
Oscillation basse fréquence dans une cellule Rayleigh-Bénard cubique

Julien SALORT

Maître de stage: Andreas TILGNER

1^{er} mai — 22 juillet 2006

Georg-August Universität Göttingen

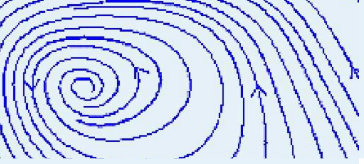


Table des matières

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

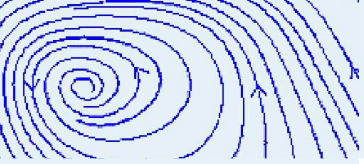
Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse fréquence

Décomposition de Karhunen-Loève

Conclusion



Introduction

Convection

Rayleigh-Bénard

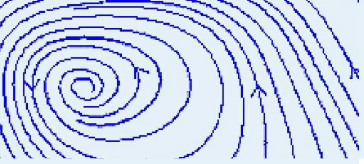
Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

Introduction



Convection Rayleigh-Bénard

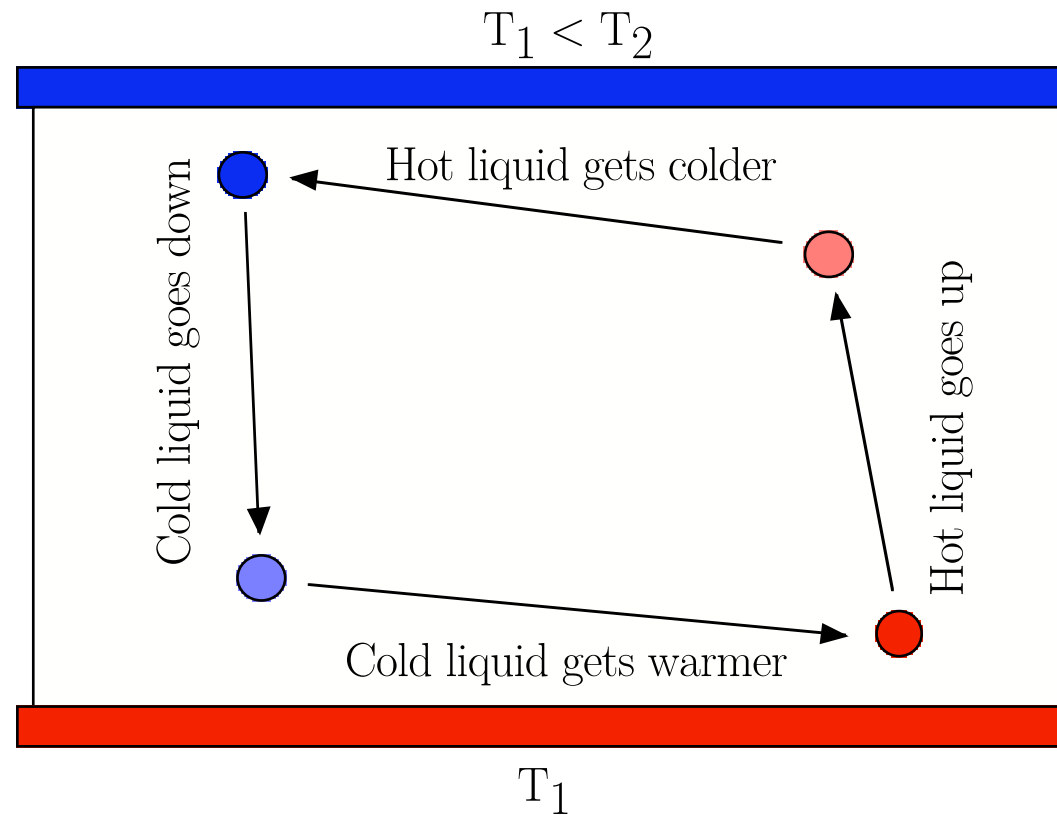
Introduction
Convection
Rayleigh-Bénard

Mesures par PIV

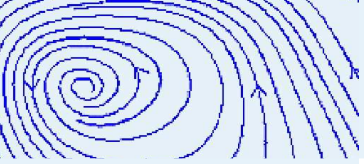
Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion



→ $Ra \gg 10^7$: régime turbulent « corrélé » de temps de cohérence finie. Existence d'une oscillation basse fréquence ($f_0 \approx 0.01$ Hz)



Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

Problèmes
expérimentaux

Profils de vitesse

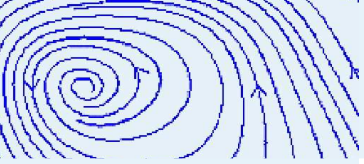
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

Mesures par PIV



Principe de base

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

Problèmes
expérimentaux

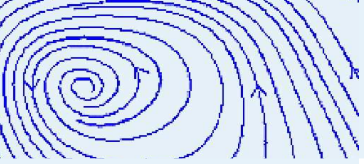
Profils de vitesse
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Ajout de particules et enregistrement d'images à t et $t + dt$



Principe de base

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

Problèmes
expérimentaux

Profils de vitesse
Moyennes de vitesse

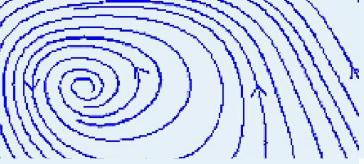
Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Ajout de particules et enregistrement d'images à t et $t + dt$
2. Calcul du déplacement des particules entre t et $t + dt$ par intercorrélation :

$$C(\xi, \eta) = \sum_{x,y} I(t, x, y) I(t + \Delta t, x + \xi, y + \eta)$$



Principe de base

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

Problèmes
expérimentaux

Profils de vitesse

Moyennes de vitesse

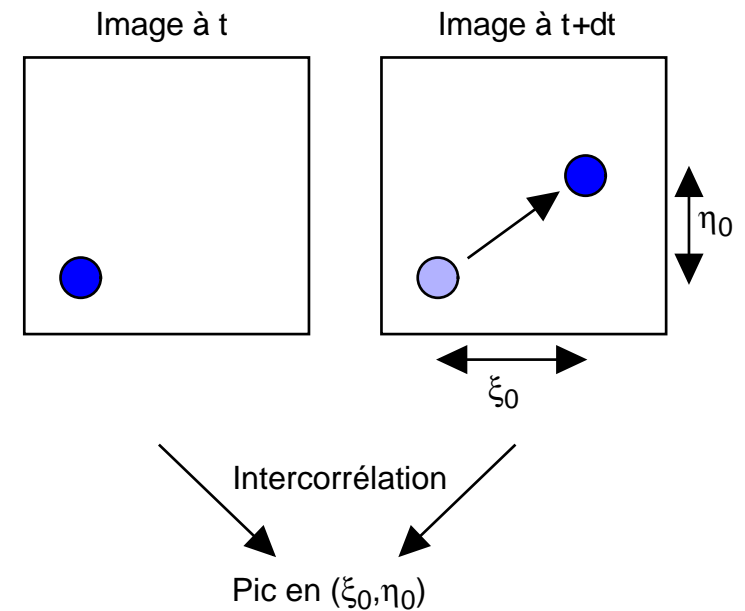
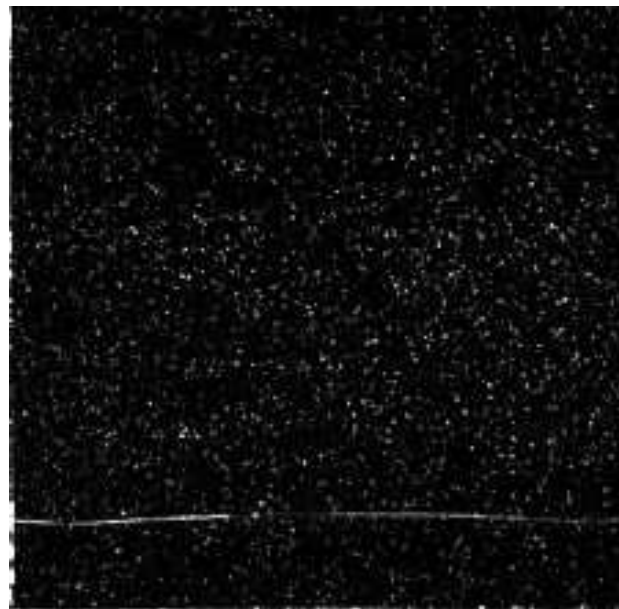
Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Ajout de particules et enregistrement d'images à t et $t + dt$
2. Calcul du déplacement des particules entre t et $t + dt$ par intercorrélation :

$$C(\xi, \eta) = \sum_{x,y} I(t, x, y) I(t + \Delta t, x + \xi, y + \eta)$$





Montage

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

Problèmes
expérimentaux

Profils de vitesse

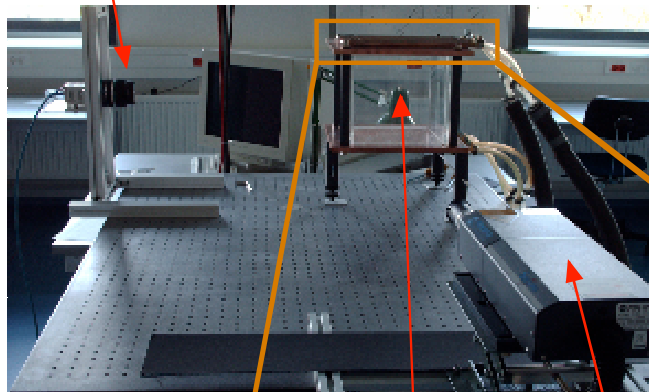
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

