

Interaction fluide structure appliquée aux éoliennes

Nicolas CAPRON, Mhamed SOULI, Gilmar MOMPEAN
Laboratoire de Mécanique de Lille



Introduction

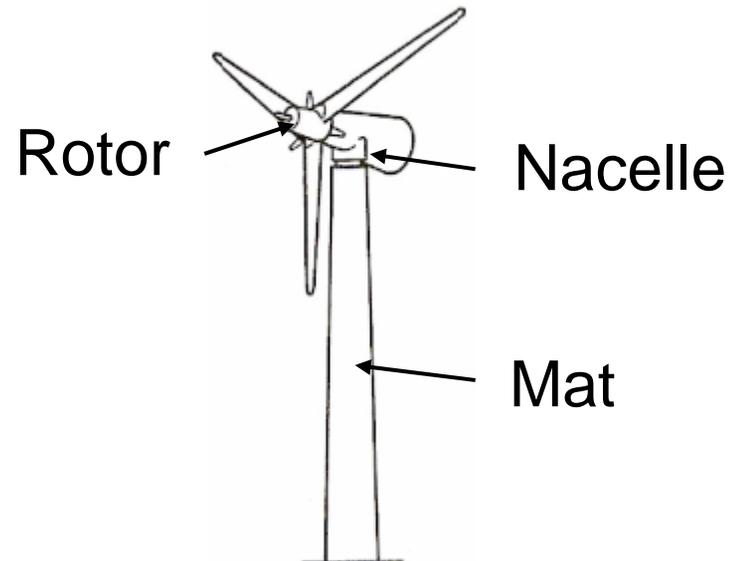
Performance
de la pale



Production
d'énergie

Compromis

- rendement aérodynamique
- légèreté
- résistance statique
- tenue en fatigue



Eolienne à axe horizontal

Problématique

Processus itératif

Configuration aérodynamique de la pale



Structure légère et résistante aux conditions de vent

Processus direct

Géométrie + Conditions d'exploitation



Rotation du rotor + Déformée de la pale

Plan

- Description du processus de couplage
 - Méthode de couplage fort
 - Méthodes de projection
- Techniques de maillage
 - Maillage glissant
 - Remaillage local du domaine
- Conclusion

Equations gouvernantes

Fluide

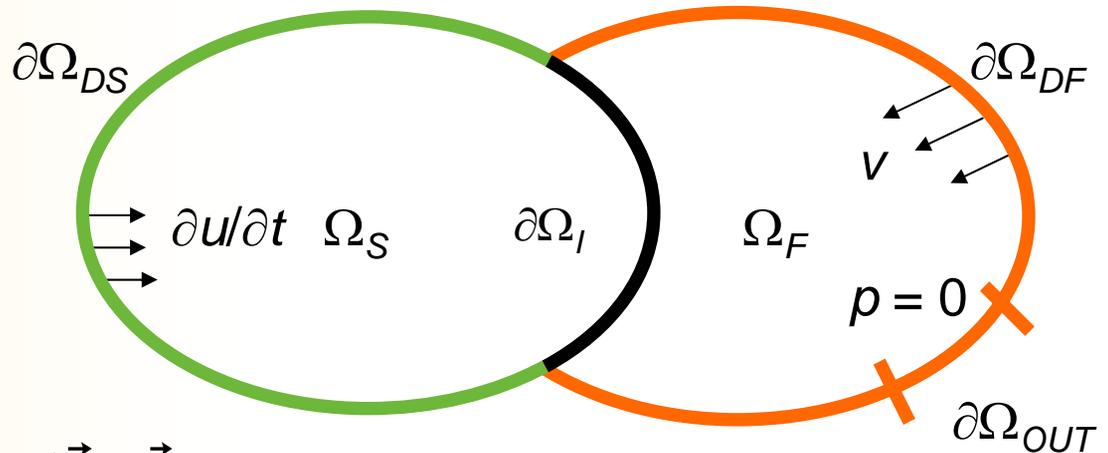
$$\frac{\partial \rho_F v_F}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_F v_F \otimes v_F) = \operatorname{div}(\sigma_F) + f_F$$
$$\operatorname{div}(v_F) = 0$$

Structure

$$\rho_S \frac{\partial v_S}{\partial t} = \operatorname{div}(\sigma_S) + f_S$$

Interface

$$(v_S - v_F) \vec{n} = \vec{0} \quad \text{et} \quad (\sigma_S - \sigma_F) \vec{n} = \vec{0}$$



