

Implémentation d'algorithmes de Couplage en Interaction Fluide-Structure sous CASTEM

Mustapha BENAOUICHA

IRENav

Institut de Recherche de l'Ecole Navale, Brest

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Ce travail constitue une partie de ma thèse dérivée par

Aziz HAMDOUNI
LEPTAB (Université de La Rochelle)

soutenue le
21/09/2007

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de couplage en IFS

Schéma Explicite Synchronne

Schéma Explicite Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Implémentation
d'algorithmes de
Couplage en
Interaction
Fluide-Structure
sous CASTEM

Mustapha
BENAOUICHA

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchronne

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Introduction

Problème d'Interaction Fluide-Structure



L'écoulement fluide est modifié par la structure (barrage)
et la position de la structure est modifiée par
l'écoulement.

Algorithmes de couplage en Interaction Fluide-Structure

Implémentation
d'algorithmes de
Couplage en
Interaction
Fluide-Structure
sous CASTEM

Mustapha
BENAOUICHA

- ⇒ *Algorithme Monolithique* : Tout le système couplé est écrit en une seule équation.
- ⇒ *Algorithmes d'Intégration Décalée* : Résolution successive des problèmes fluide et solide :

$$M_{n-1} \xrightarrow{1} \mathcal{F}_n \xrightarrow{2} f_n \xrightarrow{3} S_n \xrightarrow{4} \Gamma_n \xrightarrow{5} M_n \xrightarrow{6} \mathcal{F}_{n+1} \dots^1$$

- ▶ *Algorithmes Explicites* : Deux schémas :
 - *Schéma Synchron*
 - *Schéma Asynchrone*
- ▶ *Algorithme Implicite*

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchron

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite
Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

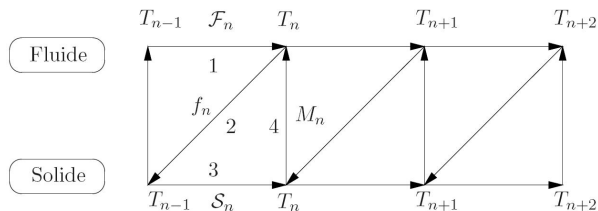
Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Schéma Explicite Synchron



- ▶ facile à mettre en oeuvre

mais

- ▶ ne conserve pas l'énergie à l'interface
- ▶ nécessite de très petits pas de temps

Schéma Implicite

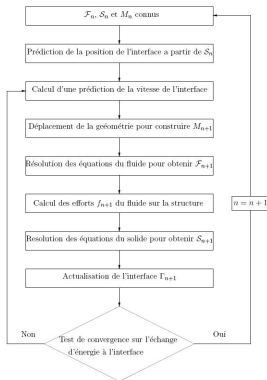
Utilisé par D. Abouri (2003)^a.

- ▶ meilleur comportement numérique
- ▶ permet d'augmenter sensiblement le pas de temps

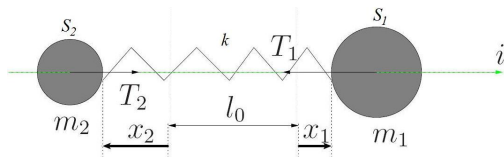
mais

- ▶ lourd à mettre en oeuvre

^aEn collaboration avec A. Parry et A. Hamdouni



Couplage structure-structure sans amortissement



Equation du mouvement

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + kx_1 & = & kx_2 \\ m_2 \ddot{x}_2 + kx_2 & = & kx_1 \\ + \text{conditions initiales} \end{cases}$$

Solution analytique

$$\begin{cases} x_1(t) & = & a \sin(\omega t) \\ x_2(t) & = & -\alpha x_1(t) \end{cases}$$

où $\alpha = \frac{m_1}{m_2}$, $\omega = \sqrt{\frac{(\alpha+1)k}{m_1}}$ et $a = -\frac{v_0}{\alpha\omega}$