Camera

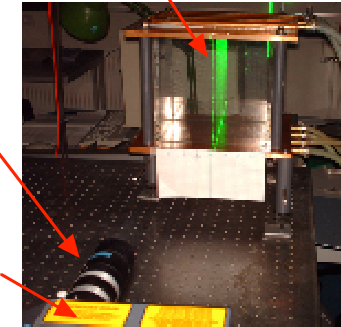


Overview

Cell

Laser

Sheet of light



Cylindrical lens

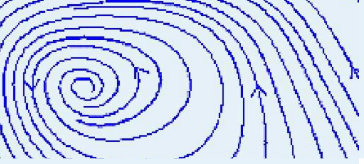
Laser

Detailed views

Copper
plate



Refrigerating
circulator



Intervalle entre les pulses

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

**Intervalle entre les
pulses**

Échantillonnage
spatial et temporel

Problèmes
expérimentaux

Profils de vitesse

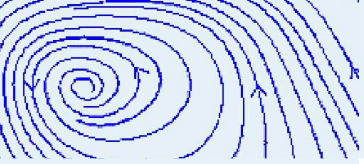
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Intervalle plus grand \Rightarrow précision de la caméra meilleure



Intervalle entre les pulses

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les pulses

Échantillonnage spatial et temporel

Problèmes

expérimentaux

Profils de vitesse

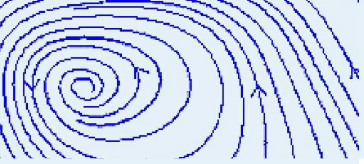
Moyennes de vitesse

Oscillation basse fréquence

Décomposition de Karhunen-Loève

Conclusion

1. Intervalle plus grand \Rightarrow précision de la caméra meilleure
2. Intervalle plus grand \Rightarrow difficulté à suivre une particule



Intervalle entre les pulses

1. Intervalle plus grand \Rightarrow précision de la caméra meilleure
2. Intervalle plus grand \Rightarrow difficulté à suivre une particule

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les pulses

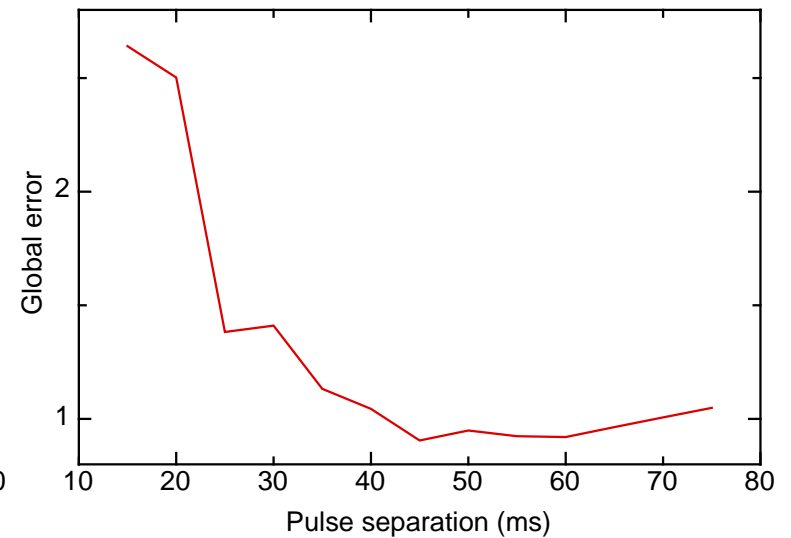
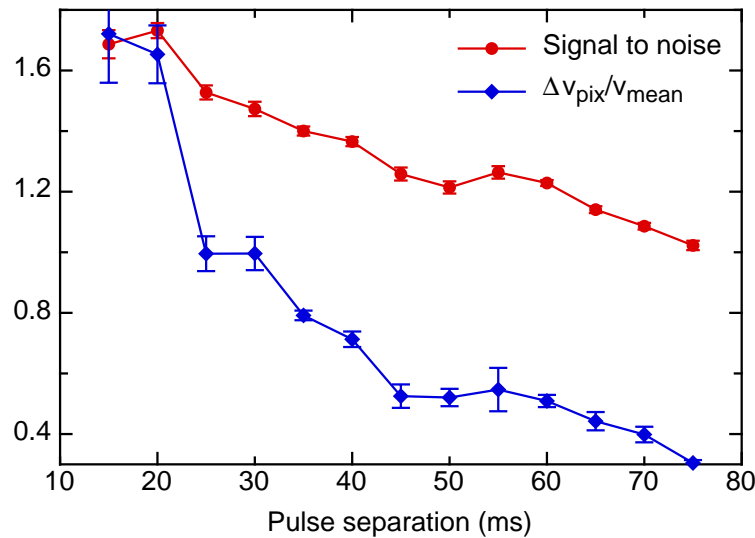
Échantillonnage spatial et temporel

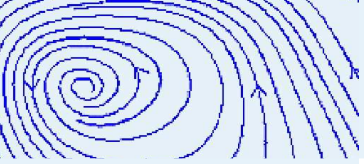
Problèmes expérimentaux
Profils de vitesse
Moyennes de vitesse

Oscillation basse fréquence

Décomposition de Karhunen-Loève

Conclusion





Échantillonnage spatial et temporel

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

**Échantillonnage
spatial et temporel**

Problèmes

expérimentaux

Profils de vitesse

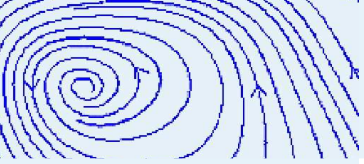
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Fréquences accessibles : 1 à 4 Hz (jusqu'à 15 Hz pour le laser)



Échantillonnage spatial et temporel

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

Problèmes

expérimentaux

Profils de vitesse

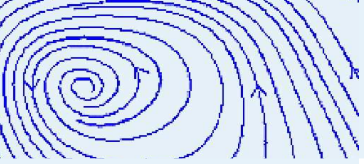
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Fréquences accessibles : 1 à 4 Hz (jusqu'à 15 Hz pour le laser)
2. Étude : oscillation basse fréquence $f_0 \approx 0.01$ Hz



Échantillonnage spatial et temporel

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

Problèmes

expérimentaux

Profils de vitesse

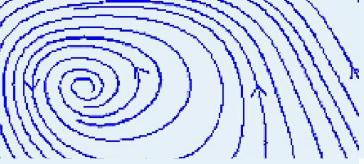
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Fréquences accessibles : 1 à 4 Hz (jusqu'à 15 Hz pour le laser)
2. Étude : oscillation basse fréquence $f_0 \approx 0.01$ Hz
3. Limitations : espace disque, temps de calcul



Échantillonnage spatial et temporel

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

Problèmes

expérimentaux

Profils de vitesse

Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Fréquences accessibles : 1 à 4 Hz (jusqu'à 15 Hz pour le laser)
2. Étude : oscillation basse fréquence $f_0 \approx 0.01$ Hz
3. Limitations : espace disque, temps de calcul
4. Résolutions accessibles : 8×8 pixels à 64×64 pixels



Échantillonnage spatial et temporel

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

**Échantillonnage
spatial et temporel**

Problèmes
expérimentaux

Profils de vitesse

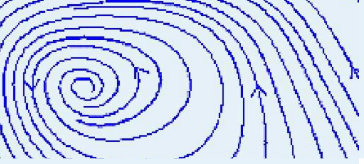
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Fréquences accessibles : 1 à 4 Hz (jusqu'à 15 Hz pour le laser)
2. Étude : oscillation basse fréquence $f_0 \approx 0.01$ Hz
3. Limitations : espace disque, temps de calcul
4. Résolutions accessibles : 8×8 pixels à 64×64 pixels
5. Le nombre de vecteur augmente exponentiellement, le temps de calcul aussi...



