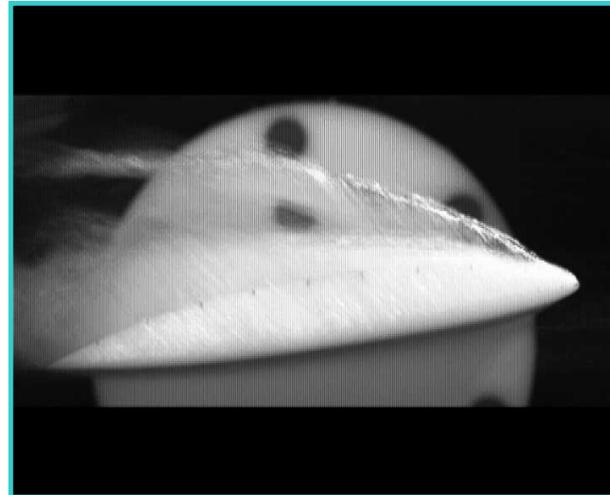


Couplage fluide-structure en écoulement cavitant

M. BENAOUICHA¹, J.A. ASTOLFI¹, O. COUTIER-DELGOSHA²

¹ Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENav). BCRM Brest, CC 600. 29240 BREST Cedex 9

² Arts et métiers ParisTech / Laboratoire de Mécanique de Lille (UMR 8107), 8 bld Louis XIV,
59046 Lille cedex



Groupe M2EN
Mécanique et Énergétique en Environnement Naval

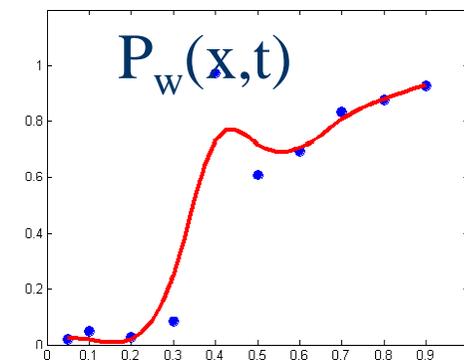
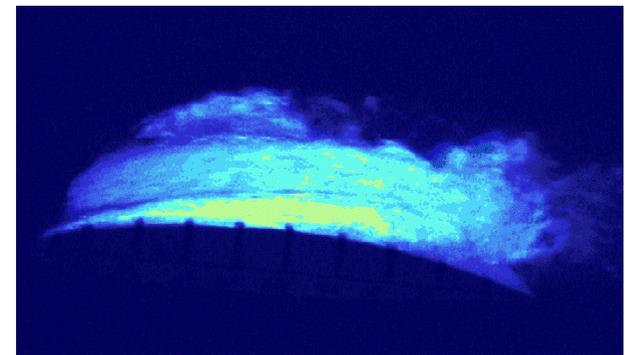
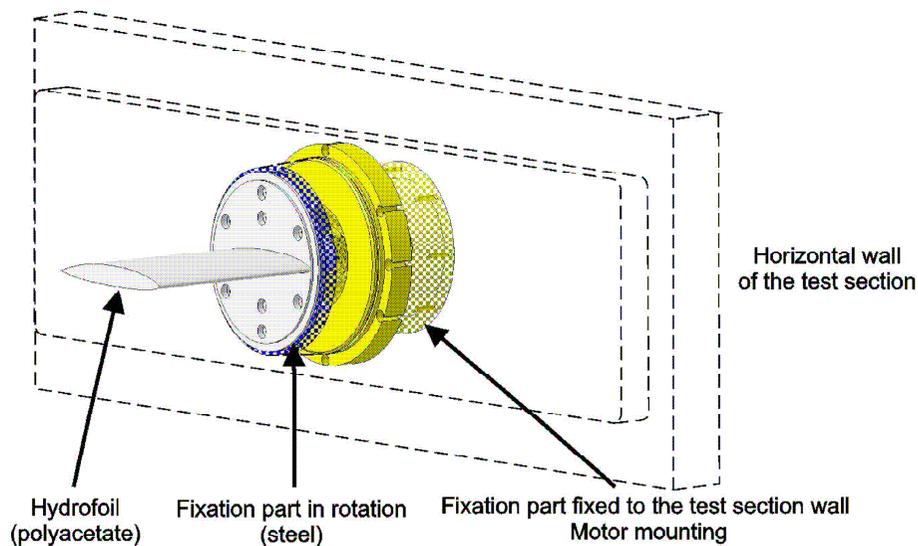


