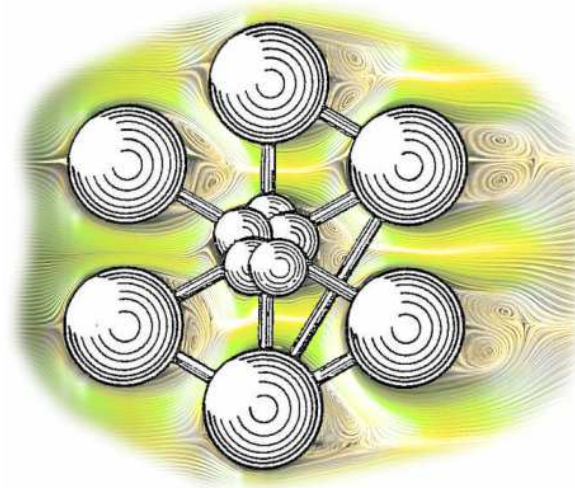

Club Cast3m 2011

cea

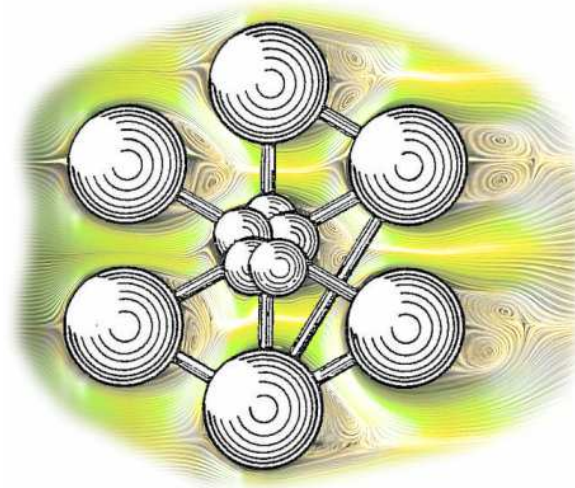


Modélisation de la turbulence en vue du calcul
des forces induites sur une structure immergée

J. Cardolaccia
CEA/D2MS/SEMT/DYN

Club Cast3m 2011

cea

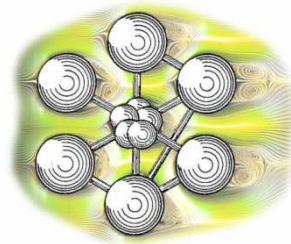


Modélisation de la turbulence en vue du calcul
des forces induites sur une structure immergée

J. Cardolaccia
CEA/D2MS/SEMT/DYN

Club Cast3m 2011

cea



Modélisation de la turbulence en vue du calcul des forces induites sur une structure immergée

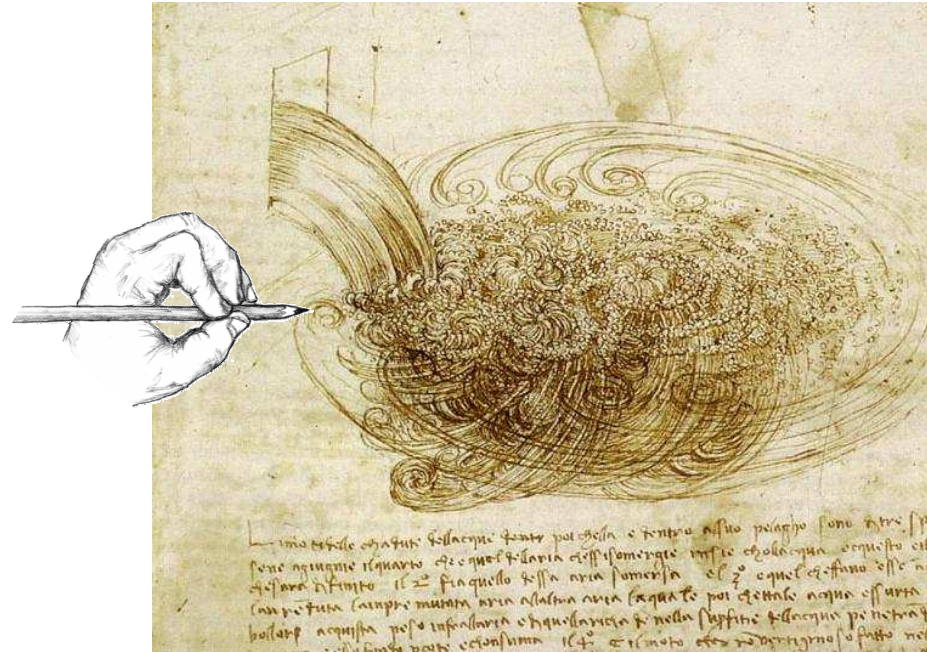
➔ Notions sur la turbulence et sa modélisation

Calcul des forces exercées sur une structure fixe

Quelques perspectives

Notions sur la turbulence (1/4)