Échantillonnage spatial et temporel

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

**Échantillonnage
spatial et temporel**

Problèmes
expérimentaux

Profils de vitesse

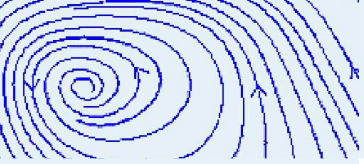
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Fréquences accessibles : 1 à 4 Hz (jusqu'à 15 Hz pour le laser)
2. Étude : oscillation basse fréquence $f_0 \approx 0.01$ Hz
3. Limitations : espace disque, temps de calcul
4. Résolutions accessibles : 8×8 pixels à 64×64 pixels
5. Le nombre de vecteur augmente exponentiellement, le temps de calcul aussi...
6. Choix final : 32×32 pixels et 1 Hz



Problèmes expérimentaux

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

**Problèmes
expérimentaux**

Profils de vitesse

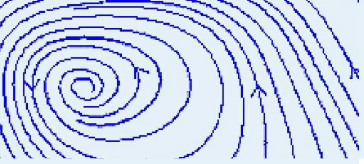
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Grosses et petites bulles



Problèmes expérimentaux

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

**Problèmes
expérimentaux**

Profils de vitesse

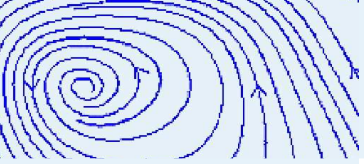
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Grosses et petites bulles
2. Sédimentation et agglomération des particules traçantes



Problèmes expérimentaux

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

**Problèmes
expérimentaux**

Profils de vitesse

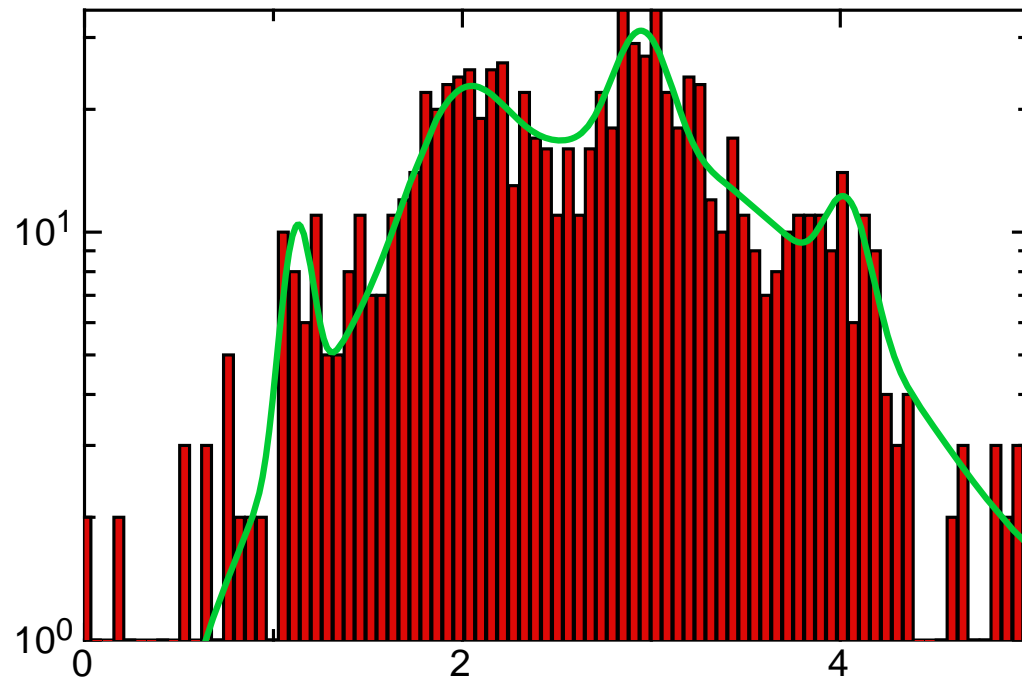
Moyennes de vitesse

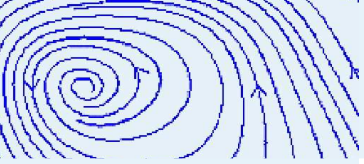
Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Grosses et petites bulles
2. Sédimentation et agglomération des particules traçantes
3. Biais dans l'estimateur sous-pixel, le « Peak-locking »





Problèmes expérimentaux — Peak-locking

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

**Problèmes
expérimentaux**

Profils de vitesse

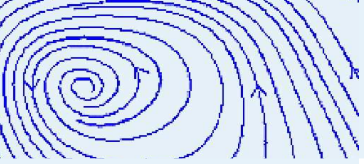
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Rôle de l'intervalle entre les pulses : Christensen :
 $d_{\tau}/d_{\text{pix}} < 2 \Rightarrow$ sous-résolu \Rightarrow Peak-locking : erreur
significative indépendamment de l'estimateur



Problèmes expérimentaux — Peak-locking

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

**Problèmes
expérimentaux**

Profils de vitesse

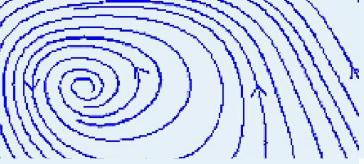
Moyennes de vitesse

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Rôle de l'intervalle entre les pulses : Christensen :
 $d_\tau / d_{\text{pix}} < 2 \Rightarrow$ sous-résolu \Rightarrow Peak-locking : erreur
significative indépendamment de l'estimateur
2. Estimateurs : Gaussiens, Whittaker



Problèmes expérimentaux — Peak-locking

[Introduction](#)

[Mesures par PIV](#)

[Principe de base](#)

[Montage](#)

[Intervalle entre les
pulses](#)

[Échantillonnage
spatial et temporel](#)

**Problèmes
expérimentaux**

[Profils de vitesse](#)

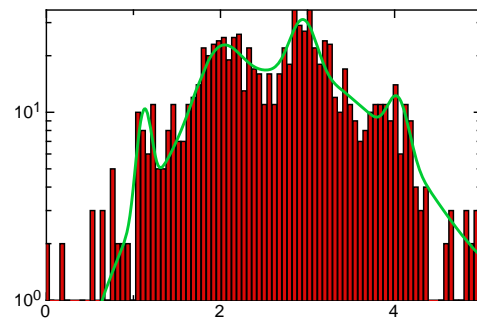
[Moyennes de vitesse](#)

[Oscillation basse
fréquence](#)

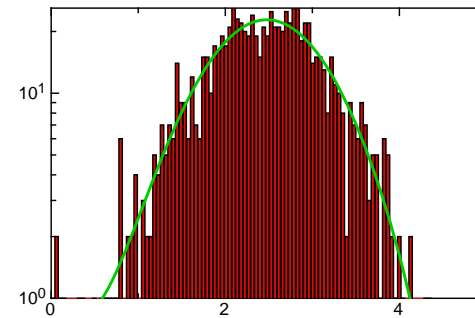
[Décomposition de
Karhunen-Loève](#)

[Conclusion](#)

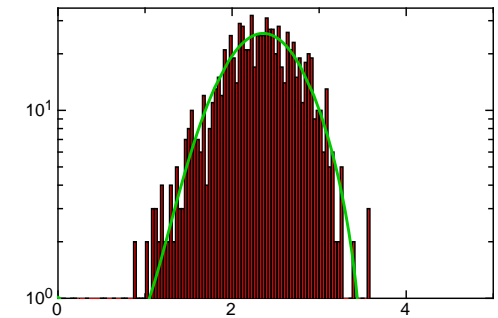
1. Rôle de l'intervalle entre les pulses : Christensen :
 $d_\tau / d_{\text{pix}} < 2 \Rightarrow$ sous-résolu \Rightarrow Peak-locking : erreur
significative indépendamment de l'estimateur
2. Estimateurs : Gaussiens, Whittaker
3. Intercorrélation adaptative et lissage du champ de vecteur



IC seul



IC + L



IC+L+ICA+L



Profils de vitesse

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les pulses

Échantillonnage spatial et temporel

Problèmes expérimentaux

Profils de vitesse

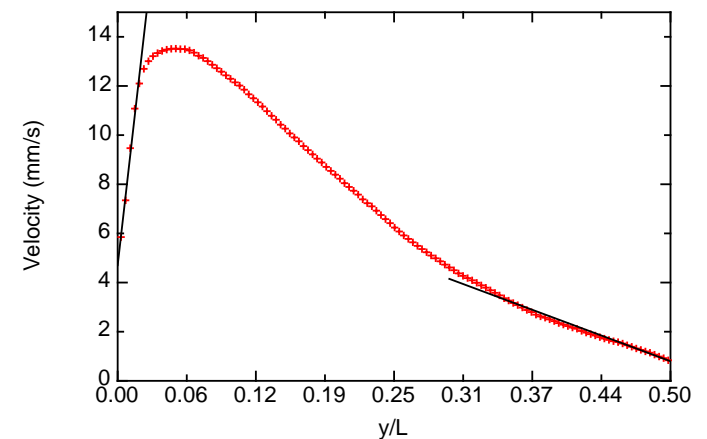
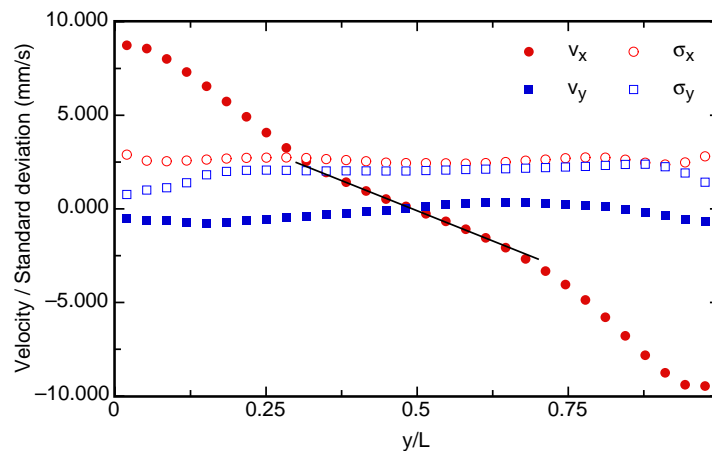
Moyennes de vitesse