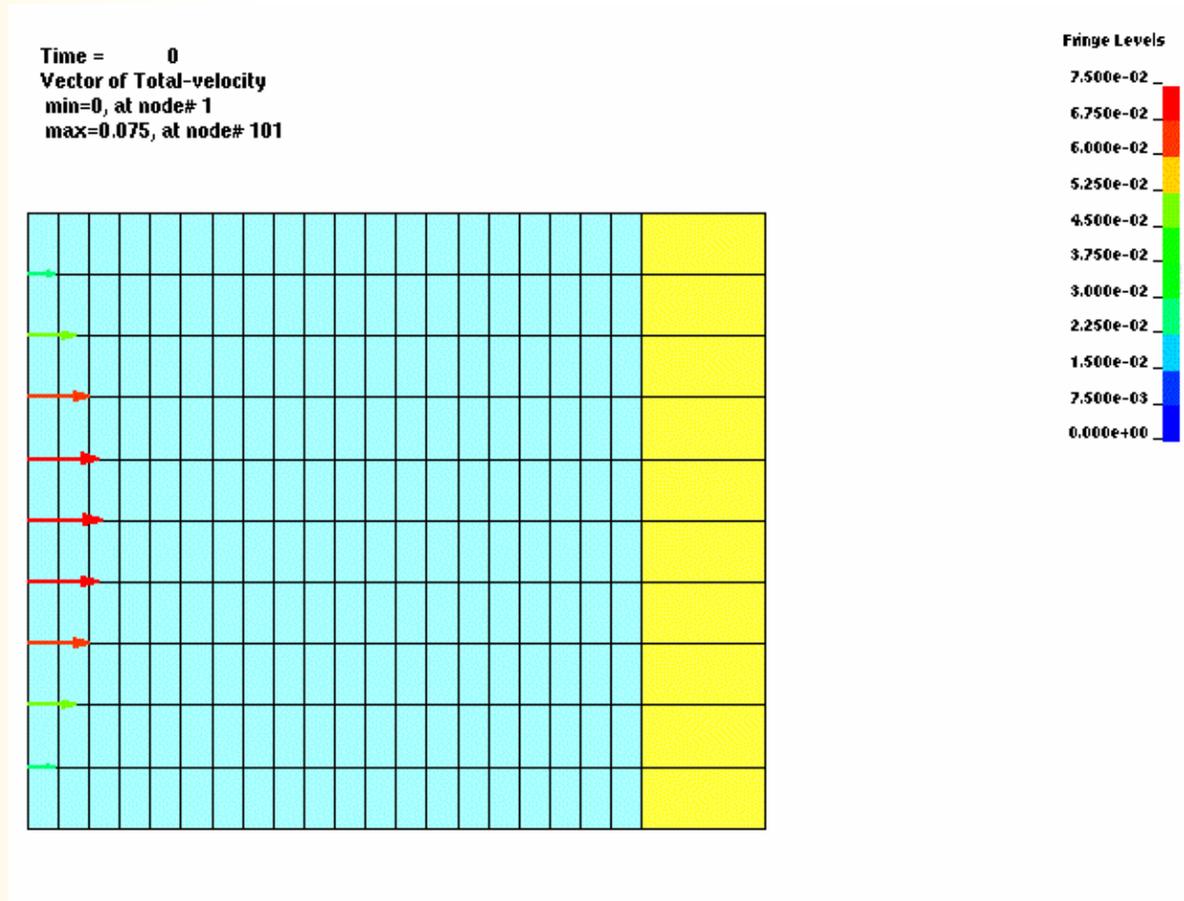
Couplage fort

Nœuds communs à l'interface entre le fluide et la structure

Nœuds communs de l'interface.



Efforts entre fluide et structure



Méthode split pour Navier-Stokes généralisé

Problème couplé



Série de problèmes découplés

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \otimes v) = \text{div}(\sigma) + f \end{cases} \Leftrightarrow \frac{\partial \phi}{\partial t} + \text{div}(\phi \cdot v) = S$$

Avec $\phi = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho v \end{bmatrix}$ et $S = \begin{bmatrix} 0 \\ \text{div}(\sigma) + f \end{bmatrix}$

Décomposition

Deux phases distinctes

- Phase Lagrangienne
- Phase d'advection

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \text{div}(\phi.v) = S$$



$$\frac{\partial \phi_L}{\partial t} = S$$



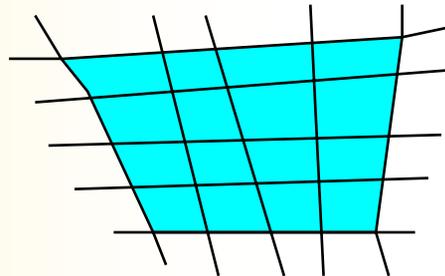
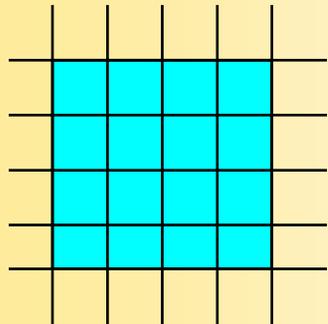
Equation de transport $\frac{\partial \phi}{\partial t} + \text{div}(\phi.v) = 0$ avec $\phi(t=0) = \phi_L$

Problème de Stokes

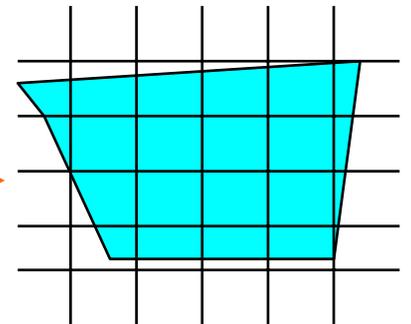
Advection

Projection du maillage Lagrangien sur un maillage ALE

Cycle
Lagrangien



Cycle
d'advection



Pas de temps

Méthodes de projection

Introduites par Chorin (1968)

Pression et champ de vitesse satisfaisant
l'incompressibilité du fluide



Découplage de la vitesse et de la pression

Développées par Gresho (1990)

→ Projection '*optimale*'

Algorithme 1

1. Vitesse intermédiaire

$$v^{*n+1} = v^n + \Delta t \left(\frac{\mu_F}{\rho_F} \Delta v^n - \frac{1}{\rho_F} \nabla p^n + f^n \right) \quad \text{sur } \Omega_F$$