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite

Synchrone

Schéma Explicite

Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

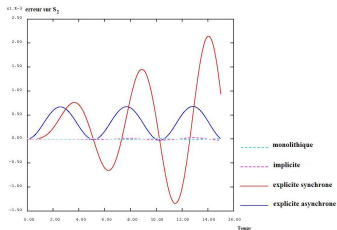
Validation

Validation 1

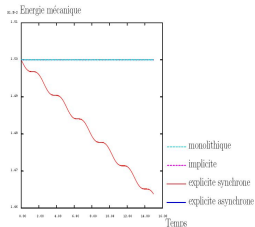
Validation 2

Conclusion

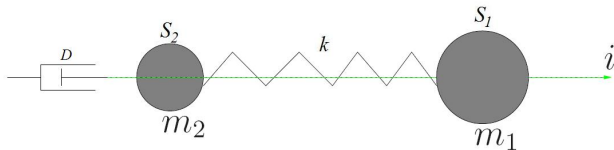
Ecart à la solution analytique du déplacement de S_2



Variation de l'énergie mécanique du système



Couplage structure-structure avec amortissement



Equation du mouvement

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{x}_1 + D \dot{x}_1 + k x_1 = k x_2 \\ m_2 \ddot{x}_2 + k x_2 = k x_1 \end{array} \right. + \text{conditions initiales}$$

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

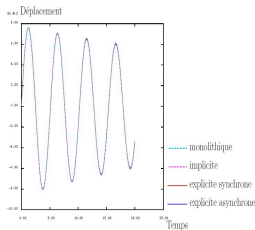
Validation

Validation 1

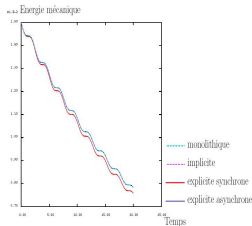
Validation 2

Conclusion

Ecart à la solution analytique du déplacement de S_2



Variation de l'énergie mécanique du système



Algorithme implicite avec sous-pas de temps pour le solide

Implémentation
d'algorithmes de
Couplage en
Interaction
Fluide-Structure
sous CASTEM

Mustapha
BENAOUICHA

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

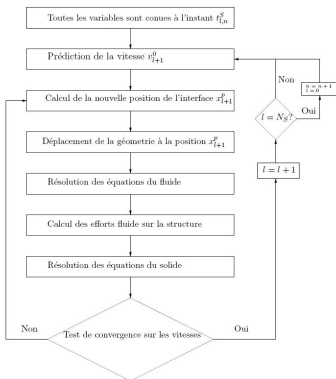
Algorithme utilisé

Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion



Problème fluide

Equations de Navier-Stokes en formulation ALE²

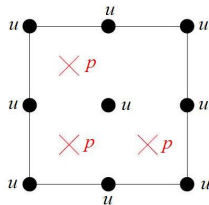
$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + ((u - w) \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \mu \Delta u + f \\ \nabla \cdot u = 0 \\ + \text{conditions initiales et limites}^3 \end{array} \right.$$

² Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne

³ u : champ de vitesse du fluide. w : vitesse du maillage. p : champ de pression. ρ : densité volumique. μ : viscosité dynamique. f : forces volumiques

Résolution numérique du problème fluide

⇒ *Discrétisation spatiale* : éléments finis de type
Crouzeix-Raviart



Elément de Crouzeix-Raviart : $\mathcal{Q}_2/\mathbb{P}_1$

⇒ *Découplage vitesse-pression* : méthode de
projection

⇒ *Stabilisation du terme de convection* : méthode
SUPG⁴

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Problème structure

Après discrétisation, les équations de la structure s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} M_S \frac{d^2 U}{dt^2} + C_S \frac{dU}{dt} + K_S U = F_S \\ + \text{conditions initiales et limites}^5 \end{array} \right.$$

Dans nos applications, nous considérons le cas d'un solide rigide

⁵ U : champ de déplacement du solide. M_S : matrice masse. C_S : matrice d'amortissement. K_S : matrice de raideur. F_S : forces volumiques

Résolution numérique du problème structure

Discrétisation en temps : algorithme de Newmark

$$V_n = V_{n-1} + \Delta t[(1 - \gamma)A_{n-1} + \gamma A_n]$$

$$U_n = U_{n-1} + \Delta t V_{n-1} + \frac{1}{2} \Delta t^2 [(1 - 2\beta)A_{n-1} + 2\beta A_n]$$

$$\beta = \frac{1}{4} \text{ et } \gamma = \frac{1}{2}$$

U_n : déplacement du solide à l'instant $t = t_n$

V_n : vitesse du solide à l'instant t_n

A_n : accélération du solide à l'instant t_n

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Couplage Fluide-Structure

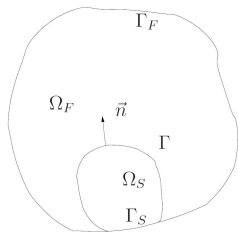
Conditions de couplage:

