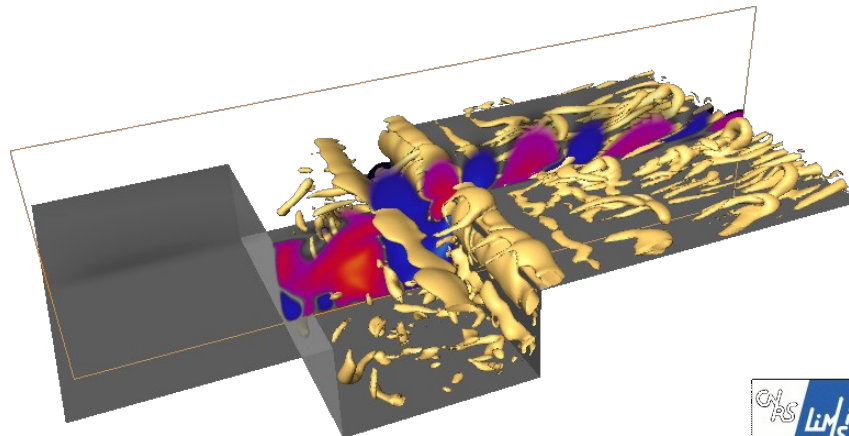


A 3D developed flow: the open cavity flow

*F. Lusseyran, L. Pastur, T. Faure,
Y. Fraigneau, B. Podvin*

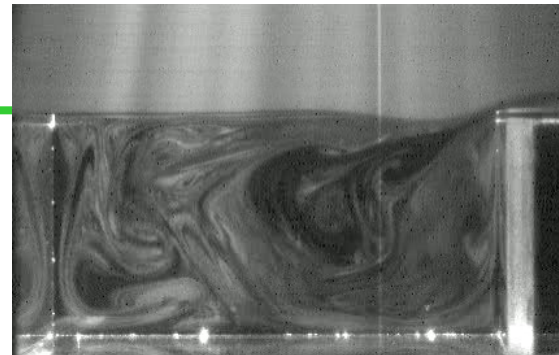
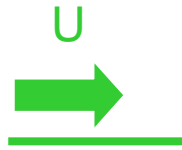
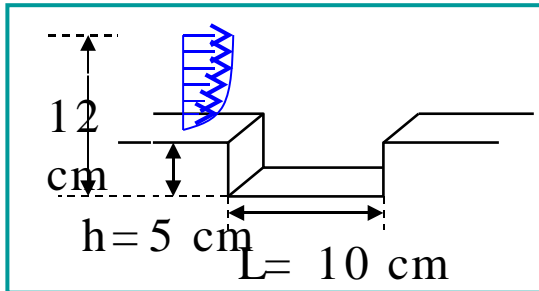
LIMSI, UPR CNRS 3251, Orsay



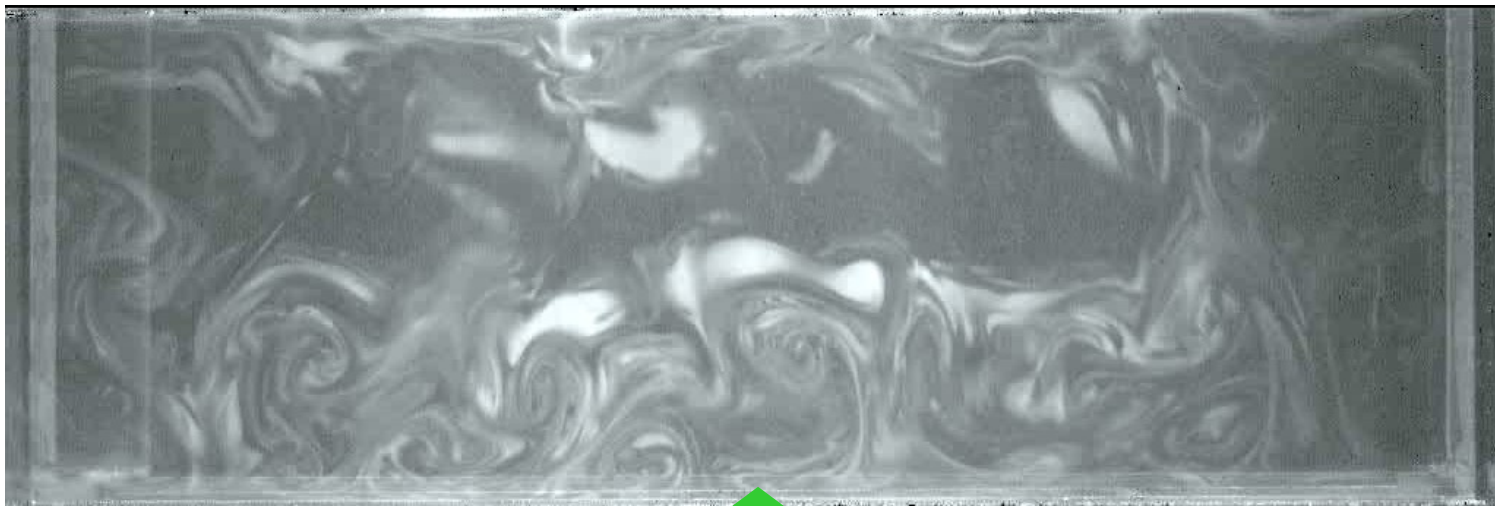
Qualitative description of the flow

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

$U = 1.27 \text{ m/s}$, $R = 2$, $\rightarrow \text{Re} = 8500$



($U = 1.21 \text{ m/s}$)



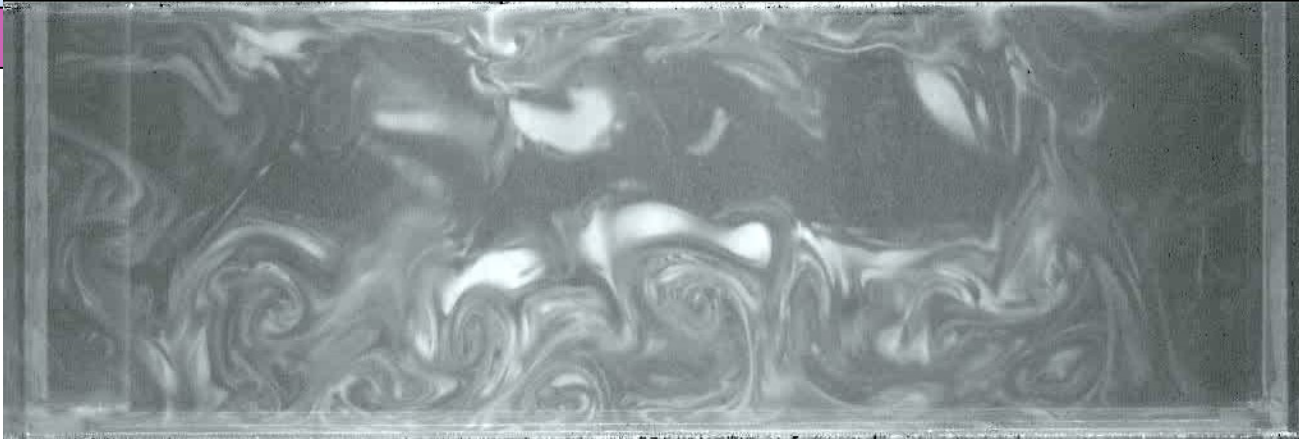
Th. M. Faure, P. Adrianos, F. Lusseyran and L. R. Pastur, "Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers", Experiments in Fluids, vol. 42, n°2, pp. 169-184 (2007)

November 14th, 2007

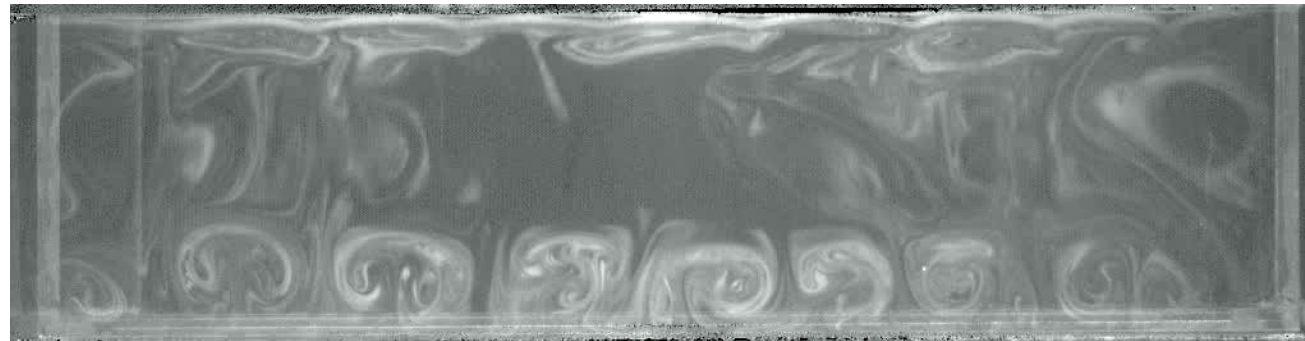
IPPT- PAN, seminar

Qualitative flow description

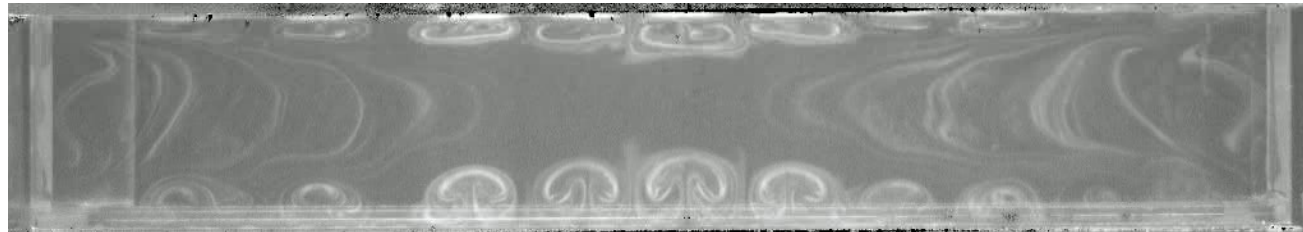
les Sciences de l'Ingénieur



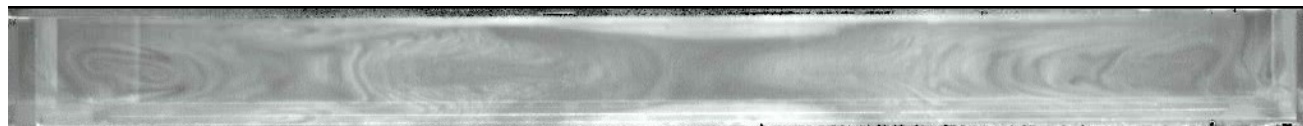
$R=2.$, $U=1.27$
m/s
 $Re=8500$



$R=1.5$, $U=1.27$ m/s
 $Re=6350$



$R=1.$, $U=1.27$ m/s
 $Re=4200$



$R=0.5$, $U=1.27$ m/s
 $Re=2100$



Tourbillons de Görtler = $f(Re, R, F)$

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

6 grandeurs: U_e, ρ, μ, L, H, S

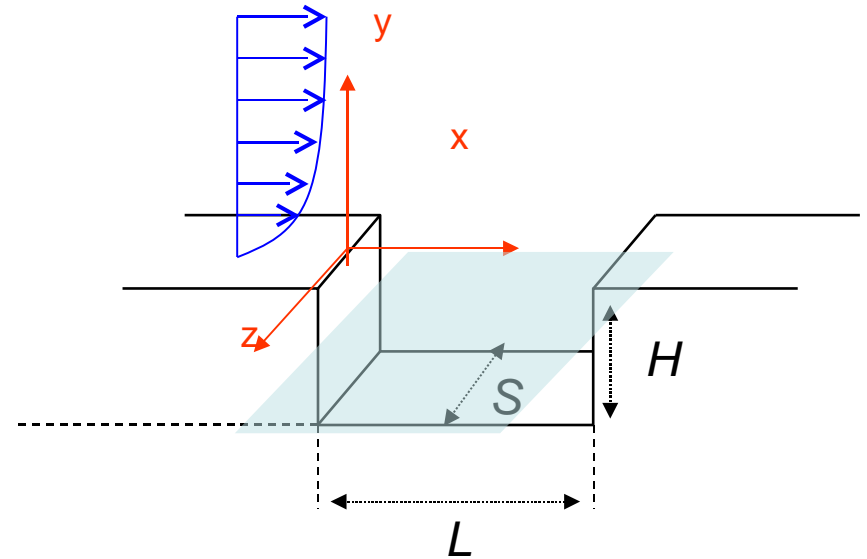
3 unités fondamentales

3 nombres adimensionnels:

$$Re = \frac{U_e L}{\mu / \rho}$$

$$R = L/H,$$

$$F = H/S$$



Existence de pseudo Görtler = $f(Re, R, F)$

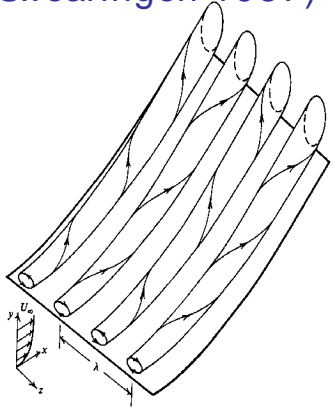
$$H \in \{0.025, 0.05, 0.10, 0.15\}m \quad S = 0.3m \quad \rightarrow \quad 0.084 < F < 0.5$$

$$500 < Re < 4000 \quad R \in \{0.25, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.5\}$$

Tourbillons de Görtler?

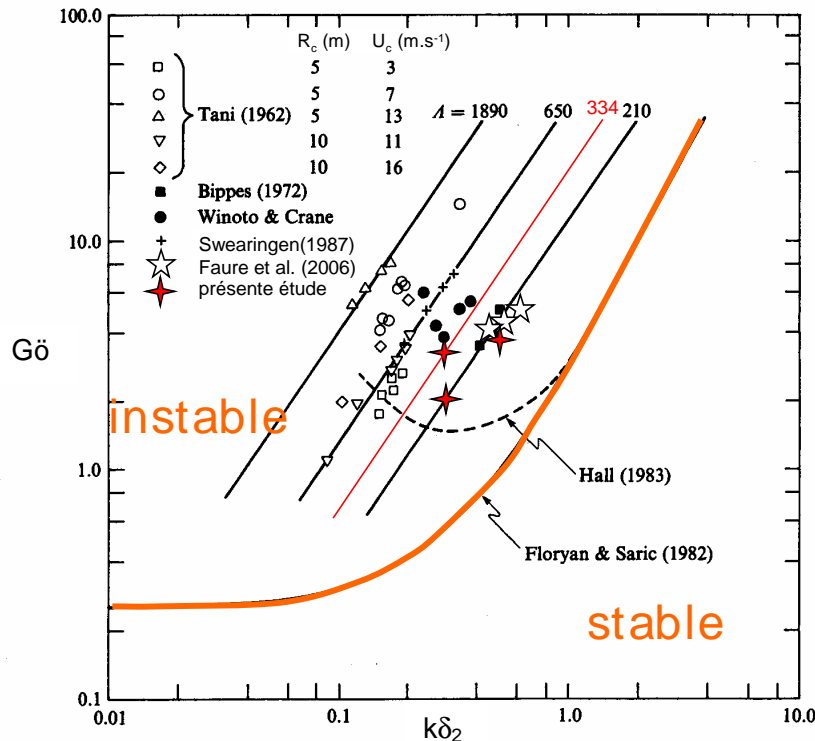
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Modèle Instabilité linéaire
(Swearingen 1987)



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Gö} = \frac{U_c \delta_2}{\nu} \left(\frac{\delta_2}{r_c} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \Lambda = \frac{U_c r_c}{\nu} \left(\frac{\lambda}{r_c} \right)^{\frac{3}{2}} \end{array} \right. \longrightarrow \text{Gö} = \frac{\Lambda}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}} (k\delta_2)^{\frac{3}{2}}$$

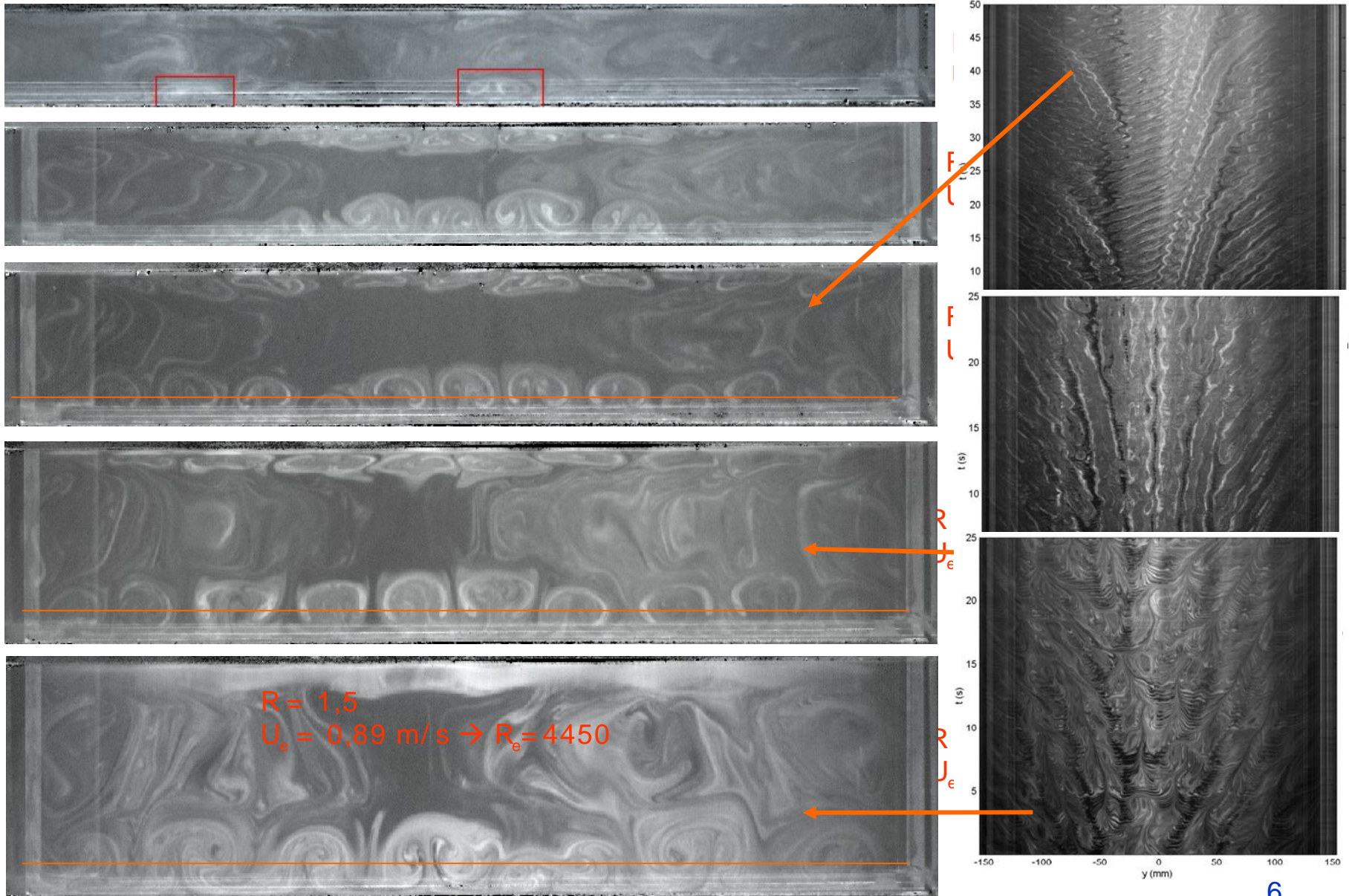
film



Space-time diagrams

$F = 0,167$ ($H = 50$ mm)