2. Projection

$$\frac{1}{\rho_F} \Delta \partial p^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot v^{*n+1} \quad \text{sur } \Omega_F$$
$$p^{n+1} = p^n + \partial p^{n+1}$$

3. Correction de la vitesse

$$v^{n+1} = v^{*n+1} - \frac{\Delta t}{\rho_F} \nabla \partial p^{n+1} \quad \text{sur } \Omega_F$$

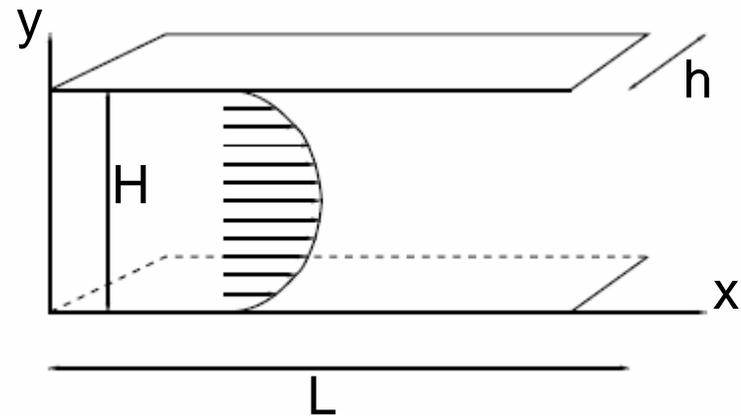
Écoulement de Poiseuille

Solution analytique

$$\Delta P = 12\mu U_m \frac{L}{H^2}$$

Données

- $\mu = 0,04 \text{ m}^2/\text{s}$
- $U_m = 0,2 \text{ m/s}$
- $L = 0,2 \text{ m}$
- $H = 0,04 \text{ m}$



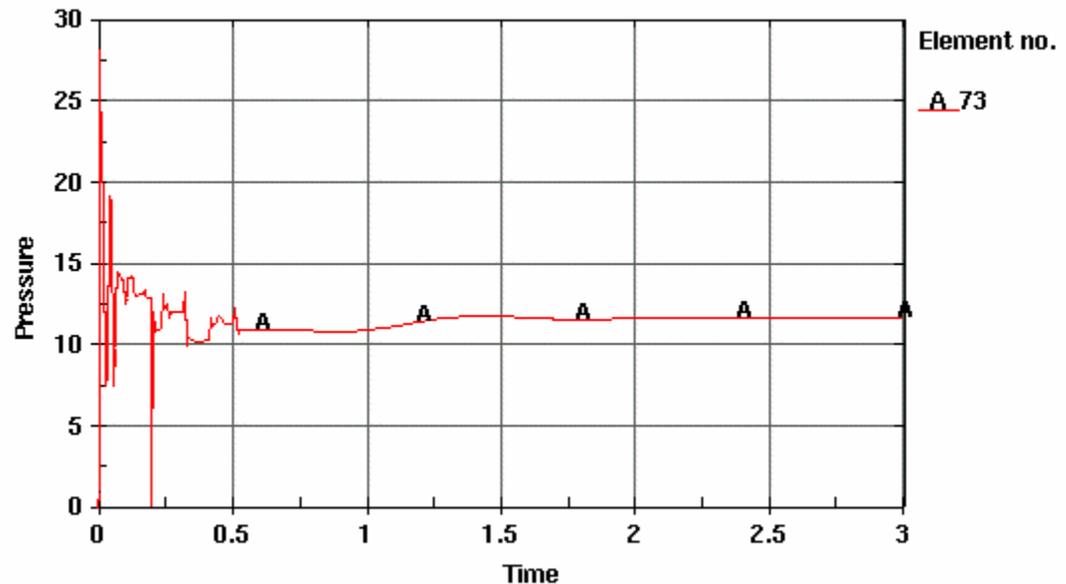
Représentation schématique
du canal plan

→ $\Delta P = 12 \text{ Pa}$

Convergence algorithme 1

Période transitoire
avec des pics de
pression importants

Chargement faussé
sur la structure



Evolution de la pression

Algorithme 2

Christon & Gresho (2002)

1. Accélération

$$a^{*n+1} = \frac{\mu_F}{\rho_F} \Delta v^n + f^n \quad \text{sur } \Omega_F$$

2. Projection

$$\frac{1}{\rho_F} \Delta p^{n+1} = \nabla \cdot a^{*n+1} \quad \text{sur } \Omega_F$$

3. Incrémentation de la vitesse

$$v^{n+1} = v^n + \Delta t \left(a^{*n+1} - \frac{1}{\rho_F} \nabla p^{n+1} \right) \quad \text{sur } \Omega_F$$

Condition initiale

$$v^{n+1} = v^n + \Delta t \left(a^{*n+1} - \frac{1}{\rho_F} \nabla p^{n+1} \right)$$

$$\nabla \cdot v^n = 0 \quad \Rightarrow \quad \nabla \cdot v^{n+1} = 0$$

Nécessité d'avoir un champ de vitesse initial à divergence nulle pour obtenir un champ satisfaisant la condition d'incompressibilité



