objet de l'encadrement d'une thèse. Si la morphologie de la recirculation de l'écoulement en fonction du rapport de forme  $L/H$  et le domaine d'existence des instabilités centrifuges ont été établis à partir de visualisations, des mesures complémentaires quantitatives sont néanmoins nécessaires pour comprendre complètement l'effet du rapport d'envergure  $S/H$ . Des informations supplémentaires pourront être apportées sur la déstabilisation de l'écoulement en fonction du rapport d'envergure  $S/H$  et du confinement des parois latérales de la cavité. En effet, le comportement du domaine d'existence des instabilités centrifuges diffère fortement pour  $S/H = 2$  par rapport aux autres rapports d'envergure. Cette différence a été interprétée par le rôle prépondérant du confinement dans ce cas, mais cette question ne peut être définitivement tranchée que par une analyse de stabilité. De même, l'étude de la sensibilité de l'écoulement aux conditions limites devra être réalisée, comme cela a été le cas pour une cavité entraînée par un couvercle mobile (Migeon, 2000), où l'ajout de rugosités en paroi pilote l'apparition des instabilités centrifuges. Dans le cas présent de l'entraînement par un écoulement extérieur, on doit analyser la déstabilisation de la rangée des tourbillons centrifuges et l'oscillation périodique de leur amplitude, qui est observée seulement pour  $S/H = 12$  et définie comme une instabilité secondaire (Faure *et al.*, 2009). Des données quantitatives et résolues en temps du champ de vitesse permettraient d'évaluer les mécanismes de déstabilisation de l'écoulement dans ce cas. La synergie entre expérimentation et DNS s'est bien développée dans notre groupe. L'analyse conjointe des données expérimentales et numériques restera un des leviers nous permettant d'accéder au développement spatio-temporel des structures tourbillonnaires.

Le deuxième axe de recherche est le développement de la PIV par flot optique vers une PIV stéréoscopique tomographique, éventuellement résolue en temps. L'objectif est l'obtention de bases de données expérimentales des trois composantes de vitesse dans un volume, pouvant faire écho aux résultats de simulations numériques, qui fournissent les trois composantes de vitesse dans l'espace au cours du temps. L'intérêt de ces mesures et leur représentation a été exposé lors de la 25<sup>e</sup> Journée Thématique de l'AFVL, en partenariat avec FLUVISU, et intitulé « Des techniques d'imagerie à la visualisation 3D d'écoulements » que j'ai organisée le 9 avril 2009 à Orsay. Une telle densité d'information permettrait non seulement une confrontation complète aux résultats issus de simulations numériques, mais ces données pourraient être représentées à travers l'environnement de réalité virtuel immersif développé au LIMSIS. Cet environnement devrait contribuer à surmonter l'obstacle de représentation que constitue la richesse de l'information des trois composantes d'un champ volumique instationnaire, à travers le couplage entre le visuel, le son et l'haptique (retour d'effort, sens du toucher). Il est une aide à la compréhension des structures de l'écoulement et à leur suivi temporel. Afin de s'orienter vers cette voie et constituer une base de données expérimentales, une ébauche de PIV stéréoscopique tomographique pourrait être réalisée dans un premier temps. Ce système consisterait à mettre en place deux nappes perpendiculaires

entre elles et utilisant deux lasers YAG en polarisation croisée, chaque plan étant couplé à 2×2 caméras, chacune possédant un filtre polarisant adapté. Du point de vue de la compréhension phénoménologique, ces informations permettraient de caractériser le plan de la recirculation et le plan des instabilités centrifuges de la cavité, afin d'obtenir des informations corrélées dans les deux plans et d'améliorer la compréhension du couplage dynamique entre les structures de la couche de cisaillement et les instabilités centrifuges. À plus long terme, l'avancée des technologies laser et du traitement informatique des données permettra de considérer un système réellement volumique. Un tel système de vélocimétrie volumétrique à trois composantes est déjà commercialisé et utilise la PIV numérique défocalisée (Pan *et al.*, 2008). L'apport de l'algorithme du flot optique par programmation dynamique orthogonale sur de tels champs expérimentaux, quoique nécessitant des temps de calcul élevés et fournissant une base de données extrêmement dense, mériterait une évaluation.