cea

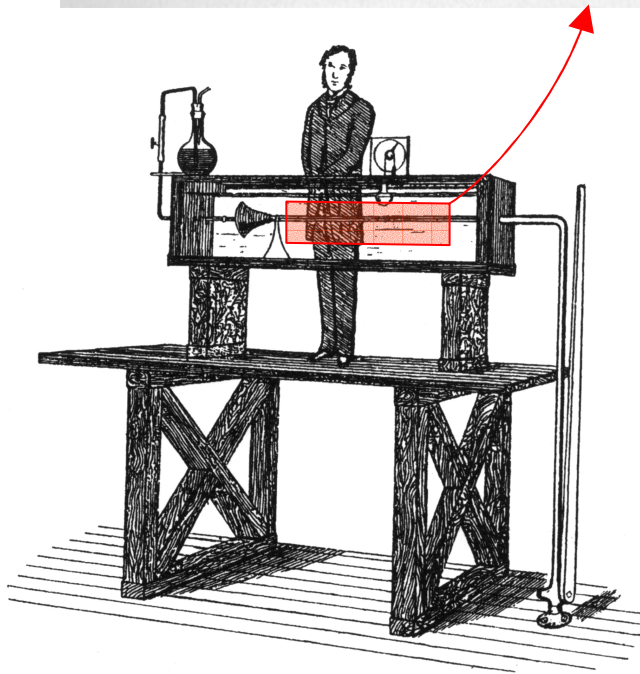
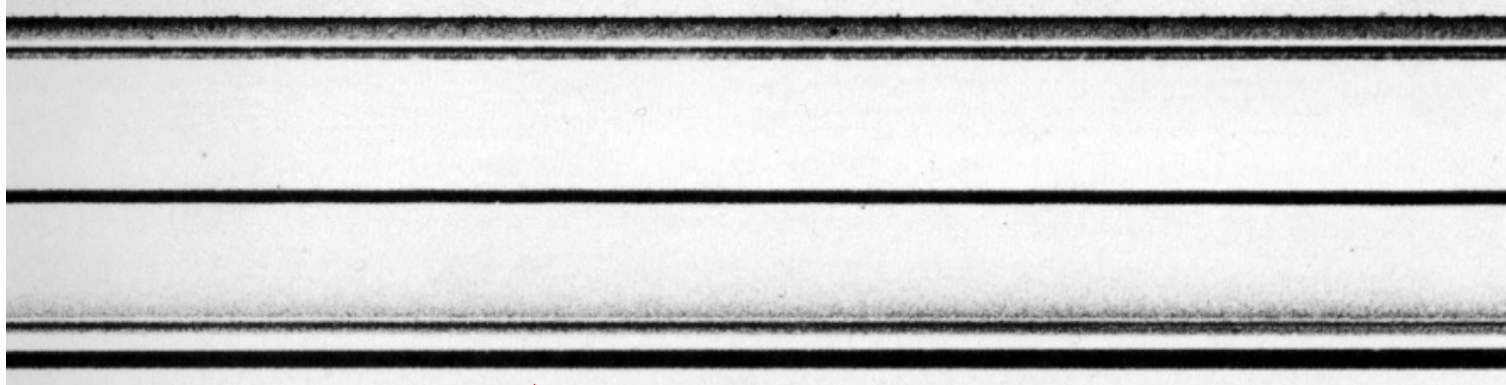


“ Observe les mouvements à la surface de l'eau, comme ils rappellent une chevelure, qui bouge du fait de son poids mais aussi de la direction de ses boucles. De la même manière, l'eau se déplace en boucles tourbillonnantes, une partie étant due au courant principal, l'autre au hasard et aux circulations inverses. ”

Léonard de Vinci (1452 – 1519)

Notions sur la turbulence (2/4)

cea



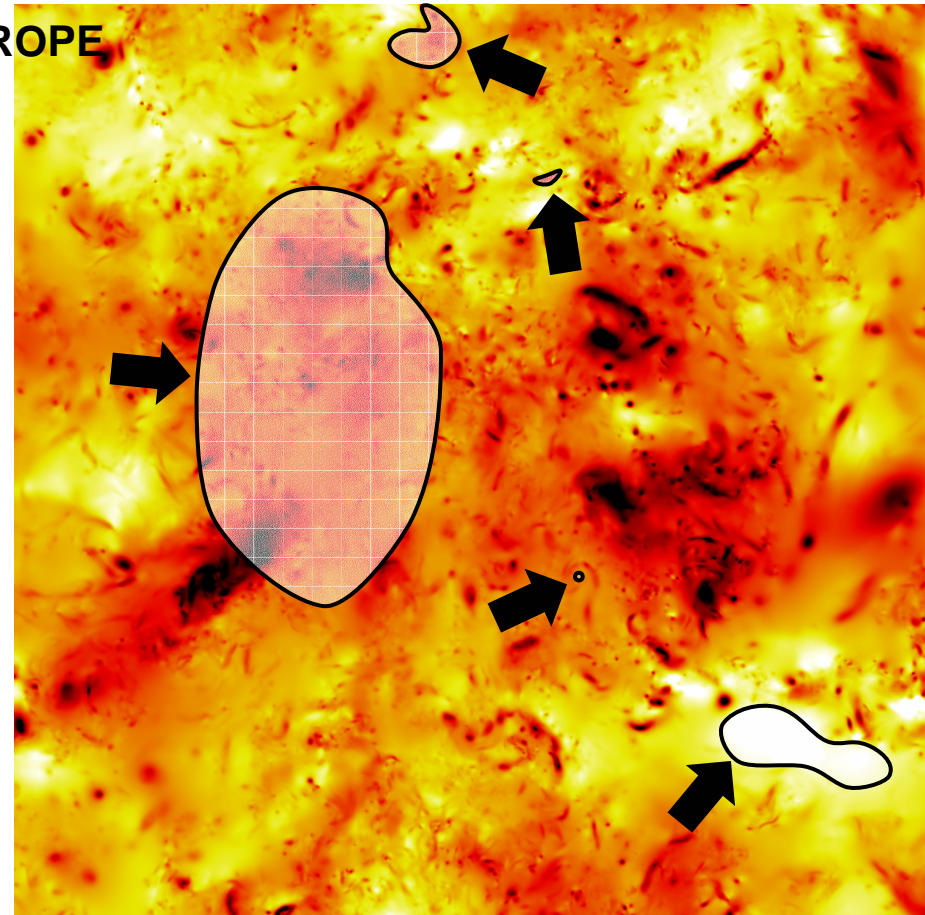
Expérience d'Osborne Reynolds
(1883)

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

Notions sur la turbulence (3/4)

TURBULENCE HOMOGENÈNE ISOTROPE
(champ de pression instantané)

cea



Théorie statistique d'Andrei Kolmogorov
(1941)

Notions sur la turbulence (4/4)

Pour résumer, la turbulence :

- Constitue une instabilité fluide apparaissant à grands nombres de Reynolds
- Se caractérise par une large gamme d'échelles spatio-temporelles
- S'appréhende comme la somme d'un champ moyen et de fluctuations aléatoires
- **Est une problématique résistant aux physiciens, aux mathématiciens, aux numériciens**



Les équations de Navier-Stokes en incompressible

(écriture adimensionnelle)

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad i \in \{1, 2, 3\} \end{cases}$$

Toute la turbulence est "incluse" dans ces équations

Modélisation de la turbulence (1/2)

Comment calculer un écoulement turbulent ?