atistique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur



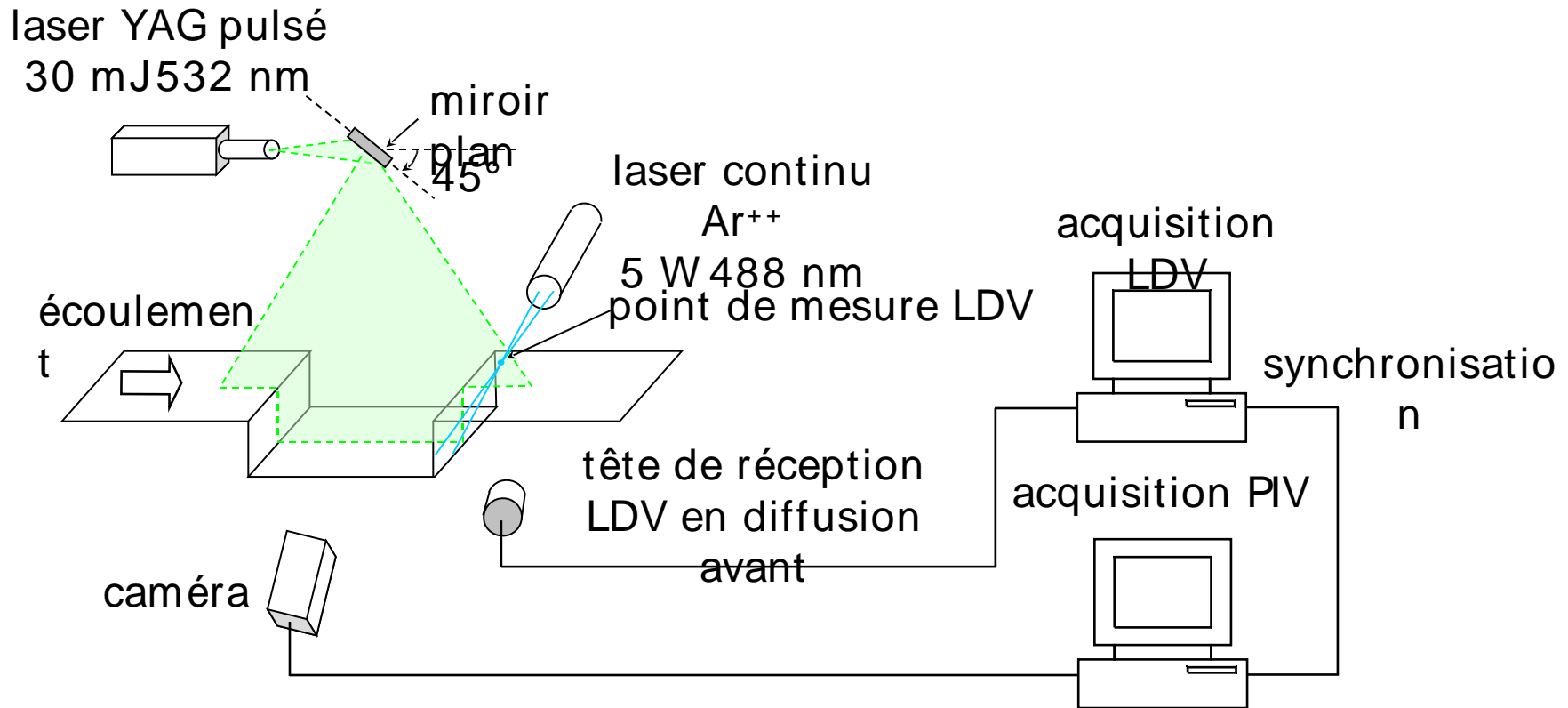
Plan de l'exposé

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

- Open cavity flow phenomenology
 - Qualitative description
 - Görtler's instability
 - **Mixing layer instability**
- 2D reduction of a 3D flow
 - POD 3D : full flow reconstruction
 - Validation POD 2D / POD 3D
 - Validation POD 2D with PIV 2C
- 3D information reconstruction from 2D



Montages mesures synchronisées PIV- LDV

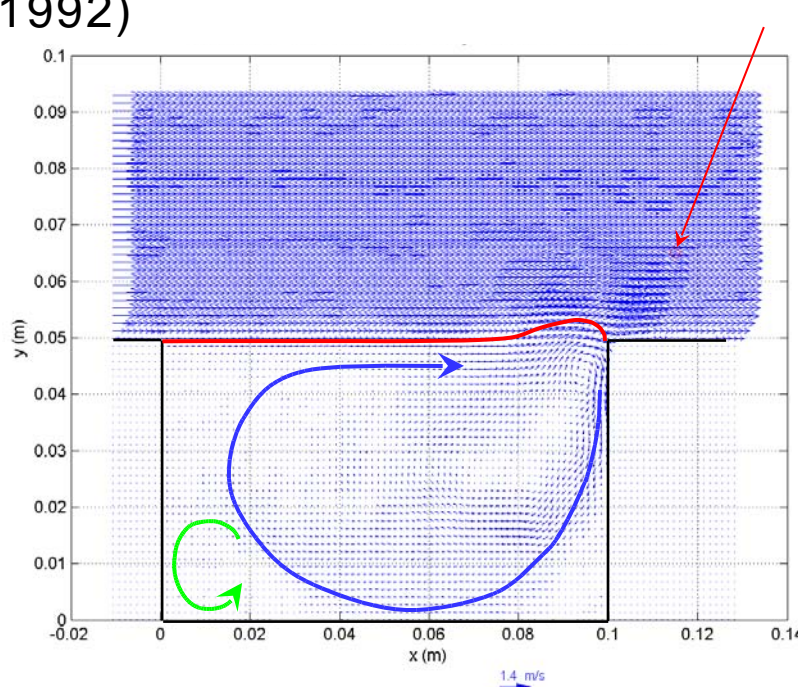


Champ de vitesse PIV-2C-2D

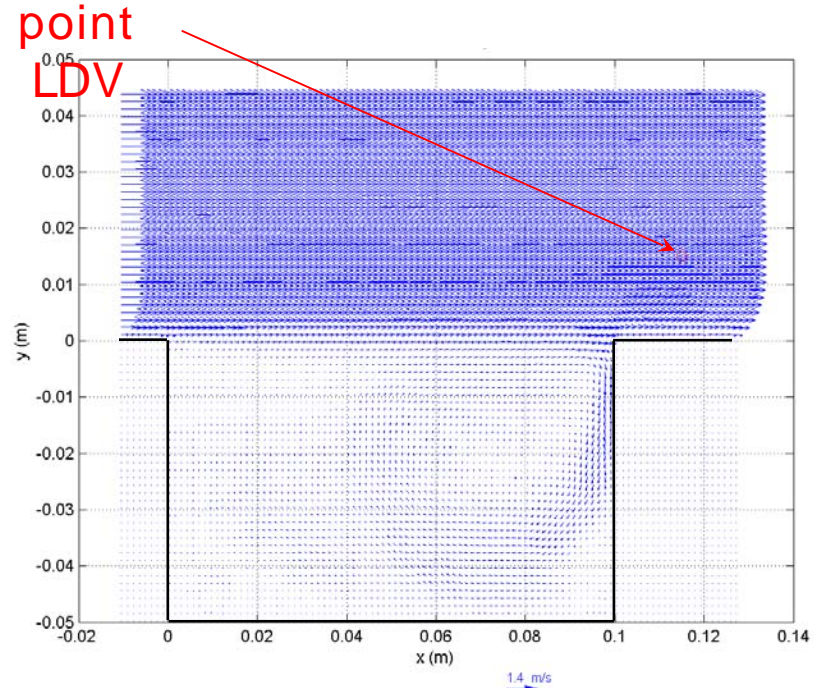
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Mesures PIV $U_e = 1,27 \text{ m.s}^{-1}$

PIV par flot optique utilisant une programmation dynamique (Quénot 1992)



champ PIV instantané

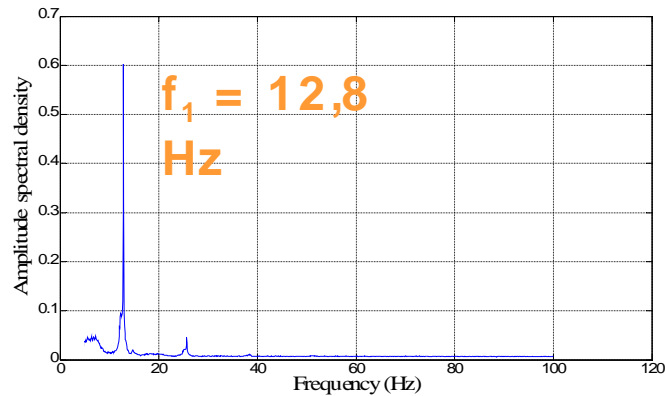
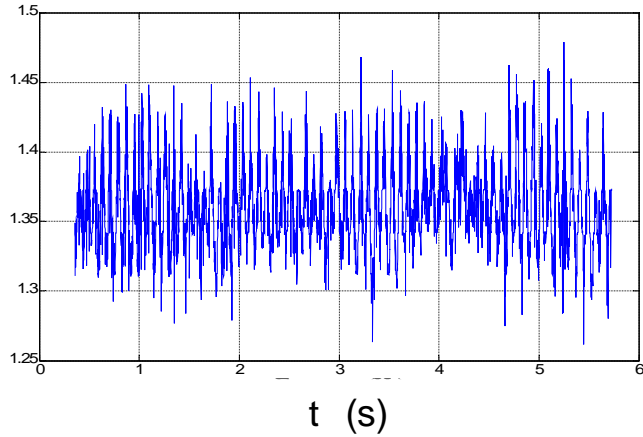


moyenne sur 1100 champs PIV

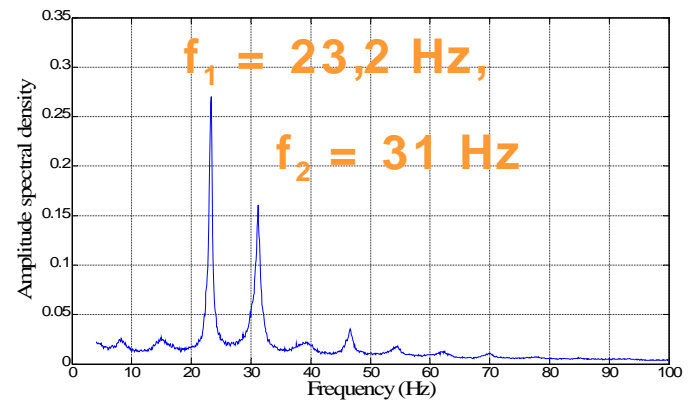
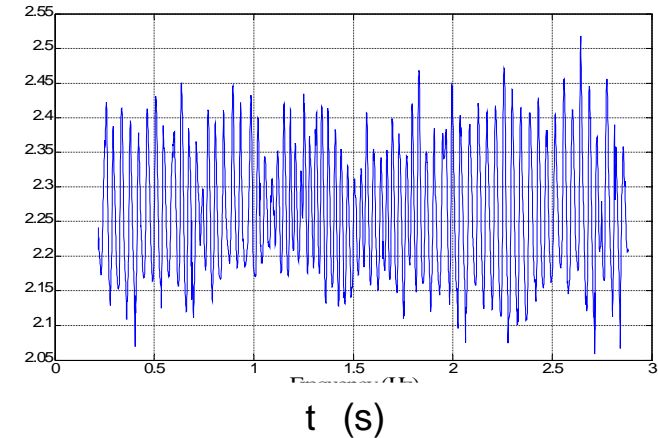
Mesure locale $u_x(t)$ par LDV

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

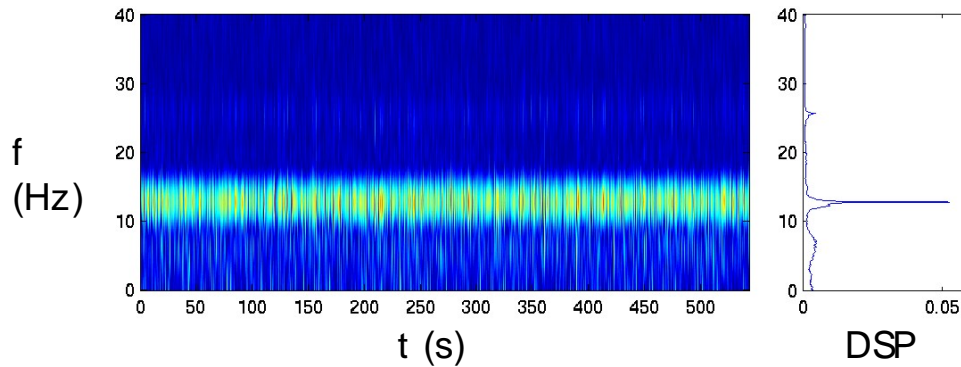
Mesures LDV $U_e = 1,27$
 $m.s^{-1}$



Mesures LDV $U_e = 2,09$
 $m.s^{-1}$

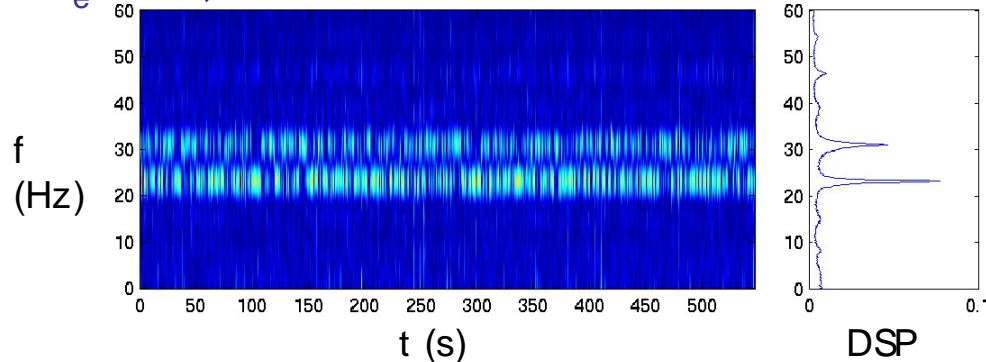


Mesures LDV $U_e = 1,27$
 $m.s^{-1}$



➔ 1 mode caractéristique à la fréquence $f_1 = 12.8$ Hz

Mesures LDV $U_e = 2,09$
 $m.s^{-1}$



➔ 2 modes présents en intermittence aux fréquences $f_1 = 23.2$ Hz et $f_2 = 31$ Hz

Objectifs :

- mesure de la longueur d'onde des oscillations de la couche de cisaillement
- comparaison avec le modèle de stabilité linéaire d'une couche de

Mésaillon

recaler les champs PIV par rapport à la phase des oscillations de la couche de cisaillement (signal LDV)

1- Vitesse U_y pour $U_e = 1.27 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow f1$

2- Vitesse U_y pour $U_e = 2.09 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow f1$ et $f2$

Construction moyennes de phases

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

- rééchantillonnage du signal LDV à une fréquence multiple des champs PIV
- filtrage autour de la fréquence $U_x \rightarrow S$ en mode (filtre passe-bande largeur 1 Hz)

- construction de la matrice des retards B

$$S = \begin{pmatrix} s(t_1) \\ s(t_2) \\ s(t_3) \\ s(t_4) \\ s(t_5) \\ s(t_6) \\ s(t_7) \end{pmatrix} \rightarrow B = \begin{pmatrix} s(t_1) & s(t_2) & s(t_3) \\ s(t_2) & s(t_3) & s(t_4) \\ s(t_3) & s(t_4) & s(t_5) \\ s(t_4) & s(t_5) & s(t_6) \\ s(t_5) & s(t_6) & s(t_7) \end{pmatrix}$$

$$B = U \cdot D \cdot V^T$$

- décomposition aux valeurs singulières

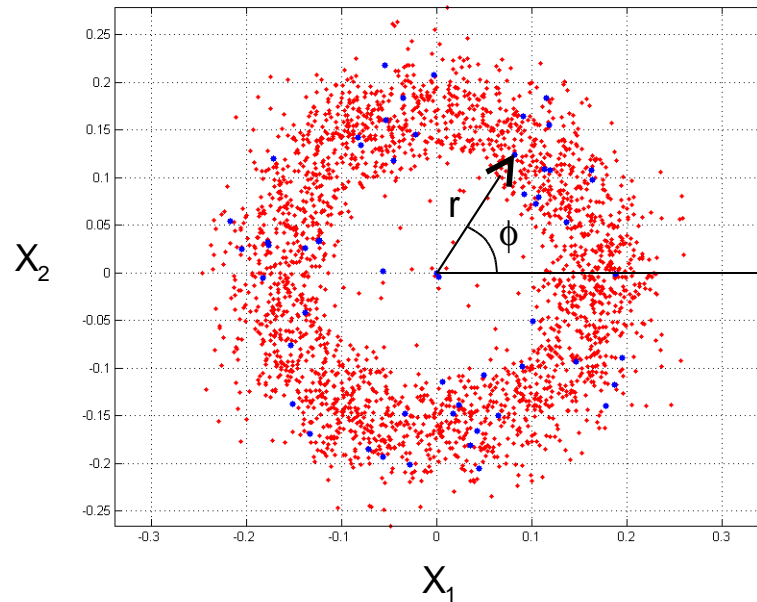
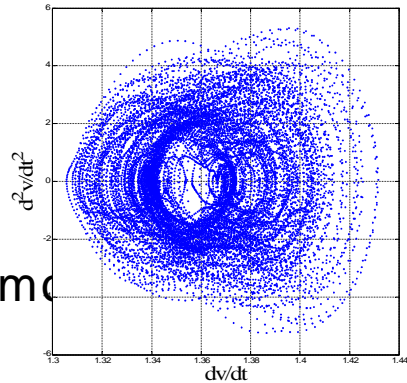
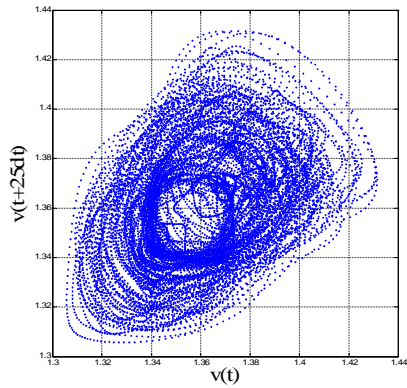
$$X = U \cdot D = B \cdot V$$