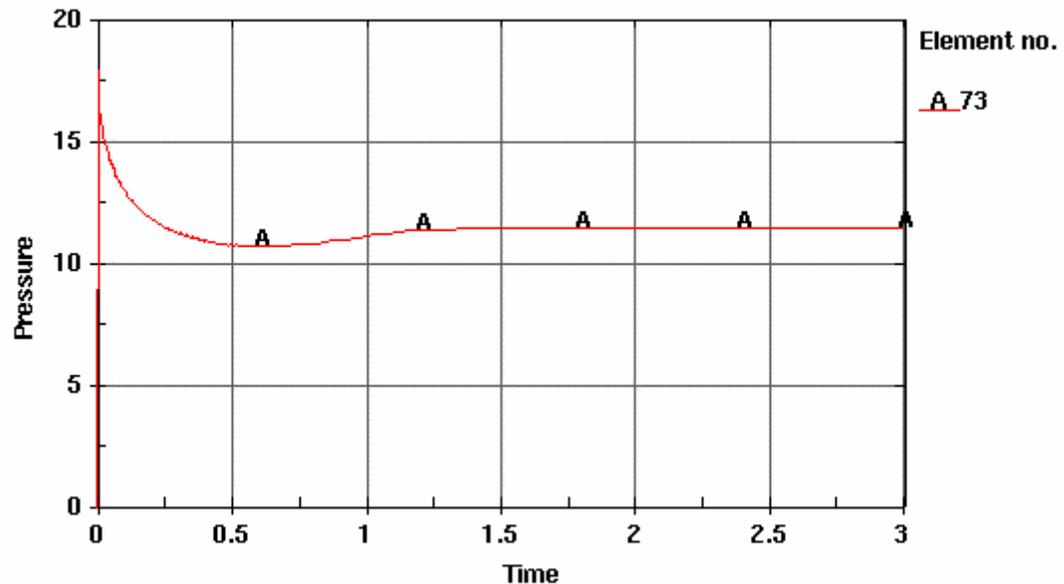
Utilisation de l'algorithme 1 pour le premier pas de temps

Convergence algorithme 2

Pic de pression au premier pas de temps

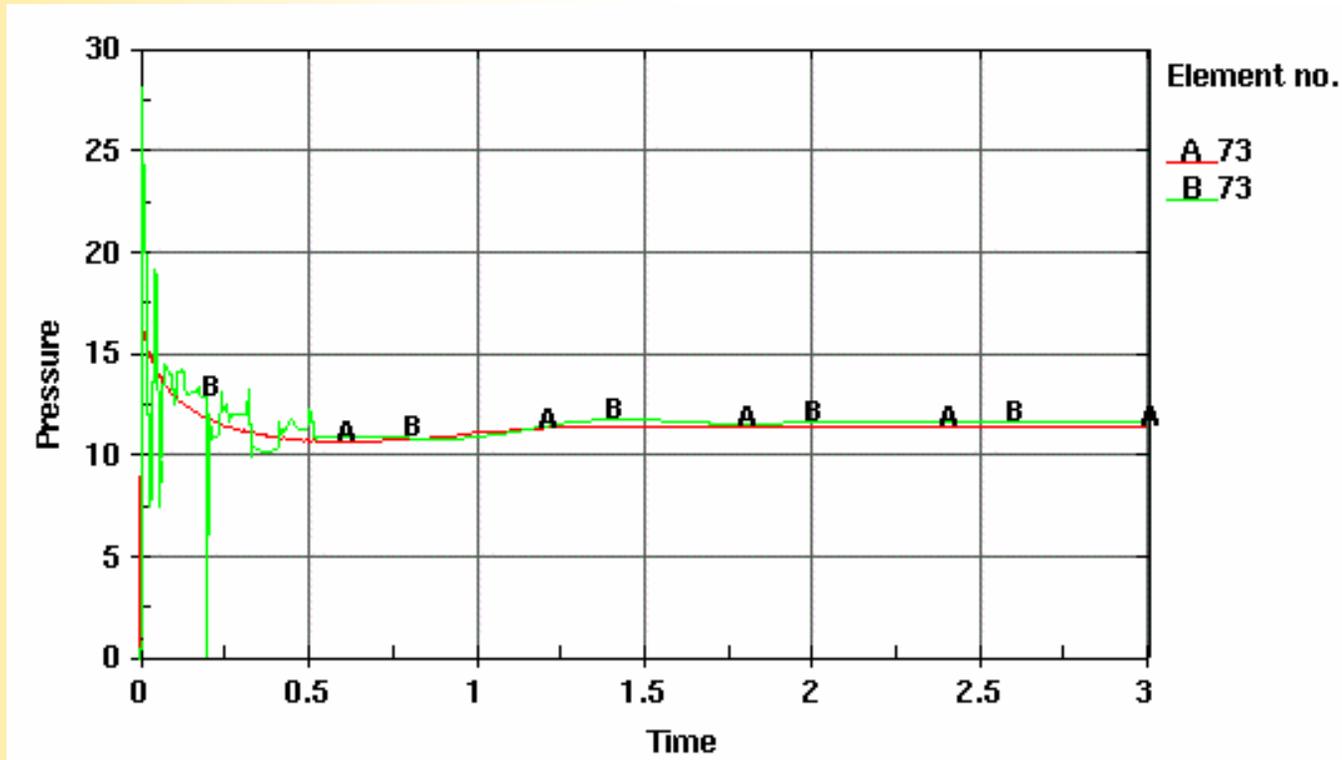
Lissage de la courbe de pression

Continuité des forces de pression appliquées à la structure



Evolution de la pression

Comparaison



Evolution de la pression
(— Algorithm 1 — Algorithm 2)

Algorithme de couplage (1/2)