On écrit les équations de Navier-Stokes

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}$$

Modélisation de la turbulence (1/2)

Comment calculer un écoulement turbulent ?



On écrit les équations de Navier-Stokes, puis :

➔ Application d'un **filtre**

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}$$

Modélisation de la turbulence (1/2)

Comment calculer un écoulement turbulent ?



On écrit les équations de Navier-Stokes, puis :

➔ Application d'un **filtre linéaire**

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial t}} + \overline{\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}} = -\frac{1}{\rho} \overline{\frac{\partial p}{\partial x_i}} + \nu \overline{\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}}$$

Modélisation de la turbulence (1/2)

Comment calculer un écoulement turbulent ?



On écrit les équations de Navier-Stokes, puis :

➔ Application d'un **filtre linéaire commutant avec la dérivation**

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2}$$

Comment calculer un écoulement turbulent ?



On écrit les équations de Navier-Stokes, puis :

➔ Application d'un **filtre linéaire commutant avec la dérivation**

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}^*}{\partial x_j}$$

➔ Apparition du tenseur des contraintes turbulentes :

$$\tau_{ij}^* = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$$

Comment calculer un écoulement turbulent ?



On écrit les équations de Navier-Stokes, puis :

➔ Application d'un **filtre linéaire commutant avec la dérivation**

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}^*}{\partial x_j}$$

➔ Apparition du tenseur des contraintes turbulentes :

$$\tau_{ij}^* = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{\nu_t}{\nu} \tau_{ij}$$

Comment calculer un écoulement turbulent ?



On écrit les équations de Navier-Stokes, puis :

➔ Application d'un **filtre linéaire commutant avec la dérivation**

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2}$$

➔ Apparition du tenseur des contraintes turbulentes :

$$\tau_{ij}^* = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{\nu_t}{\nu} \tau_{ij}$$

Modélisation de la turbulence (2/2)

Comment calculer un écoulement turbulent ?

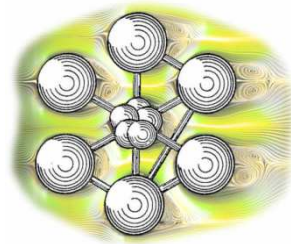


Implémentation dans Cast3m du **modèle SPAL**
(Spalart-Allmaras) à une équation de transport :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \tilde{v} &= \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \left((\nu + \tilde{v}) \vec{\nabla} \tilde{v} \right) + \frac{C_{b2}}{\sigma} |\vec{\nabla} \tilde{v}|^2 \\ &+ C_{b1} \tilde{S} \tilde{v} \\ &- C_{w1} f_w \left(\frac{\tilde{v}}{y} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\nu_t = f_{v1} \tilde{v}$$

Club Cast3m 2011



Modélisation de la turbulence en vue du calcul des forces induites sur une structure immergée

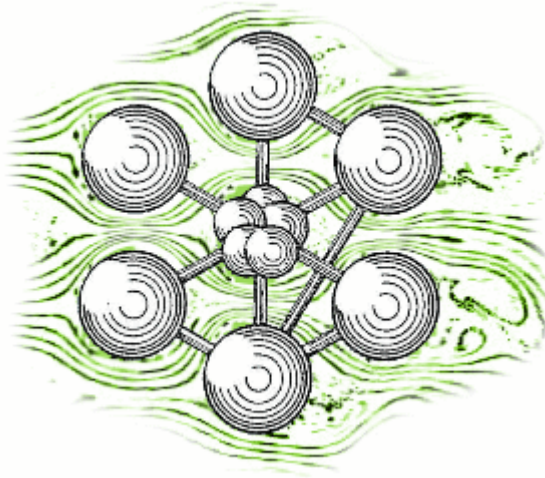
Notions sur la turbulence et sa modélisation

➔ Calcul des forces exercées sur une structure fixe

Quelques perspectives

Contexte industriel (1/2)

Pourquoi calculer des écoulements autour de tubes ?



Vis-à-vis de la structure, le fluide :

- agit comme une source d'excitation vibratoire
- modifie ses caractéristiques dynamiques apparentes (couplage)

**➔ Pour déterminer la réponse en déplacement,
il faut connaître l'écoulement du liquide**

Contexte industriel (2/2)

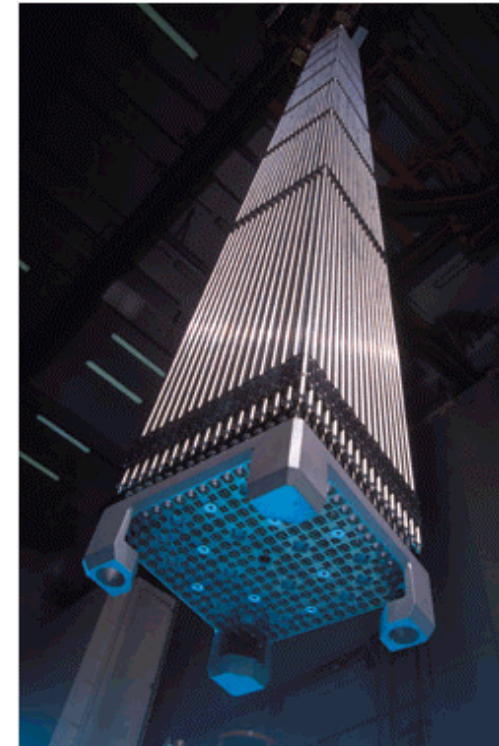
Pourquoi calculer des écoulements autour de tubes ?