- matrice de la dynamique propre du système X

Moyennes de phases pour s1

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

portrait de phase réalisé à partir des 2 premières colonnes de la matrice X



• champ PIV

les champs PIV compris dans un secteur de phase de $22,5^\circ$

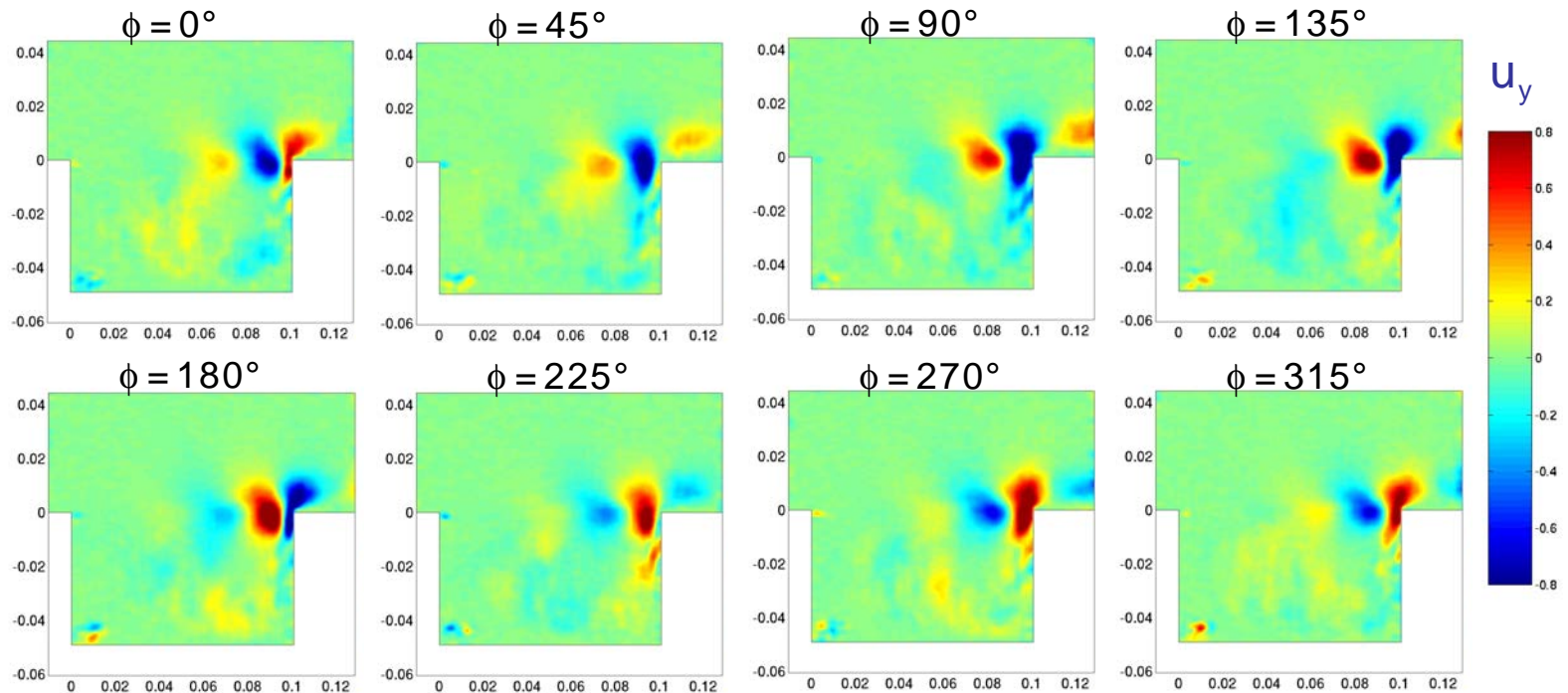
Moyennes de phases pour s1

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Moyennes des réalisations de l'écoulement par secteur de $\Delta\phi = 22.5^\circ$
phase

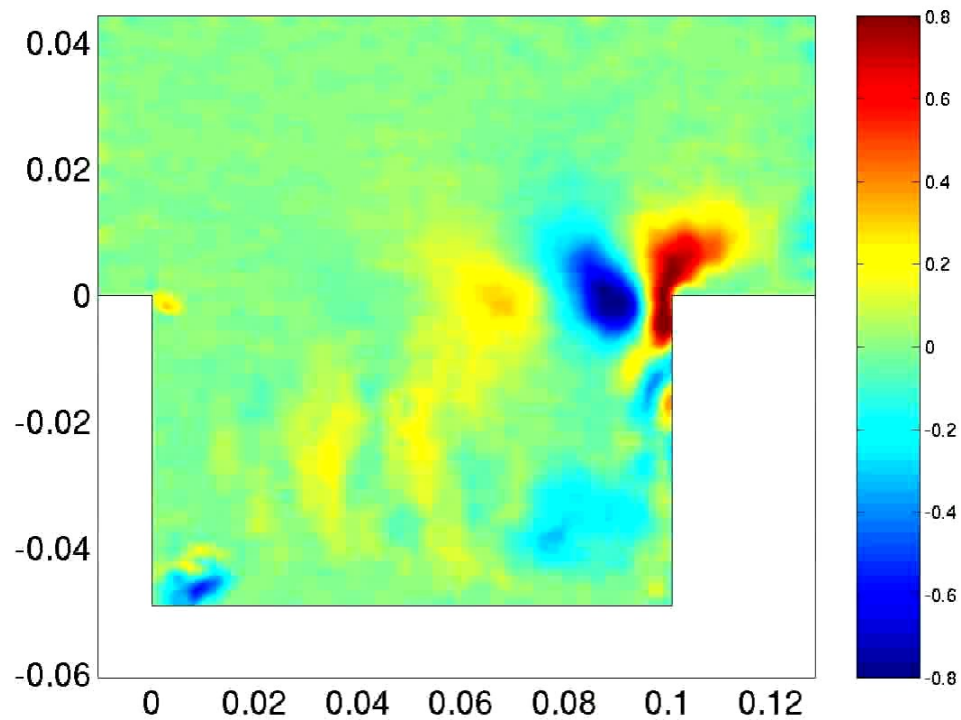
$$U_e = 1,27 \text{ m.s}^{-1}$$

1



Moyennes de phases pour s1

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

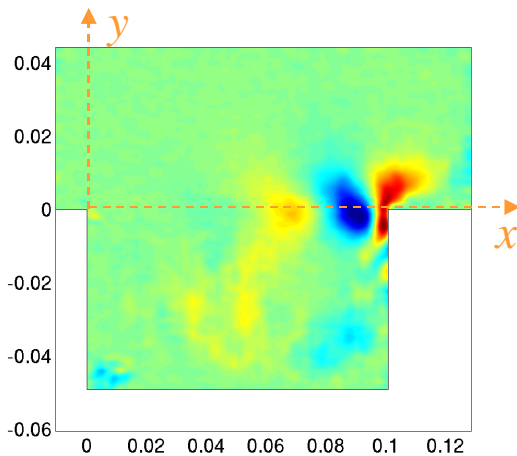


Relation de dispersion pour s1

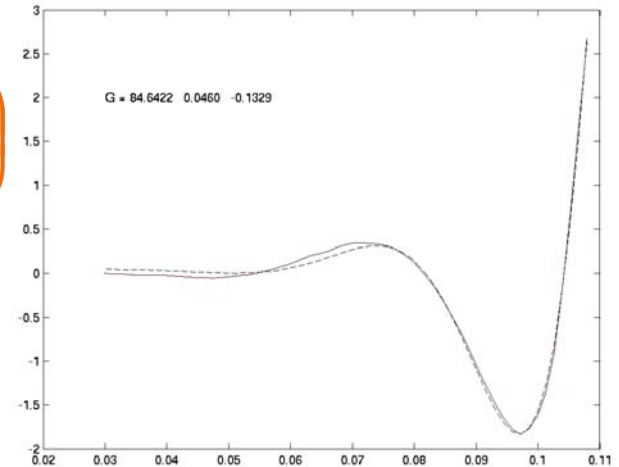
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Instabilité convective linéaire

$$U_e = 1,27 \text{ m.s}^{-1}$$



$$u_y(x) = A + Be^{\beta x} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \varphi\right)$$



ϕ (°)	0	45	90	135	180	225	270	315
λ (cm)	4.01	5.2	4.77	4.63	4.56	5.12	5.04	4.45
β	66.11	66.92	64.25	72.67	61.4	54.90	68.75	62.22

$$\lambda_{moyen} = 4.75 \pm 0.7 \text{ cm}$$

TAB. 3.1 – Longueurs d'onde et coefficient d'amplification spatiale obtenus pour 8 des 16 champs moyennés en phase, pour $u_e = 1.27 \text{ m/s}$

Relation de dispersion pour s_1

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Longueur d'onde des oscillations de la couche de cisaillement

$$U_e = 1,27 \text{ m.s}^{-1}$$

- Moyenne de phases $\rightarrow \lambda = 0.048 \pm 0.007$

m

pour une couche de cisaillement en tangente hyperbolique

$$u_x(y) = \frac{U_1 + U_2}{2} + \frac{U_1 - U_2}{2} \tanh\left(\frac{y - y_0}{\delta}\right)$$

$$U_c = \frac{U_1 + U_2}{2} \approx \frac{U_e}{2} = 0.635 \text{ m.s}^{-1}$$

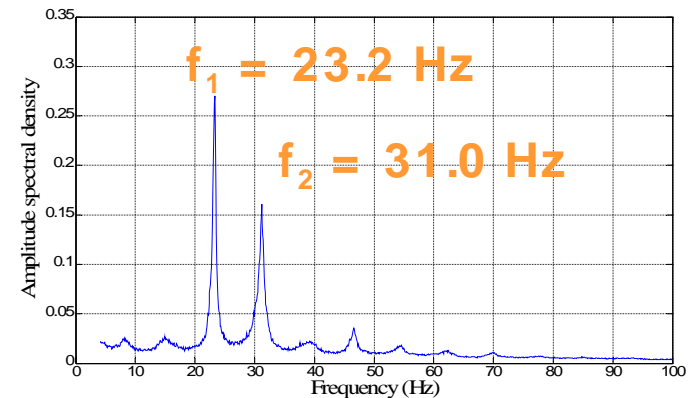
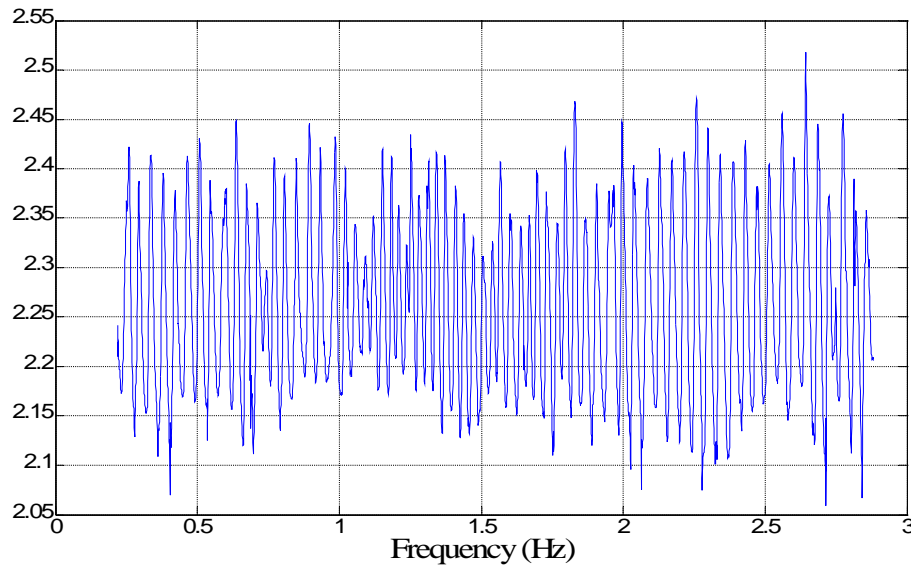
- Moyenne de phases $\rightarrow c = \lambda f = 0.61 \pm 0.09 \text{ m s}^{-1}$

Moyenne de phase pour s2

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

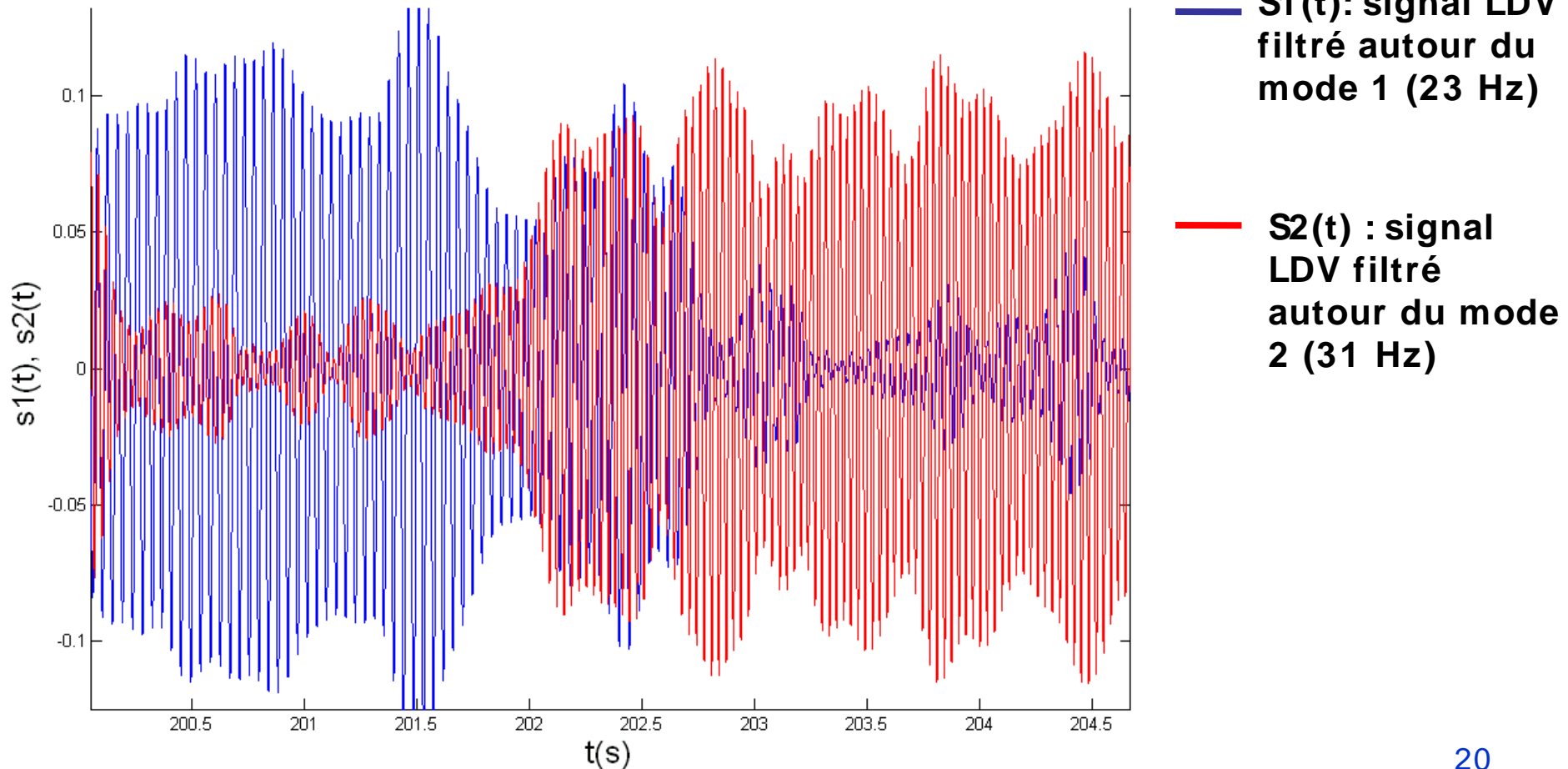
1- Vitesse U_y pour $U_e = 1.27 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow f_1$

2- Vitesse U_y pour $U_e = 2.09 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow f_1$ et f_2



TF de Hilbert autour de f_1 et f_2

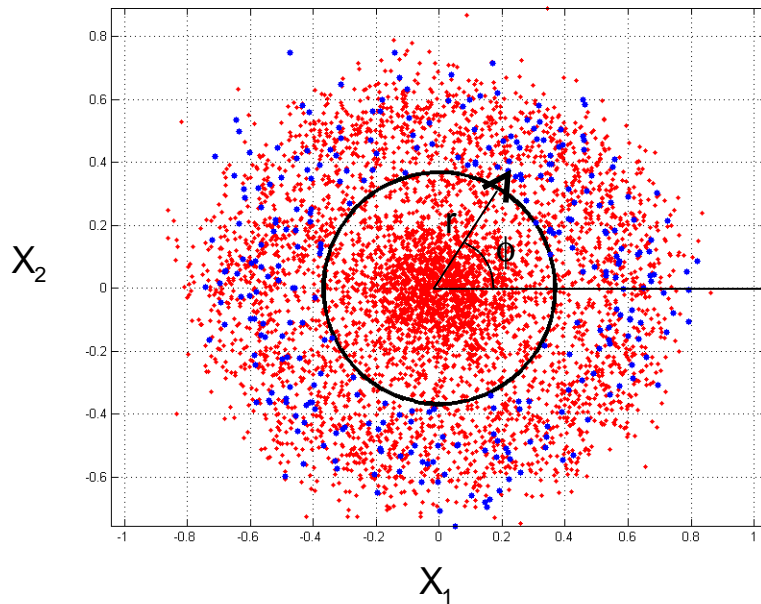
- filtrage du signal LDV autour du mode sur lequel on souhaite se recaler



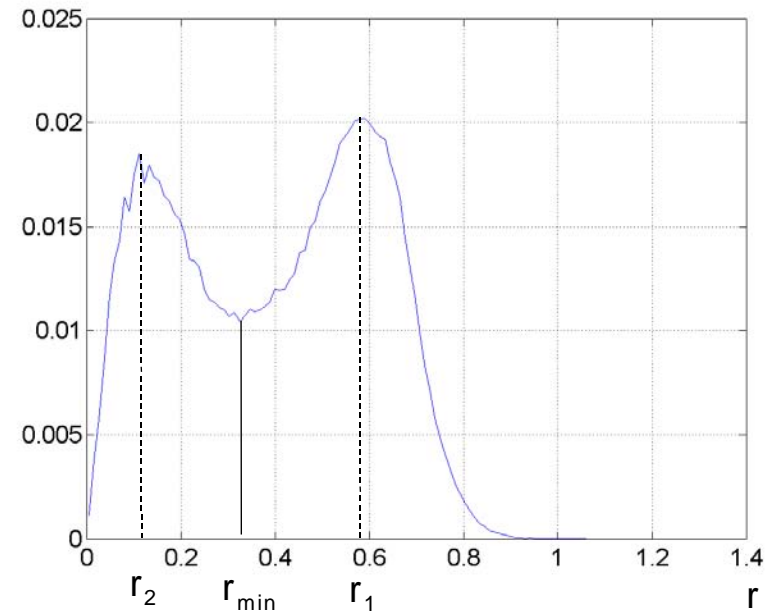
Mesures PIV $U_e = 2,09 \text{ m.s}^{-1}$

filtrage successif sur chacun des deux modes avant la moyenne par phase
filtrage sur le mode 1 :

