



## Interaction fluides turbulents - structures 3D dans un faisceau de tubes coudés

**Hoarau Yannick**

Laboratoire des sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie de Strasbourg  
Équipe MECAFLU

Groupe « Instabilité, Turbulence et Diphasique »  
CNRS - Université de Strasbourg  
2 Rue Boussingault, Strasbourg, France  
hoarau@unistra.fr

Le 16 mai 2013



# Sommaire

## 1 Le Solveur Navier-Stokes NSMB

- Le Solveur Navier-Stokes NSMB
- Discrétisations et modèles dans NSMB
- La méthode chimère
  - Le principe de la méthode chimère
  - Applications

## 2 Modélisation d'un faisceau de tubes

- Application industrielle
- Objectifs
- Modélisation statique
- Interactions fluide-structure

## 3 Conclusions et perspectives

# Sommaire

## 1 Le Solveur Navier-Stokes NSMB

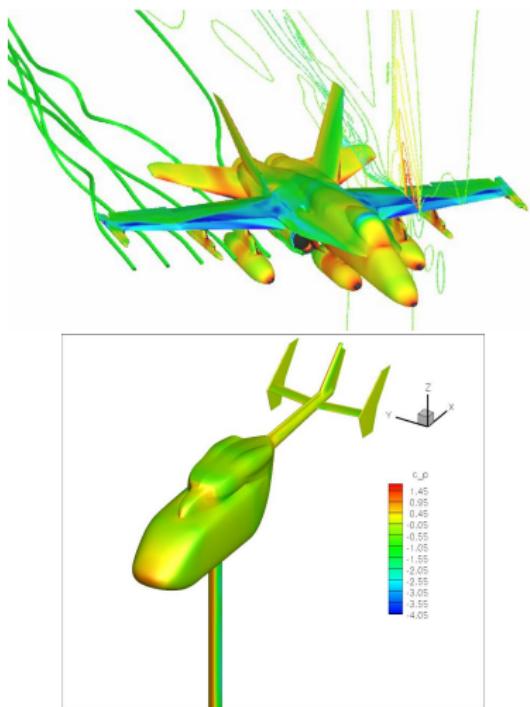
- Le Solveur Navier-Stokes NSMB
- Discrétisations et modèles dans NSMB
- La méthode chimère

## 2 Modélisation d'un faisceau de tubes

## 3 Conclusions et perspectives

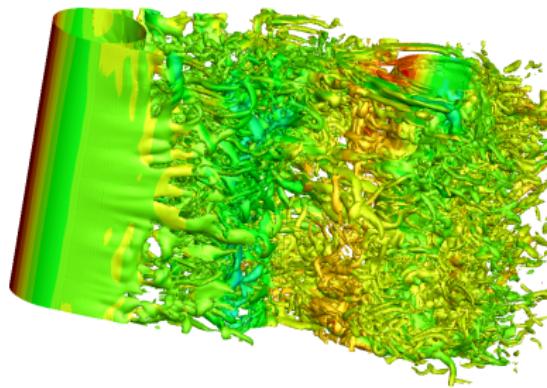
# Le Solveur Navier-Stokes NSMB

- Solveur des équations de Navier-Stokes compressibles et incompressibles, multi-blocs et parallèle
- Développé au sein d'un consortium (centres de recherche universitaires et industriels)
- Champ d'application vaste (aérodynamiques externes, combustion, interaction fluide/structure, chimie, ...)
- Grand choix de discrétisations et de modèles numériques



# Discrétisations et modèles dans NSMB

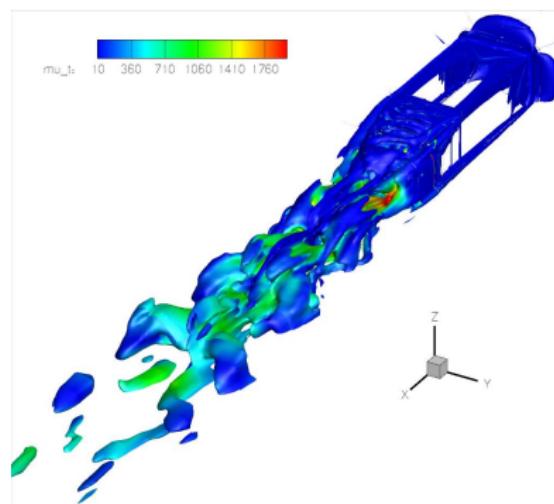
- Discrétisation spatiale
  - Discrétisation temporelle
  - Schémas incompressibles
  - Turbulence
  - Chimie
  - Mouvement de grilles
  - Chimère mobile
  - IBM mobile
  - Modélisation du givrage
  - Cavitation
- Schémas centrés d'ordre 2 et 4
  - Schémas décentrés d'ordre 1, 2, 3 et 5