Objectifs

- Modélisation par couplage entre un code « structure » et un code « cavitation » : couplage faible
- Caractérisation expérimentale du comportement vibratoire d'une structure en écoulement cavitant
- **Intérêt industriel** : conception et dimensionnement des structures marines avec prise en compte du couplage fluide structure (safran, stabilisateurs, hélices marines...).
- **Intérêt académique** : IFS en écoulement diphasique

Configuration étudiée

- Hydrofoil NACA 66 (C-F-F-F) Matériau : Polyacetate, $E = 3GPa$; $\nu = 0.35$; $\rho_s = 1480kg/m^3$.
- Cavitation par poche attachée instationnaire
- $\alpha=8^\circ$, $R_e=0.75 \cdot 10^6$



Leroux J., Coutier-Delgosha O., and Astolfi J.A 2005 A joint experimental and numerical study of mechanisms associated to instability of partial cavitation on two-dimensional hydrofoil. *Physics of Fluids*, 17, 052101.

Modélisation Fluide (code IZ)

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_F}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_F u) = 0 \\ \frac{\partial (\rho_F u)}{\partial t} + \nabla (\rho_F u^2) = \nabla \cdot \sigma_F \end{cases}$$

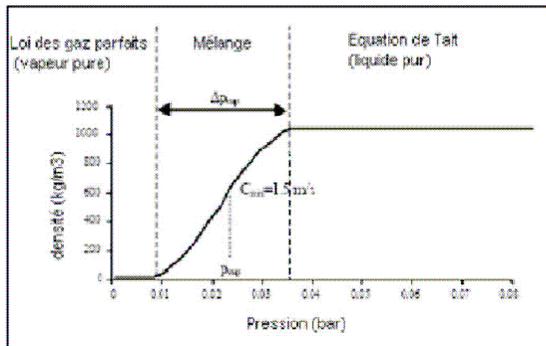
Méthode des volumes finis.

Modèle de turbulence : modèle $k-\omega$ RNG modifié.

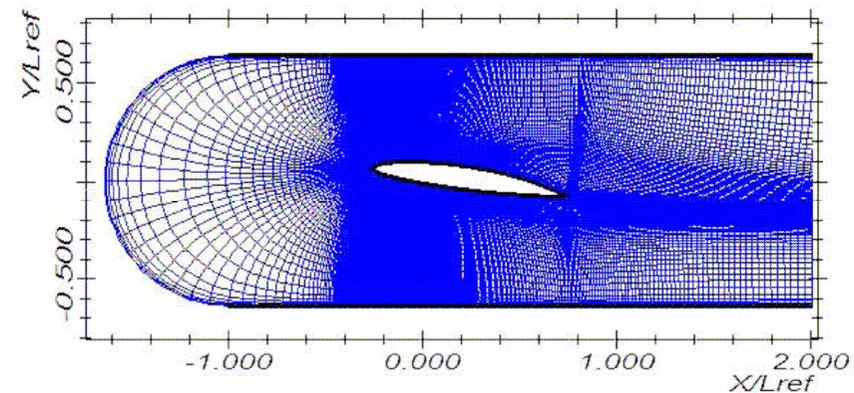
$$\mu_t = \frac{f(\rho_F) C_\mu k^2}{\epsilon} \quad \text{où} \quad f(\rho_F) = \rho_v + (1 - \alpha)^n (\rho_l - \rho_v)$$

Modèle de cavitation

$$\rho_F = f(P)$$



Loi d'état barotropique



→ Chargement fluide instantané sur la paroi $\mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t})$

Modélisation Structure (code Castem)