• champ PIV



densité

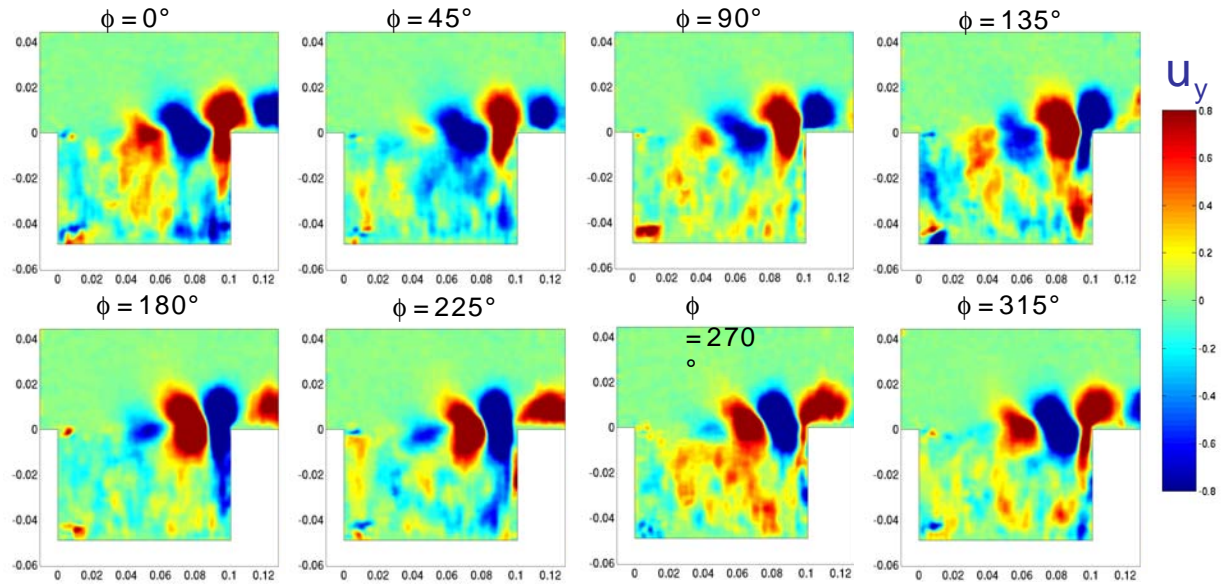


Moyennes de phases

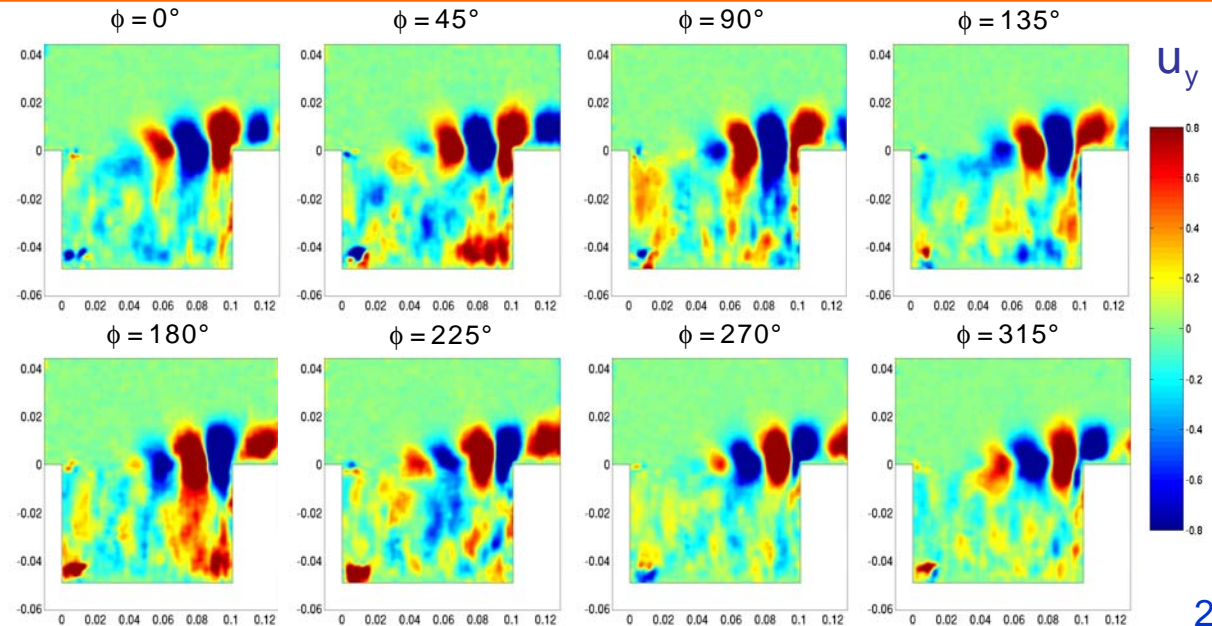
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

$$U_e = 2,09 \text{ m.s}^{-1}$$

mode 1

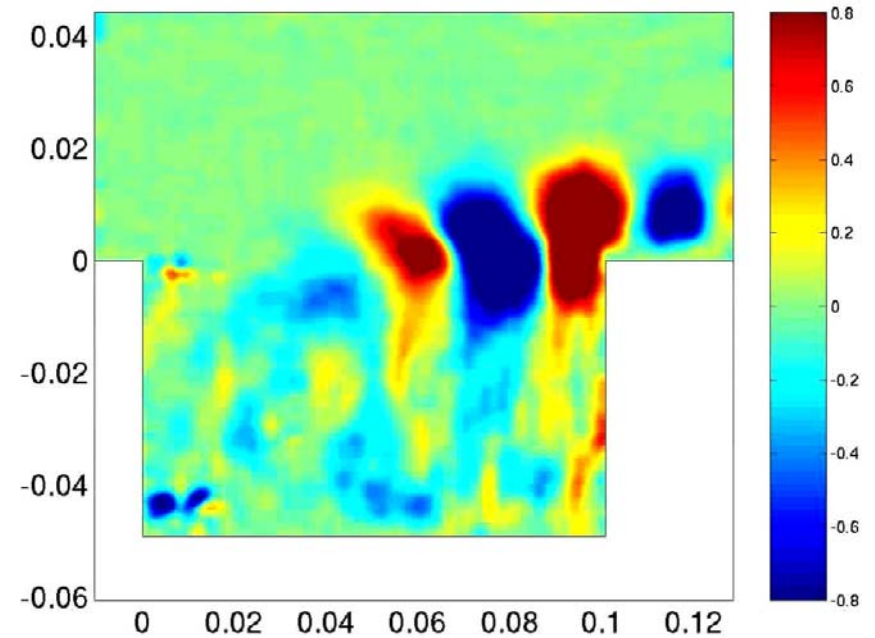
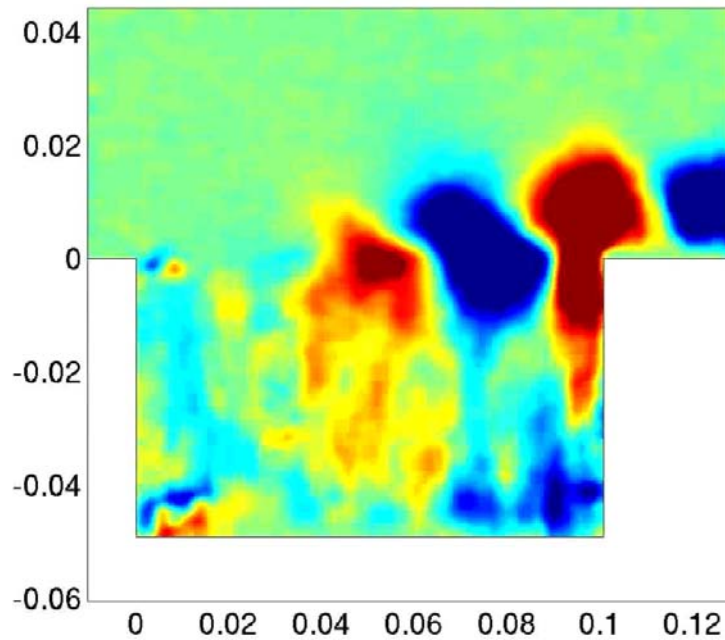


mode 2



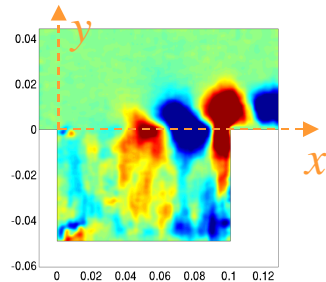
$$f_1 = 23.2Hz$$

$$f_2 = 31.0Hz$$

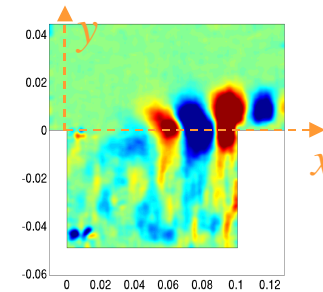


Relation de dispersion pour s2

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur



$$u_y(x) = A + Be^{\beta x} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \varphi\right)$$



ϕ (°)	0	45	90	135	180	225	270	315
λ (cm)	5.33	5.67	5.95	4.79	4.83	4.54	4.58	4.74
β	35.2	37.38	42.57	51.34	69.3	70.26	62.25	36.52

$$\lambda_1 \text{ moyen} = 4.95 \pm 1 \text{ cm}$$

TAB. 3.2 – Longueur d'onde et coefficient d'amplification spatiale obtenues pour 8 des 16 champs moyennés en phase, sur le premier mode $f_1 = 23.2$ Hz pour $u_e = 2.09$ m/s

ϕ (°)	0	45	90	135	180	225	270	315
λ (cm)	3.92	3.64	3.38	3.80	3.61	3.79	3.55	4.07
β	35.74	39.60	34.74	55.34	64.52	55.54	34.84	35.08

$$\lambda_2 \text{ moyen} = 3.75 \pm 0.72 \text{ cm}$$

TAB. 3.3 – Longueur d'onde et coefficient d'amplification spatiale obtenues pour 8 des 16 champs moyennés en phase, sur le second mode $f_2 = 31.0$ Hz pour $u_e = 2.09$ m/s

Relation de dispersion pour s2

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Longueur d'onde des oscillations de la couche de cisaillement

$$U_e = 2,09 \text{ m.s}^{-1}$$

vitesse de convection théorique de l'onde :

$$U_c = \frac{U_1 + U_2}{2} \approx \frac{U_e}{2} = 1,045 \text{ m.s}^{-1}$$

ajustement de U_y sur une fonction d'onde spatiale

amplifiée:
mode 1 ($f_1 = 23,2 \text{ Hz}$) : $\lambda_1 = 0,0495 \pm 0,01 \text{ m}$ et $U_{c,1} = 1,15 \pm 0,23 \text{ m.s}^{-1}$

mode 2 ($f_2 = 31,0 \text{ Hz}$) : $\lambda_2 = 0,0375 \pm 0,007 \text{ m}$ et $U_{c,2} = 1,16 \pm 0,22 \text{ m.s}^{-1}$

➔ on retrouve une vitesse de convection du même ordre de grandeur

Plan de l'exposé

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

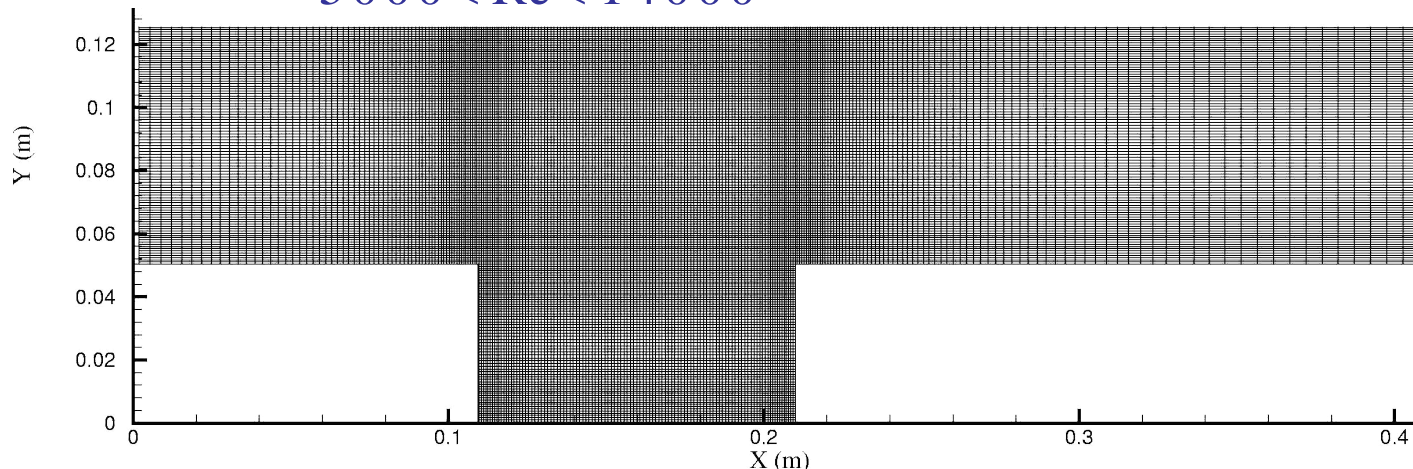
- Open cavity flow phenomenology
 - Qualitative description
 - Görtler's instability
 - Mixing layer instability
- 2D analysis of a 3D flow from DNS
 - POD 3D : full flow reconstruction
 - Validation POD 2D / POD 3D
 - Validation POD 2D with PIV 2C
- 3D information reconstruction from 2D



CODE OLORIN (LIMSI) :

- 2D et 3D instationnaire isotherme et incompressible (Boussinescq)
- Volumes finis, schéma d'ordre 2 en temps et espace
- Flux convectifs → schéma QUICK
- Flux de diffusion → résolution implicite A.D.I (Alternating Direction Implicit)
- méthode multigrille : 3D 259 x 131 x 194

$5000 < Re < 14000$



Direct Numerical Simulation

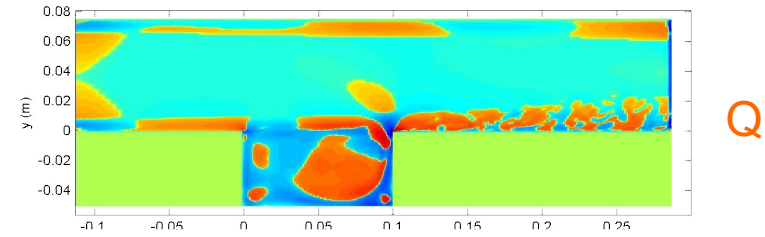
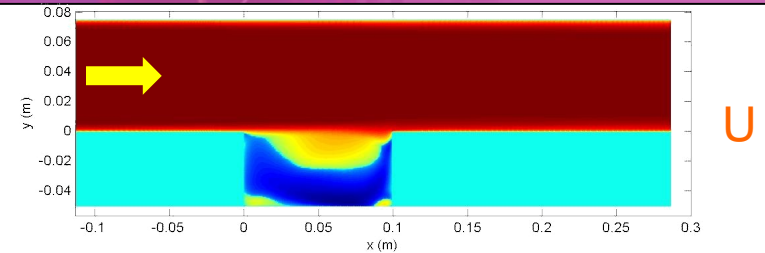
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Maillage : 259x131x194

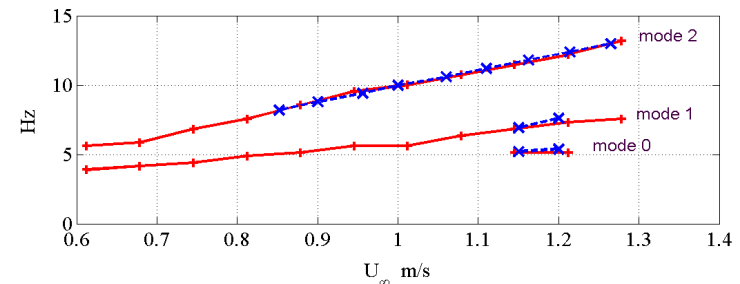
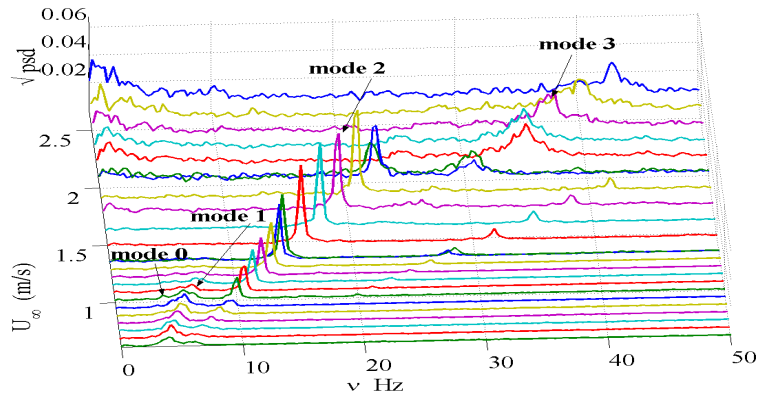
Domaine : 39.62 cm x 12.5 cm x 30 cm

Cavité: L= 10 cm, H= 5 cm, R=L/H= 2

$t_i = 50.0167$ s $\rightarrow t_f = 69.5882$ s $\rightarrow \Delta t \approx 20$ s

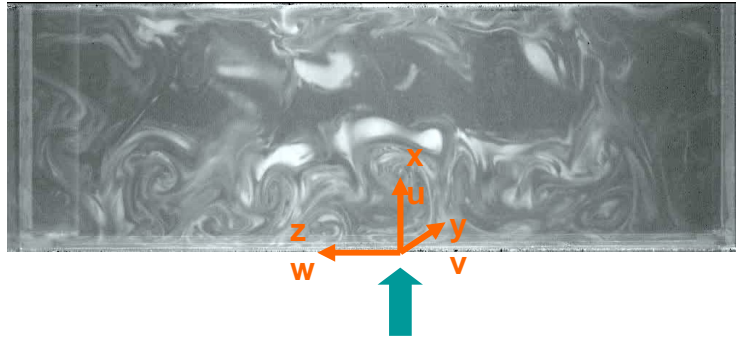


From LDV u measurement



2D slides

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

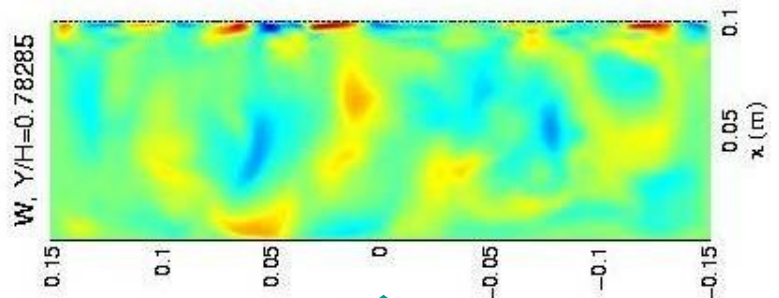
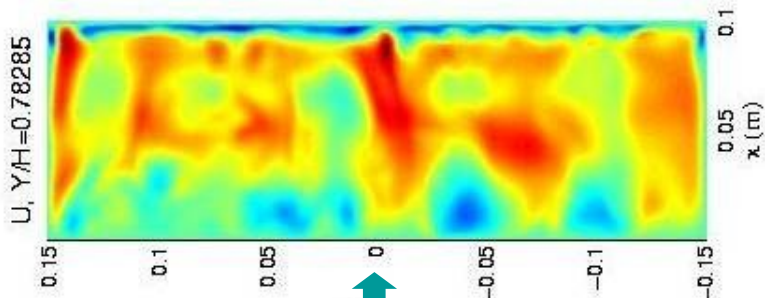
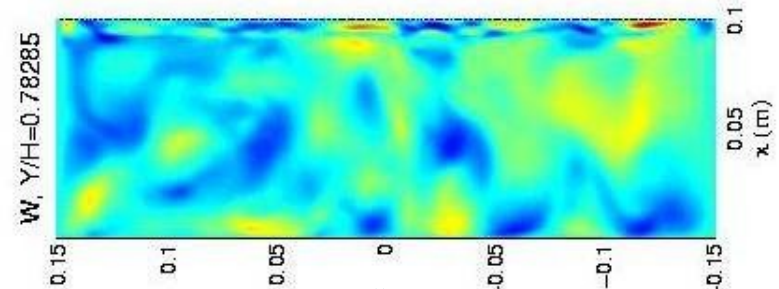
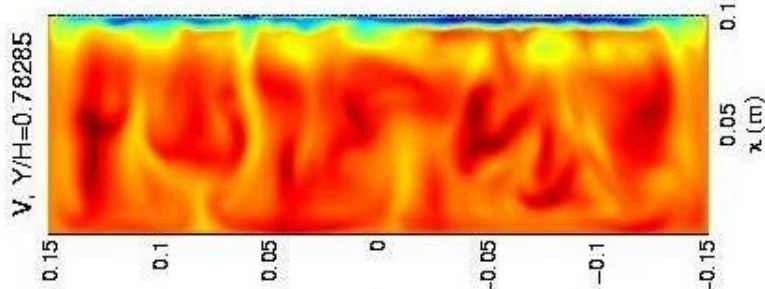