# Discrétisations et modèles dans NSMB

- Discrétisation spatiale
- Discrétisation temporelle
- Schémas incompressibles
- Turbulence
- Chimie
- Mouvement de grilles
- Chimère mobile
- IBM mobile
- Modélisation du givrage
- Cavitation

- *Calcul stationnaire :* explicite Runge Kutta ou implicite LU-SGS
- *Calcul instationnaire :* explicite Runge Kutta, pas de temps dual, schéma LU-SGS



# Discrétisations et modèles dans NSMB

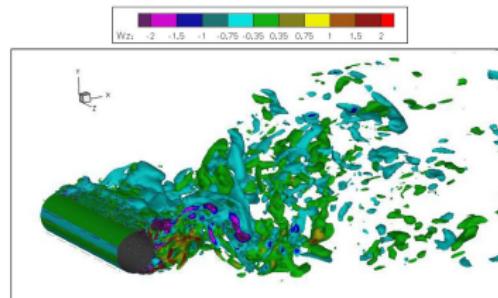
- Discrétisation spatiale
- Discrétisation temporelle
- Schémas incompressibles
- Turbulence
- Chimie
- Mouvement de grilles
- Chimère mobile
- IBM mobile
- Modélisation du givrage
- Cavitation

- *Couplage pression-vitesse :* SIMPLE, SIMPLEC, PISO, Braza
- *Stabilisation de Rhee and Chow*
- *Solveur linéaire :* librairie PSBLAS

# Discrétisations et modèles dans NSMB

- Discrétisation spatiale
- Discrétisation temporelle
- Schémas incompressibles
- Turbulence
- Chimie
- Mouvement de grilles
- Chimère mobile
- IBM mobile
- Modélisation du givrage
- Cavitation

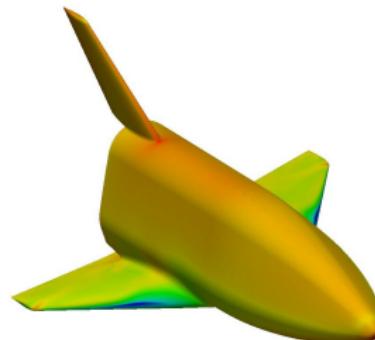
- Modèles algébriques
- Modèle de Spalart-Allmaras et ses variantes
- Modèle  $k-\epsilon$  Chien, OES
- Modèles  $k-\omega$  Menter, Wilcox, LLR, BPD
- EARSM Girimagi, GS, AJL
- NLEVM SZL, WJ
- DES, DDES, WMLES, IDDES
- OES tensoriel
- RSM SSG
- Modèles LES Smagorinsky, FS, FSF, WALE, ADM



# Discrétisations et modèles dans NSMB

- Discrétisation spatiale
- Discrétisation temporelle
- Schémas incompressibles
- Turbulence
- Chimie
- Mouvement de grilles
- Chimère mobile
- IBM mobile
- Modélisation du givrage
- Cavitation

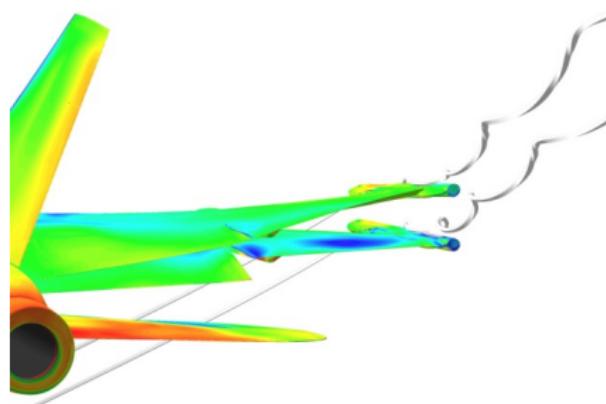
- Chimie Air/ $N_2$
- Chimie générale hors équilibre
- Modèle de diffusion de flamme



# Discrétisations et modèles dans NSMB

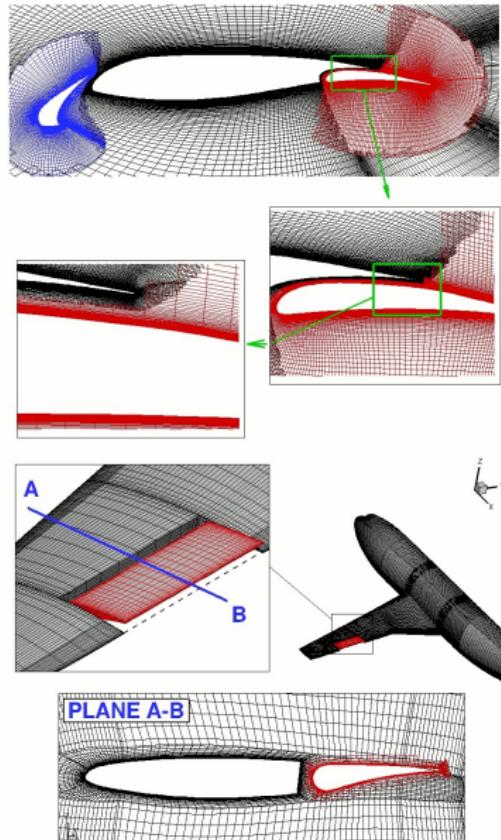
- Discrétisation spatiale
- Discrétisation temporelle
- Schémas incompressibles
- Turbulence
- Chimie
- Mouvement de grilles
- Chimère mobile
- IBM mobile
- Modélisation du givrage
- Cavitation

- ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) et remaillage



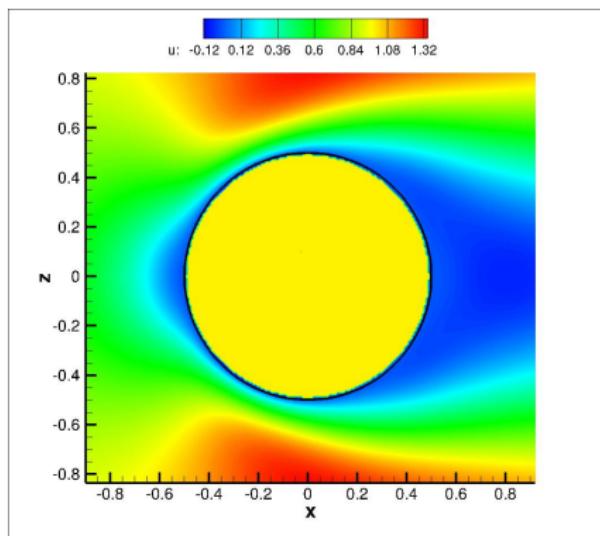
# Discrétisations et modèles dans NSMB

- Discrétisation spatiale
- Discrétisation temporelle
- Schémas incompressibles
- Turbulence
- Chimie
- Mouvement de grilles
- **Chimère mobile**
- IBM mobile
- Modélisation du givrage
- Cavitation



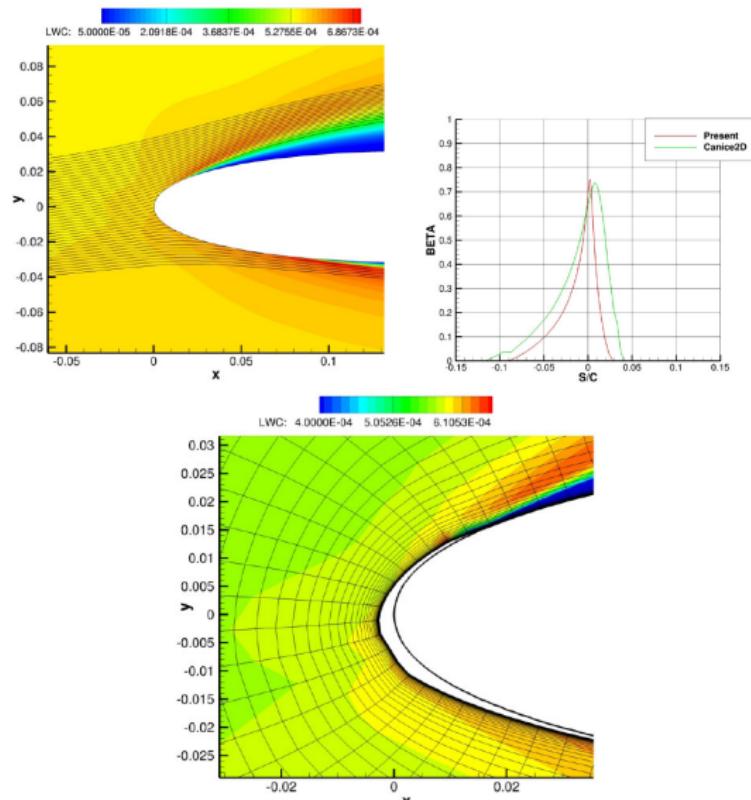
# Discrétisations et modèles dans NSMB

- Discrétisation spatiale
- Discrétisation temporelle
- Schémas incompressibles
- Turbulence
- Chimie
- Mouvement de grilles
- Chimère mobile
- IBM mobile
- Modélisation du givrage
- Cavitation