⇒ Condition de continuité
des vitesses^a

$$v_{|\Gamma} = u_{|\Gamma}$$

⇒ Condition de continuité
des efforts

$$\sigma_F \cdot \mathbf{n}_{|\Gamma} = \sigma_S \cdot \mathbf{n}_{|\Gamma}$$



a

^a Ω_F : domaine fluide. Ω_S : domaine solide.

Γ : interface fluide-structure. Γ_F : limite du domaine fluide. Γ_S : limite du domaine solide.

$\vec{n} = n_{|\Gamma}$: normale unitaire extérieure au domaine solide à l'interface Γ .

b

^a $u_{|\Gamma}$: champ de vitesse du fluide. $v_{|\Gamma}$: vitesse du solide (à l'interface Γ)

^b σ_F, σ_S : tenseur des contraintes de Cauchy dans le fluide et dans le solide respectivement.

Efforts fluides sur la structure

Les efforts F qu'exerce le fluide sur la structure sont données par la relation :

$$F = \int_{\Gamma} \sigma_F \cdot n|_{\Gamma} ds$$

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

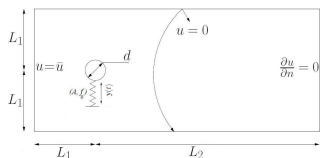
Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Ecoulement autour d'un cylindre en Oscillations



^a *Domaine de calcul :*

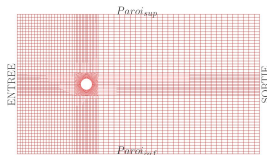
▶ écoulement fluide :

$$Re = 200$$

▶ oscillation du cylindre :

$$y(t) = A \sin(2\pi f_0 t)$$

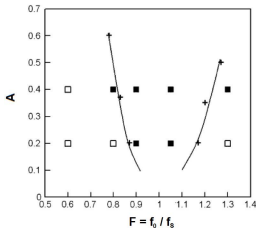
^a $d = 1, L_1 = 6d, L_2 = 12d, \bar{u}_{max} = 1$



Maillage du domaine fluide :
21160 noeuds, 5200 éléments.

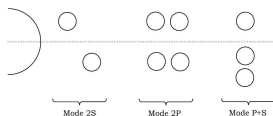
On s'intéresse à deux phénomènes :

⇒ *Accrochage fréquentiel* : la fréquence de Strouhal $f_S = St$ coïncide avec f_0

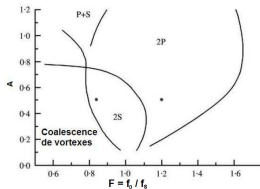


Zones d'accrochage fréquentiel données par Koopman (1967) et Nobari et al. (2006)

⇒ *Mode d'émission tourbillonnaire*



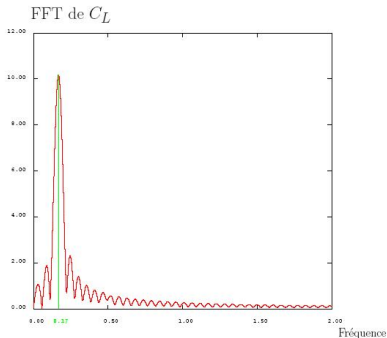
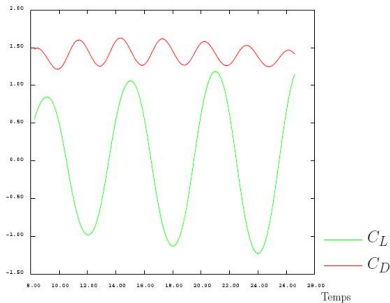
Modes d'émission 2P, 2S et P+S