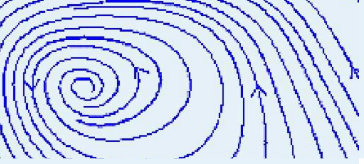
Oscillation basse fréquence

Décomposition de Karhunen-Loève

Conclusion

1. $y/L \leq 0.04$: couche limite, v_x augmente linéairement
2. $0.04 \leq y/L \leq 0.25$: région intermédiaire, σ plus petit que v_x mais plus grand que v_y
3. $0.25 \leq y/L \leq 0.75$: région centrale, σ_x devient plus grand que v_x , fluctuations homogènes, v_x profile linéaire, v_y reste assez petit.





Moyennes de vitesse

Introduction

Mesures par PIV

Principe de base

Montage

Intervalle entre les
pulses

Échantillonnage
spatial et temporel

Problèmes
expérimentaux

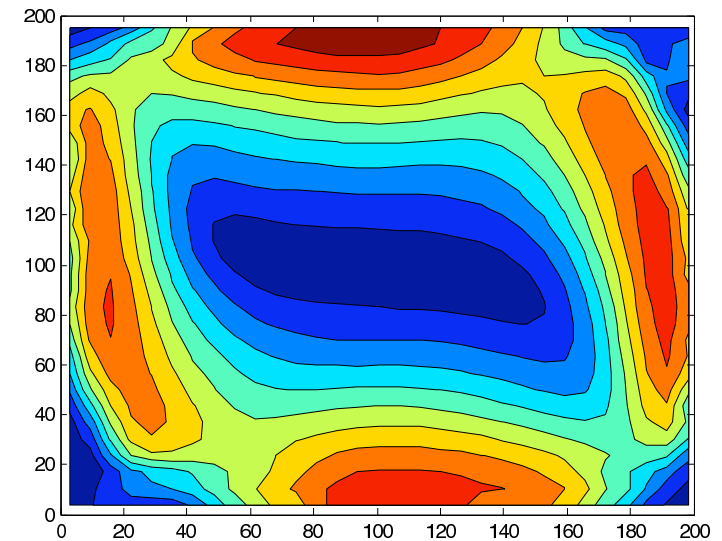
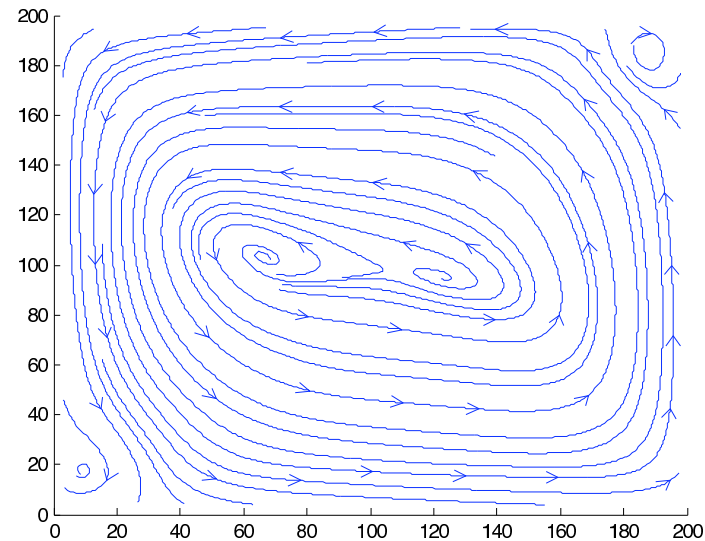
Profils de vitesse

Moyennes de vitesse

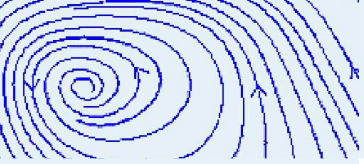
Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion



→ on observe une symétrie par rapport à la diagonale



Introduction

Mesures par PIV

**Oscillation basse
fréquence**

Premières
observations

Localisation du pic

Fonction de
cohérence

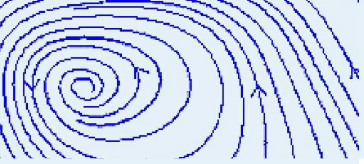
Lignes isophases

Résultats

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

Oscillation basse fréquence



Premières observations

[Introduction](#)

[Mesures par PIV](#)

[Oscillation basse fréquence](#)

[Premières observations](#)

[Localisation du pic](#)

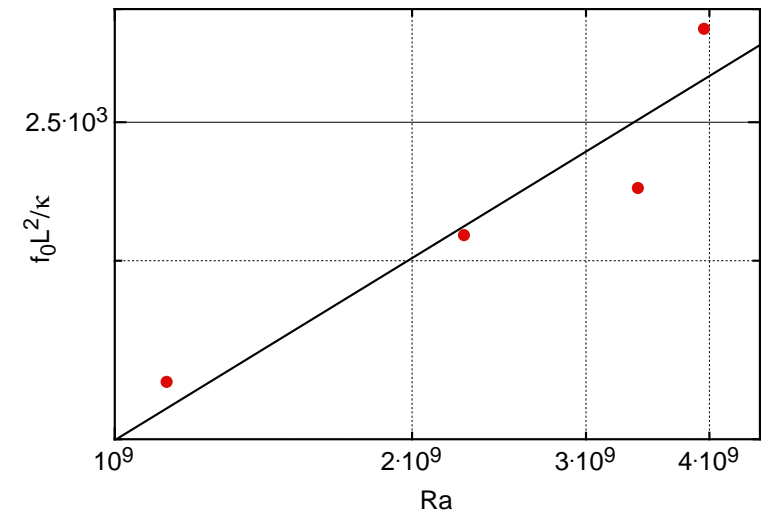
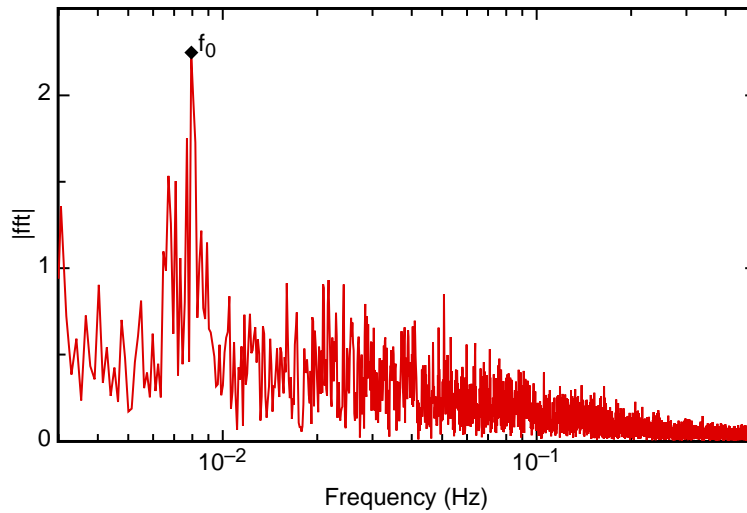
[Fonction de cohérence](#)

[Lignes isophases](#)

[Résultats](#)

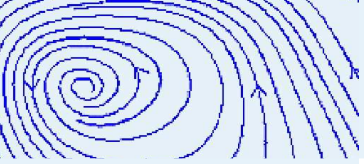
[Décomposition de Karhunen-Loève](#)

[Conclusion](#)