# Discrétisations et modèles dans NSMB

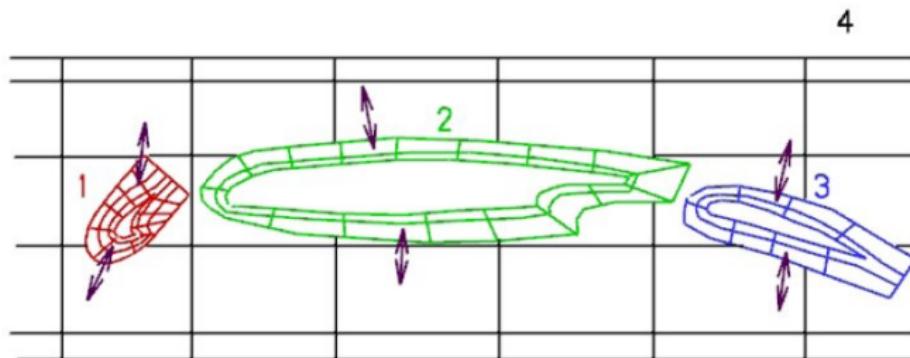
- Discrétisation spatiale
- Discrétisation temporelle
- Schémas incompressibles
- Turbulence
- Chimie
- Mouvement de grilles
- Chimère mobile
- IBM mobile
- Modélisation du givrage
- Cavitation



# Discrétisations et modèles dans NSMB

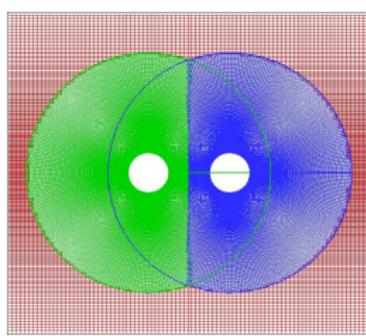
- Discrétisation spatiale
- Discrétisation temporelle
- Schémas incompressibles
- Turbulence
- Chimie
- Mouvement de grilles
- Chimère mobile
- IBM mobile
- Modélisation du givrage
- Cavitation

# Exemple de développement numérique : la méthode chimère

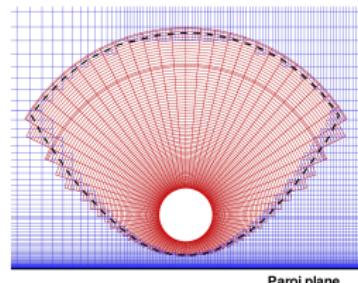


# Exemples

Profil 3 éléments,  
 $Re = 3 \times 10^6$



Cylindres tandem,  
 $Re = 100$ ,  $L/d = 1$  et  
4



Sphère proche paroi

# Chute libre et oscillation libre

ARV-APEX

## Séparation de deux modules

Vue Y

Vue Z

# FAST-20X

# Sommaire

## 1 Le Solveur Navier-Stokes NSMB

## 2 Modélisation d'un faisceau de tubes

- Application industrielle
- Objectifs
- Modélisation statique
- Interactions fluide-structure

## 3 Conclusions et perspectives

## Détérioration des tubes en « U » dans les Générateurs de Vapeur

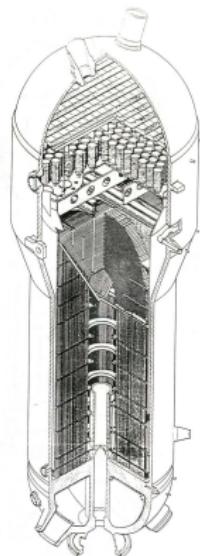
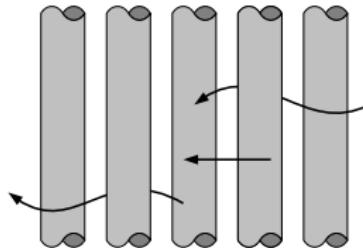
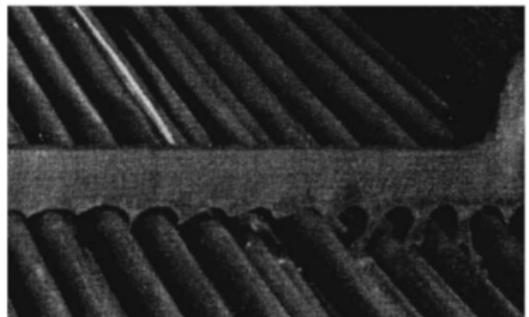


Schéma de principe d'un générateur de vapeur

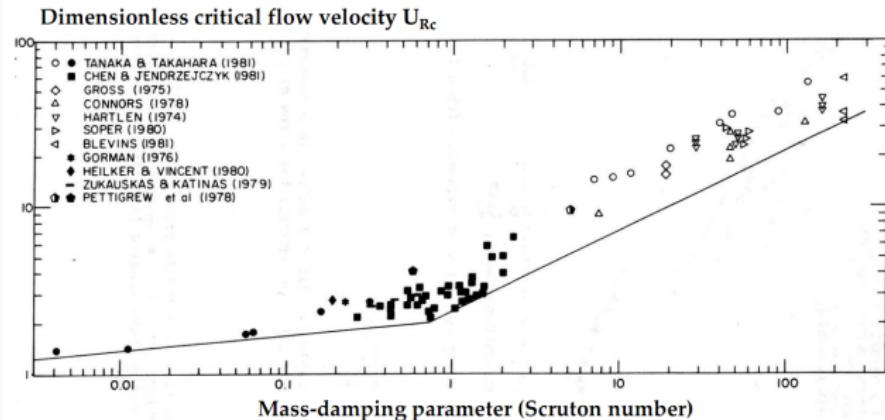


Écoulement transverse



Exemple de rupture de tubes

# Cartographie de l'instabilité fluide-élastique : Courbe de Connors



Nombre de Scruton :

$$Sc = \frac{2 \pi \xi m}{\rho d^2 l} \quad \text{avec } \xi = \frac{a}{2 \sqrt{m r}}$$

vitesse réduite :

$$u^* = \frac{u}{f_{s_0} d} \quad \text{avec } f_{s_0} = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{r}{m}}$$