Carte des modes d'émission tourbillonnaire établie par Williamson et al. (1988)

$$F = \frac{f_0}{f_S} = 1 \text{ et } A = 0.25$$

► Accrochage fréquentiel : oui



Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite

Synchrone

Schéma Explicite

Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

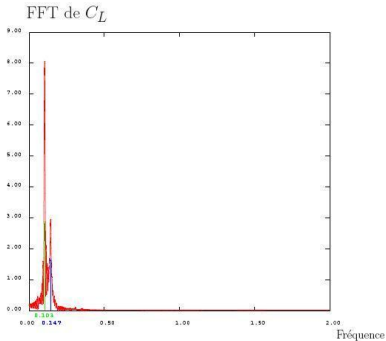
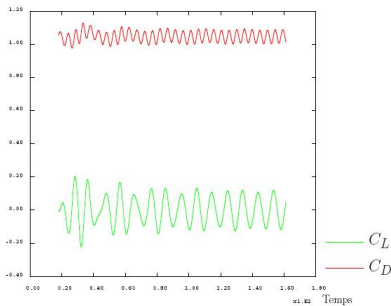
Validation 1

Validation 2

Conclusion

$$F = \frac{f_0}{f_S} = 0.6 \text{ et } A = 0.25$$

► Accrochage fréquentiel : non



Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite

Synchrone

Schéma Explicite

Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

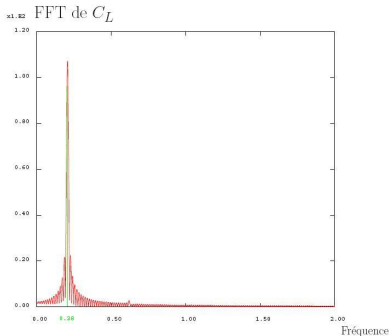
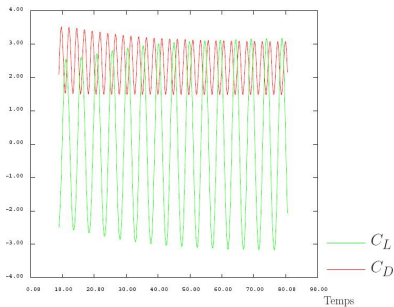
Validation 1

Validation 2

Conclusion

$$F = \frac{f_0}{f_S} = 1.2 \text{ et } A = 0.8$$

► Accrochage fréquentiel : oui



Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite

Synchrone

Schéma Explicite

Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

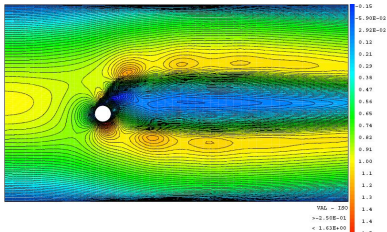
Validation

Validation 1

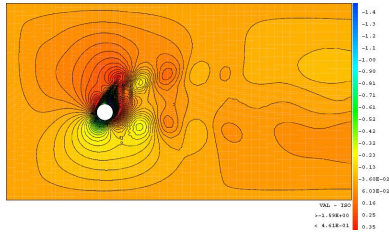
Validation 2

Conclusion

► Mode d'émission tourbillonnaire : 2P



Composante u_x de la vitesse du fluide à $t^* = 161.12$



Composante u_y de la vitesse du fluide à $t^* = 161.12$

Conclusion

Le code que l'on a développé dans CASTEM, permet donc de prédire les phénomènes liés au cas d'un cylindre en oscillations dans un écoulement laminaire incompressible.

Oscillations d'un cylindre dans un espace fluide confiné

Implémentation
d'algorithmes de
Couplage en
Interaction
Fluide-Structure
sous CASTEM

Mustapha
BENAOUICHA

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

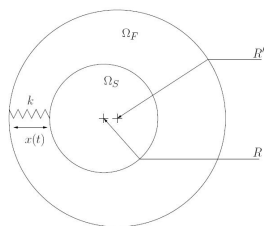
Algorithme utilisé

Validation

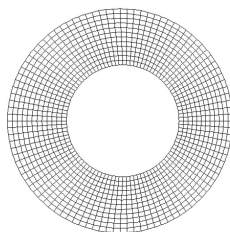
Validation 1

Validation 2

Conclusion



Domaine de calcul



*Maillage du domaine fluide :
1200 éléments.*

On s'intéresse aux coefficients de masse et d'amortissement ajoutés.

Fritz (1972) dans le cas d'un fluide parfait.