Experience:
Visualisation with smoke

V

3D DNS

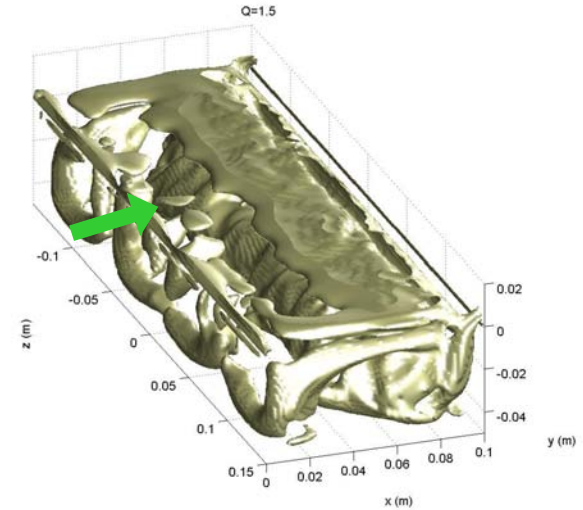
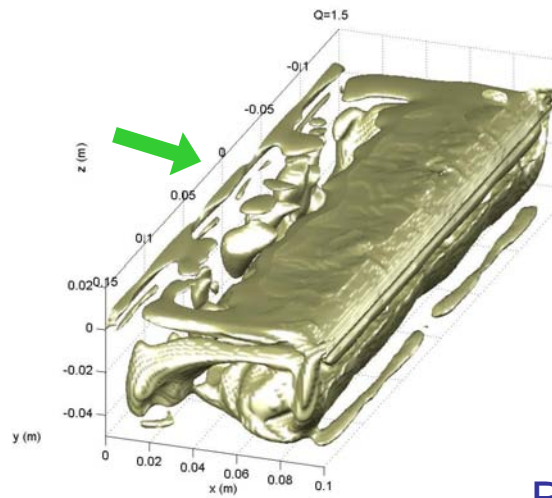
W



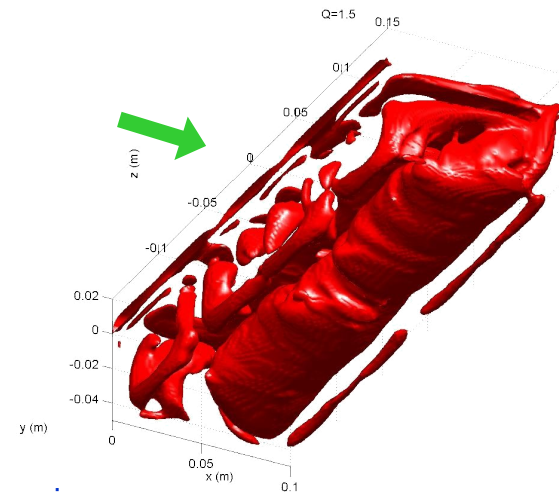
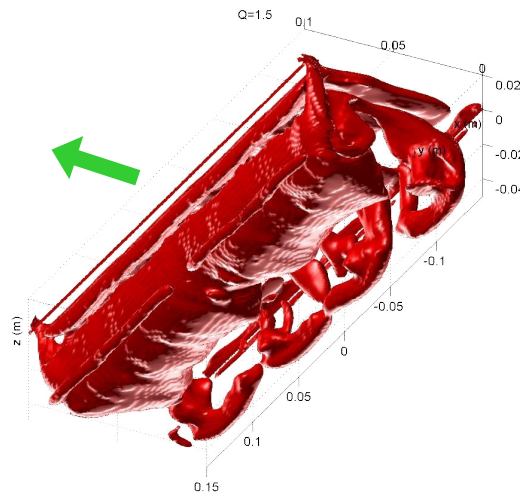
3D isosurfaces Q factor

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Top view

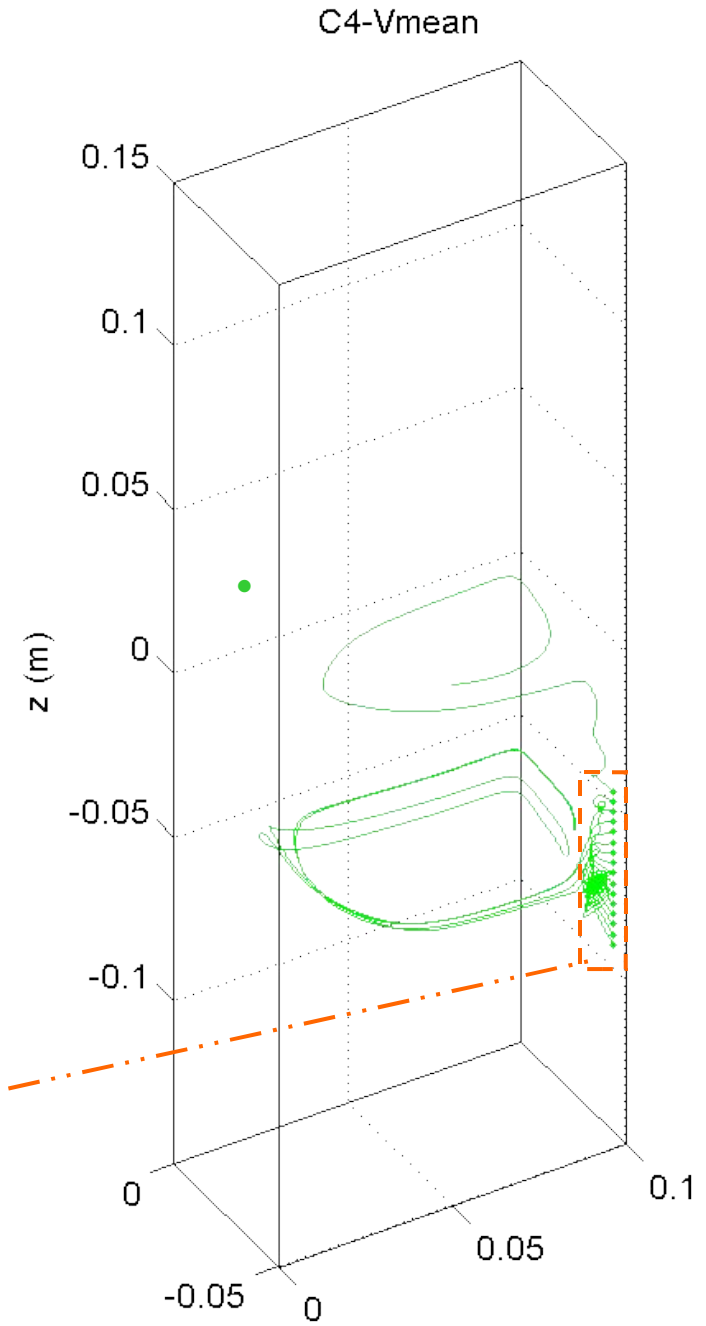
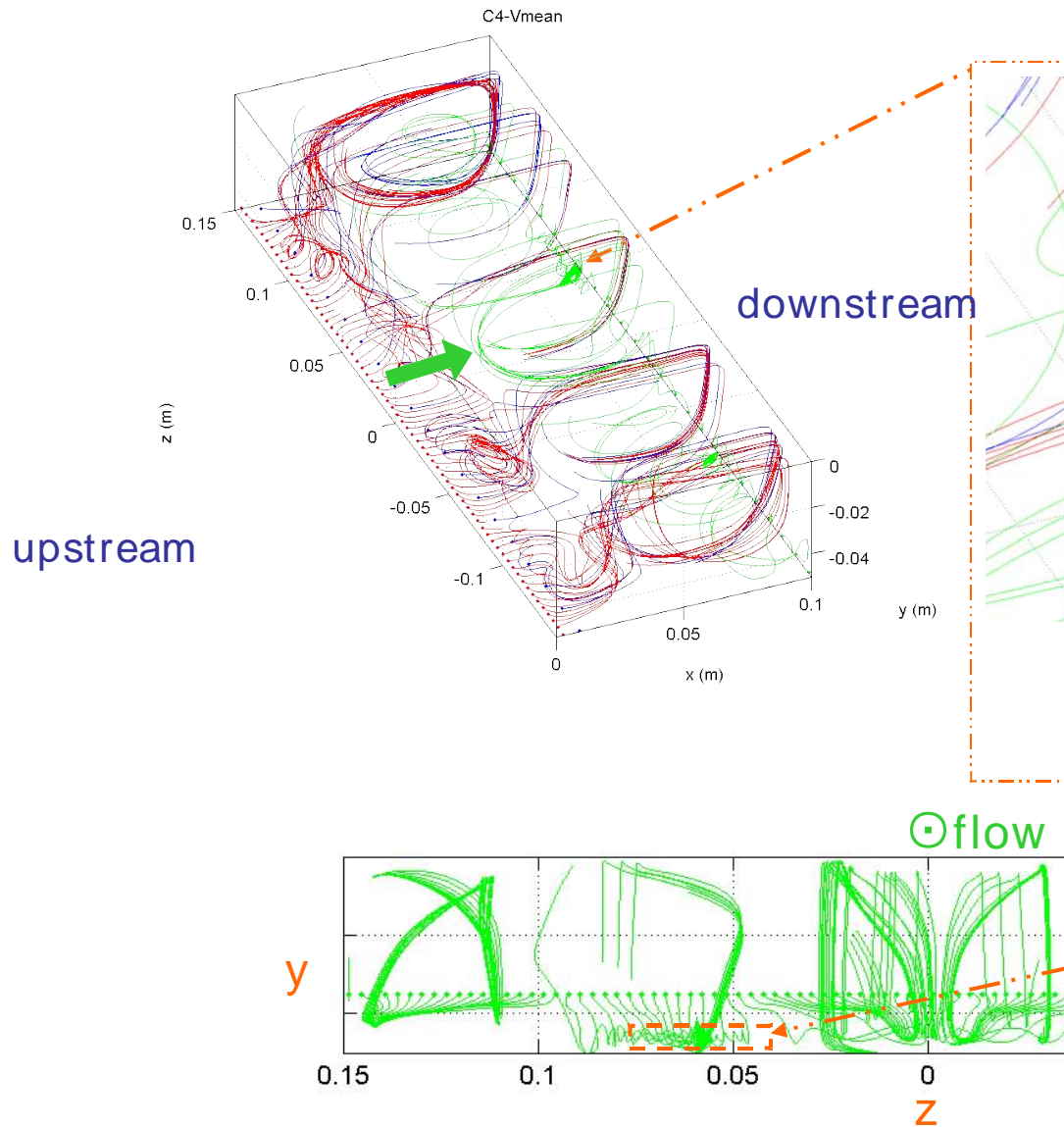


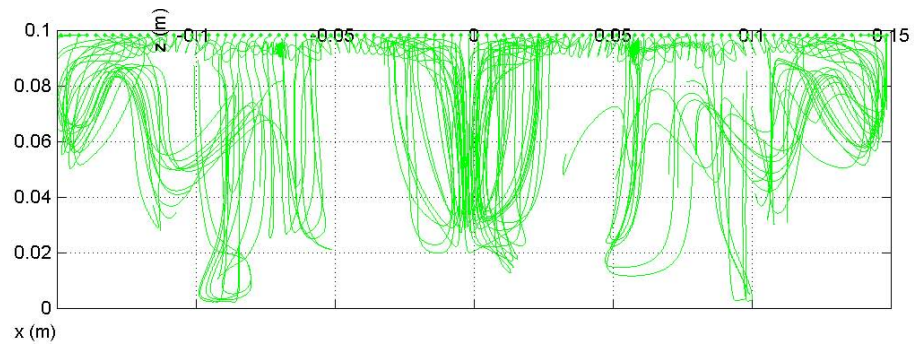
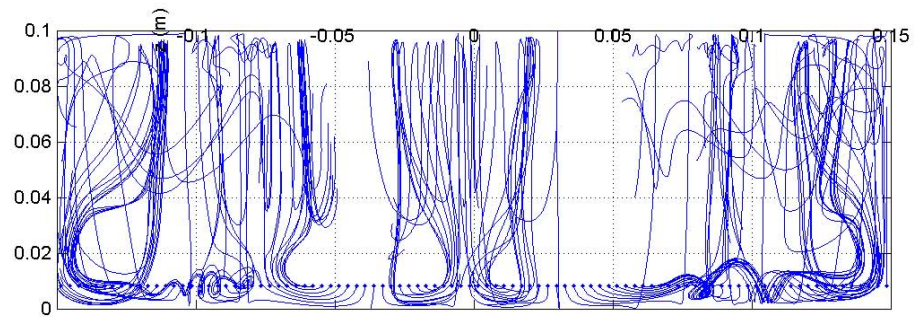
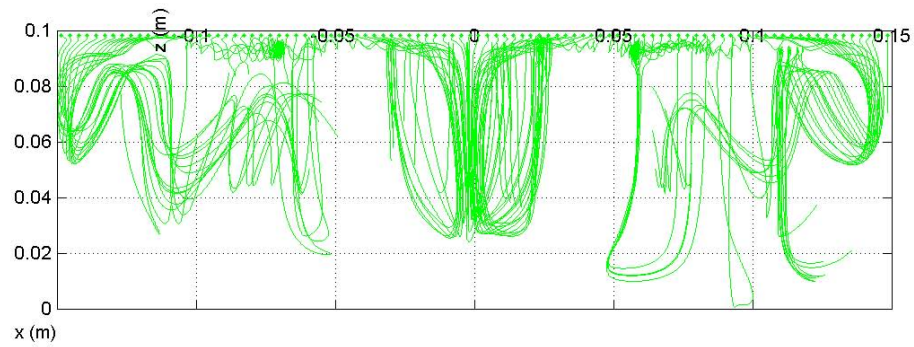
Bottom view



Streamlines- stream

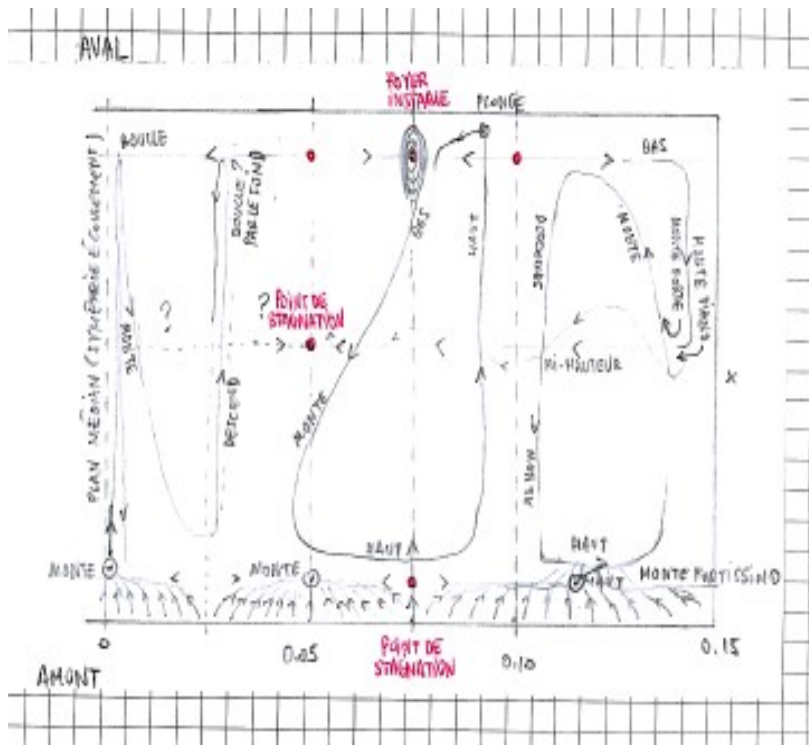
Laboratoire d'Informatique po





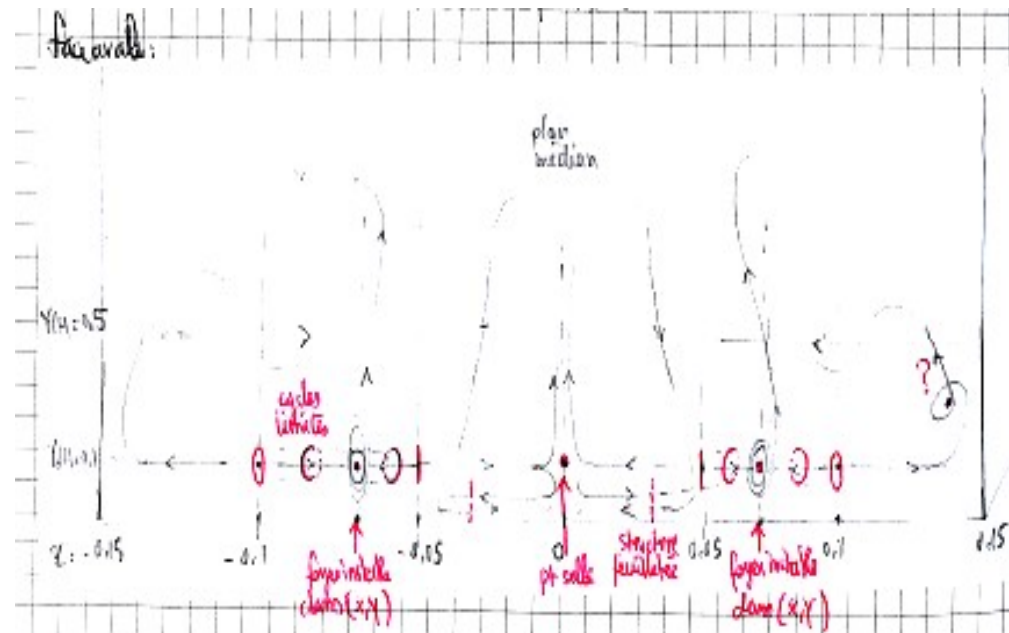
Understanding of the flow morphology!

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur



Vortex folding and stretching
 ← Flow dynamics skeleton

Critical point,
 Separation plane,
 Saddle point



Lack of conceptual - mathematical tools

- for 3D vortex recognition (using: Q criterion, λ_2 , wavelets filtering, pathline)
- Automated topology classification method for instantaneous velocity field

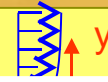
Space localization (visualization) and time characterization

- Volume rendering
- 3D immersion \rightarrow VR environment \rightarrow numerical wind tunnel

Résumé de la Procédure

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

$$\{u(x, y, z, t_i)\}_{i=1, N} \longrightarrow u(x, y, z, t_i) = \sum_{n=1}^N a_n(t_i) \phi_n(x, y, z)$$



DI
{

$$b_n(t_i) = M_{nm} a_m(t_i)$$

$$M_{nm} = \int_D \left\{ \phi_u^n(x, y, z_0) \phi_u^m(x, y, z_0) + \phi_v^n(x, y, z_0) \phi_v^m(x, y, z_0) + \dots \right.$$

PI
{

$$\left. \phi_w^n(x, y, z_0) \phi_w^m(x, y, z_0) \right\} dx dy$$

$$\text{si } D = \Omega \Rightarrow M = I$$

[Podvin et al. 2006]

• [Pa

coherent structures in an open cavity flow, *PHYSICA*, 2006.

• [Podvin 2006] B. Podvin, Y. Fraigneau, F. Lusseyran, P. Gougat, "A reconstruction method for the flow past an open cavity", *JE* **128**, May 2006.