$m$ , masss,  $a$ , amortissement et  $r$ , raideur de la structure (tubes du faisceau)

## Objectifs de l'étude



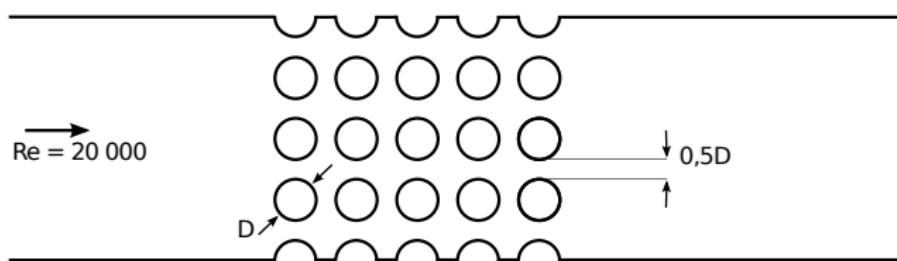
- simulations numériques des écoulements (2D et 3D)
  - tester la validité de modèles de turbulences
  - capture des instationnarités de l'écoulement
  
- modélisation de la turbulence dans un faisceau de tubes
  - simulation des échanges énergétiques (contexte de l'interaction fluide-structure)
  - définir les apports des simulations 2D/3D (design)

### Démarche

- ① étude de la modélisation de la turbulence dans le faisceau sans mouvement
- ② simulation dans le faisceau avec prise en compte du mouvement

# La configuration DIVA

## Faisceau de tubes



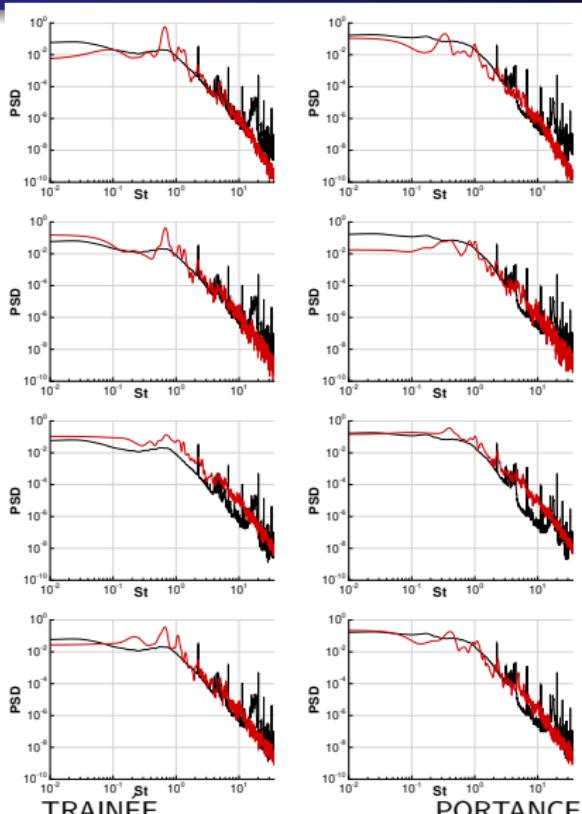
## Caractéristiques

- 15 cylindres + 10 demi-cylindres
- pas réduit  $P^* = 1,5$
- $\text{Re}_{ia.} = 20\,000$ ,  $\text{Re}_{it.} = 60\,000$
- écoulement incompressible et monophasique :  $\text{Ma} = 0,18$  (préconditionnement)

→ caractéristiques proches du banc d'essai DIVA du CEA

# Comparaison avec le banc d'essai DIVA : densités spectrales de puissance

Spalart-A.

