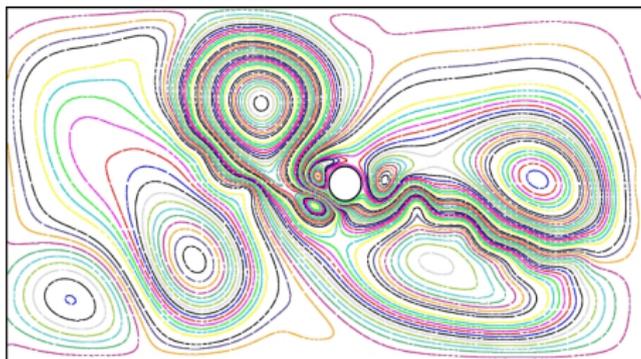


Etude numérique et physique de l'interaction entre un fluide et un cylindre oscillant

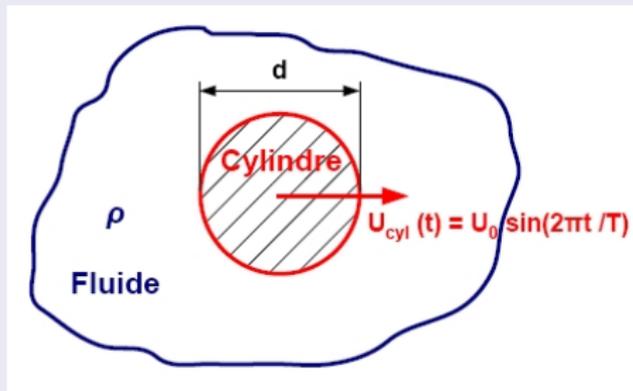
Marion Duclercq^{1,2}, Daniel Broc¹, Olivier Cadot²

¹CEA, DEN, DM2S, SEMT, EMSI : laboratoire d'études de mécanique sismique

²ENSTA ParisTech : UME - dynamique des fluides et acoustique



- 1 Problème et modélisation
- 2 Résolution numérique
- 3 Etude physique globale
- 4 Etude des variations temporelles de F_{cyl}
- 5 Conclusions



- Problème 2D
- Cylindre soumis à un déplacement sinusoïdal transverse
- Fluide réel initialement au repos

Quelle est la dynamique de l'écoulement généré par le cylindre ?
Quelle est la force de traînée F_{cyl} exercée par le fluide sur le cylindre ?

Equations de Navier-Stokes (incompressible)

$$\begin{cases} \operatorname{div}(u) = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \Delta u \end{cases}$$

Problème adimensionnel

$$\begin{cases} \operatorname{div}(u) = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + K_c u \cdot \nabla u = -K_c \nabla p + \frac{K_c}{Re} \Delta u \end{cases}$$

$$\text{avec } Re = \frac{U_0 d}{\nu} \text{ et } K_c = 2\pi \frac{D}{d}$$

$$\text{ainsi que } \beta = \frac{Re}{K_c} = \frac{d^2}{\nu T} \quad \text{Plan } (K_c, Re)$$

Equations de Navier-Stokes (incompressible)

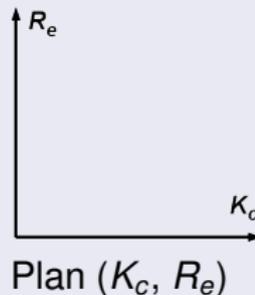
$$\begin{cases} \operatorname{div}(u) = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \Delta u \end{cases}$$

Problème adimensionnel

$$\begin{cases} \operatorname{div}(u) = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + K_c u \cdot \nabla u = -K_c \nabla p + \frac{K_c}{Re} \Delta u \end{cases}$$

$$\text{avec } Re = \frac{U_0 d}{\nu} \text{ et } K_c = 2\pi \frac{D}{d}$$

$$\text{ainsi que } \beta = \frac{Re}{K_c} = \frac{d^2}{\nu T}$$



- 1 Problème et modélisation
- 2 **Résolution numérique**
 - Formulation et maillage
 - Discrétisations spatiale et temporelle
- 3 Etude physique globale
- 4 Etude des variations temporelles de F_{cyl}
- 5 Conclusions

- Conditions aux limites et initiales :

$$\begin{array}{l} \Omega \\ u(t=0) = 0 \\ \Gamma_{\text{cyl}} \\ u = U_{\text{cyl}} \\ \Gamma_{\text{paroi}} \quad u = 0 \end{array}$$

- $H = 10d$ hauteur du domaine fluide
 - $L = 20d$ longueur du domaine fluide
 - ⇒ calculs pour $K_c < 63$.
- Déformation d'un coin du maillage pour réduire le temps de croissance des instabilités.