En ce qui nous concerne, les applications se trouvent dans le domaine nucléaire :



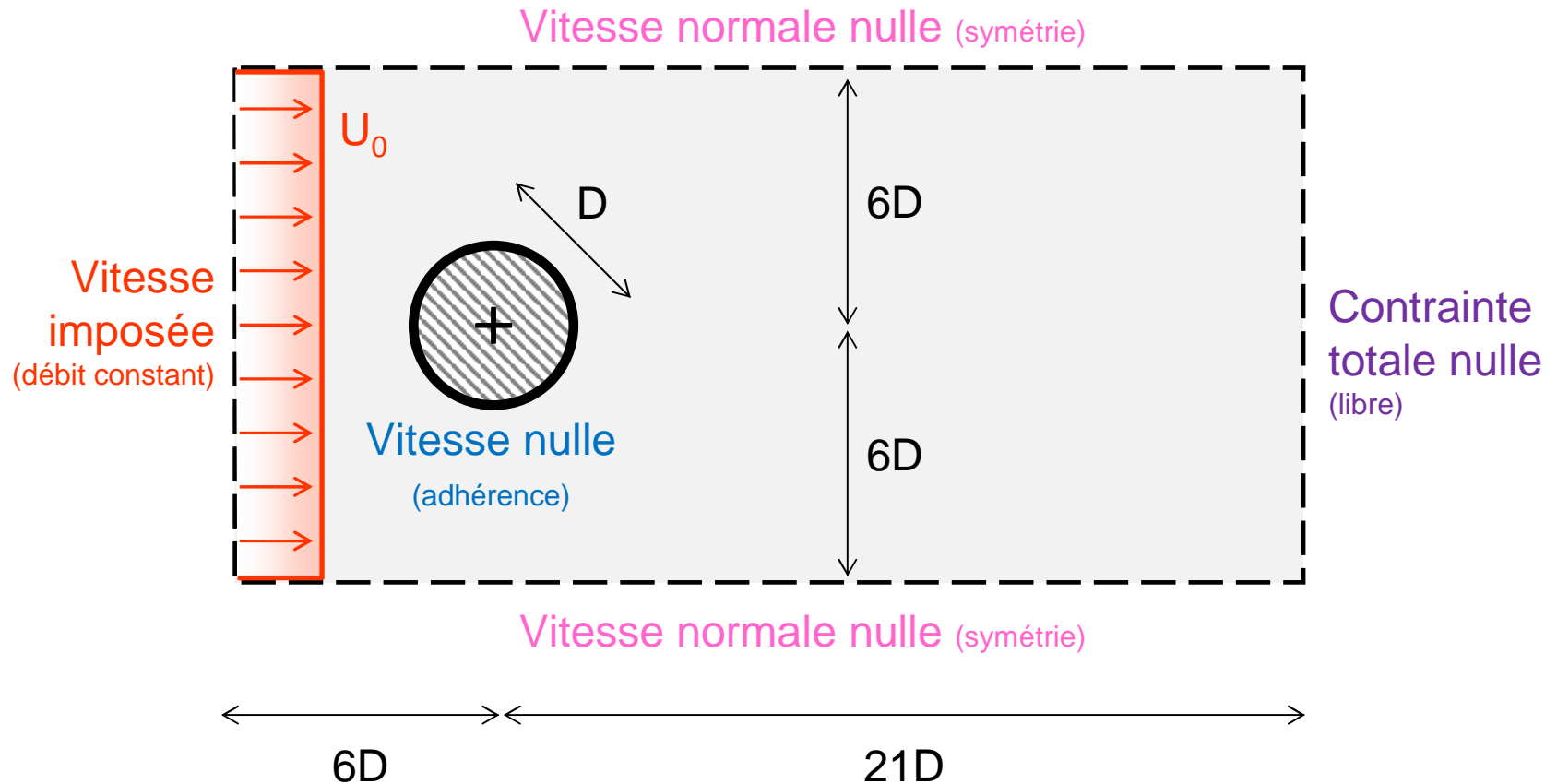
Tubes de Générateurs de Vapeur



Assemblages de crayons combustibles

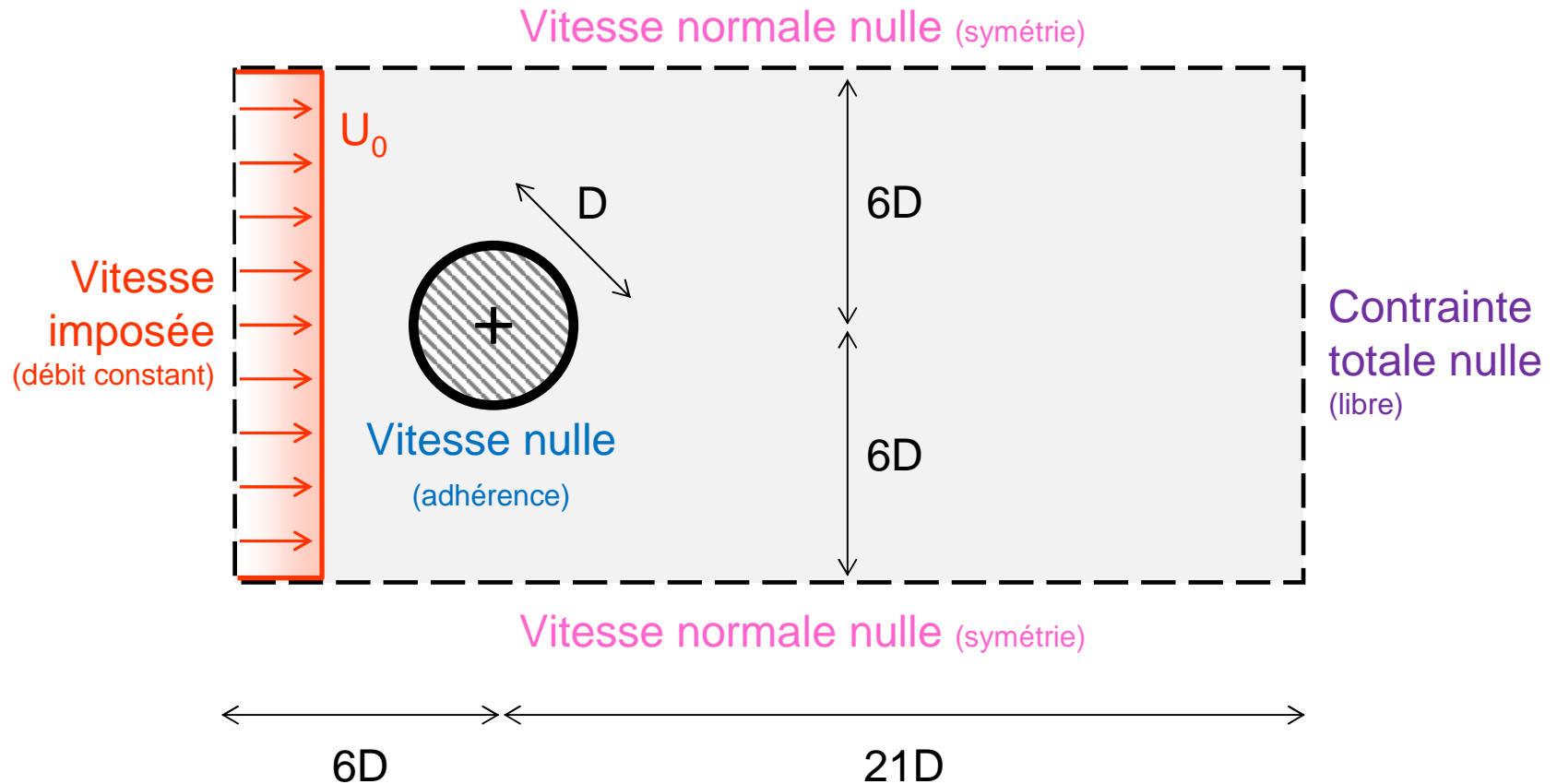
Simulation pour un tube seul (1/5)

Présentation du calcul



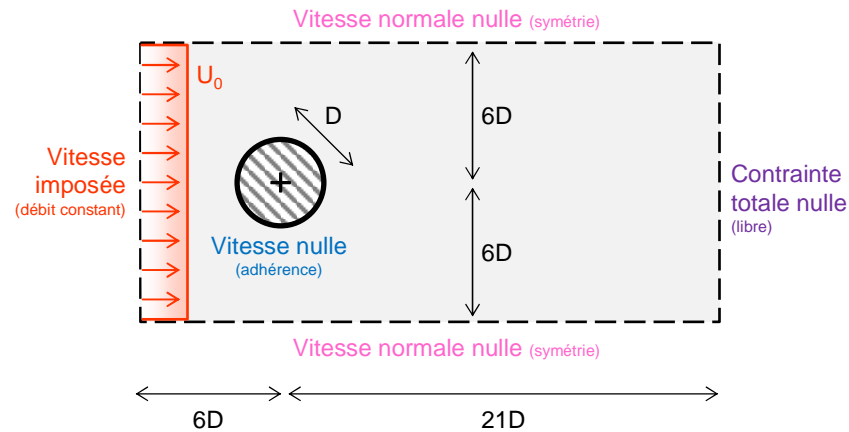
Simulation pour un tube seul (1/5)