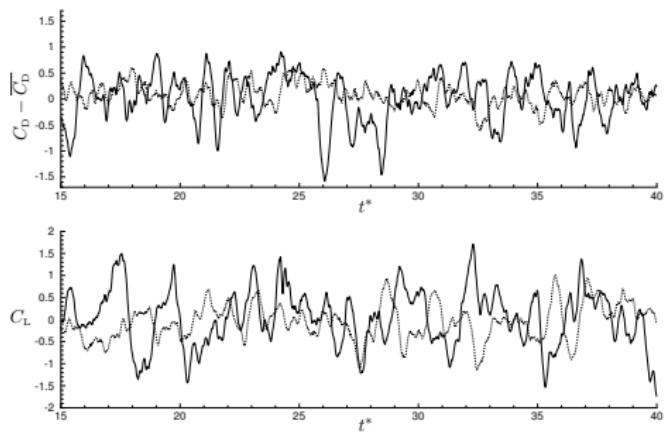
 $k - \omega$ -SST $k - \omega$ -BL-OES $k - \varepsilon$ -OES

## Légende

- simulations numériques
- banc d'essai
- PSD : *Power Spectral Density*
- St : fréquences adimensionnelles

# $k - \omega$ -BSL-OES

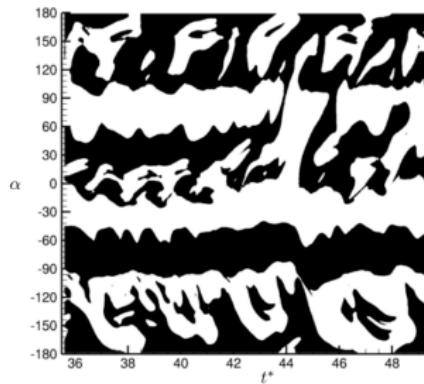
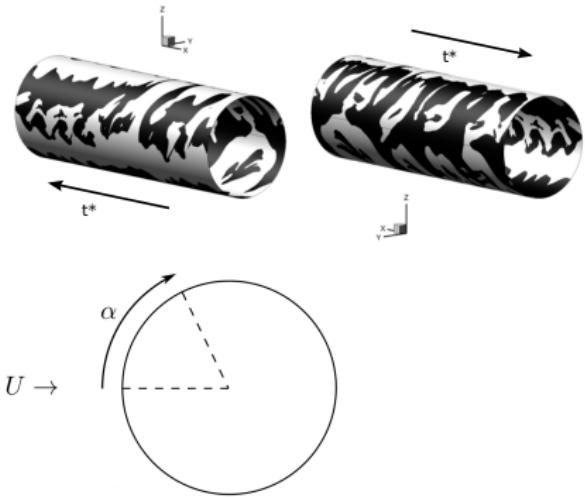
## Vorticité



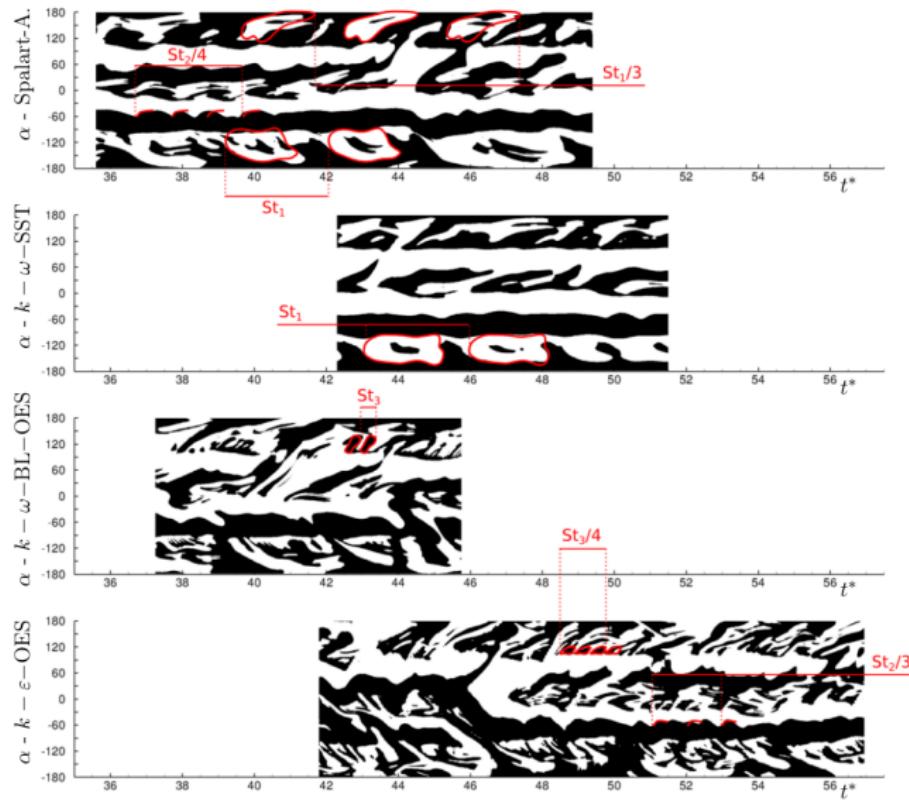
Coefficient aérodynamiques (données expérimentales en pointillé)