Définition de la POD

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

$$\left\{ u(x, y, z, t_i) \right\}_{i=1, N} \longrightarrow \vec{u}(x, y, z, t_i) = \sum_{n=1}^N \lambda_n a_n(t_i) \phi_n(x, y, z)$$

$$1) A = \begin{pmatrix} u_x(r_1, t_1) & u_x(r_1, t_2) & \cdots & u_x(r_1, t_N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_x(r_M, t_1) & u_x(r_M, t_2) & \cdots & u_x(r_M, t_N) \\ u_y(r_1, t_1) & u_y(r_1, t_2) & \cdots & u_y(r_1, t_N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_y(r_M, t_1) & u_y(r_M, t_2) & \cdots & u_y(r_M, t_N) \\ u_z(r_1, t_1) & u_z(r_1, t_2) & \cdots & u_z(r_1, t_N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_z(r_M, t_1) & u_z(r_M, t_2) & \cdots & u_z(r_M, t_N) \end{pmatrix}$$

$$2) K = A^t \cdot A \longrightarrow K = V_A \cdot \Lambda_A^2 \cdot V_A^t \quad (\text{POD})$$

$$\longrightarrow A \cdot V_A = U_A \cdot \Lambda_A$$

$$2') A = U_A \cdot \Lambda_A \cdot V_A^t \quad (\text{SVD})$$

1 SVD: t_{cpu}

1 prod.+ 1 val. propre+ 1 projection :
 $t_{\text{cpu}}/4!$

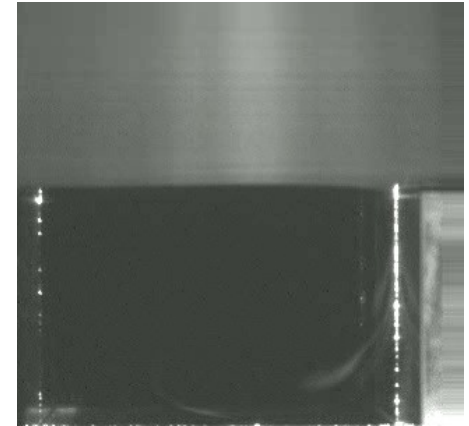
• Les colonnes de $V_A =$ chronos ou coeff. temporels $a_n(t_i)$

• Les colonnes de $U_A =$ topos ou modes spatiaux : $\phi_n(x, y, z)$

en 2D $N \approx 1000$ et $M \approx \frac{1000 \times 800}{10} \approx 80000 \rightarrow 2\text{Go RAM}$

3D?

$R=1.5$, $U=1.27$ m/s



$R=1.$, $U=1.27$ m/s



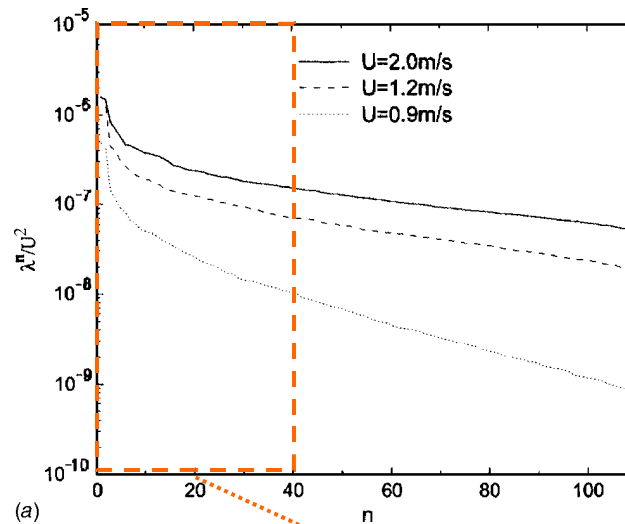
Modes 3D: valeurs propres

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

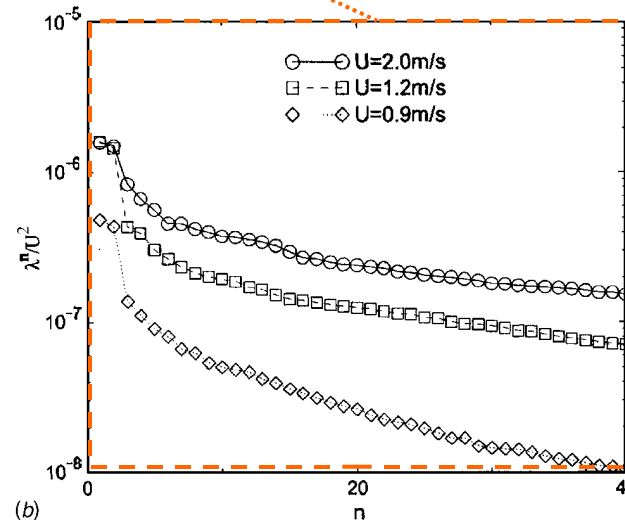
120 modes calculés

$$R = L/H = 2$$

$$U_{\infty} = \{0.9, 1.2, 2.0\} \text{ m/s}$$



(a)



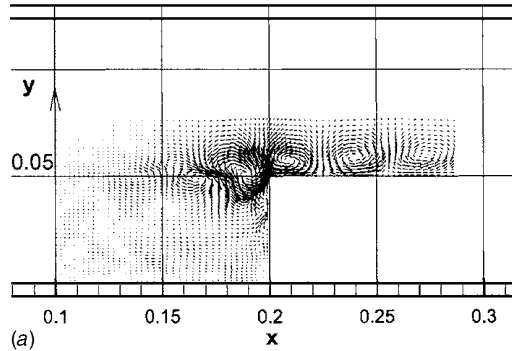
(b)

zoom

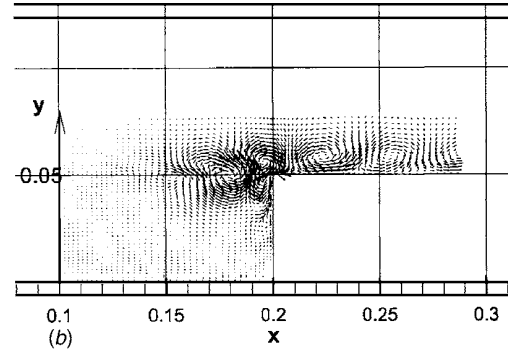
Topos 3D: section longitudinale $\rightarrow \phi_n(x, y, z=0)$

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

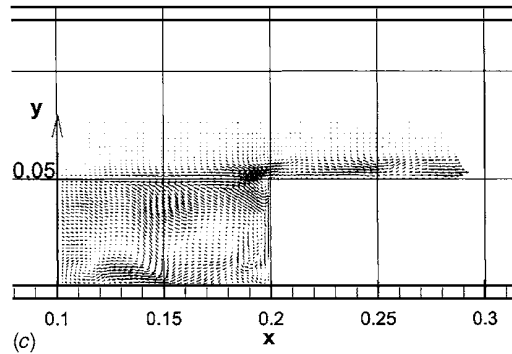
mode 1



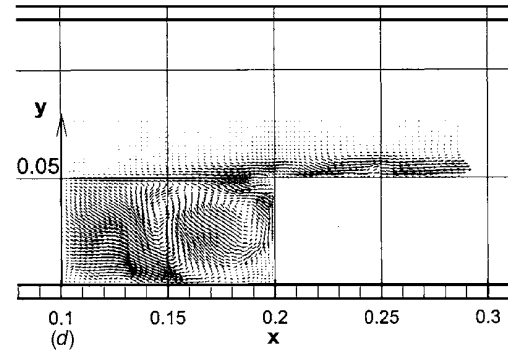
mode 2



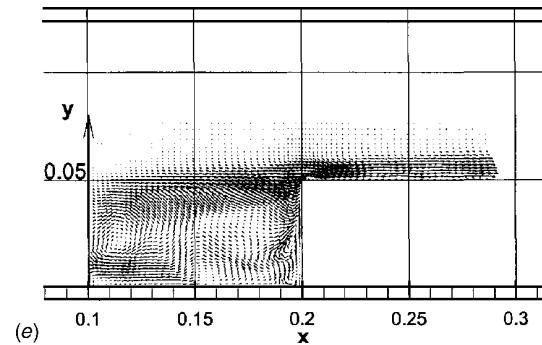
mode 3



mode 4



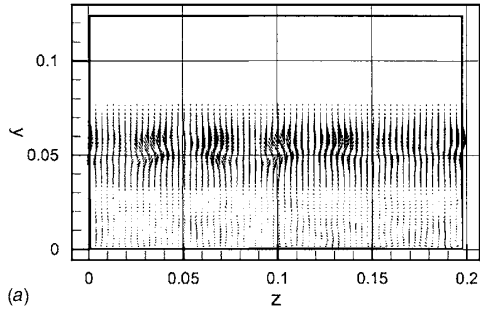
mode 5



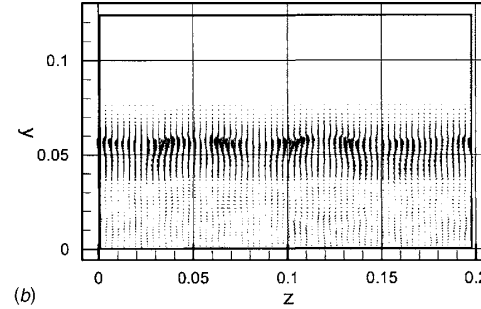
2D

section transversale: $\phi_n(x=0.08, y, z)$

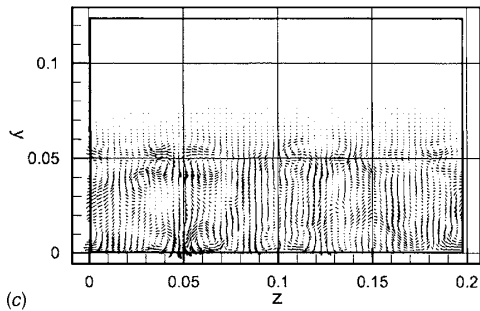
mode 1



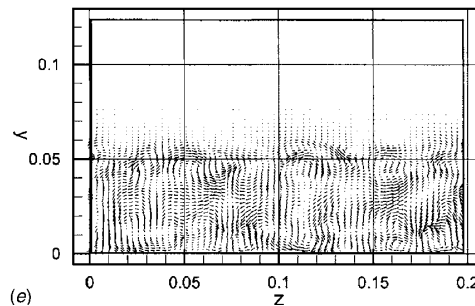
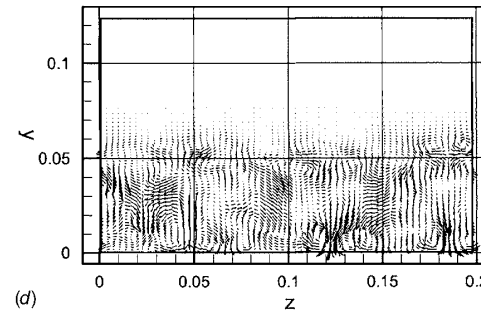
mode 2



mode 3



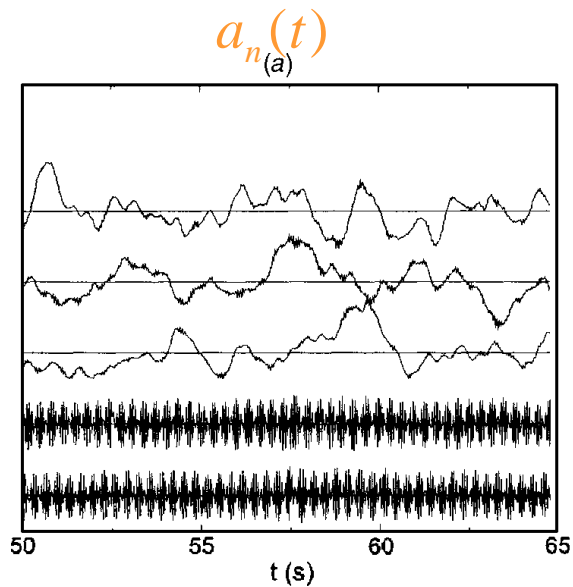
mode 4



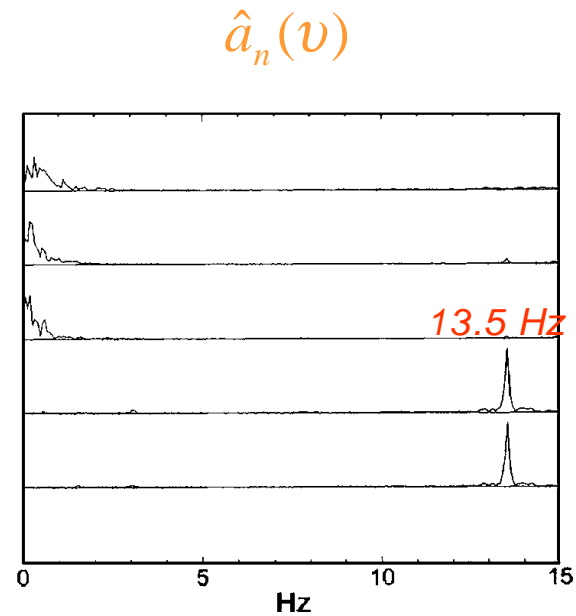
mode 5

2D

$$\{u(x, y, z, t_i)\}_{i=1, N} \xrightarrow{\text{POD 3D}} \{\phi_n(x, y, z), a_n(t_i)\}_{n=1, N}$$




mode 5
mode 4
mode 3
mode 2
mode 1



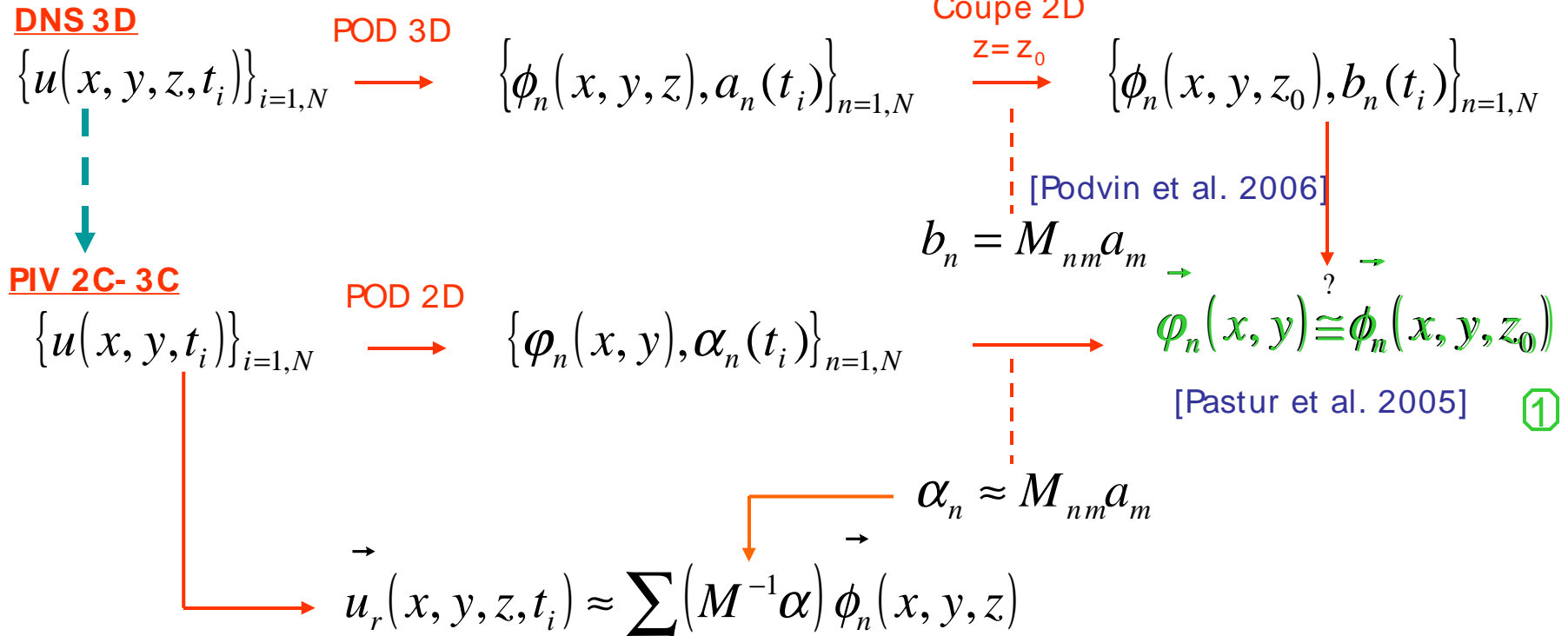
Plan de l'exposé

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

- Open cavity flow phenomenology
 - Qualitative description
 - Görtler's instability
 - Mixing layer instability
- 2D reduction of a 3D flow
 - POD 3D : full flow reconstruction
 -  Validation POD 2D / POD 3D
 - Validation POD 2D with PIV 2C
- 3D information reconstruction from 2D

Résumé de la Procédure

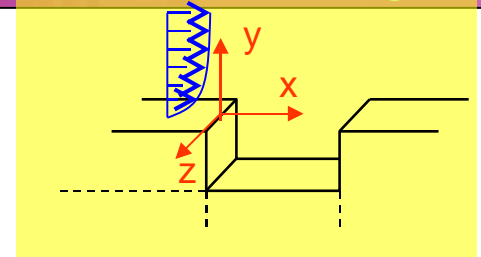
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur



- [Pastur 2005] L.R. Pastur, F. Lusseyran, Y. Fraigneau, B. Podvin, "Determining the spectral signature of spatial coherent structures in an open cavity flow", *PRE* **72**, 2005.
- [Podvin 2006] B. Podvin, Y. Fraigneau, F. Lusseyran, P. Gougat, "A reconstruction method for the flow past an open cavity", *JE* **128**, May 2006.