Présentation du calcul



Simulation pour un tube seul (1/5)

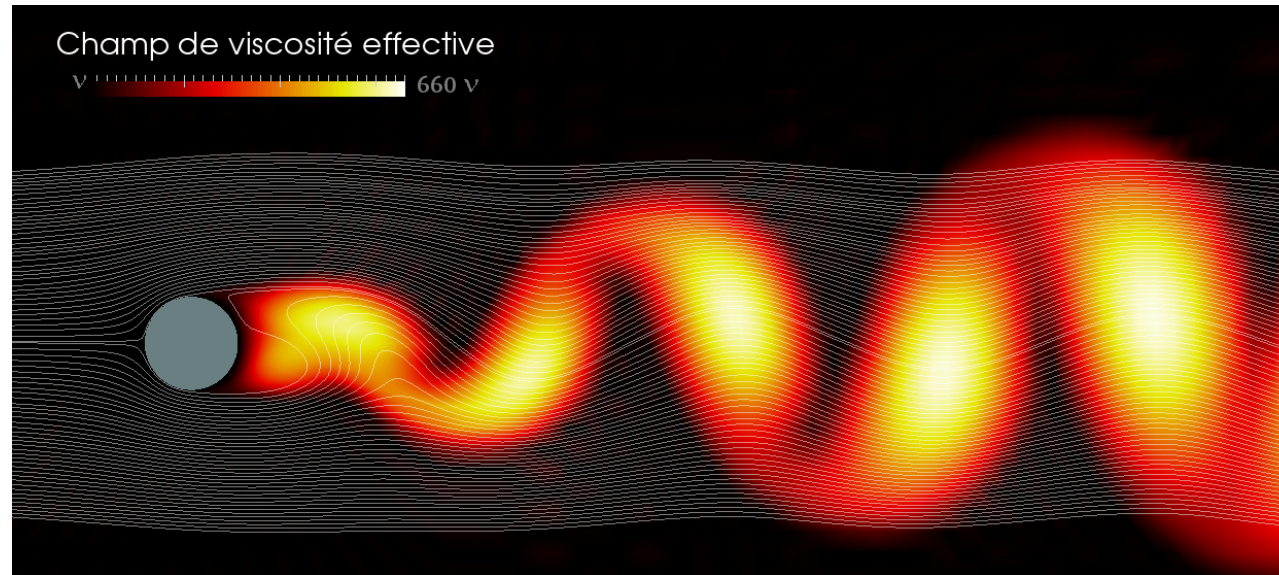
Présentation du calcul



Nombre de Reynolds :	$Re = \frac{U_0 D}{\nu} = 24000$
Maillage :	23600 nœuds (éléments QUAF)
Pas de temps :	$\Delta t = 2 \text{ ms}$ (CFL ≈ 1)
Durée simulée :	Transitoire + 130 périodes
Durée CPU :	Environ 1 mois (1 cœur)