- Boucle sur les éléments fluides **et sur les éléments solides**

- Calculs $\dot{\varepsilon}$, ε étant le tenseur de déformation

σ , tenseur des contraintes

$$F_{\text{interne}} = \int_K \sigma : \nabla N_i dv$$

$$F = F_{\text{interne}} + F_{\text{externe}}$$

- Calculs cinématiques : accélération, vitesse et déplacement

- Boucle uniquement sur les éléments fluides

- Calcul de la position des nœuds en fonction du maillage ALE
- Advection de la quantité de mouvement

Algorithme de couplage (2/2)

- Projection du champ de vitesse fluide sur un espace à divergence nulle
 - $\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } t=0, \text{ calcul de la divergence de la vitesse} \\ \text{Si } t \neq 0, \text{ calcul de la divergence de l'accélération} \end{array} \right.$
 - Résolution de l'équation de Poisson pour la pression
 - Correction de la vitesse

Gradient de vent

Profil de vitesse

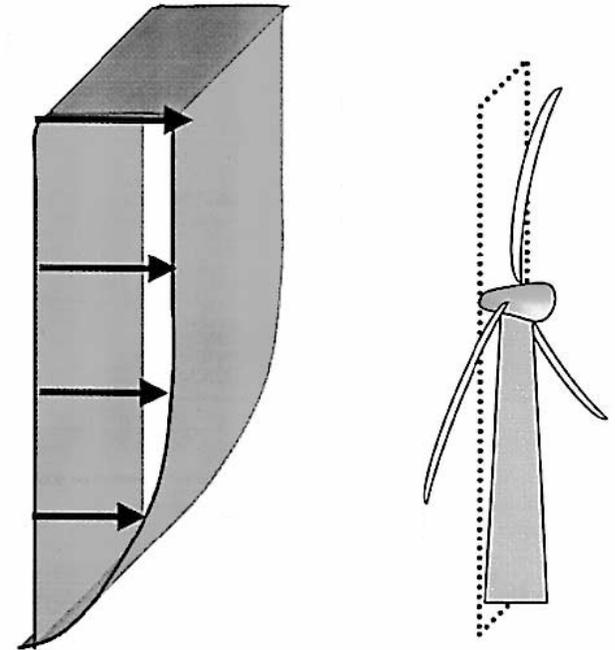
$$V(H) = V_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha$$