- Conditions aux limites et initiales :

$$\begin{array}{l} \Omega \\ u(t=0) = 0 \\ \Gamma_{\text{cyl}} \\ u = U_{\text{cyl}} \\ \Gamma_{\text{paroi}} \quad u = 0 \end{array}$$

- $H = 10d$ hauteur du domaine fluide
- $L = 20d$ longueur du domaine fluide
- ⇒ calculs pour $K_c < 63$.
- Déformation d'un coin du maillage pour réduire le temps de croissance des instabilités.

Pas d'espace dx :

- Autour du cylindre : $dx = 0.02 d$
donné par l'épaisseur de la couche limite pour une plaque plane oscillante :

$$e = \frac{4}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{K_c}{Re}} d \quad \text{Iliadis (1998)}$$

- Ailleurs : $dx = 0.157 d$

Pas de temps dt :

- Pour $K_c \geq 1$: dt donné par $U_0 \frac{d\tilde{t} T}{d\tilde{x} d} = \frac{K_c d\tilde{t}}{d\tilde{x}} = 0.35$
- Pour $K_c \leq 1$: $dt = 0.05 T$

Pas d'espace dx :

- Autour du cylindre : $dx = 0.02 d$
donné par l'épaisseur de la couche limite pour une plaque plane oscillante :

$$e = \frac{4}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{K_c}{Re}} d \quad \text{Iliadis (1998)}$$

- Ailleurs : $dx = 0.157 d$

Pas de temps dt :

- Pour $K_c \geq 1$: dt donné par $U_0 \frac{d\tilde{t} T}{d\tilde{x} d} = \frac{K_c d\tilde{t}}{d\tilde{x}} = 0.35$
- Pour $K_c \leq 1$: $dt = 0.05 T$

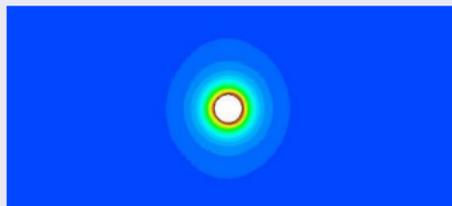
- 1 Problème et modélisation
- 2 Résolution numérique
- 3 Etude physique globale**
- 4 Etude des variations temporelles de F_{cyl}
- 5 Conclusions

Cas asymptotique $K_c \rightarrow 0$

Solution analytique de Stokes :

$$F_{cyl}^{Stokes}(t) = C_m \frac{\rho \pi d^2}{4} \frac{dU_{cyl}(t)}{dt} + C_d \rho d U_0 U_{cyl}(t)$$

où C_m et C_d s'expriment à partir des fonctions de Bessel.



Norme de la vitesse pour $K_c=1$ et $R_e=1000$

Cas asymptotique $K_c \rightarrow +\infty$

Problème de Von Karman : $U_{cyl}(t) = U_0$

$$F_{cyl} = C_x \frac{1}{2} \rho d U_0^2 \quad \text{avec } C_x : \text{coefficient de traînée (empirique)}$$

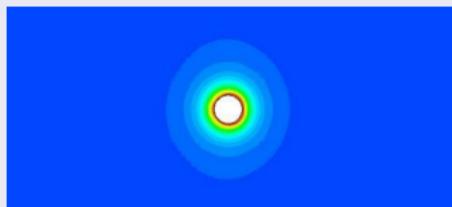
Champ de vorticité pour K_c infini et $R_e=200$

Cas asymptotique $K_c \rightarrow 0$

Solution analytique de Stokes :

$$F_{cyl}^{Stokes}(t) = C_m \frac{\rho \pi d^2}{4} \frac{dU_{cyl}(t)}{dt} + C_d \rho d U_0 U_{cyl}(t)$$

où C_m et C_d s'expriment à partir des fonctions de Bessel.