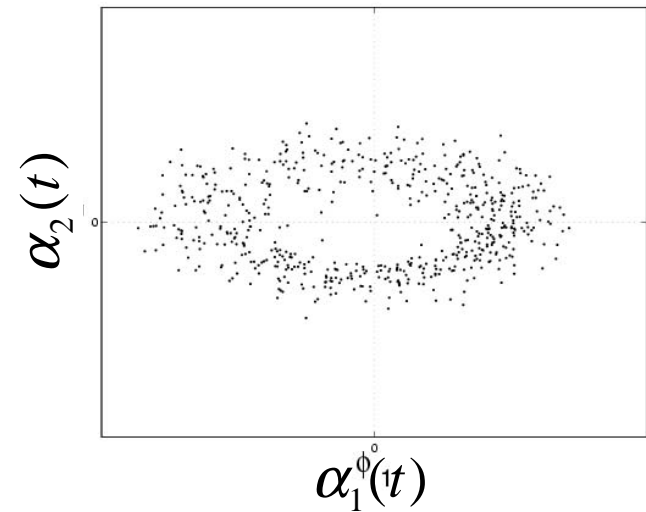
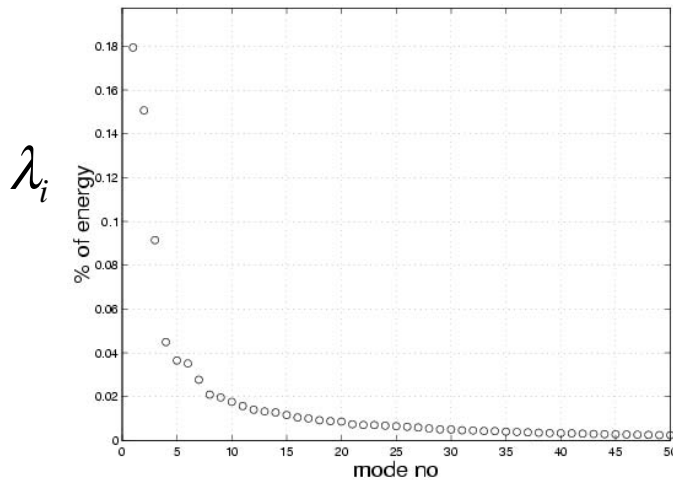
modes 2D DNS: $\varphi_n(x, y)$ (1/4)

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

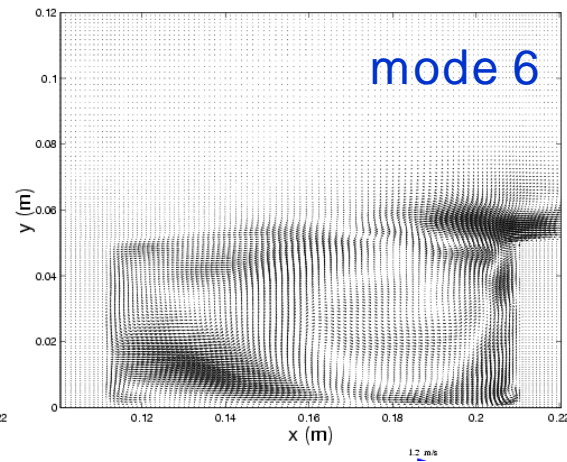
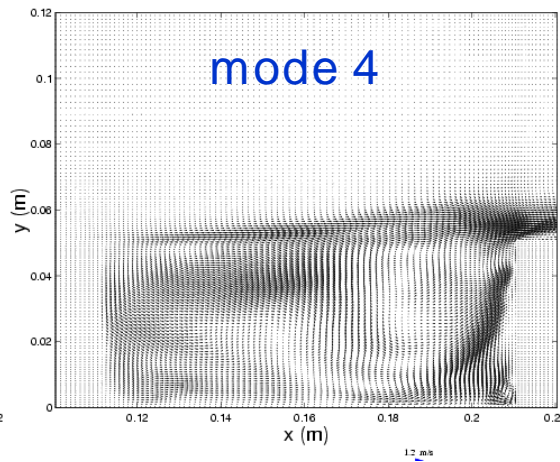
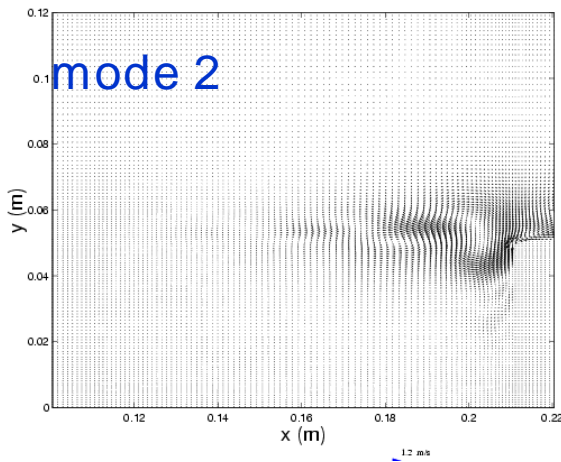
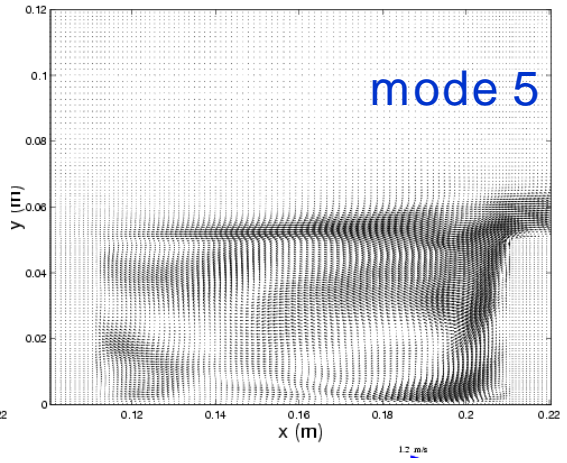
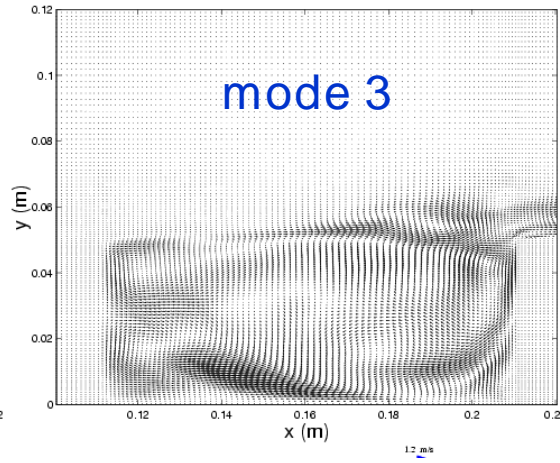
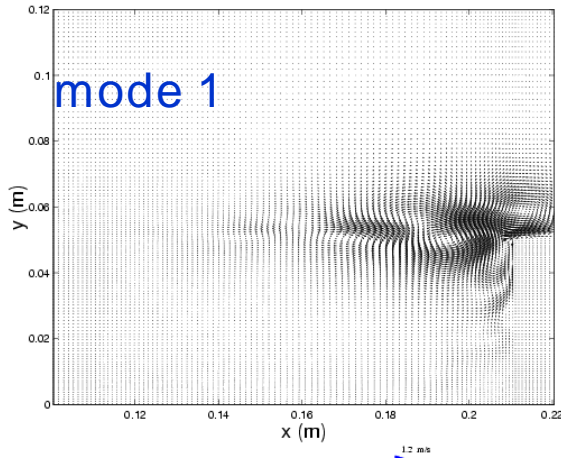


$$\{u(x, y, z = 0, t_i)\}_{i=1, N} \longrightarrow \{u(x, y, t_i)\}_{i=1, N} \xrightarrow{\text{POD 2D}} \{\varphi_n(x, y), \alpha_n(t_i)\}_{n=1, N}$$

$N = 600$



3D

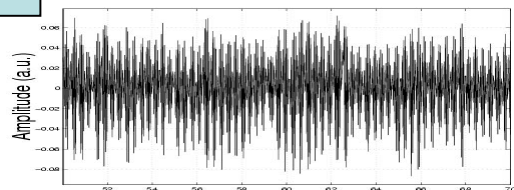


Chronos 2D : calculés à partir de

(3/4) $\phi_n(x, y, t)$

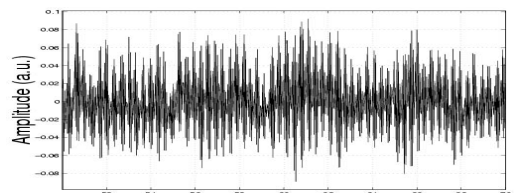
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

3D

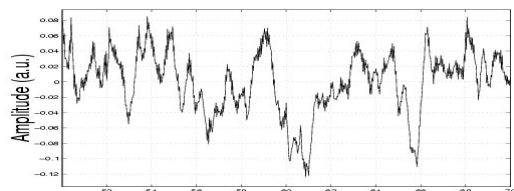


$$\alpha_n(t)$$

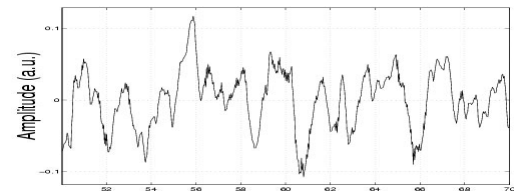
mode 1



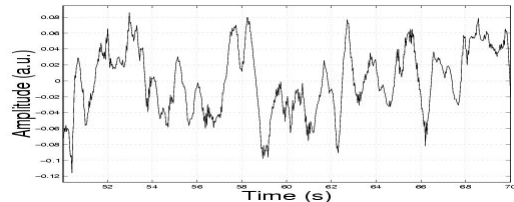
mode 2



mode 3

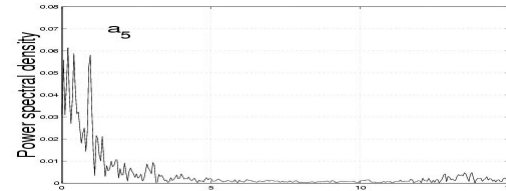
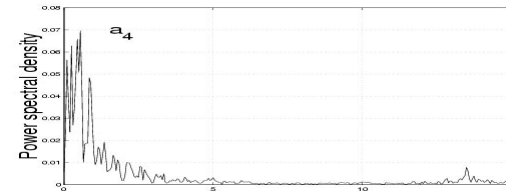
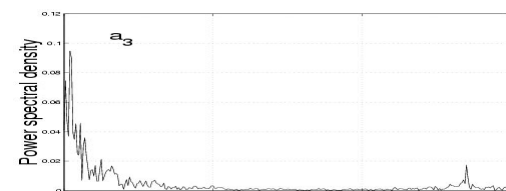
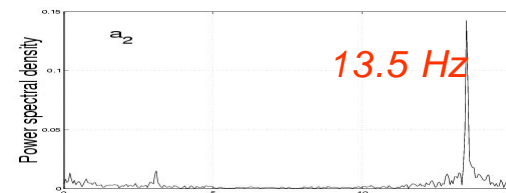
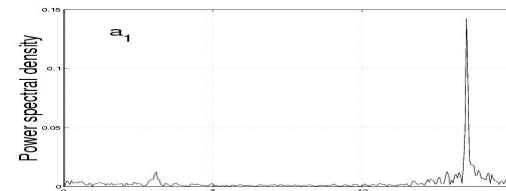


mode 4



mode 5

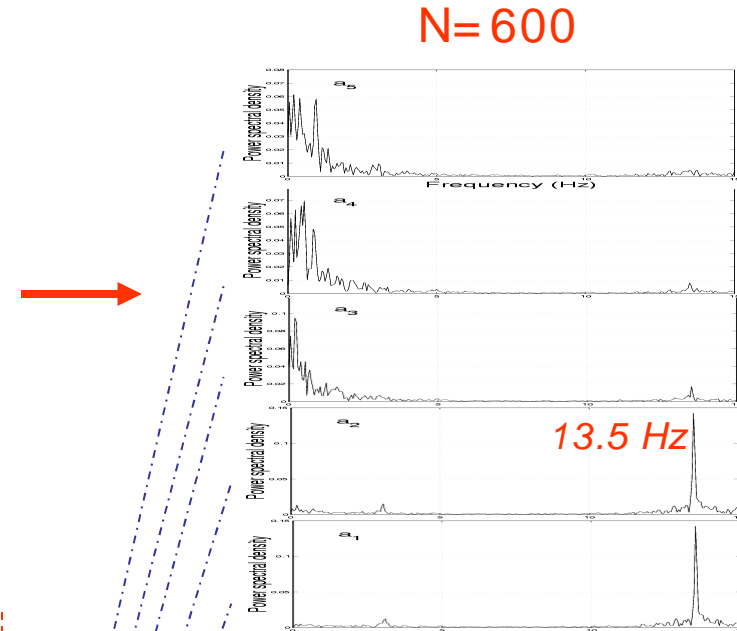
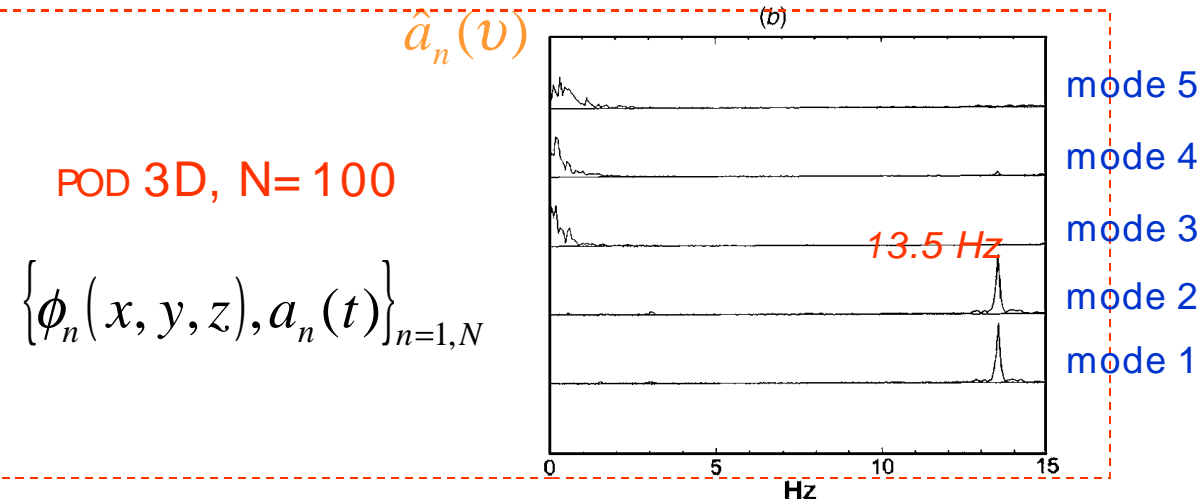
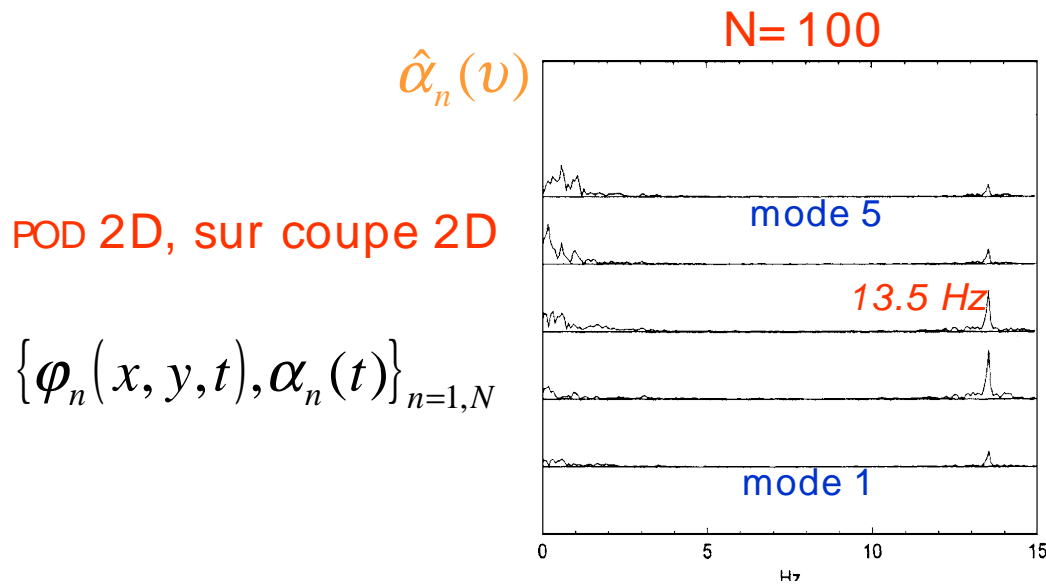
$$\hat{\alpha}_n(\nu)$$



Calcul 2D, question de convergence ...

(4/4)

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur



Plan de l'exposé

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

- Open cavity flow phenomenology
 - Qualitative description
 - Görtler's instability
 - Mixing layer instability
- 2D reduction of a 3D flow
 - POD 3D : full flow reconstruction
 - Validation POD 2D / POD 3D
 - **Validation POD 2D with PIV 2C**
- 3D information reconstruction from 2D



Plan de l'exposé

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

- Phénoménologie de l'écoulement en cavité ouverte
 - Description qualitative
 - Instabilité de Görtler
 - Instabilité de la couche de mélange
- Réduction 2D d'un écoulement fortement 3D
 - POD 3D : reconstruction de l'écoulement complet
 - Validation de la POD 2D / POD 3D
 - Validation de la POD 2D sur PIV 2C
- Reconstruction des informations 3D



Mode 2D, calculés à partir de PIV

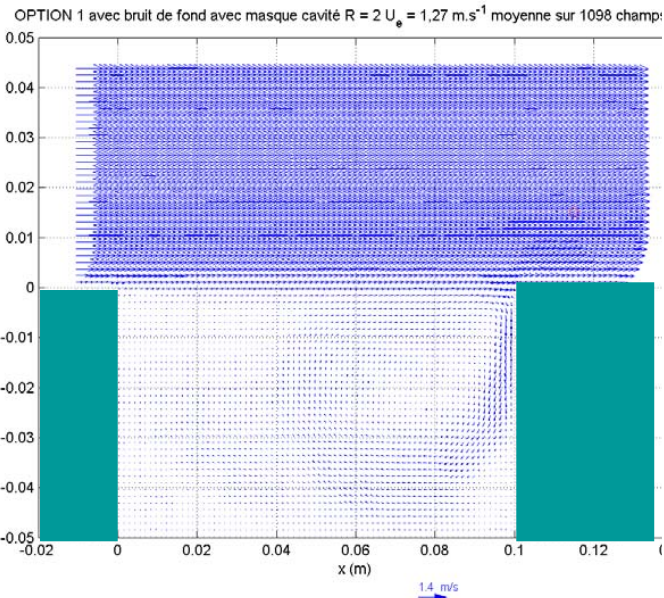
$$\{u(x, y, t_i)\}_{i=1, N}$$

- Les données: 2000 images 8 bits, 1032x768 pixels, de 4.6 μm , $f_e = 10\text{Hz}$, $\Delta t = 2122 \mu\text{s}$
- Traitement: algorithme de flot optique par programmation dynamique (G. Quénot)

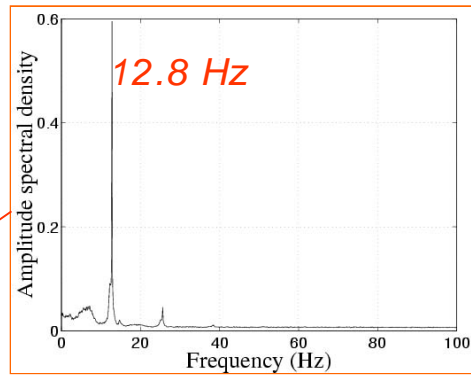
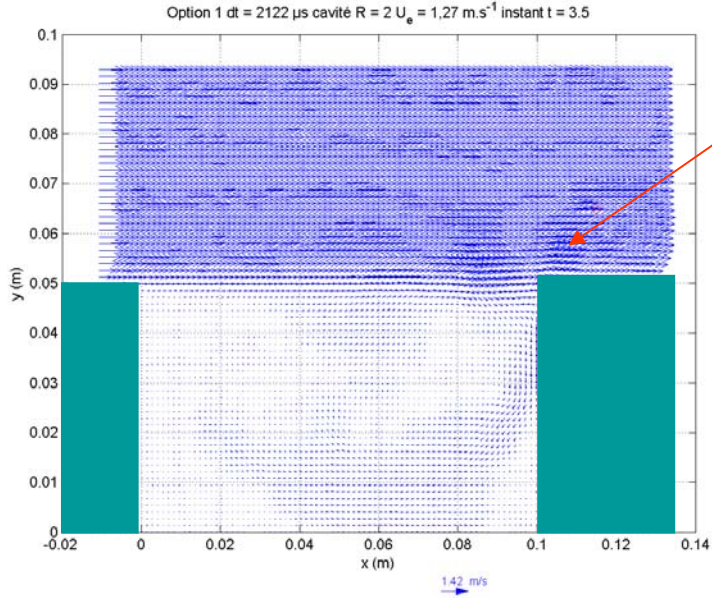
$U = 1.27 \text{ m/s}$

Spectre de puissance, d'une série temporelle enregistrée par LDV: 810^5 points, à 1500Hz.