V_0 : vitesse moyenne

H_0 : hauteur de la nacelle

α : coefficient de rugosité du sol

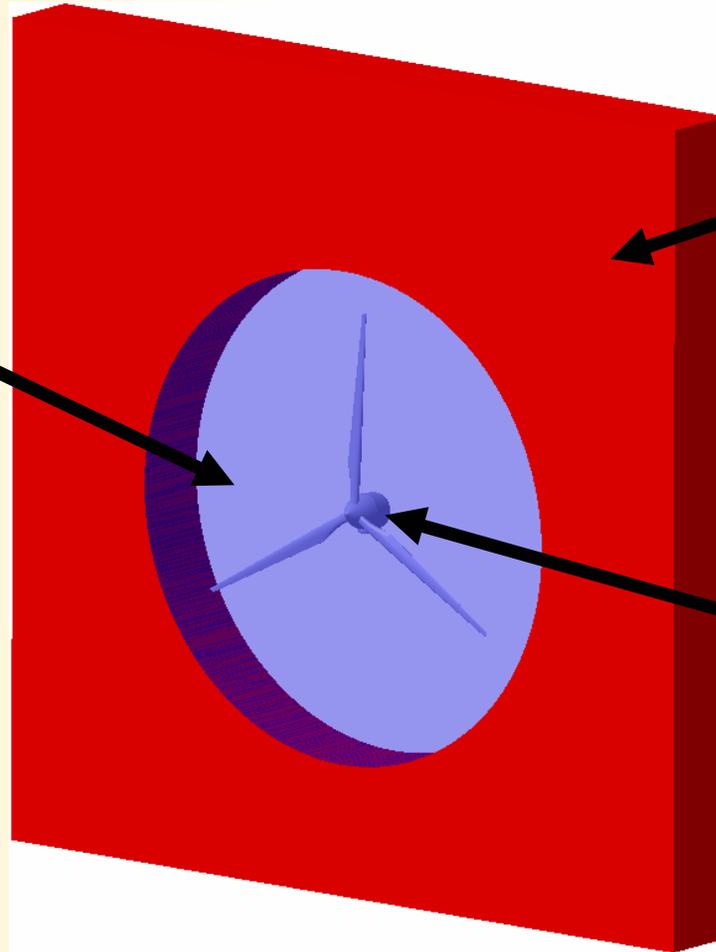
$$0,1 \leq \alpha \leq 0,4$$



Composante
axiale du vent

Domaine d'étude

Domaine fluide
mobile
↓
Maillage ALE



Domaine fluide
fixe
↓
Maillage Eulérien

Structure
↓
Maillage Lagrangien

Coupe transversale du
domaine d'étude

Maillage glissant

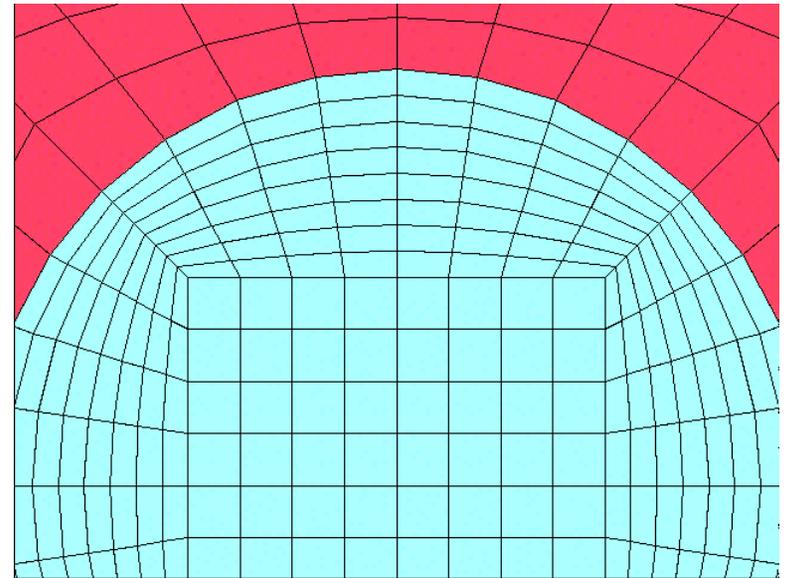
Glissement du maillage mobile le long de l'interface



Formation de deux maillages discontinus de part et d'autre de l'interface



Moyen de calcul des flux à travers l'interface



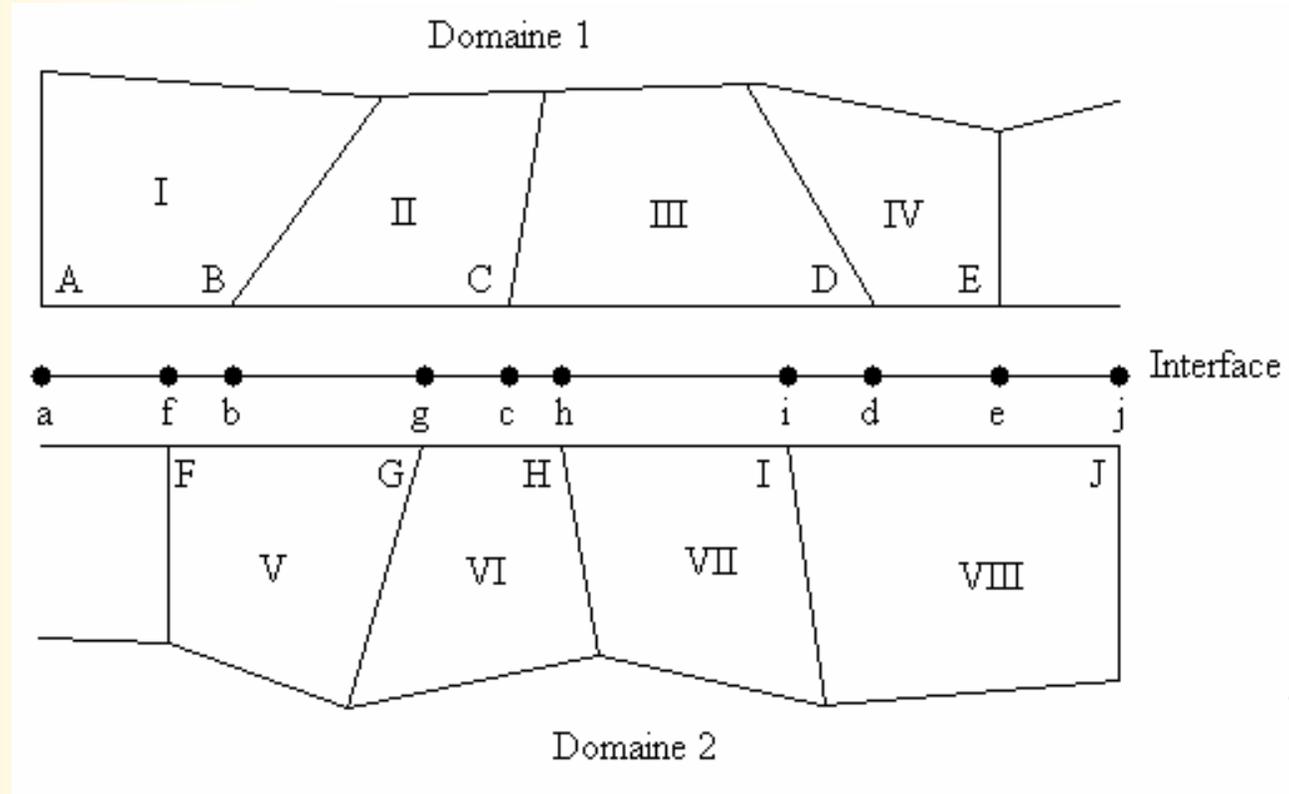
Maillage glissant

Calcul des flux

Projection des maillages sur l'interface



Décomposition de l'interface permettant le calcul des flux à travers ses faces.