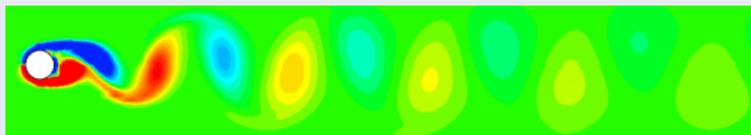


Norme de la vitesse pour $K_c=1$ et $Re=1000$

Cas asymptotique $K_c \rightarrow +\infty$

Problème de Von Karman : $U_{cyl}(t) = U_0$

$$F_{cyl} = C_x \frac{1}{2} \rho d U_0^2 \quad \text{avec } C_x : \text{coefficient de traînée (empirique)}$$

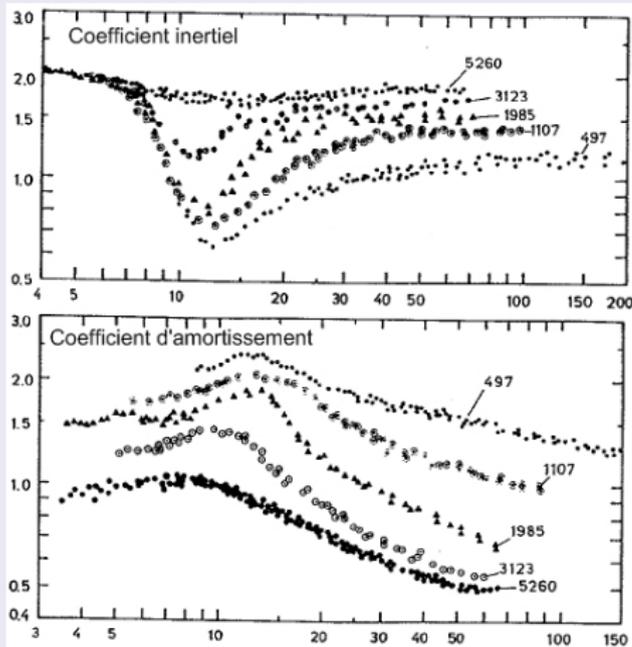


Champ de vorticité pour K_c infini et $Re=200$

Décomposition de Morison (1950)

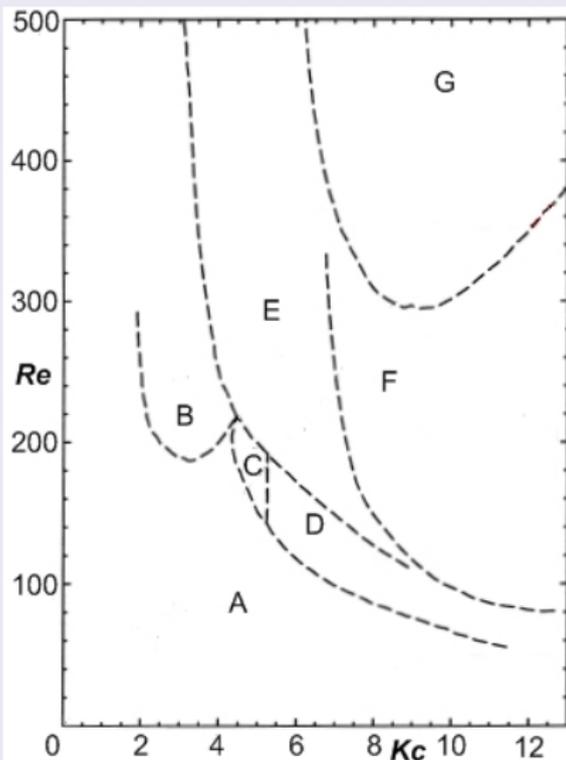
$$F_{cyl}^{Morison}(t) = \alpha_m \rho \pi \frac{d^2}{dt^2} U_{cyl}(t) + \alpha_d \frac{1}{2} \rho d |U_{cyl}(t)| U_{cyl}(t)$$

où α_m et α_d sont déterminés expérimentalement ou numériquement.



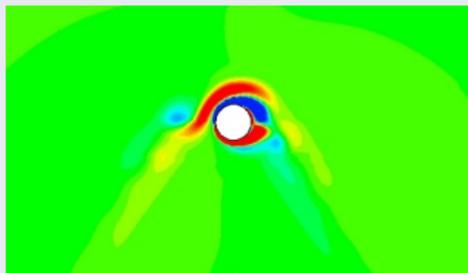
α_m et α_d en fonction de K_c
pour différents $\beta = R_e/K_c$.
(Sarpkaya 1976, 1981)

Régimes d'écoulement identifiés par Tatsuno & Bearman (1990)

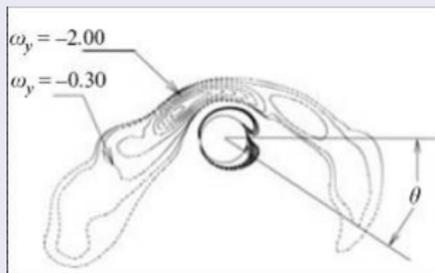


- A : lâché tourbillonnaire longitudinal symétrique
- D : lâché tourbillonnaire transverse en ∇
- E : lâché tourbillonnaire transverse avec basculements entre ∇ et \wedge
- F : lâché tourbillonnaire en diagonale
- G : écoulement complexe avec des lâchés dans plusieurs directions.