Relation expérimentale entre la fréquence et le nombre de Rayleigh :

$$\frac{f_0 L^2}{\kappa} = 0.23 \times Ra^{0.42}$$



Localisation du pic

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Premières
observations

Localisation du pic

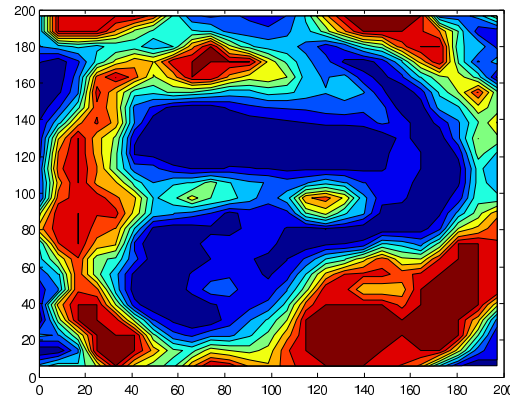
Fonction de
cohérence

Lignes isophases

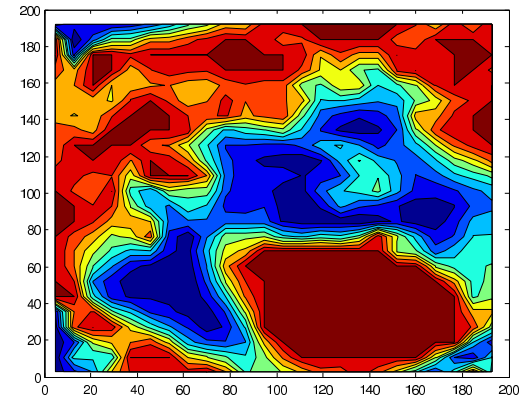
Résultats

Décomposition de
Karhunen-Loève

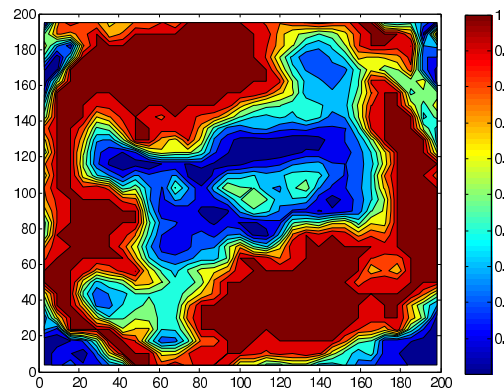
Conclusion



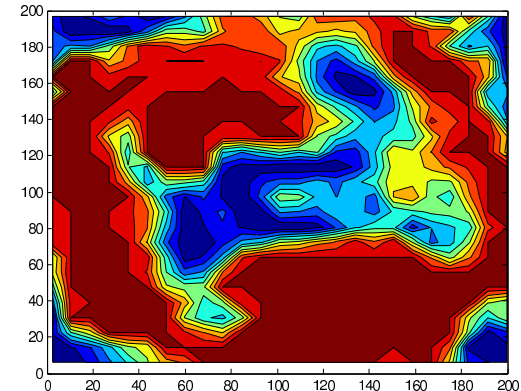
$\Delta T = 10 \text{ K}$



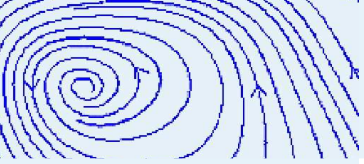
$\Delta T = 20 \text{ K}$



$\Delta T = 30 \text{ K}$



$\Delta T = 35 \text{ K}$



Fonction de cohérence

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse fréquence

Premières observations

Localisation du pic

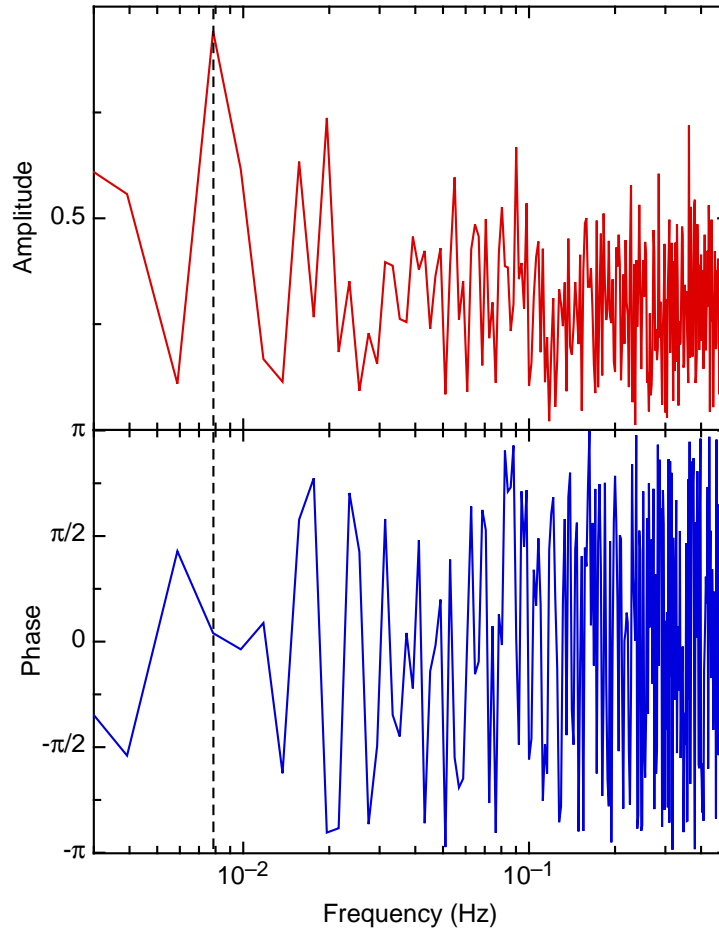
Fonction de cohérence

Lignes isophases

Résultats

Décomposition de Karhunen-Loève

Conclusion

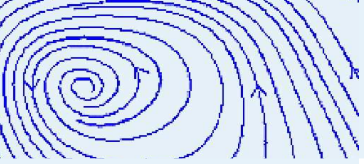


Fonction de cohérence entre v_{haut}
et v_{bas}

1. Définition de la fonction de cohérence de $f_1(t)$ et $f_2(t)$:

$$\text{Coh}_{f_1 f_2}(\nu) = \frac{\hat{f}_1(\nu) \cdot \hat{f}_2(\nu)^*}{\sqrt{|\hat{f}_1(\nu)|^2 |\hat{f}_2(\nu)|^2}}$$

2. Application entre $v_{\text{haut}}(t)$ et $v_{\text{bas}}(t)$: pic en f_0 et phase de l'ordre de 0 → problème ?



Fonction de cohérence

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Premières
observations

Localisation du pic

**Fonction de
cohérence**

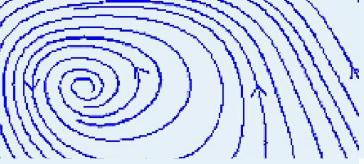
Lignes isophases

Résultats

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Villermaux et mesures expérimentales précédentes : opposition de phase entre le haut et le bas



Fonction de cohérence

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse fréquence

Premières observations

Localisation du pic

Fonction de cohérence

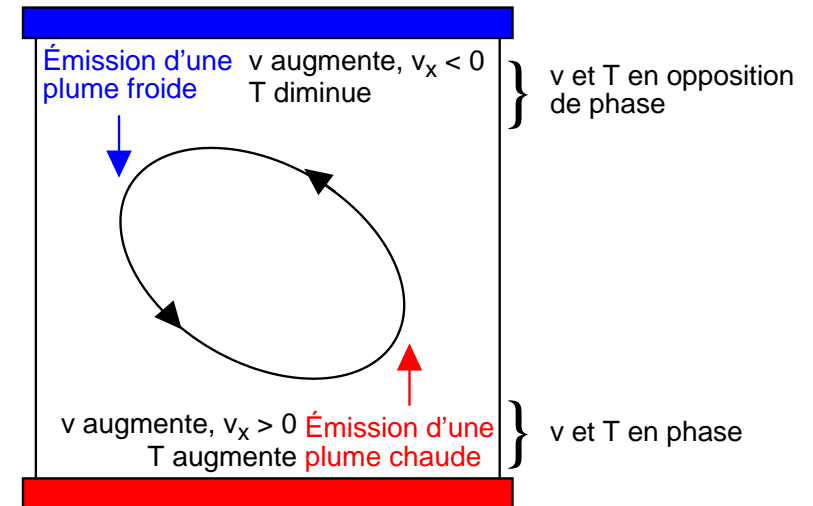
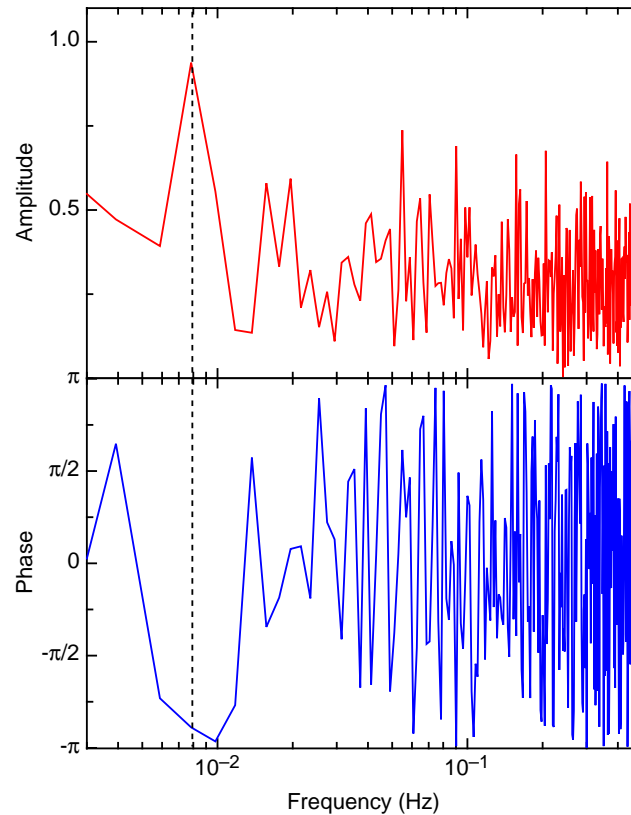
Lignes isophases