Champ moyen sur 1098 instantanés. vecteurs: 1/15 représentés



Champ instantané vecteurs: 1/15 représentés



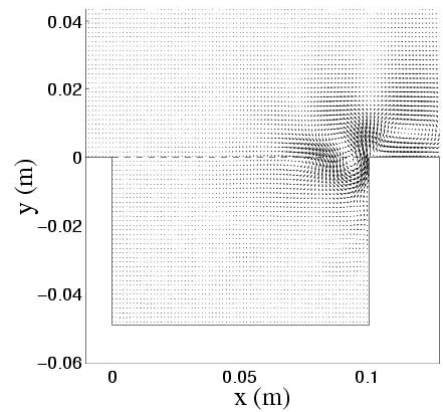
Mode 2D, calculés à partir de

$$\{u(x, y, t_i)\}_{i=1, N}$$

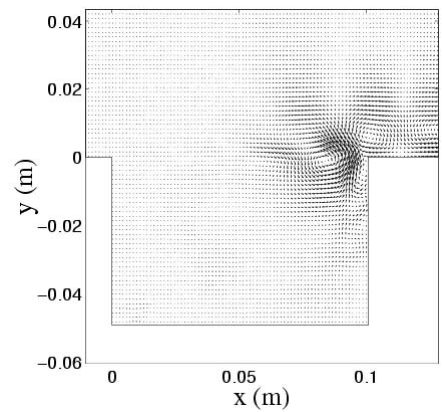
(2/3)

PIV, N= 1098

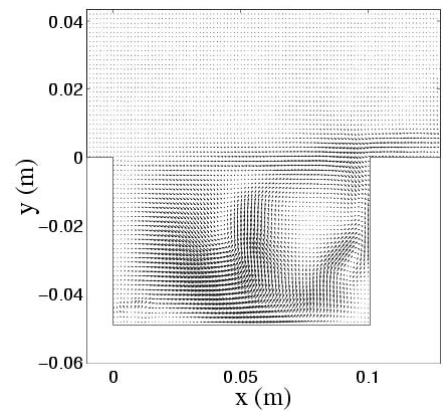
$$\varphi_n(x, y)$$



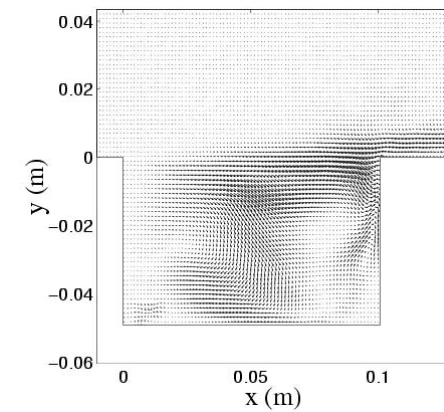
mode 1



mode 2

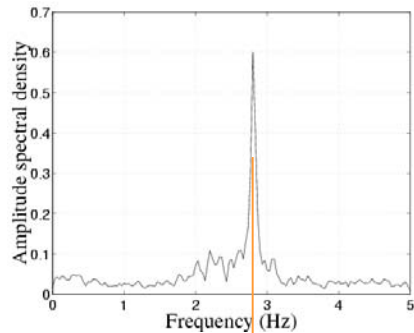
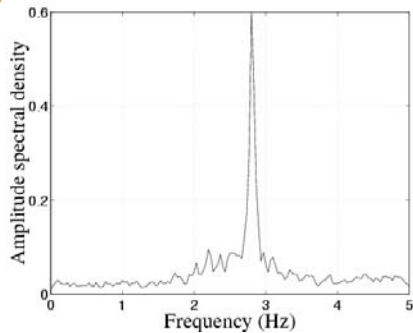


mode 3

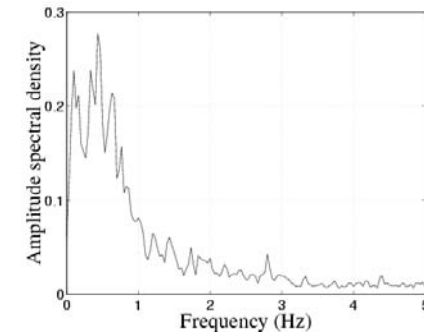
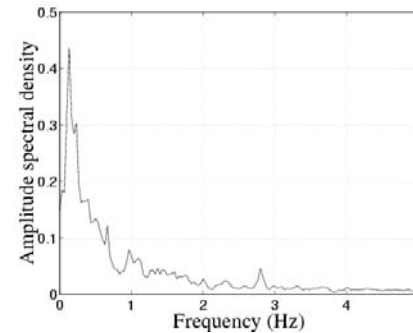


mode 4

$$\hat{\alpha}_n(\nu)$$

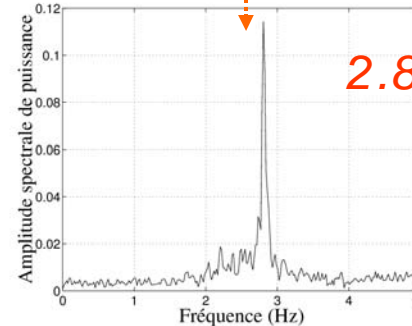
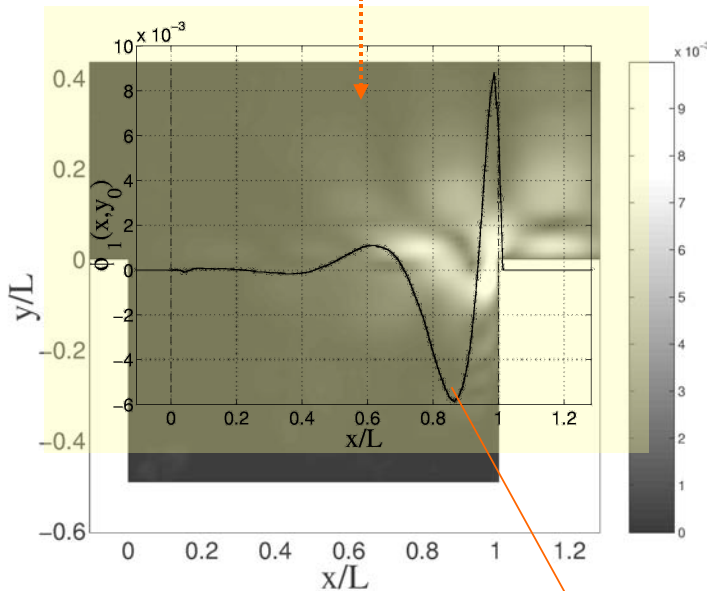


$$12.8 - 10 = 2.8 \text{ Hz}$$



POD :

$$\vec{u}(x, y, t_i) = \sum_{n=1}^N a_n(t_i) \phi_n(x, y)$$



$2.8 + 10 = 12.8 \text{ Hz}$

$$u_y(x) = A + Be^{\beta x} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \varphi\right)$$

Longueur d'onde des oscillations de la couche de cisaillement

$$U_e = 1,27 \text{ m.s}^{-1}$$

- Moyenne de phases $\rightarrow \lambda = 0.048 \pm 0.007$

$$\text{m} \quad 0.049^{+0.006}_{-0.004} \text{m}$$

- 1^{er} mode POD $\rightarrow \lambda =$

pour une couche de cisaillement en tangente hyperbolique

$$u_x(y) = \frac{U_1 + U_2}{2} + \frac{U_1 - U_2}{2} \tanh\left(\frac{y - y_0}{\delta}\right)$$

$$U_c = \frac{U_1 + U_2}{2} \approx \frac{U_e}{2} = 0.635 \text{ m.s}^{-1}$$

- Moyenne de phases $\rightarrow c = \lambda f = 0.61 \pm 0.09 \text{ m s}^{-1}$

- 1^{er} mode POD $\rightarrow c = \lambda f = 0.63^{+0.08}_{-0.05} \text{ m s}^{-1}$

Plan de l'exposé

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

- Phénoménologie de l'écoulement en cavité ouverte
 - Description qualitative
 - Instabilité de Görtler
 - Instabilité de la couche de mélange
- Réduction 2D d'un écoulement fortement 3D
 - POD 3D : reconstruction de l'écoulement complet
 - Validation de la POD 2D / POD 3D
 - Validation de la POD 2D sur PIV 2C



- Reconstruction des informations 3D

Résumé de la Procédure

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

DNS 3D

$$\{u(x, y, z, t_i)\}_{i=1, N}$$

POD 3D

$$\rightarrow \{\phi_n(x, y, z), a_n(t_i)\}_{n=1, N}$$

Coupe 2D

$$\xrightarrow{z=z_0} \{\phi_n(x, y, z_0), b_n(t_i)\}_{n=1, N}$$

[Podvin et al. 2006]

$$b_n = M_{nm} a_m$$

PIV 2C- 3C

$$\{u(x, y, t_i)\}_{i=1, N}$$

POD 2D

$$\rightarrow \{\phi_n(x, y), \alpha_n(t_i)\}_{n=1, N}$$

$$\rightarrow \phi_n(x, y) \stackrel{?}{\cong} \phi_n(x, y, z_0)$$

[Pastur et al. 2005]

$$\alpha_n \approx M_{nm} a_m$$

$$\vec{u}_r(x, y, z, t_i) \approx \sum (M^{-1} \alpha) \phi_n(x, y, z)$$

②

• [Pastur 2005] L.R. Pastur, F. Lusseyran, Y. Fraigneau, B. Podvin, "Determining the spectral signature of spatial coherent structures in an open cavity flow", *PRE* **72**, 2005.

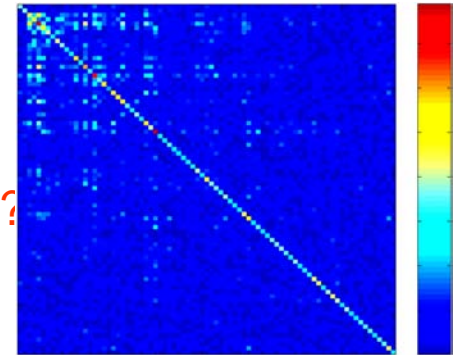
• [Podvin 2006] B. Podvin, Y. Fraigneau, F. Lusseyran, P. Gougat, "A reconstruction method for the flow past an open cavity", *JE* **128**, May 2006.

Reconstruction des champs de vitesse 3D

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

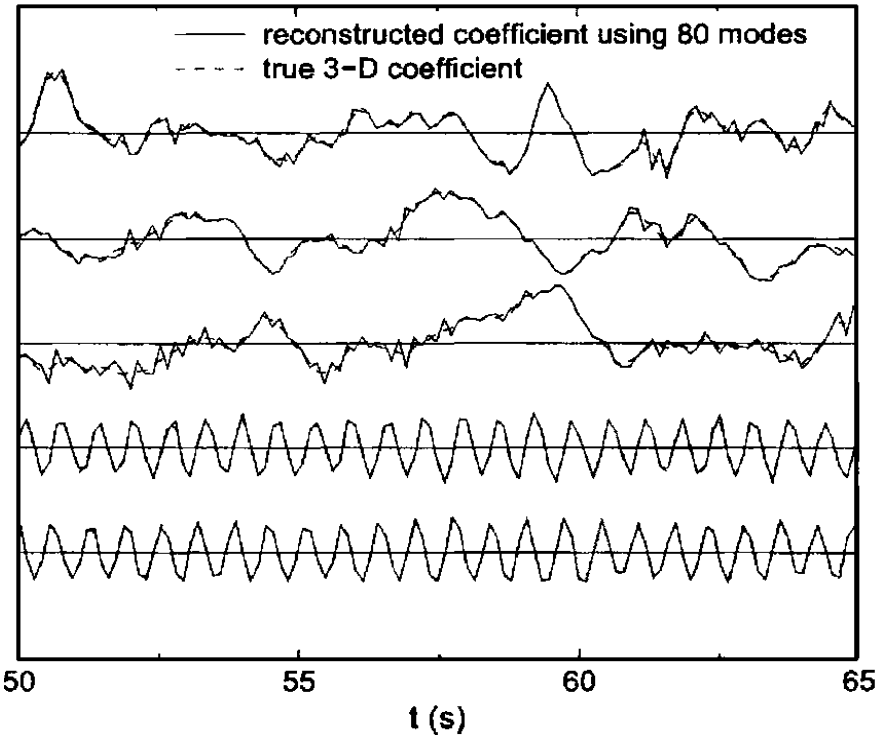
$$\vec{u}_r(x, y, z, t) = \sum_1^N (M^{-1} \alpha) \phi_n(x, y, z)$$

M = ?

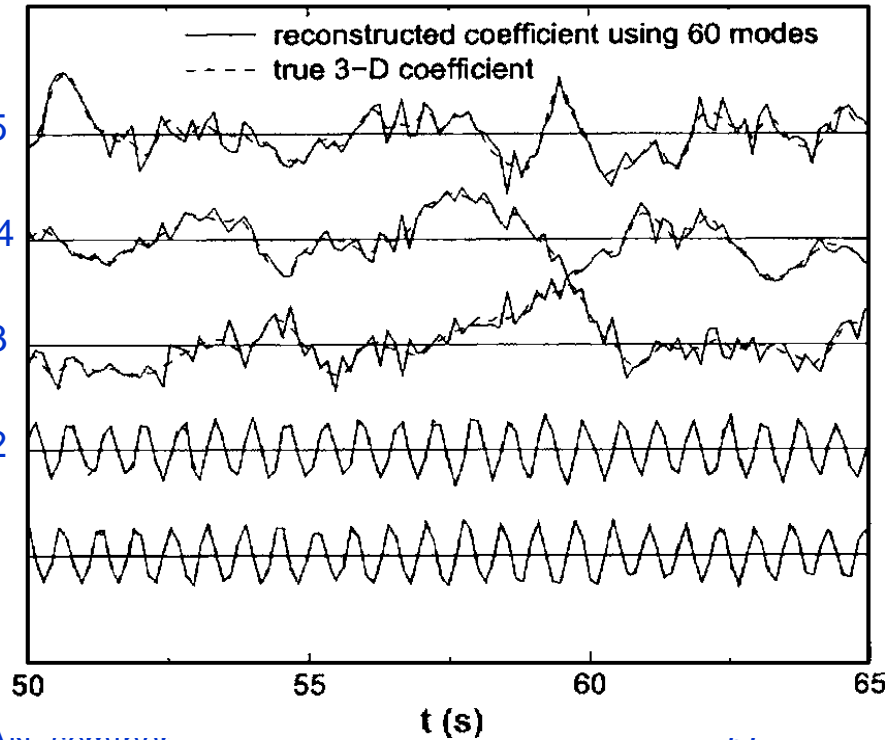


N = 80

N = 60



mode 5
mode 4
mode 3
mode 2
mode 1





Conclusion

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

« *The peril of petascale : emerging challenges in large scale computational sciences* », John Clyne, NCAR, Boulder

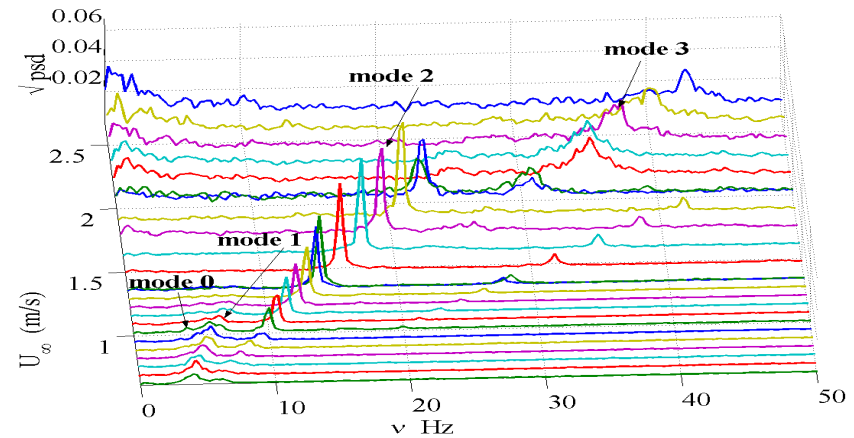
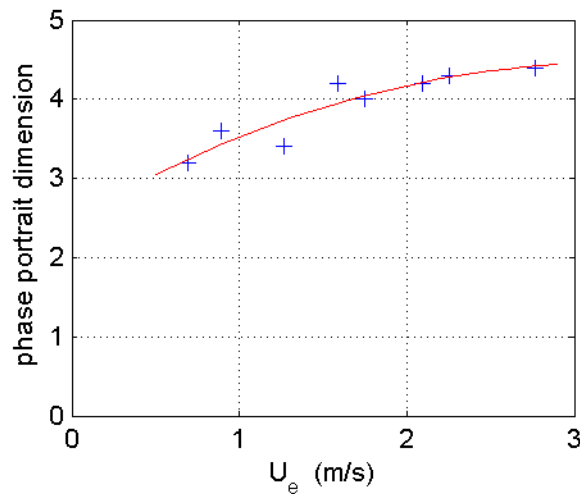
Dynamics reduction

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur

Mesure de la dimension de corrélation (Procaccia 1988), sur série LDV filtrage non-linéaire déterministe (T. Schreiber PRE 47, 1993):

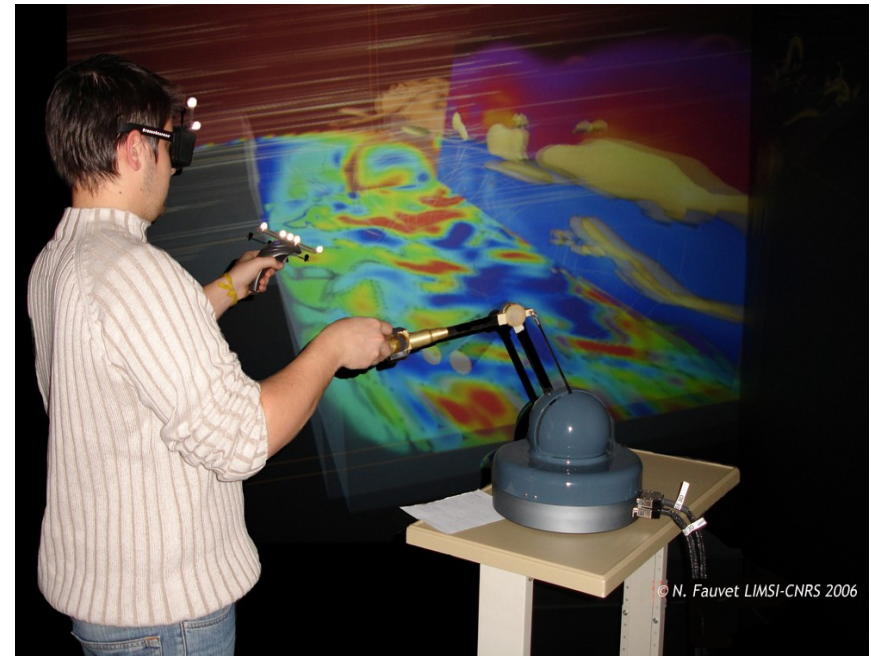
$$d_c = \lim_{N \rightarrow \infty} \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log_2 C(r)}{\log_2 r}$$

$$C(r) = \frac{1}{N_{ref}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_{ref}} \sum_{j=1}^N H(r - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|)$$



LIMSI- VENISE VR team

- Work on clustering, multimodality, metaphors, AR
- Rendering and exploration of massive datasets using multiple modalities in VR.
- User is immersed in CAVE- like facility

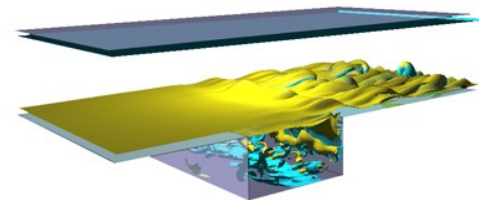


multimodal outputs:
visual, haptics, sound



Real-time inputs: voice,
gesture, body tracking, 3D

pointer



VR simulation

Virtual Reality : WHAT FOR ??

Not just a fancy high-tech “toy”: perform some useful tasks. In our case: **better understanding** of phenomena, new findings.

CORSAIRE project: investigate how to combine output modalities in two scientific tasks: CFD and bioinformatics (molecular docking)

Participants: LIMSI (leader), IRCAM- CNRS, EBG- INSERM, LEI- Paris 5, Haption S.A.
funded by ANR (National French Funding Agency), started 2006 (3 years)

CFD: huge field, many different experimental and simulation settings.

« Typical » test case: simulation of cavity