Régime D : lâché tourbillonnaire transverse en ∇

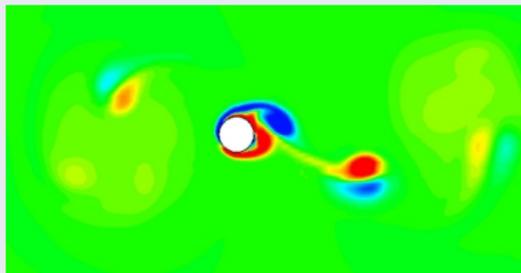


$K_C=6.25$ et $Re=150$ (Cast3M)

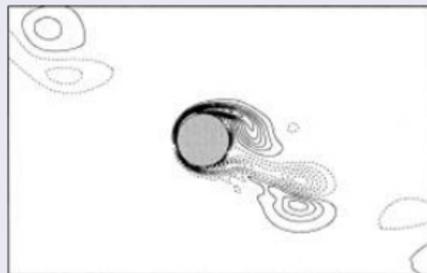


$K_C=6.5$ et $Re=130$ (Nehari 2004)

Régime F : lâché tourbillonnaire en diagonale

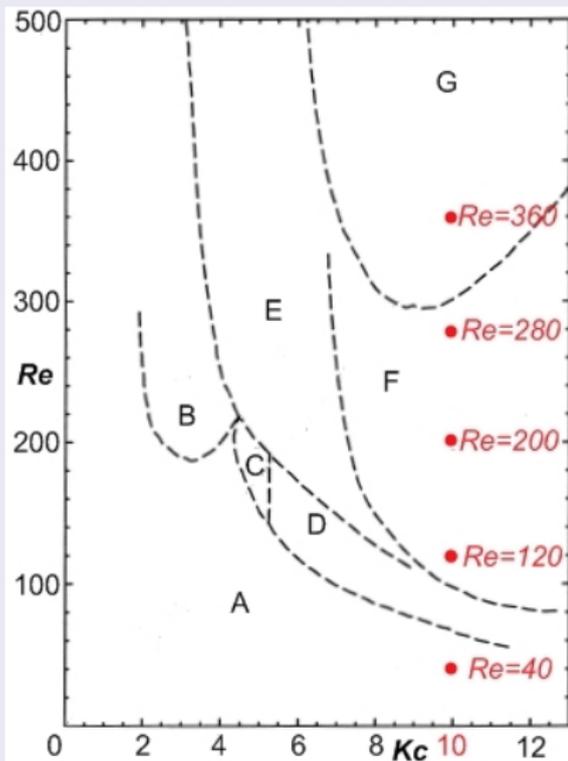


$K_C=10$ et $Re=200$ (Cast3M)

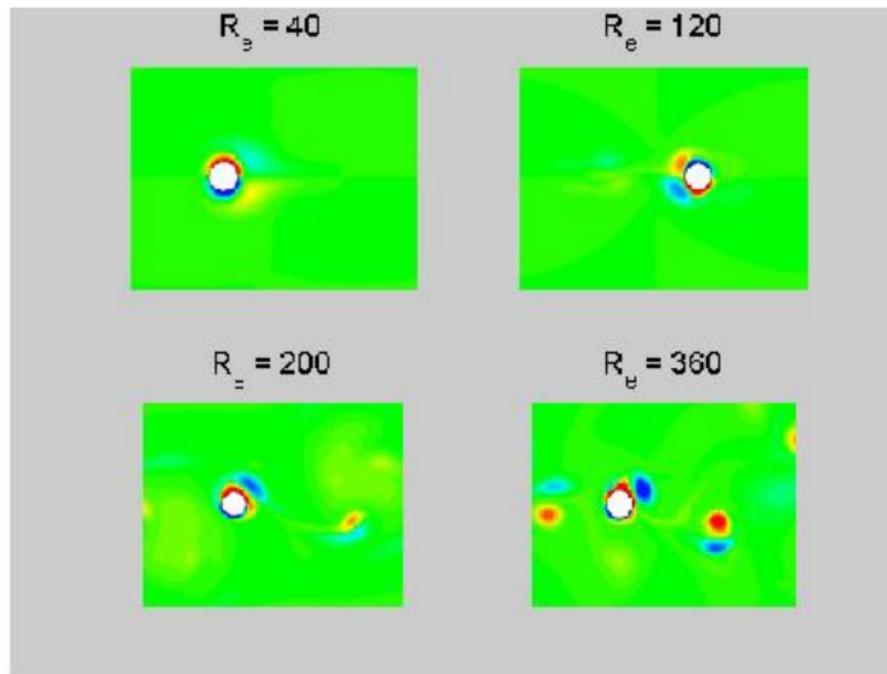


$K_C=10$ et $Re=200$ (Dütsch 1998)