Modèle visco-élastique linéaire

$$\sigma_S = \frac{E}{1+\nu}\epsilon + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}\text{Tr}(\epsilon)I + \eta\dot{\epsilon}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho_S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma_S + f_v & \text{sur } \Omega \\ \xi = 0 & \text{sur } \partial\Omega_\xi \\ \sigma_S \cdot \mathbf{n} = \sigma_F \cdot \mathbf{n} & \text{sur } \partial\Omega_\sigma \\ \xi(\cdot, 0) = 0 & \text{sur } \Omega \\ \dot{\xi}(\cdot, 0) = 0 & \text{sur } \Omega \end{array} \right.$$

$$\sigma_F \cdot \vec{n} = -p \vec{n}$$

Discrétisation structure

Discrétisation spatiale : méthode des éléments finis.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}$$

$\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}} \in \mathbf{R}^N$: valeurs de $\xi, \frac{\partial \xi}{\partial t}, \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$ aux noeuds.
 \mathbf{M}, \mathbf{C} et \mathbf{K} matrices de masse, amortissement et rigidité.
 \mathbf{F} : vecteur des efforts.

Discrétisation en temps : algorithme centré de Newmark.

$$X_{n+1} = X_n + \Delta t_s \dot{X}_n + \frac{\Delta t_s^2}{2} \ddot{X}_n$$

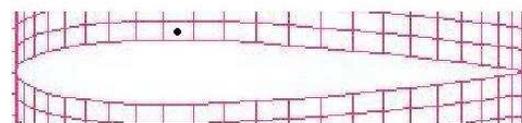
$$\dot{X}_{n+1} = \dot{X}_n + \frac{\Delta t_s}{2} \ddot{X}_n + \frac{\Delta t_s}{2} \ddot{X}_{n+1}$$

$$\Delta t_s = k \Delta t_F \quad k = 10$$

$$\Delta t_s = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

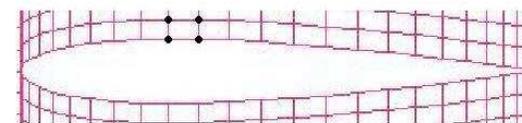
Couplage fluide structure : traitement de l'interface

Fluide en volumes finis maillage orthogonal en C



Pression calculée au centre de l'élément

Interpolation linéaire

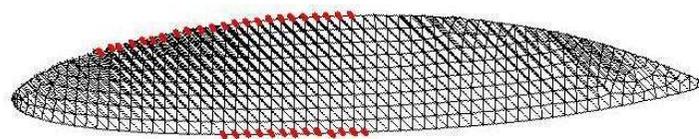


Pression sur les noeuds (411 noeuds sur l'interface)

Structure en éléments finis linéaires



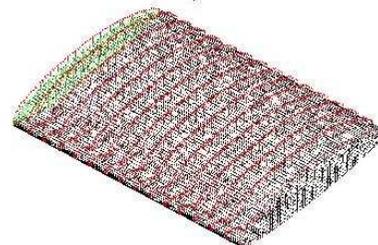
Interpolation de la pression :
Spline cubique