Résultats

Décomposition de Karhunen-Loève

Conclusion

1. Villermaux et mesures expérimentales précédentes : opposition de phase entre le haut et le bas
2. Phases entre température et vitesse différentes :





Lignes isophases

[Introduction](#)

[Mesures par PIV](#)

[Oscillation basse
fréquence](#)

[Premières
observations](#)

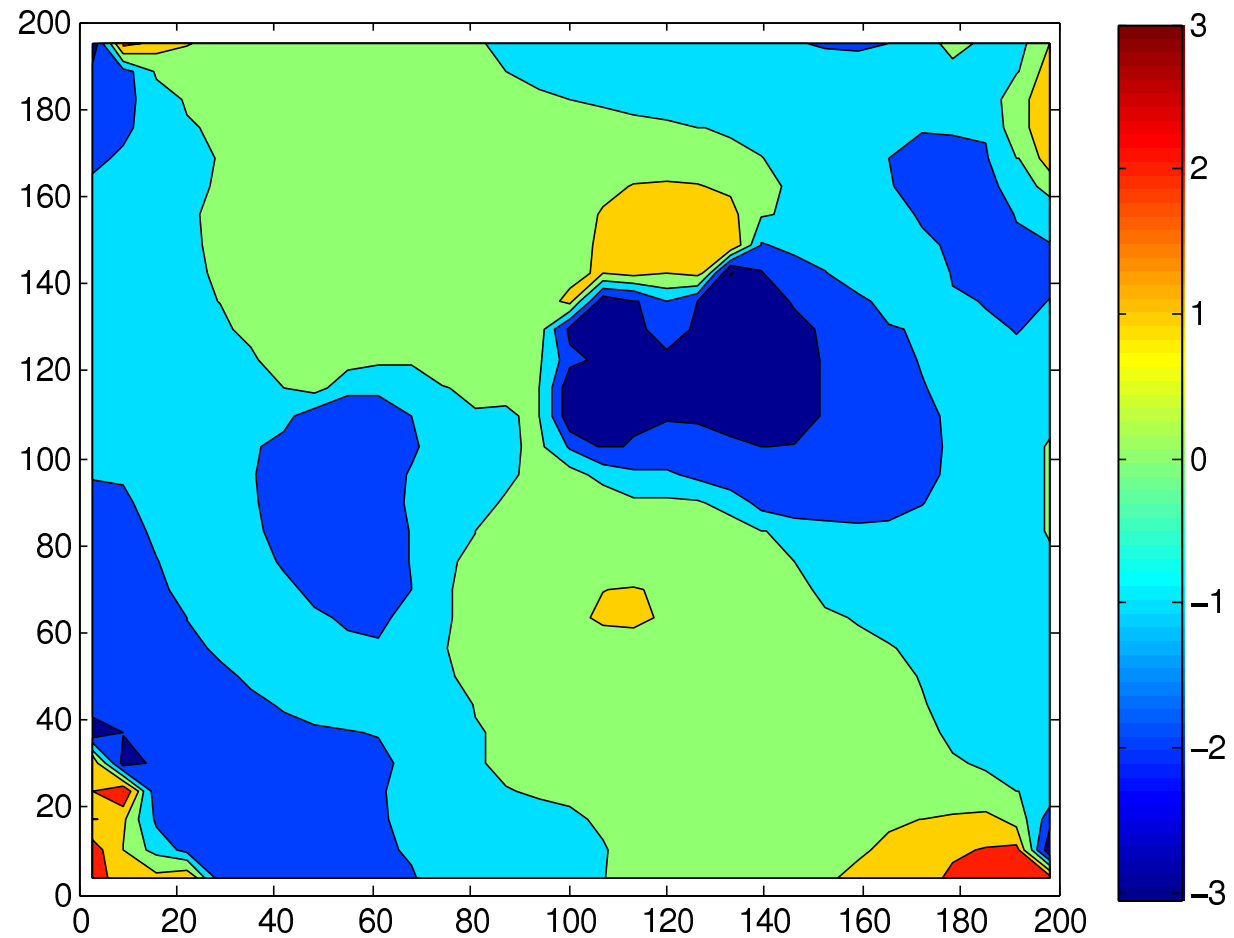
[Localisation du pic
Fonction de
cohérence](#)

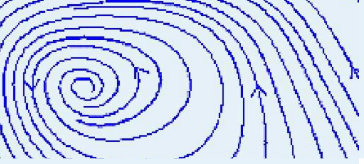
[Lignes isophases](#)

[Résultats](#)

[Décomposition de
Karhunen-Loève](#)

[Conclusion](#)





Résultats

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Premières
observations

Localisation du pic

Fonction de
cohérence

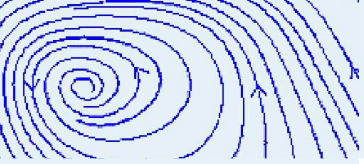
Lignes isophases

Résultats

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Localisation du pic
2. Oscillation en phase



Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

**Décomposition de
Karhunen-Loève**

Principe

Poids des modes

Spectre des
coefficients

Allure des modes

Fonction de
cohérence de q_1 et

q_2

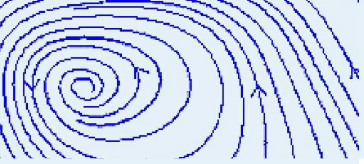
Approximation
d'ordre 2

Approximation
d'ordre 6

Résultats

Conclusion

Décomposition de Karhunen-Loève



Principe

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Principe

Poids des modes

Spectre des
coefficients

Allure des modes

Fonction de
cohérence de q_1 et

q_2

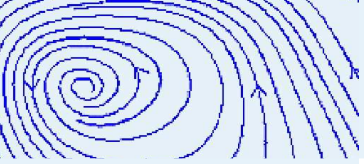
Approximation
d'ordre 2

Approximation
d'ordre 6

Résultats

Conclusion

1. $A \in \mathcal{M}_{Nm}$ telle que A_{ij} : $i^{\text{ème}}$ mesure de la $j^{\text{ème}}$ sonde



Principe

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Principe

Poids des modes

Spectre des
coefficients

Allure des modes

Fonction de
cohérence de q_1 et
 q_2

Approximation
d'ordre 2

Approximation
d'ordre 6

Résultats

Conclusion

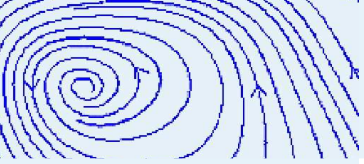
1. $A \in \mathcal{M}_{Nm}$ telle que A_{ij} : $i^{\text{ème}}$ mesure de la $j^{\text{ème}}$ sonde

2. Décomposition : $A = U\Sigma V^T$

U matrice $N \times N$ orthogonale

V matrice $m \times m$ orthogonale

Σ matrice $N \times m$ diagonale



Principe

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Principe

Poids des modes

Spectre des
coefficients

Allure des modes

Fonction de
cohérence de q_1 et
 q_2

Approximation
d'ordre 2

Approximation
d'ordre 6

Résultats

Conclusion

1. $A \in \mathcal{M}_{Nm}$ telle que A_{ij} : $i^{\text{ème}}$ mesure de la $j^{\text{ème}}$ sonde

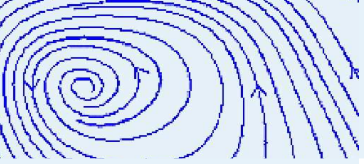
2. Décomposition : $A = U\Sigma V^T$

U matrice $N \times N$ orthogonale

V matrice $m \times m$ orthogonale

Σ matrice $N \times m$ diagonale

3. Si $Q = U\Sigma$, $A = QV^T$ soit $A_{ij} = \sum_{k=1}^m q_{k,i} v_{k,j}$



Poids des modes

[Introduction](#)