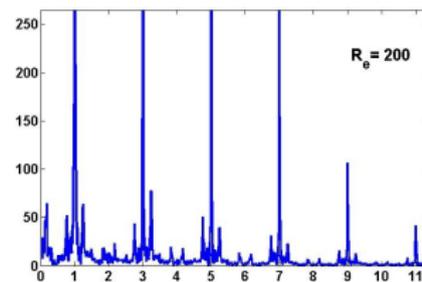
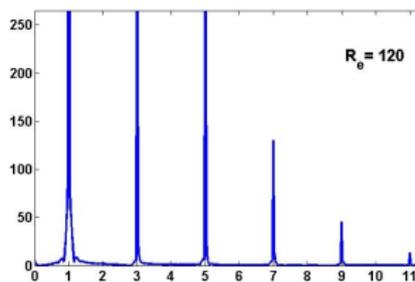
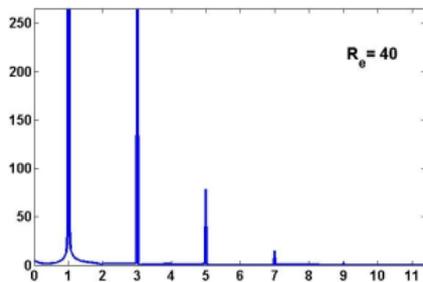
Régimes d'écoulement identifiés par Tatsuno & Bearman (1990)



- A : lâché tourbillonnaire longitudinal symétrique
- D : lâché tourbillonnaire transverse en ∇
- E : lâché tourbillonnaire transverse avec basculements entre ∇ et \wedge
- F : lâché tourbillonnaire en diagonale
- G : écoulement complexe avec des lâchés dans plusieurs directions.

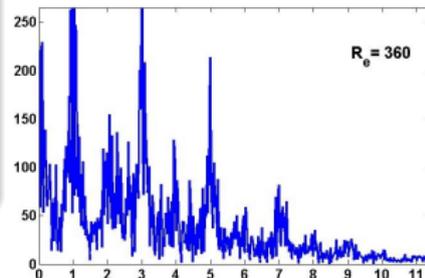
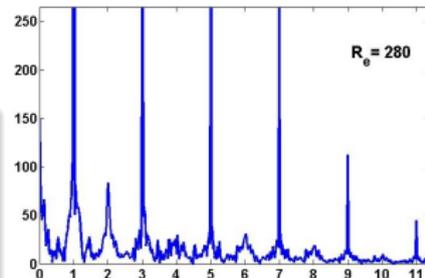


Influence de R_e sur le spectre de F_{Cyl}



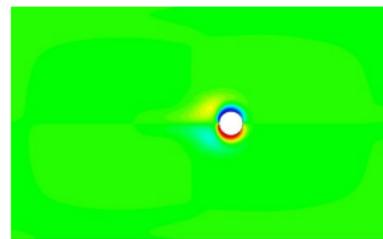
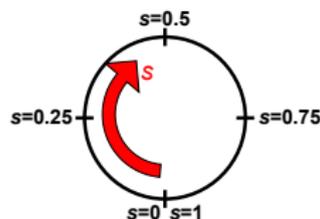
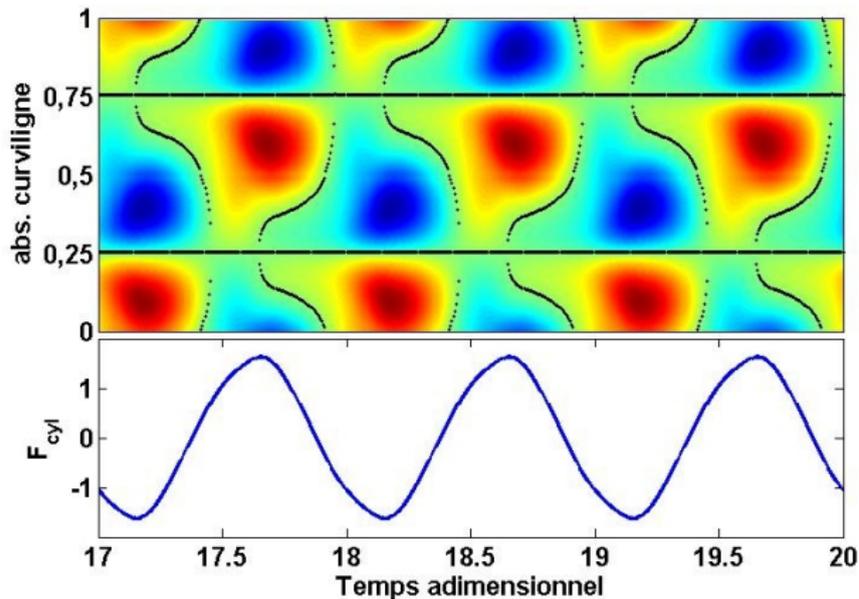
Courbes de $|FFT(F_{Cyl}(t))|$ en fonction de la fréquence pour $K_C=10$ et différents R_e