Simulation pour un tube seul (2/5)

Résultats : fréquence des oscillations



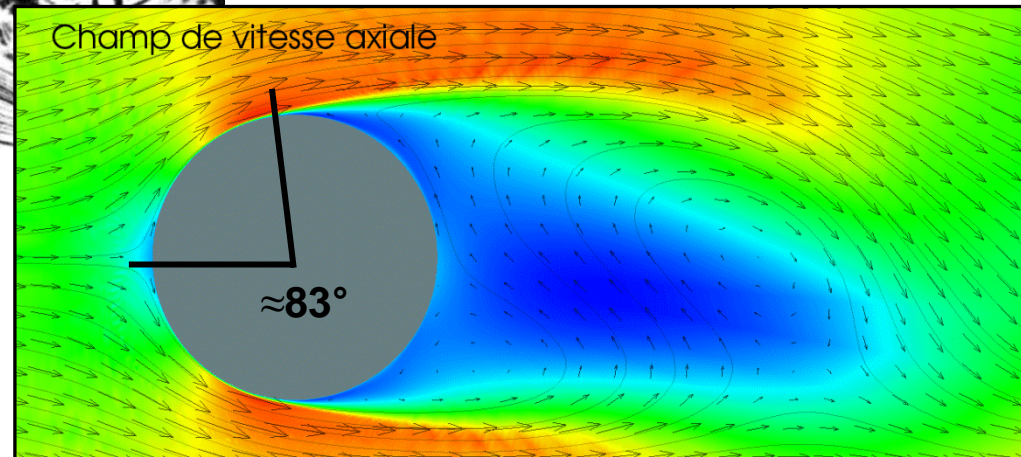
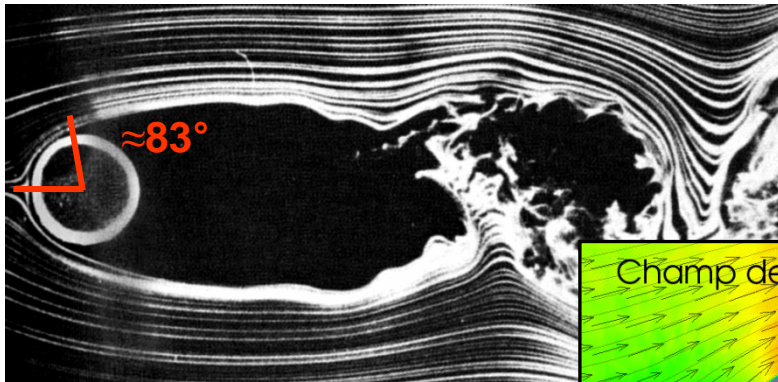
Nombre de Strouhal : $St = \frac{fD}{U_0}$

Calcul Cast3m	0,207
Expérience [1]	0,206
Corrélation [2]	0,192

Simulation pour un tube seul (3/5)