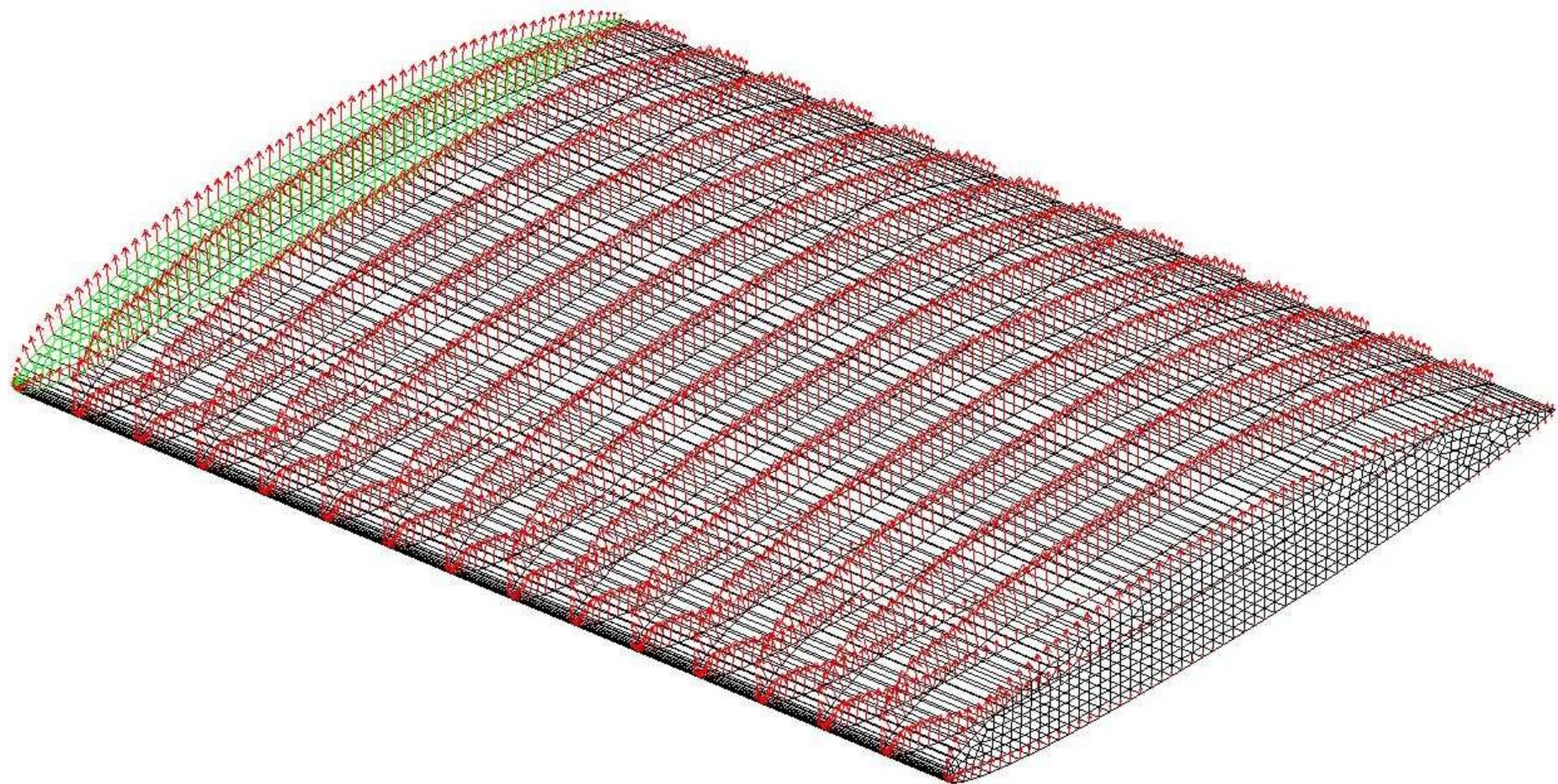


Pression sur la surface d'une section 2D (139 noeuds)