- Force en $|U_{Cyl}(t)| U_{Cyl}(t)$
- Apparition de phénomènes de couplages quand R_e augmente
- Enrichissement du contenu spectral pour les plus grands R_e



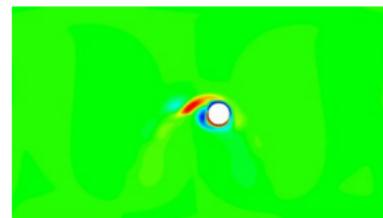
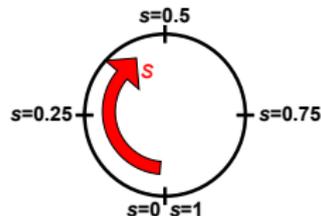
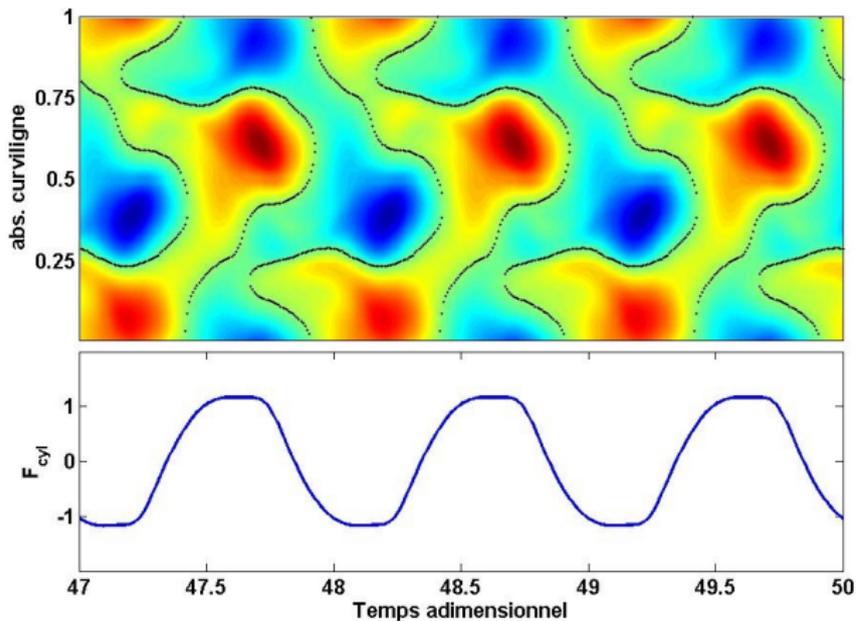
- 1 Problème et modélisation
- 2 Résolution numérique
- 3 Etude physique globale
- 4 Etude des variations temporelles de F_{cyl}**
 - Vorticité sur le cylindre
 - Force et pression sur le cylindre
 - Cas des grands (K_c , Re)
- 5 Conclusions

Cas de $Re=40$ et $K_C=10$ (régime A)