Le troisième point vise à apporter des progrès significatifs dans la compréhension de la structuration spatio-temporelle de l'écoulement, et s'inscrit dans le cadre de l'ANR DIB. Pour cela, des outils d'analyse quantitatifs d'identification de structures tourbillonnaires seront mis en œuvre sur des champs de vitesse résolus en temps. Des critères eulériens seront appliqués aux champs de vitesse de la cavité (vorticité, critères  $Q$ ,  $\lambda_2$ ,  $F_2$ , suivi de points critiques de l'écoulement ou Feature Flow Fields, ...). Des techniques de suivi de frontières matérielles au cours du temps, fondées sur une analyse lagrangienne (structures cohérentes lagrangiennes, ou LCS, extraites des champs d'exposants de Lyapunov aux temps finis ou FTLE, ou à distance finie ou FSLE, ...) seront développées et adaptées. L'objectif sera d'extraire et de corrélérer la dynamique du champ de vitesse, à travers sa topologie, au champ de pression. Le cas échéant, on espère pouvoir mettre en évidence une dynamique basse fréquence, éventuellement présente dans les structures de l'écoulement. Il est en effet possible que ces basses fréquences se dissimulent dans un signal de pression ou dans des mesures LDV réalisées dans la couche de cisaillement. La mise en œuvre de ces méthodes d'identification et de suivi s'effectuera à partir d'une base de données de mesures couplées pression/vitesse établie sur la cavité. L'objectif sera de pouvoir remonter à une structure spatiale de l'écoulement à partir d'une information locale. Après validation, l'extension de l'application de ces moyens à des classes plus larges d'écoulements pourra être envisagée.

Enfin, une perspective à plus long terme sera le développement du contrôle en boucle fermée de l'écoulement de cavité, et s'inscrit dans le cadre de l'ANR CORMORED. Son application pratique concerne notamment la problématique environnementale du transport d'un polluant et des échanges de quantité de mouvement avec l'extérieur, dans un milieu partiellement confiné, comme une rue bordée d'immeubles. Le contrôle envisagé ici a pour but la suppression, ou au contraire l'augmentation, des instabilités afin de piloter l'échange entre la cavité et l'écoulement extérieur. Ce projet diffère par ce point de la plupart des projets de contrôle développé actuellement et qui s'attachent principalement au rayonnement acoustique engendré. Une série de capteurs de pression sera implanté en aval de la cavité, tandis qu'un système d'actionneurs, placé en amont, permettra d'agir sur l'écoulement en temps réel, via le modèle de contrôle. Ce modèle sera développé au sein de l'équipe Aérodynamique du LIMSIS (Lionel Mathelin, Luc Pastur). À nombre de Reynolds modéré, les applications concernent le transport d'un scalaire dans et à l'extérieur de la cavité. À la suite de la thèse de Jérémie Basley, actuellement en cours, qui porte sur l'implantation d'un premier système, un sujet de thèse pourra être proposé afin de mettre en œuvre pratiquement ce contrôle et caractériser systématiquement son impact selon les paramètres de l'écoulement (nombre de Reynolds, géométrie de la cavité) et le type d'action souhaitée (diminution ou augmentation des instabilités). Dans ce contexte, le montage au LIMSIS d'un second dispositif expérimental, à savoir un canal en eau, pourra compléter la soufflerie basse vitesse actuelle.

Ce canal hydraulique donnera accès à une meilleure dynamique de pression, permettant d'identifier plus facilement un signal d'activation du contrôle. De plus, des moyens électrolytiques pourront être utilisés en eau et permettront une évaluation quantitative du transfert d'un scalaire. Dans ce cadre, les outils d'identification, de suivi et d'analyse des structures de l'écoulement développées dans le troisième point de ces perspectives, seront mis en pratique et devraient constituer des éléments déterminants pour la compréhension de la dynamique et des effets du modèle de contrôle retenu.

L'utilisation de la PIV multi-plans, d'outils d'identification de structures d'écoulement et le savoir-faire acquis en contrôle actif, qui constituent les trois dernières perspectives de mon projet, pourront également permettre une ouverture vers des applications plus larges que le cadre des écoulements de cavité. La mise en œuvre de ce savoir-faire pourra concerner tout écoulement présentant une recirculation. Une première application touche au domaine automobile, où la caractérisation et le contrôle de l'écoulement de culot sont des préoccupations majeures en vue d'une réduction de la traînée. On pourrait ainsi envisager une étude expérimentale sur une maquette typique d'un arrière-corps de véhicule (corps d'Ahmed). Un autre domaine d'application serait celui des énergies renouvelables, à travers les hydroliennes et les éoliennes. Le couplage fluide-structure résultant de l'interaction entre un tourbillon d'extrémité et la pale qui le suit, pourrait être envisagé à travers une étude en grille d'aubes.

## Références

- FAURE, Th. M., PASTUR, L. R., LUSSEYRAN, F., FRAIGNEAU, Y., BISCH, D** (2009) Three-dimensional centrifugal instabilities development inside a parallelepipedic open cavity of various shape, *Experiments in Fluids*, Vol. 47, No. 3, pp. 395–410
- MIGEON, Ch.** (2000) *Contribution à l'analyse de l'écoulement tridimensionnel instable s'établissant à l'intérieur de cavités cylindriques*, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers
- PAN, G., MENON, R., ZHANG, H., LAI, W., GRAFF, E., GHARIB, M.** (2008) Quantitative 3D flow visualization using volumetric 3-component velocimetry, *13<sup>th</sup> International Symposium on Flow Visualization*, Nice (France), July 1-4 2008, paper ID 286



## **C. Publications**