Distribution uniforme de la pression
le long de l'envergure de la structure 3D

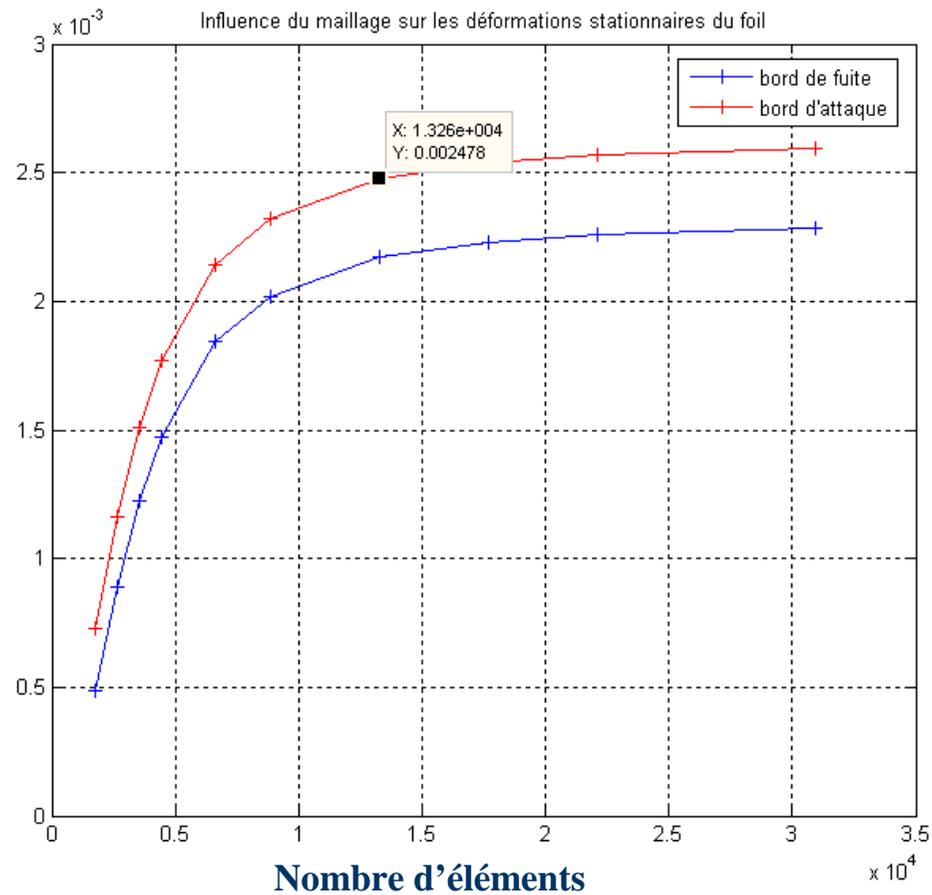




Pression normale uniforme le long de l'envergure (70 sections)