Résultats : angle de décollement

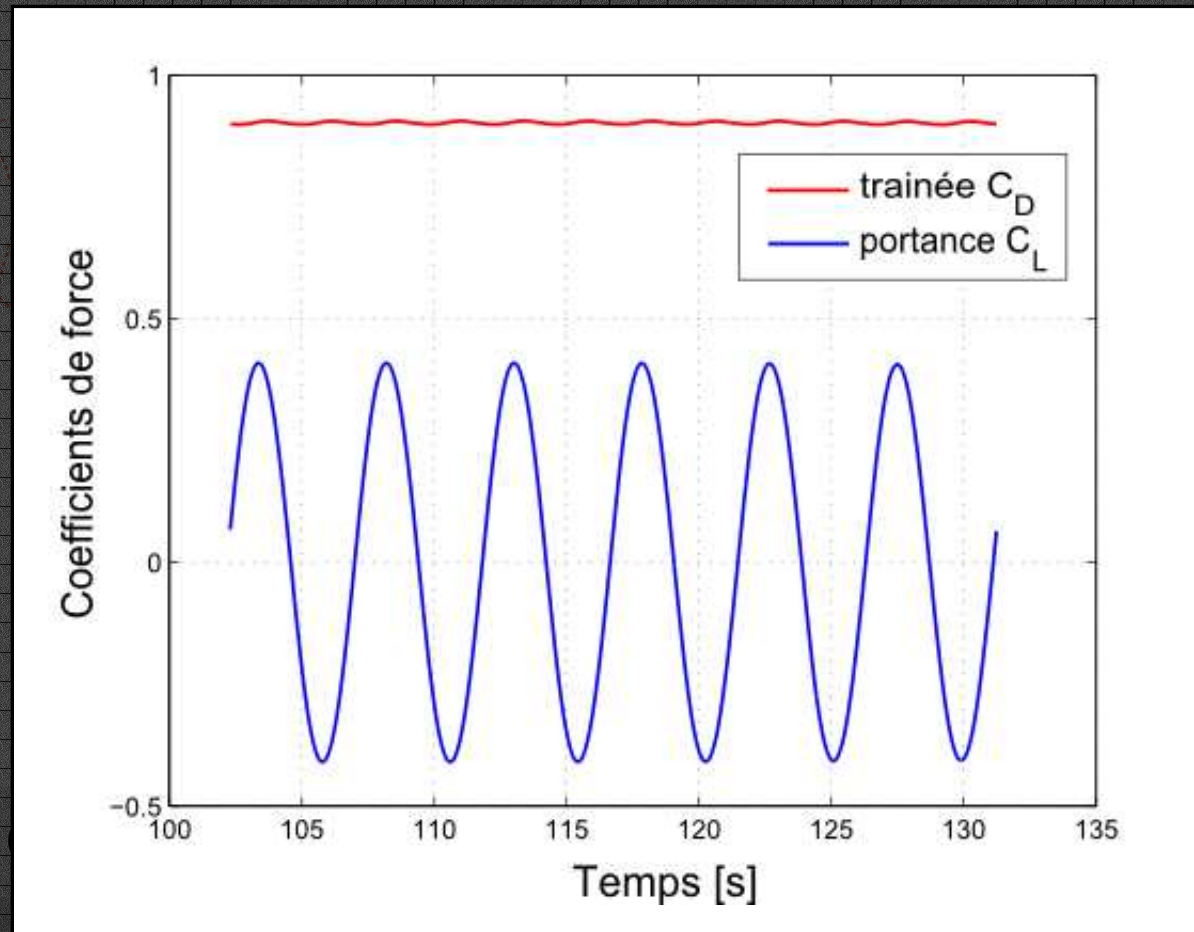
cea



Calcul Cast3m	83°
Expérience [3]	83°
Corrélation [4]	79,4

Simulation pour un tube seul (4/5)

Résultats : coefficients de forces turbulentes



$$C_p(\theta) \sin(\theta) d\theta$$

RMS

0,290

0,4

Calcul

Expériences [1][5]

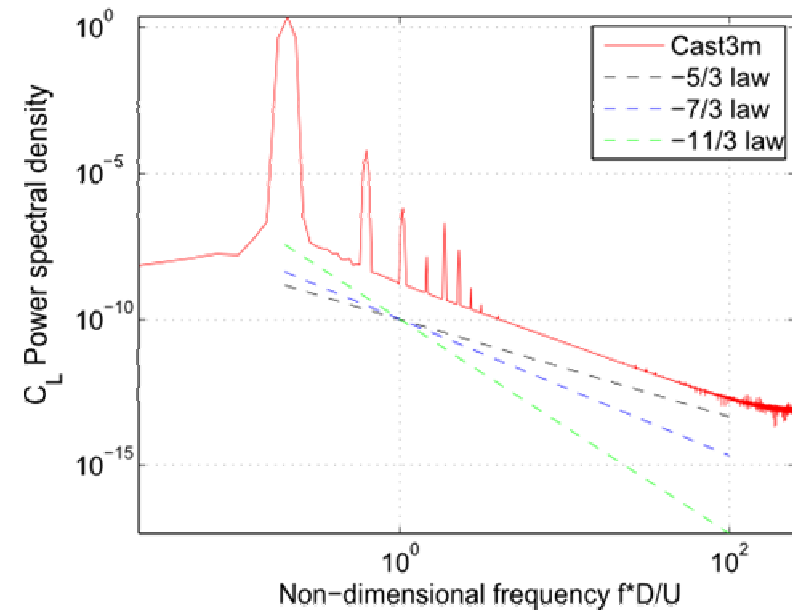
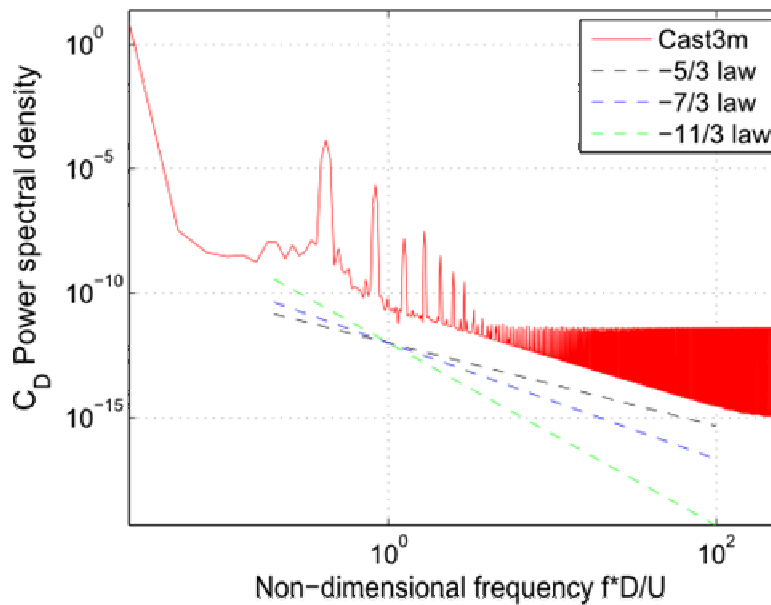
1,2

0,1

0

Simulation pour un tube seul (5/5)

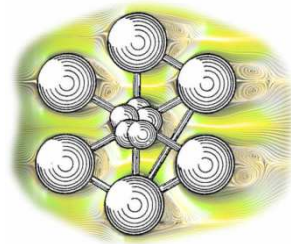
Résultats : spectres de forces turbulentes



➡ Pente en $-7/3$, conforme à la théorie

➡ MAIS niveaux spectraux très faibles

Club Cast3m 2011



Modélisation de la turbulence en vue du calcul des forces induites sur une structure immergée