[Mesures par PIV](#)

[Oscillation basse fréquence](#)

[Décomposition de Karhunen-Loève](#)

[Principe](#)

[Poids des modes](#)

[Spectre des coefficients](#)

[Allure des modes](#)

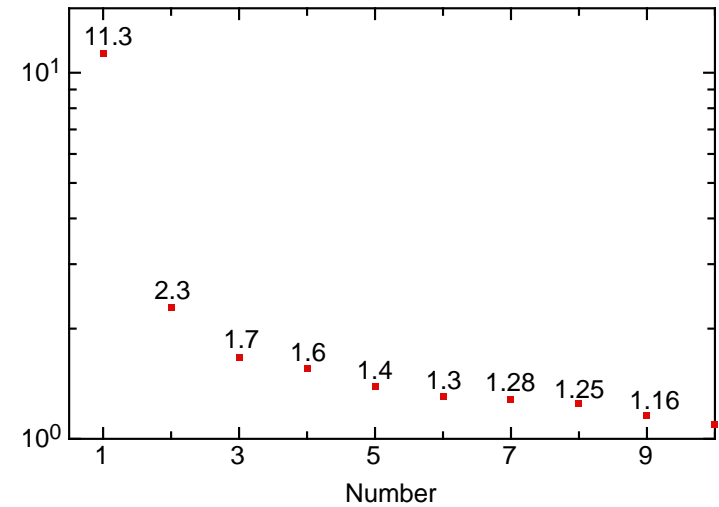
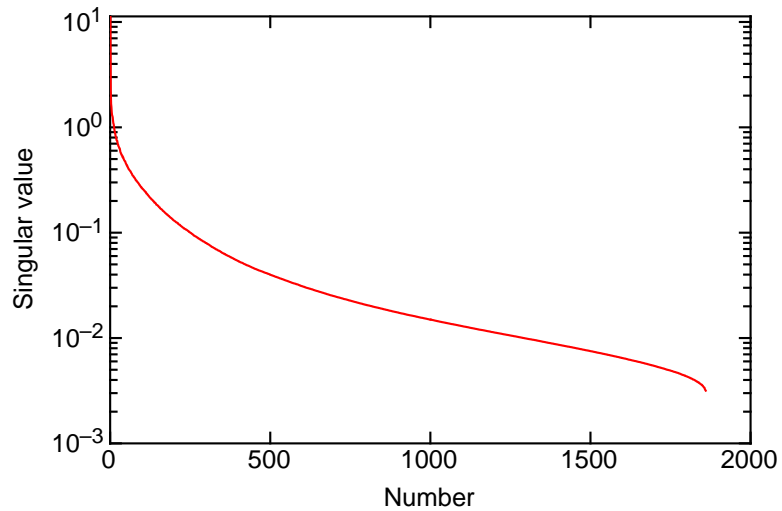
[Fonction de cohérence de \$q_1\$ et \$q_2\$](#)

[Approximation d'ordre 2](#)

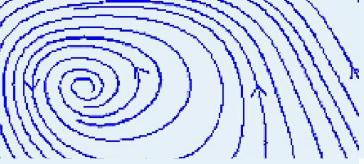
[Approximation d'ordre 6](#)

[Résultats](#)

[Conclusion](#)



$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 11.3 \\ \sigma_{10} &= 1.1 \\ \sigma_{249} &= 10^{-1} \\ \sigma_{1291} &= 10^{-2}\end{aligned}$$



Spectre des coefficients

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse fréquence

Décomposition de Karhunen-Loève

Principe

Poids des modes

Spectre des coefficients

Allure des modes

Fonction de cohérence de q_1 et

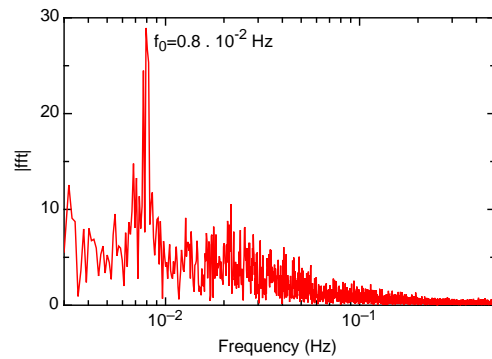
q_2

Approximation d'ordre 2

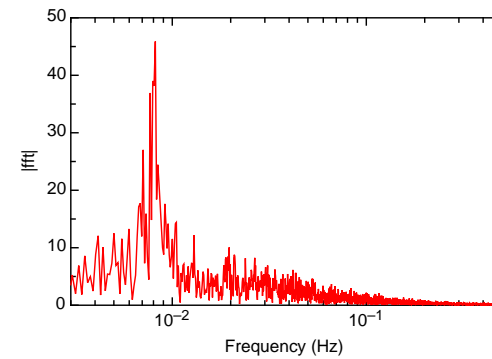
Approximation d'ordre 6

Résultats

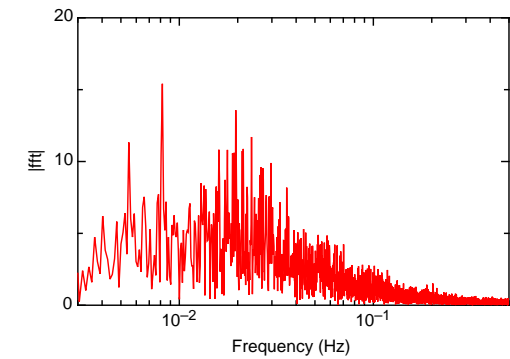
Conclusion



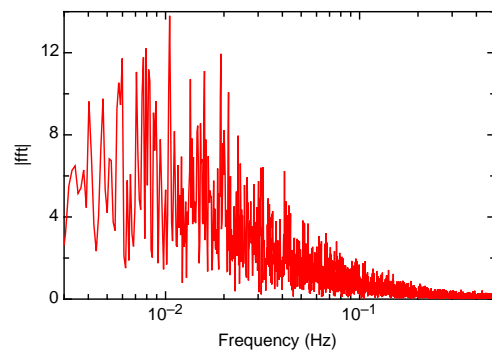
$k = 1$



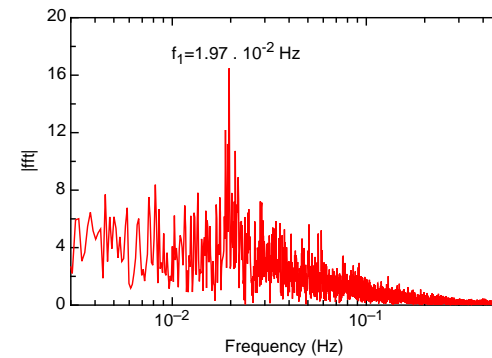
$k = 2$



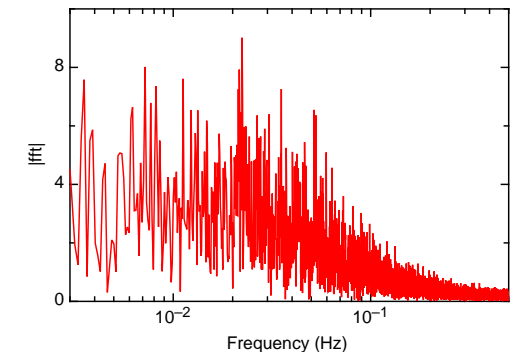
$k = 3$



$k = 4$



$k = 5$



$k = 6$



Allure des modes

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse fréquence

Décomposition de Karhunen-Loève

Principe

Poids des modes

Spectre des coefficients

Allure des modes

Fonction de cohérence de q_1 et q_2

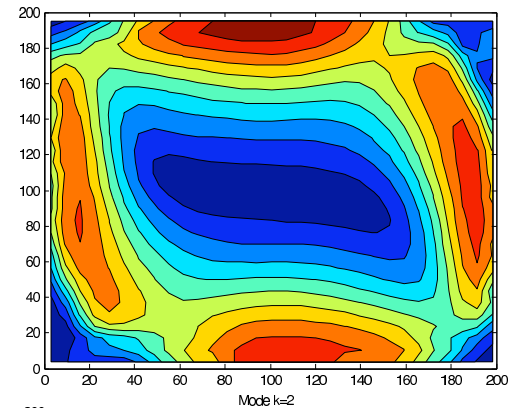
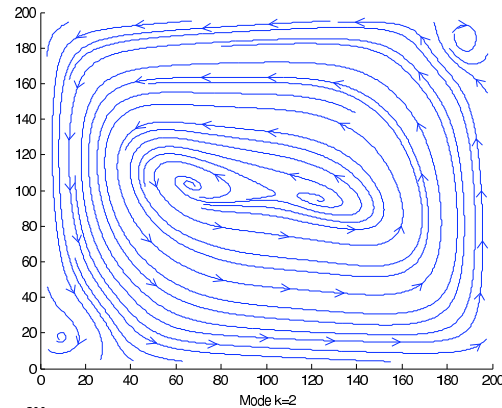
Approximation d'ordre 2