Influence du maillage

Déplacement statique

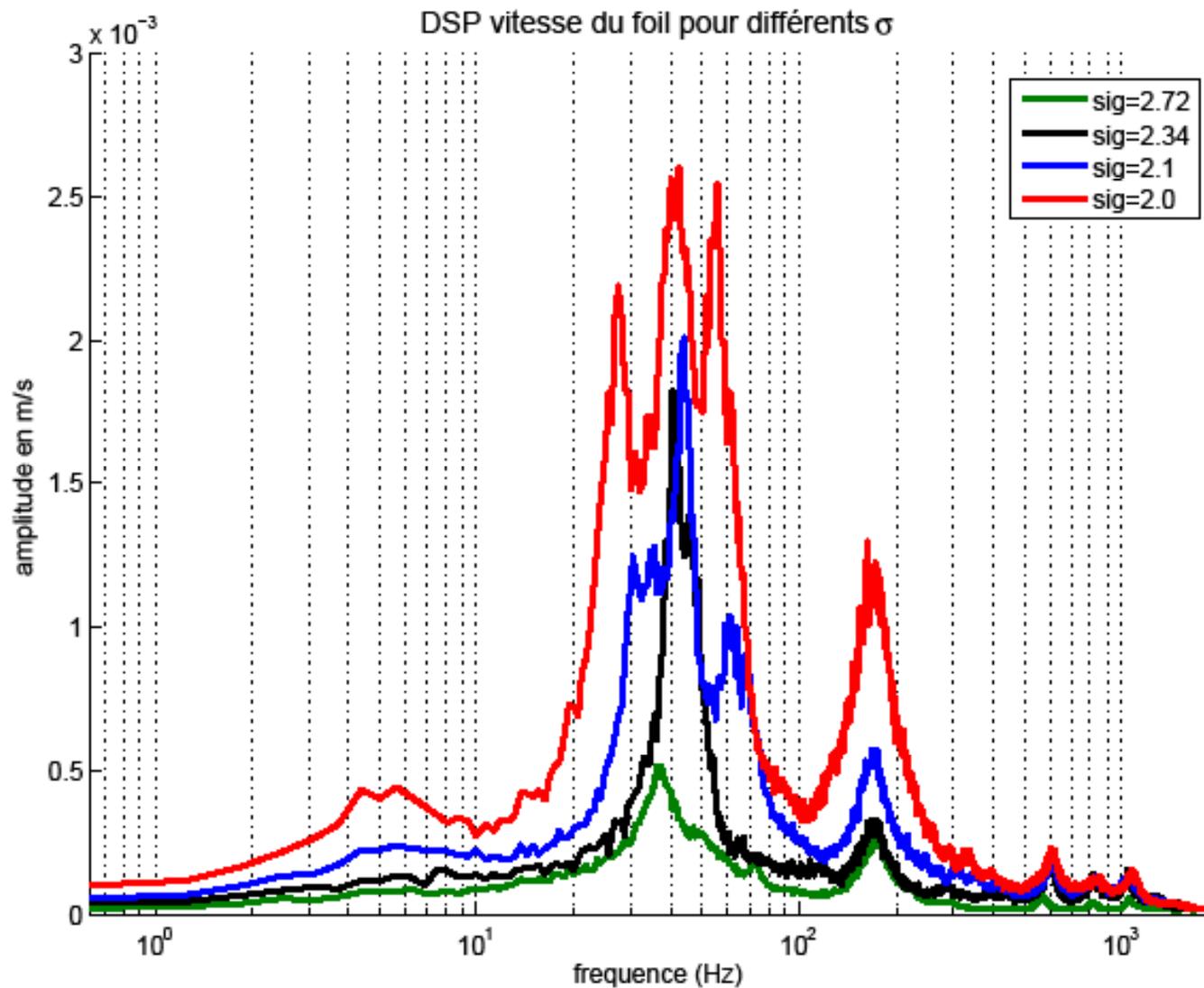


Protocole expérimental

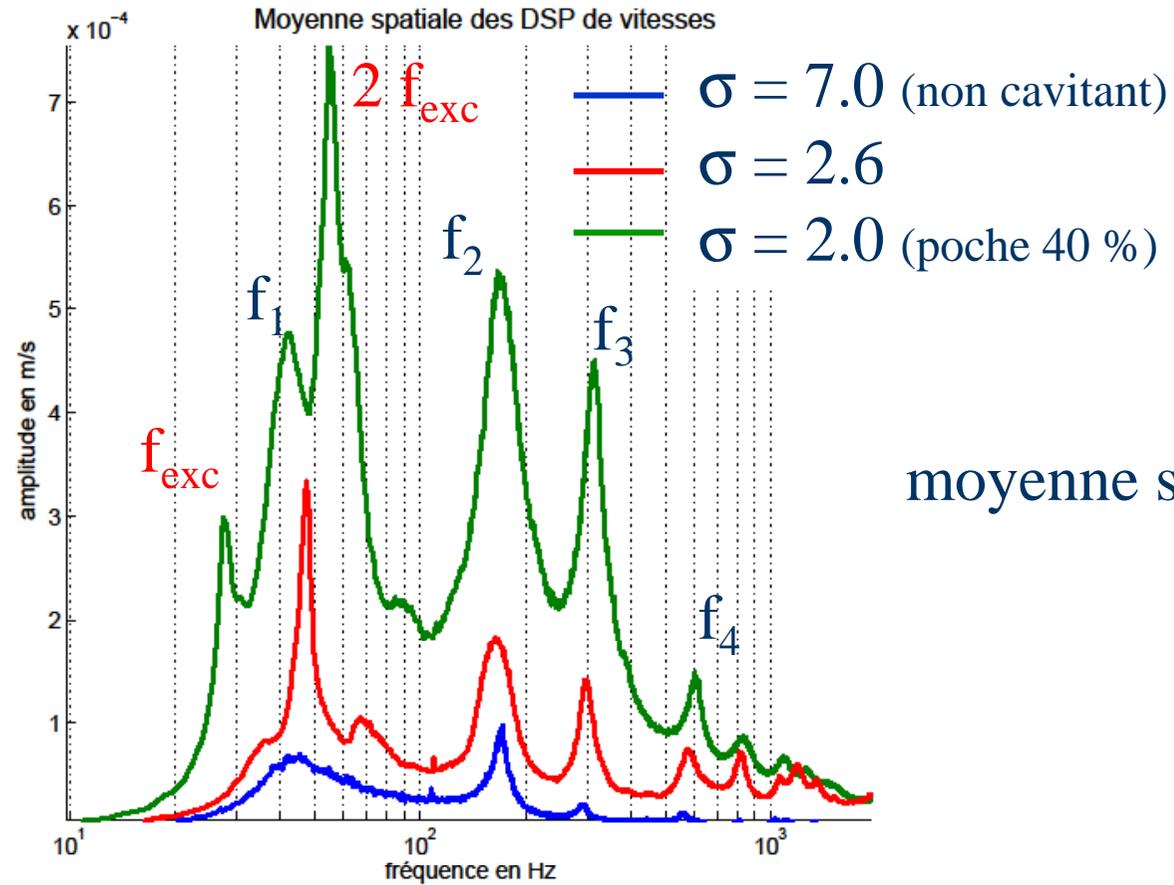
- Essais en tunnel de cavitation
- Structure :
 - Vibrométrie laser balayage de phase
 - Visualisation : déplacement (flèche en extrémité)
- Fluide : dynamique de la poche de cavitation
 - Visualisation par vidéo rapide et traitement d'images
 - Synchronisation Laser/Vidéo