Notions sur la turbulence et sa modélisation

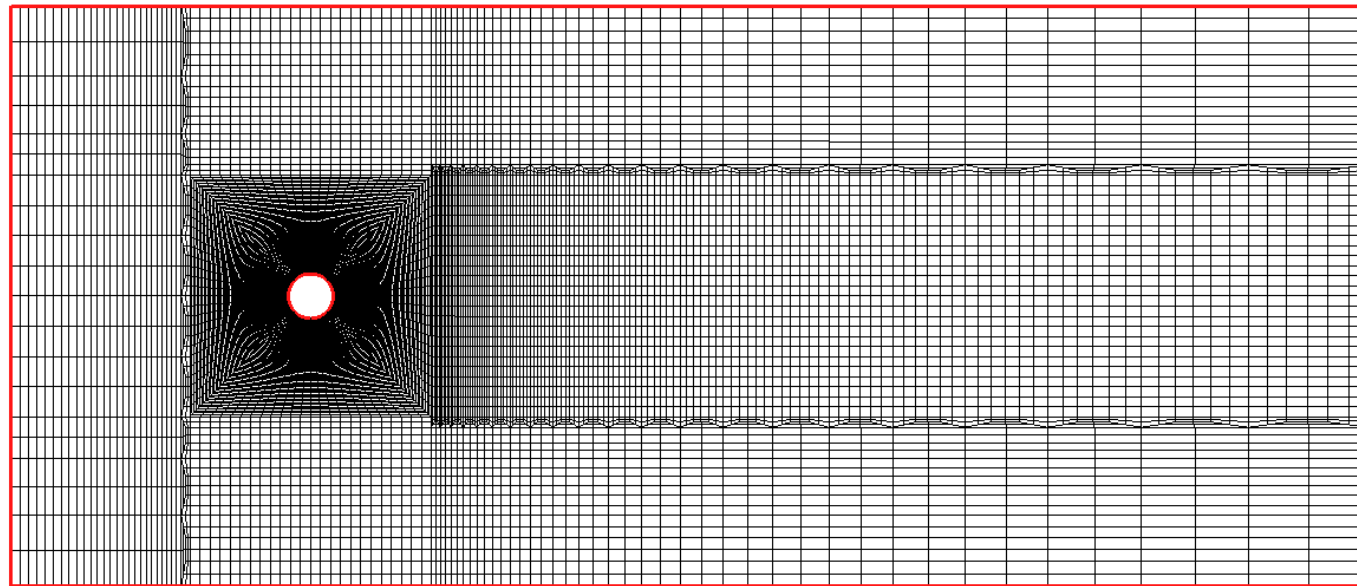
Calcul des forces exercées sur une structure fixe

➔ Quelques perspectives

Perspectives (1/2)

Utilisation de maillages mobiles (ALE)

cea

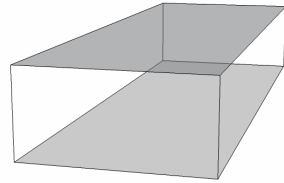


➔ Simulation complète du **couplage**
entre fluide et structure

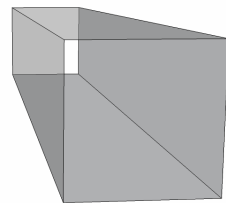
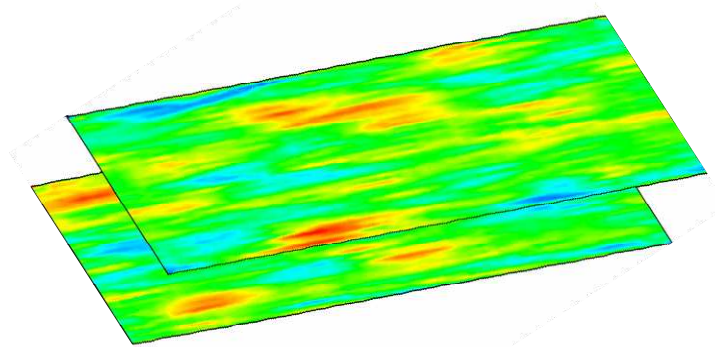
Perspectives (2/2)

Modélisation avancée de la turbulence

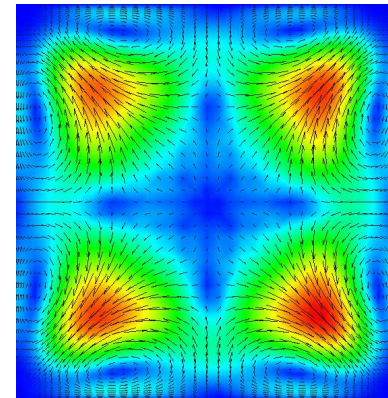
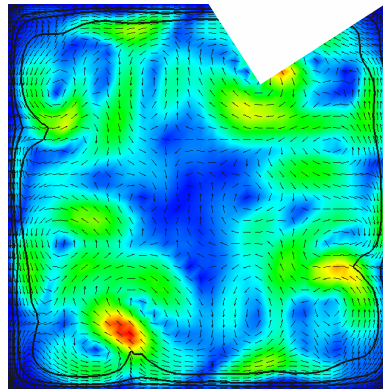
cea



Canal plan



Canal carré



➔ Méthodes plus coûteuses mais plus riches en contenu
(images ci-dessus : tentatives de calculs LES dans Cast3m)

Références et remerciements

➔ Réalisation des calculs : **Edouard Michta**



➔ Illustrations :

- Milton Van Dyke, *An Album of Fluid Motion*, The Parabolic Press
- DNS de « Giorgios » (slide 5) : <http://hydrodynamic-turbulence.blogspot.com/>

➔ Articles utilisés pour la validation :

- [1] F. Bouak and J. Lemay. *Passive control of aerodynamic forces acting on a circular cylinder*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 16 :pp. 112-121, 1998.
- [2] C. Norberg. *Fluctuating lift on a circular cylinder : review and new measurements*. *Journal of Fluid and Structures*, 17 :pp. 57-96, 2003.
- [3] L. Labraga, N. Bourabaa, and T. Berkah. *Wall shear stress from a rotating cylinder in cross flow using the electrochemical technique*. *Experiments in Fluids*, 33 :pp. 488-496, 2002.
- [4] C. Dalton. *Fundamentals of vortex-induced vibration*. University of Houston.
- [5] C. Wieselsberger. *Neuere feststellungen über die gesetze des flüssigkeits und luftwiderstand*. *Physikalische Zeitschrift*, 22 :pp. 321-328, 1921.