# Cartographies du point de décollement

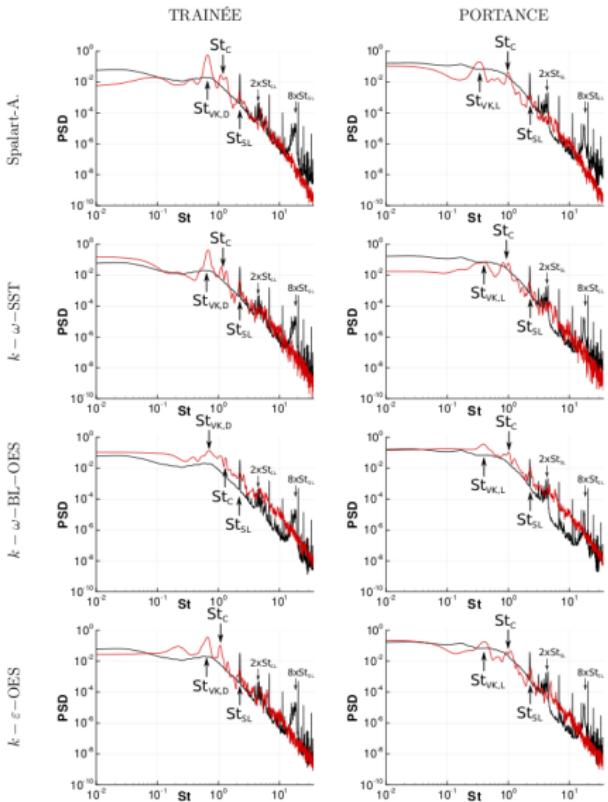
- sur chaque instantané, tracé de la vorticité perpendiculaire au plan de l'écoulement
- extraction des valeurs à la paroi
- mise bout à bout des valeurs extraites



# Carthographies du point de décollement

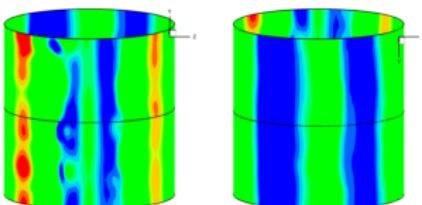


# Densités spectrales de puissance



# Simulations 3D

## Cylindre central



*Pression pariétale (longueur d'onde spatiale  $\approx D/5$ )*

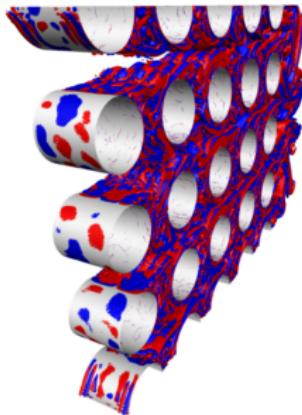
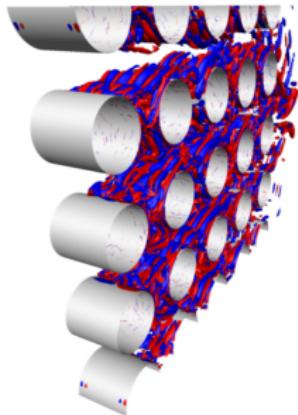
- développement d'une instabilité secondaire
- longueur d'onde régulière (cellules tourbillonnaires contra-rotatives)
- en accord avec les études en DNS (cylindre seul)

Persillon & Braza, JFM (1998) ; Braza, Faghani & Persillon, JFM (2001)

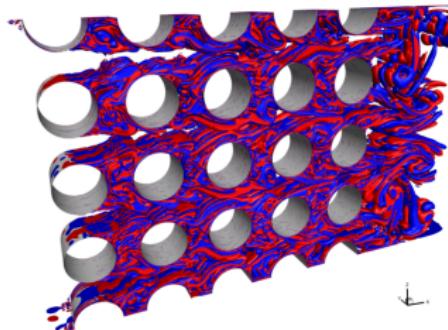
## Simulations

- SA IDDES
- $k - \omega$  – SST IDDES
- $k - \omega$  – OES IDDES
- $k - \varepsilon$  – OES
- $k - \omega$  – SAS

# $k - \omega$ SST IDDES

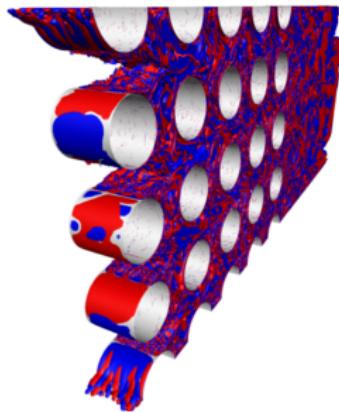
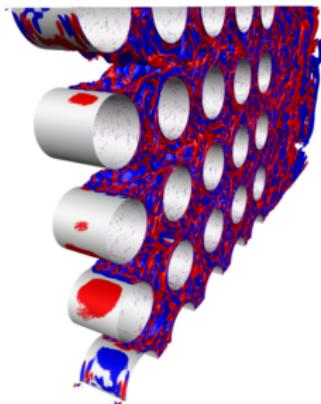