Synyavaski (1976) puis Chen (1987) dans le cas d'un fluide visqueux.

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Mouvement du cylindre imposé

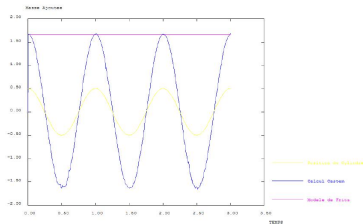
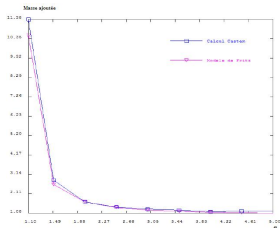
Le mouvement du cylindre est décrit par l'équation :

$$\ddot{x} + \omega_0 x = 0$$

ω_0 est la pulsation du mouvement oscillatoire

On étudie séparément les cas d'un fluide parfait et d'un fluide visqueux

Fluide parfait



Calcul de masse ajoutée en
fonction du ratio de
confinement $\alpha = \frac{R'}{R}$

Evolution des efforts de
pression dans le temps pour
 $\alpha = 2$

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

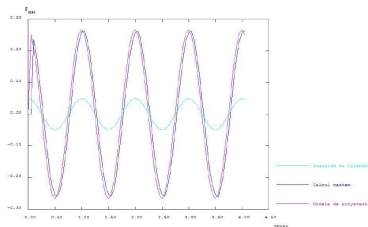
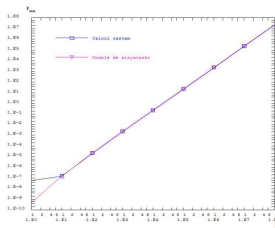
Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Fluide visqueux



Efforts de pression maximum
en fonction du nombre de
Stokes $S = \frac{\omega_0 R^2}{\nu}$

ν : viscosité cinématique du fluide

Evolution des efforts fluides
dans le temps pour $\alpha = 2$ et
 $S = 10000$

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite

Synchrone

Schéma Explicite

Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Le mouvement du cylindre est déterminé par l'action couplée fluide-solide.

Equation du mouvement :

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2x = 0$$

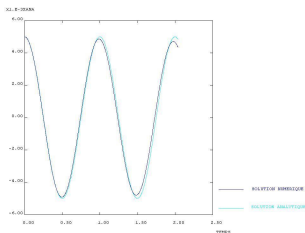
Solution analytique :

$$x(t) = x_0 \cos [\omega(\xi)t] \cdot e^{-\xi\omega t}, \quad |\xi| < 1$$

$$\omega(\xi) = \omega\sqrt{1 - \xi^2}$$

Fluide parfait

Dans ce cas $\xi = 0$ (pas d'amortissement) et $\omega < \omega_0$



Déplacement du cylindre calculé par l'algorithme implicite d'ordre deux avec 50 sous-pas de temps pour le solide.

ω est déterminé par le modèle de Fritz.

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

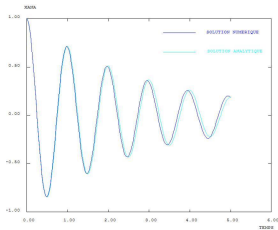
Validation 1

Validation 2

Conclusion

Fluide visqueux

Dans ce cas $\xi \neq 0$ et $\omega < \omega_0$



Déplacement du cylindre calculé par l'algorithme implicite d'ordre deux avec 50 sous-pas de temps pour le solide.

Plan de l'Exposé

Introduction

Algorithmes de
couplage en IFS

Schéma Explicite
Synchrone

Schéma Explicite
Asynchrone

Schéma Implicite

Exemples d'application

Exemple 1

Exemple 2

Algorithme utilisé

Validation

Validation 1

Validation 2

Conclusion

Conclusion

Les oscillations du cylindre sont assez bien prédites par l'algorithme implicite d'ordre deux avec sous-pas de temps pour le solide.

Conclusion Générale

- ▶ Validation et mise en oeuvre d'un code d'IFS sous CASTEM
- ▶ Bonnes prédictions dans le cas de l'écoulement autour d'un cylindre en oscillations
- ▶ Résultats satisfaisants pour le cas d'un cylindre en oscillation dans un espace fluide confiné
- ▶ Algorithme implicite avec sous-pas de temps pour le solide