Interface 2D

Remaillage local

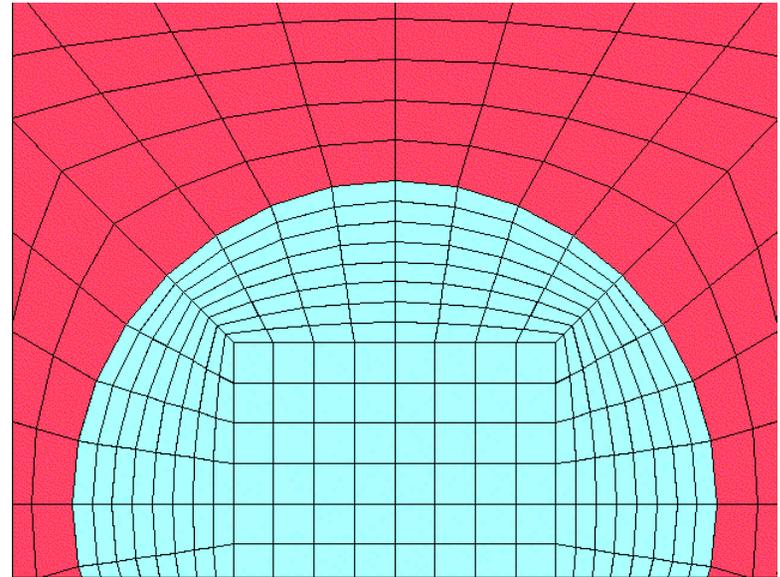
Coïncidence entre les nœuds du maillage fixe et du maillage mobile au niveau de l'interface



Distorsion des éléments à l'interface



Remaillage ciblé afin de conserver une bonne qualité de maillage



Remaillage local

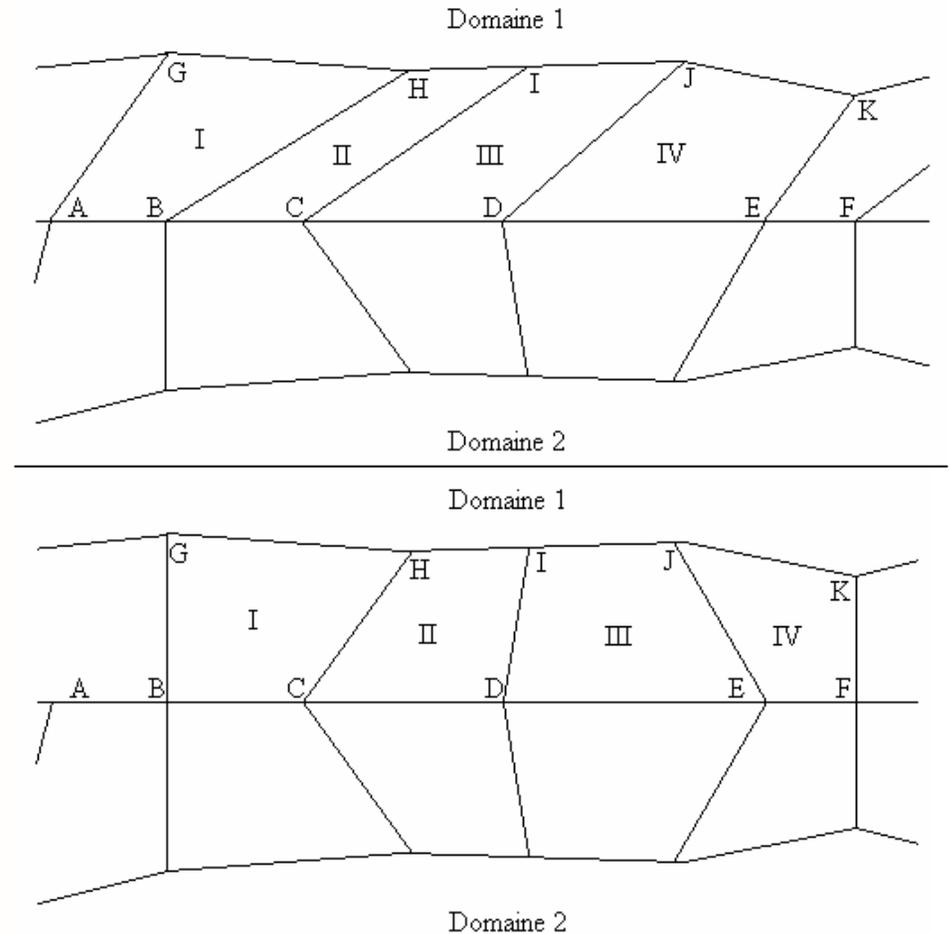
Permutation des connectivités

Au temps t

- I = A-B-H-G
- II = B-C-I-H
- III = C-D-J-I
- IV = D-E-K-J

Au temps $t+\Delta t$

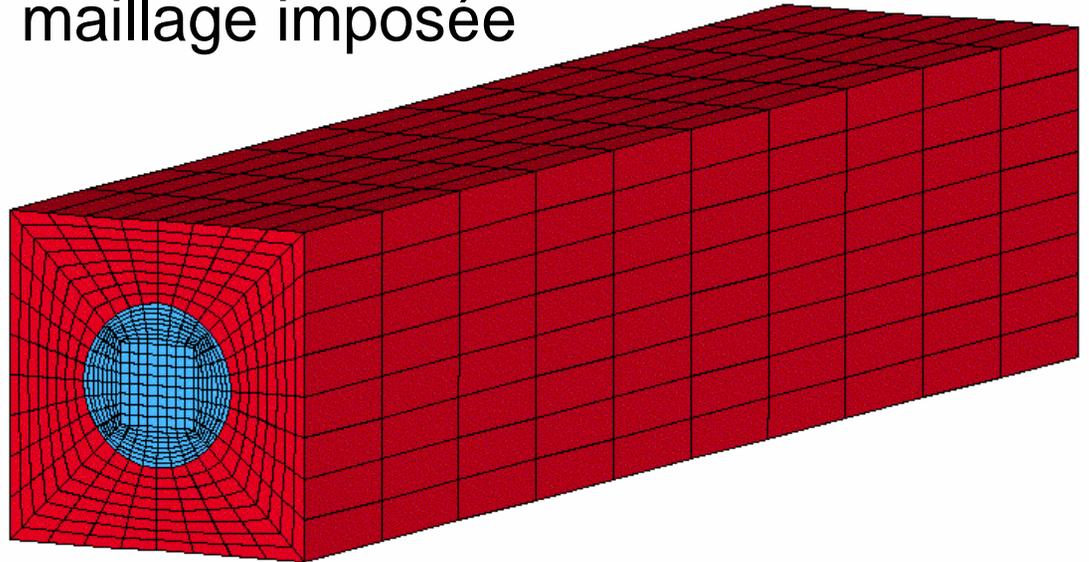
- I = B-C-H-G
- II = C-D-I-H
- III = D-E-J-I
- IV = E-F-K-J