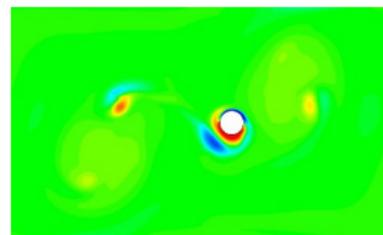
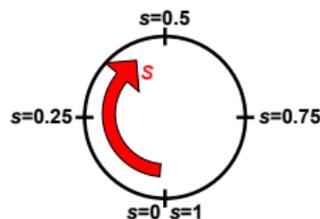
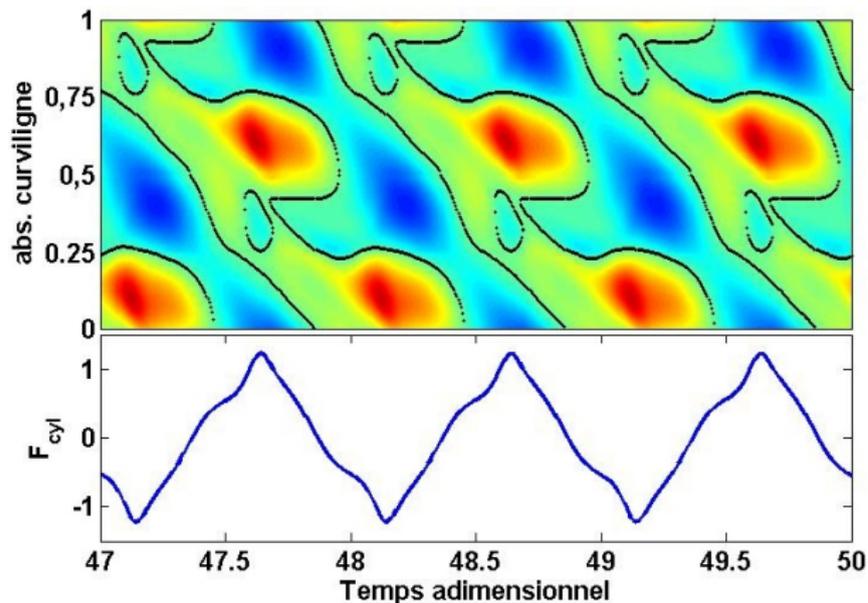
Vorticité

Cas de $R_e=150$ et $K_c=6.25$ (régime D)



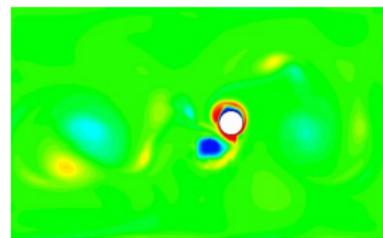
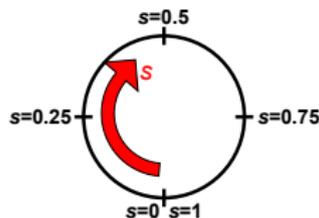
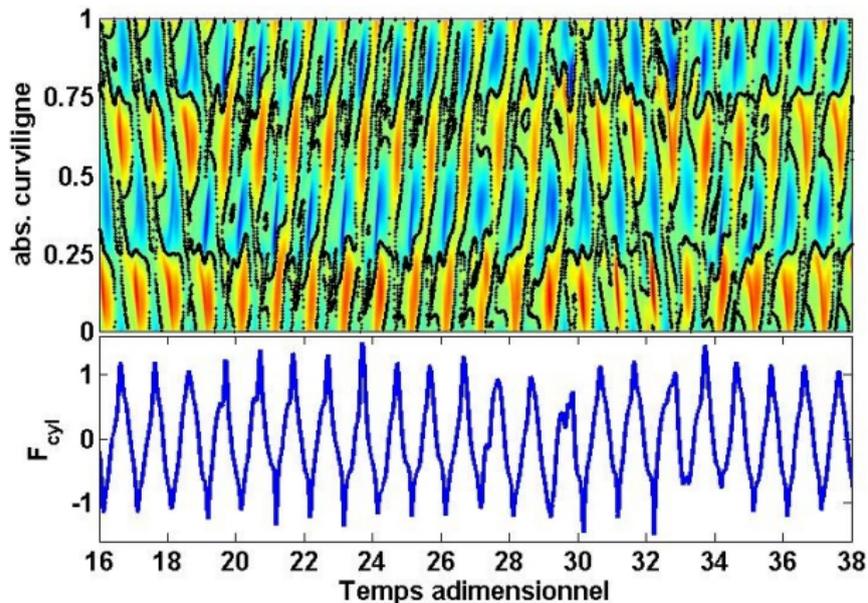
Vorticité

Cas de $Re=200$ et $K_c=10$ (régime F)