Réponse vibratoire en écoulement cavitant (expérience)

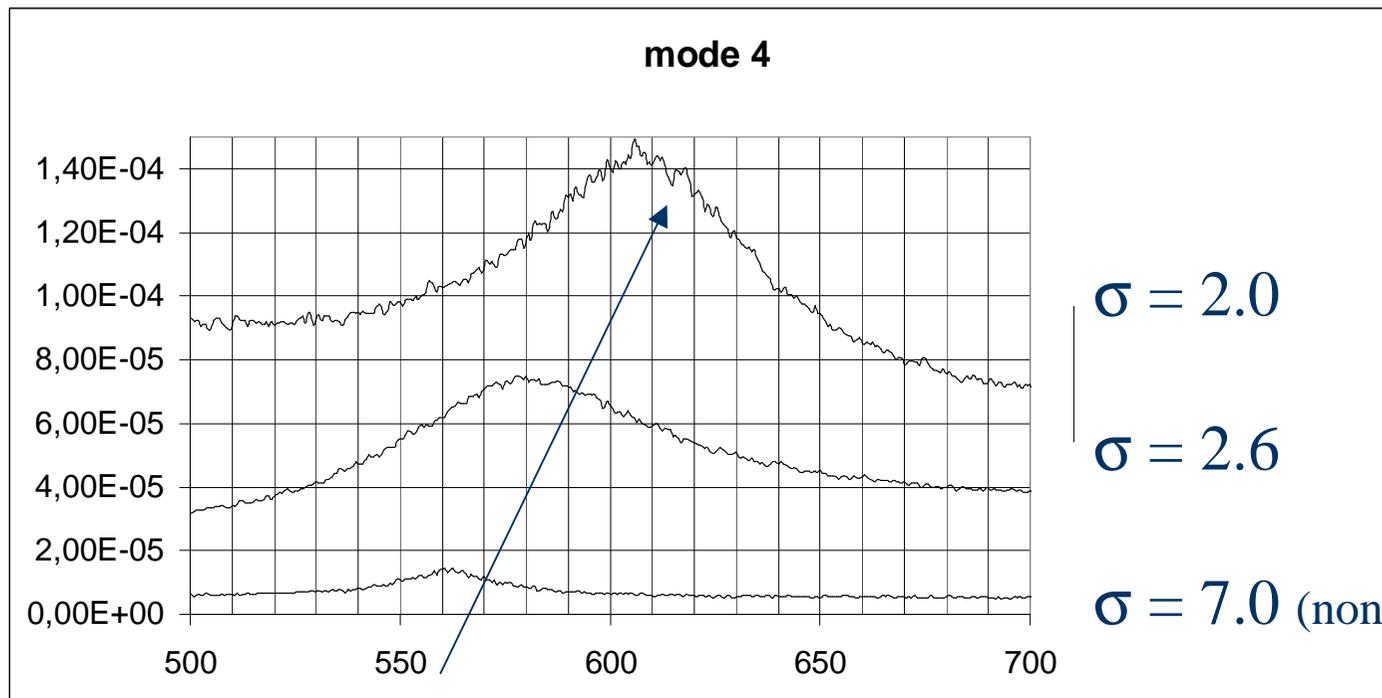


Réponse vibratoire en écoulement cavitant (expérience)