*Iso-surface de vorticité longitudinale*

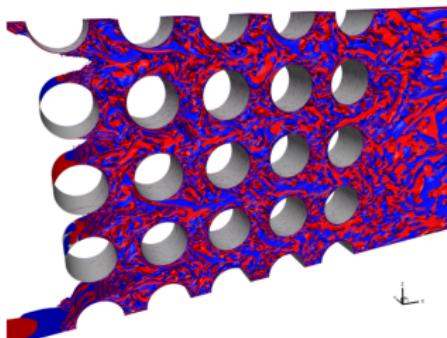


*Iso-surface de vorticité transversale*

# $k - \omega$ OES IDDES

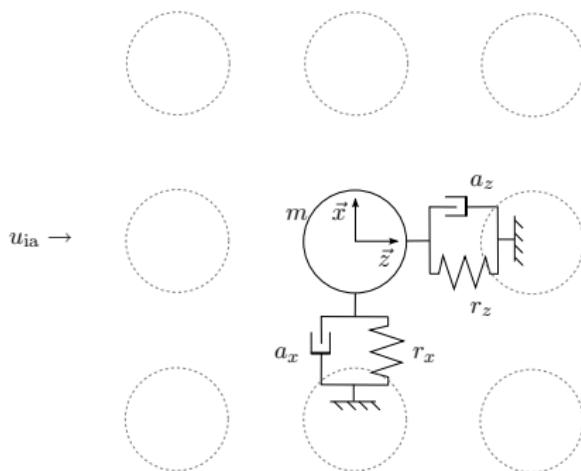


*Iso-surface de vorticité longitudinale*



*Iso-surface de vorticité transversale*

# Cylindre monté élastiquement



## Hypothèses

- cylindre libre dans la direction perpendiculaire à l'écoulement (portance)
- simulation 2D
- structure rigide indéformable
- nombres adimensionnels :  $Re, Sc = \frac{2 \pi \xi m}{\rho d^2 I}$  et  $u^* = \frac{f d}{u}$
- instabilité fluide-élastique dans le faisceau pour ( $3 \leq u^* \leq 4, Sc = 1$ )

# La méthodologie

## Les équations adimensionnées

$$m^* \ddot{z}^* + b^* \dot{z}^* + k^* z^* = C_z(t^*)$$

$m^*$  masse réduite

$b^*$  amortissement

$k^*$  rigidité

## Algorithme

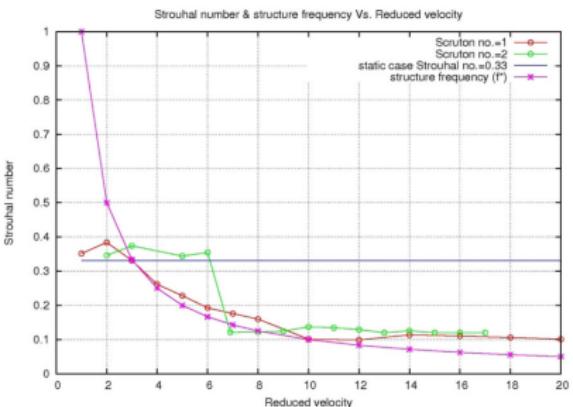
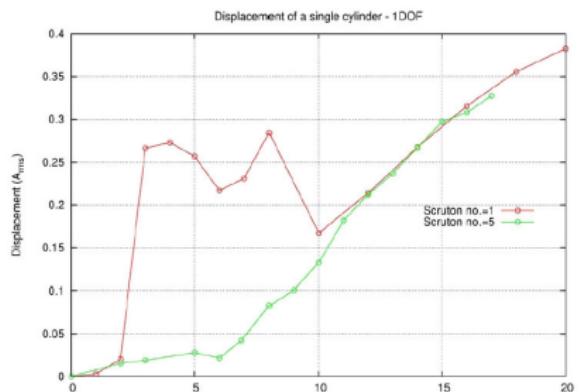
- Couplage FSI faible
- Extrapolation d'ordre 1 de la portance
- Schéma de Newmark pour le solide
- Remaille VSI et lissage elliptique
- Résolution fluide

# $k - \omega$ -OES

$$(u^*, Sc) = (2, 1)$$

$$(u^*, Sc) = (3, 1)$$

## VIV



# Sommaire

- 1 Le Solveur Navier-Stokes NSMB
- 2 Modélisation d'un faisceau de tubes
- 3 Conclusions et perspectives

# Conclusions et perspectives

- NSMB : un solveur complet et robuste, effort sur la scalabilité
- Chimère : très efficace et très adaptée aux géométries mobiles
- Faisceau : écoulement complexe, "bonne" modélisation du couplage Fluide-Structure, calculs chimère, étude de stabilité, variation du Scruton
- NSIBM : un solveur cartésien non-structuré, parallèle avec IBM

Merci de votre attention

Yannick Hoarau  
ICUBE  
[hoarau@unistra.fr](mailto:hoarau@unistra.fr)