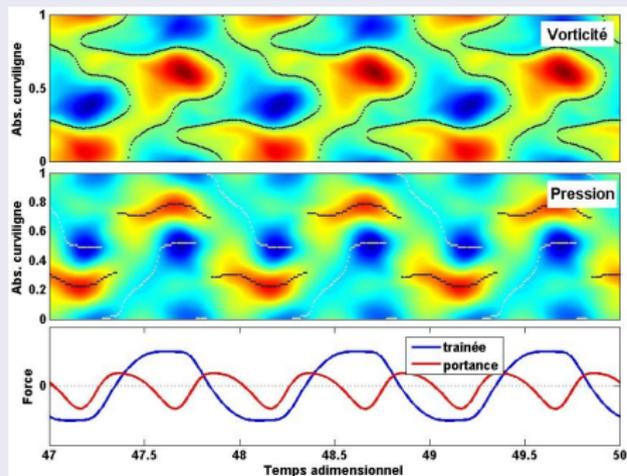
Vorticité

Cas de $Re=360$ et $Kc=10$ (régime G)

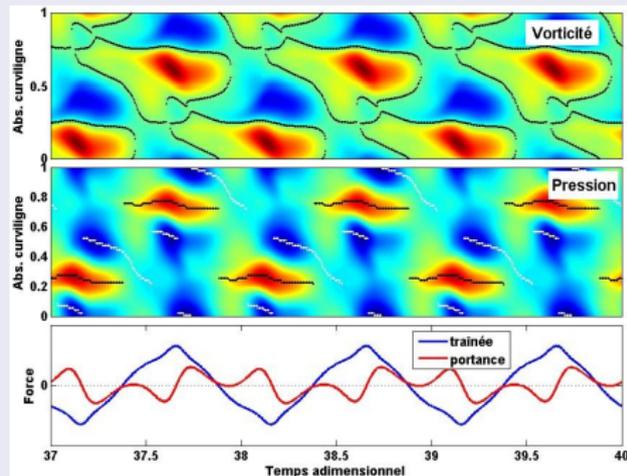


Vorticité

Cas de $R_e=150$ et $K_c=6.25$
(régime D)

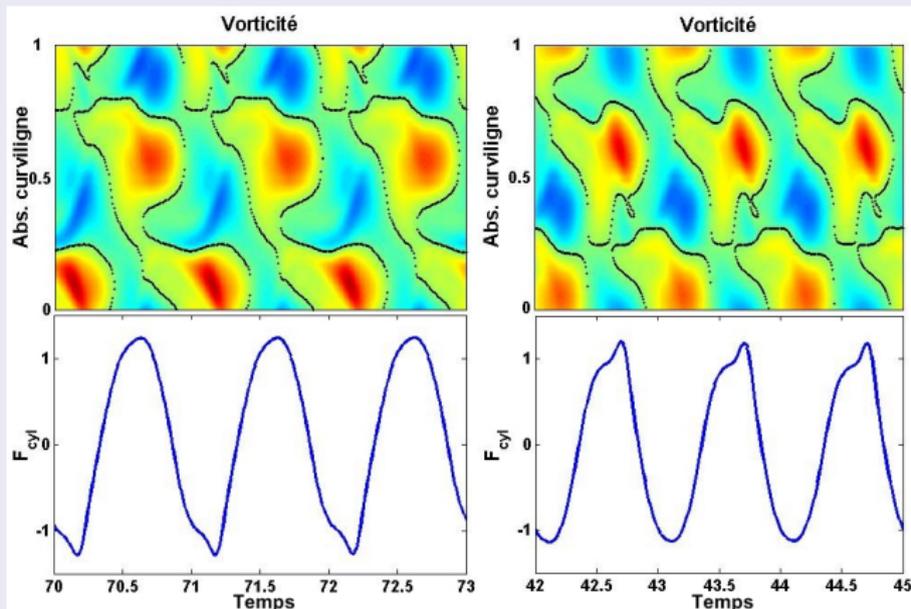


Cas de $R_e=120$ et $K_c=10$
(régime F)



- L'évolution de F_{cyl} est pilotée par celle de la zone de surpression au premier ordre.
- L'évolution de la zone de dépression régit les variations de F_{cyl} au second ordre, conditionnant l'existence d'un pic de F_{cyl} .

Cas de $R_e=200$ et $K_C=6.25$ (régime E)



- Alternance de différents modes
- "Mixage" des modes (un mode par demi-période)

- 1 Problème et modélisation
- 2 Résolution numérique
- 3 Etude physique globale
- 4 Etude des variations temporelles de F_{cyl}
- 5 Conclusions**

Construction d'un programme de calculs :

- permettant de traiter différentes configurations (K_c , R_e) ;
- procurant beaucoup d'informations sur l'écoulement.

Résultats physiques :

- Caractérisation de différents régimes d'écoulement.
- Liens entre la structure de l'écoulement et F_{cyl} .