Approximation d'ordre 6

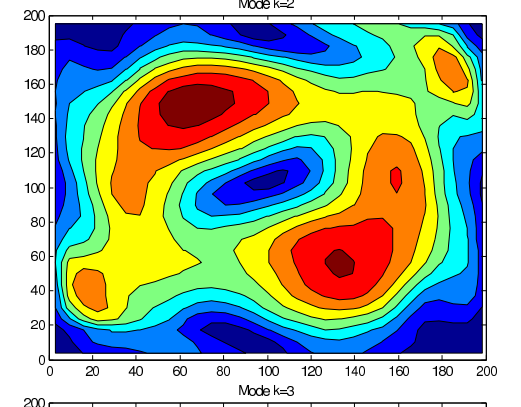
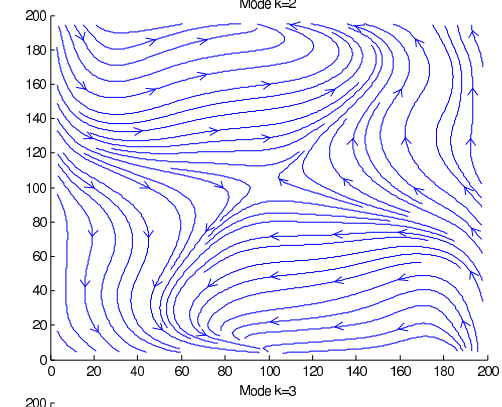
Résultats

Conclusion

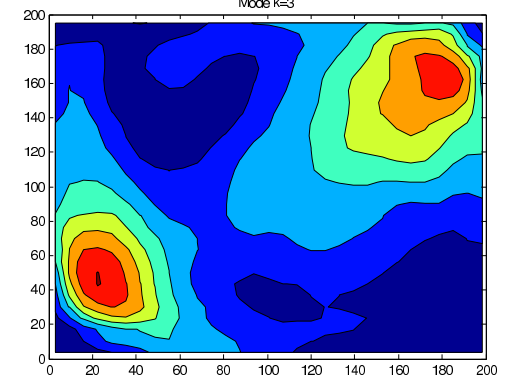
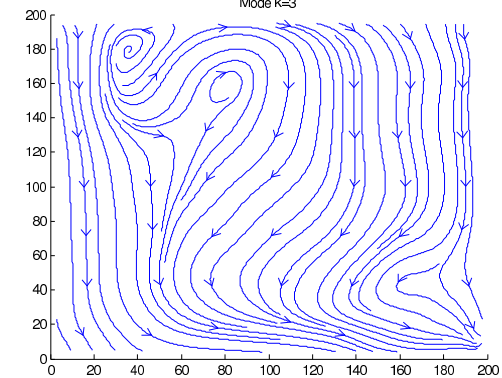
$k = 1$

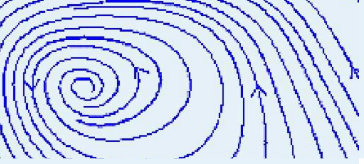


$k = 2$



$k = 3$





Fonction de cohérence de q_1 et q_2

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Principe

Poids des modes
Spectre des
coefficients

Allure des modes

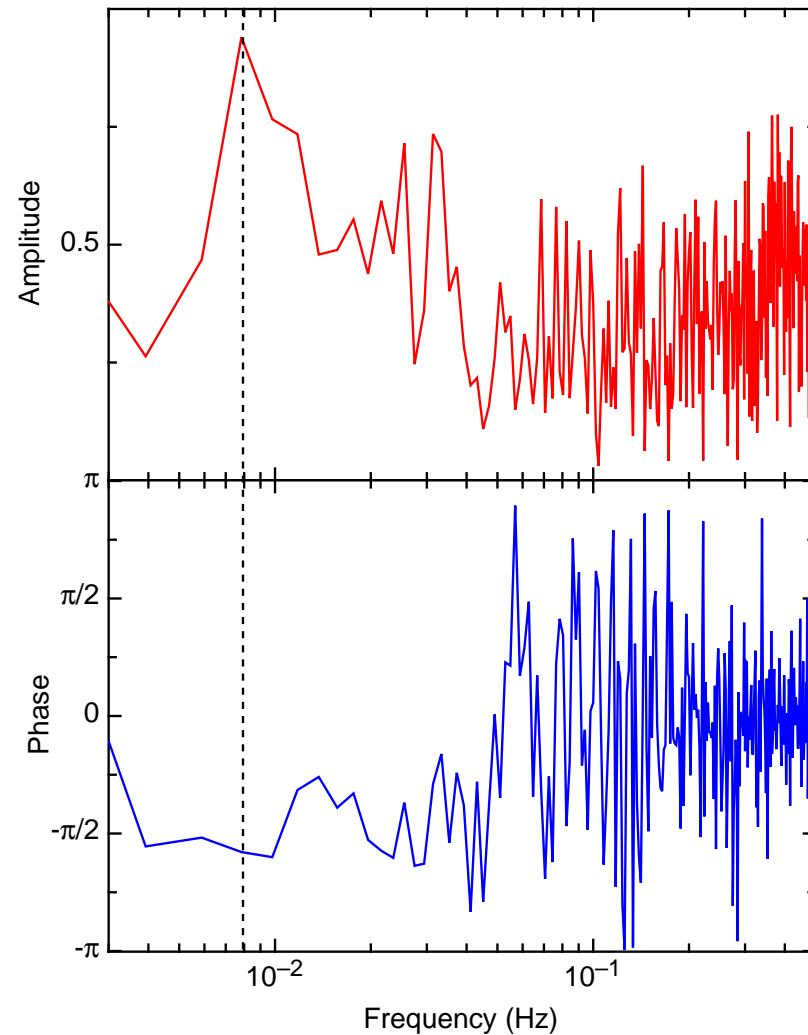
Fonction de
cohérence de q_1 et
 q_2

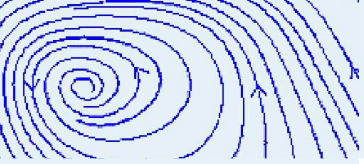
Approximation
d'ordre 2

Approximation
d'ordre 6

Résultats

Conclusion





Approximation d'ordre 2

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Principe

Poids des modes
Spectre des
coefficients

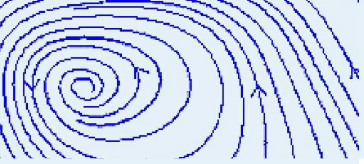
Allure des modes
Fonction de
cohérence de q_1 et
 q_2

Approximation
d'ordre 2

Approximation
d'ordre 6

Résultats

Conclusion



Approximation d'ordre 6

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Principe

Poids des modes
Spectre des
coefficients

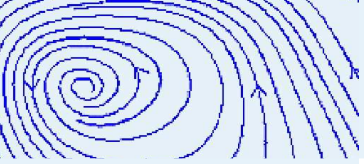
Allure des modes
Fonction de
cohérence de q_1 et
 q_2

Approximation
d'ordre 2

**Approximation
d'ordre 6**

Résultats

Conclusion



Résultats

[Introduction](#)

[Mesures par PIV](#)

[Oscillation basse fréquence](#)

[Décomposition de Karhunen-Loève](#)

[Principe](#)

[Poids des modes
Spectre des coefficients](#)

[Allure des modes
Fonction de cohérence de \$q_1\$ et \$q_2\$](#)

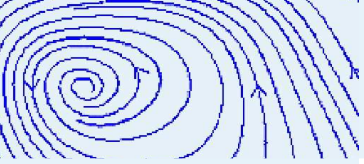
[Approximation d'ordre 2](#)

[Approximation d'ordre 6](#)

[Résultats](#)

[Conclusion](#)

1. Modélisation de l'écoulement avec une dizaine de modes
2. Oscillation basse fréquence :
 - Oscillation de $k = 1$
 - Les $k = 1$ et $k = 2$ dominant alternativement
3. Problème : changement de structures



Introduction

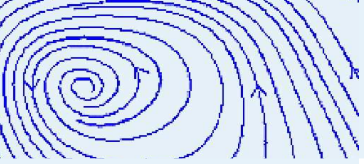
Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

Conclusion



Conclusion

Introduction

Mesures par PIV

Oscillation basse
fréquence

Décomposition de
Karhunen-Loève

Conclusion

1. Bilan du stage

- Prise en main et optimisation d'un système neuf
- Profils et moyennes de vitesses dans une cuve carré (possibilité d'une plus grande finesse)
- Analyse de Fourier
- Analyse de Karhunen-Loève

2. Perspectives

- Données plus fines spatialement et calcul plus poussé
- Acquisition sur des temps plus longs