Validation

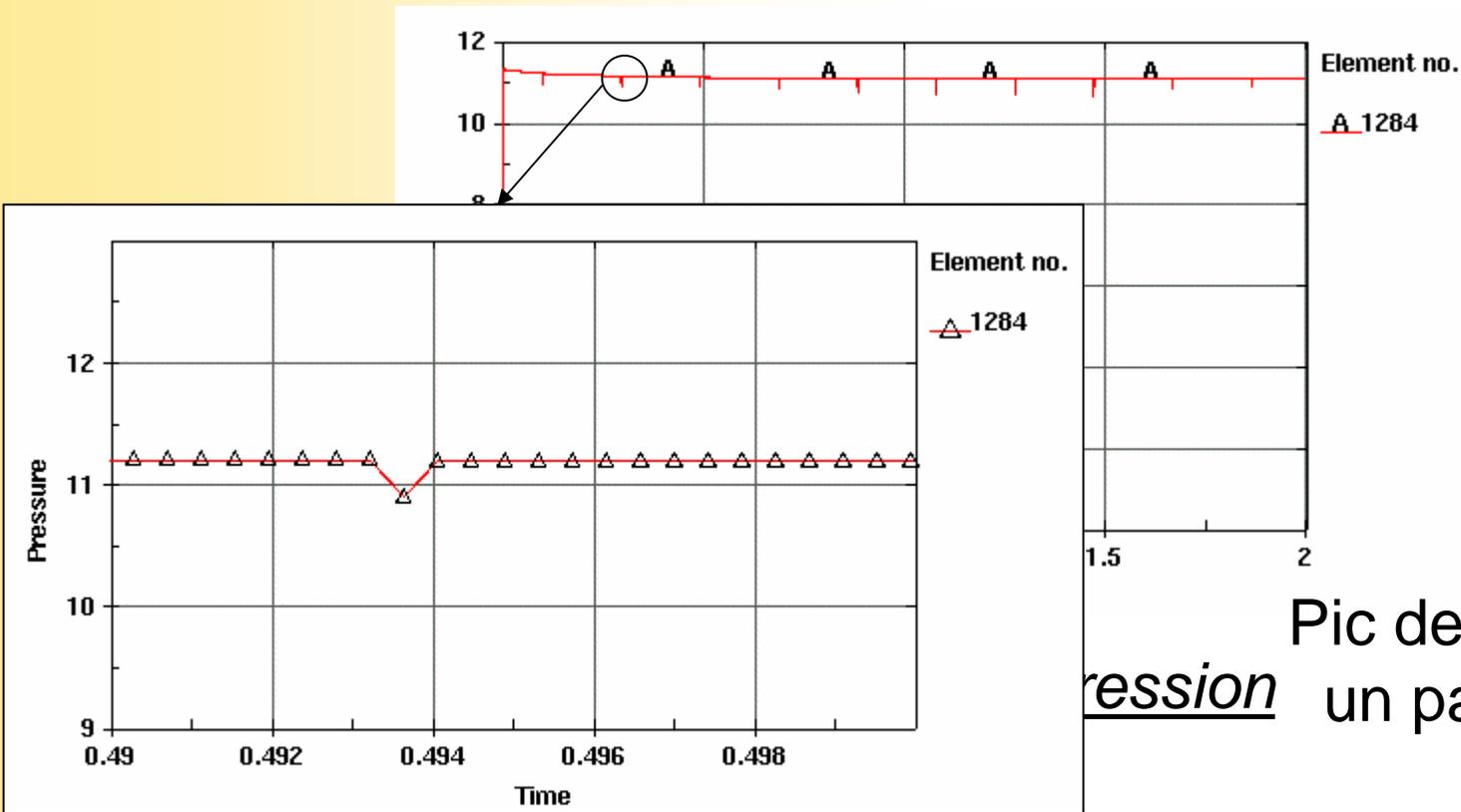
Ecoulement canal plan

Vitesse de rotation du maillage imposée



Maillage 3D

Convergence



pression Pic de pression sur un pas de temps

Erreur relative < 3%

Conclusion

- Méthode de couplage fort pour laquelle :
 1. le fluide et la structure sont résolus pendant le même pas de temps et dans le même process des éléments.
 2. la résolution explicite en vitesse et implicite en pression est bien adaptée pour les problèmes d'écoulement autour des éoliennes puisqu'ils sont transitoires.

- Méthode simple de remaillage limitée aux problèmes de domaine tournant permettant :
 1. d'éviter un remaillage automatique.
 2. d'utiliser d'un maillage en hexaédrique.

Perspectives

- Simulation de structures tournantes rigides
- Simulation de structures tournantes déformables
- Prise en compte du taux de turbulence dans les conditions d'écoulement