moyenne spatiale

influence de la cavitation sur les fréquences propres



sigma	mode 4	
	fmod	
2,05	605	
2,6	580	
7	562	

$$\sigma = 2.0$$

$$\sigma = 2.6$$

$$\sigma = 7.0 \text{ (non cavitant)}$$

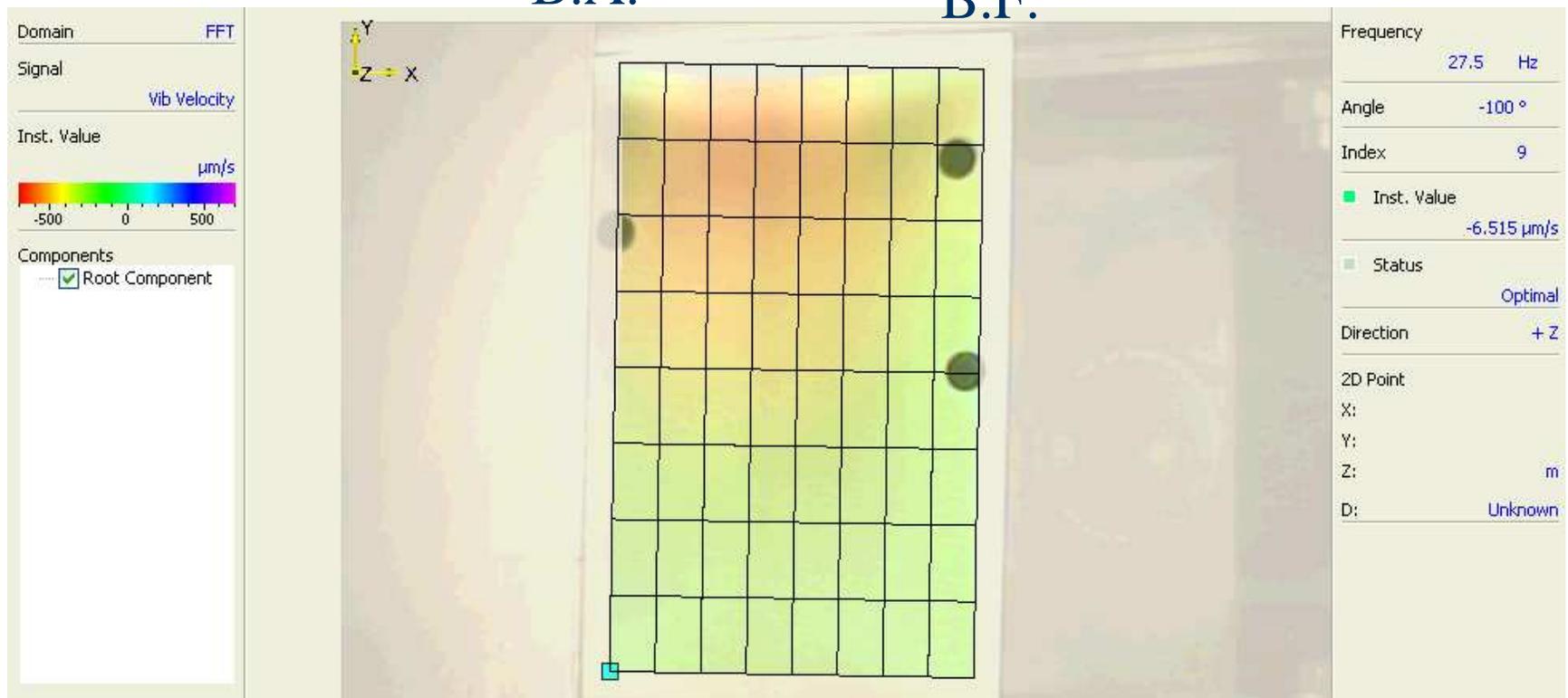
Glissement des fréquences propres vers les hautes fréquences
masse ajoutée fonction de la longueur de poche

Déformée

Déformée à la fréquence d'oscillation de la poche de cavitation

B.A.

B.F.

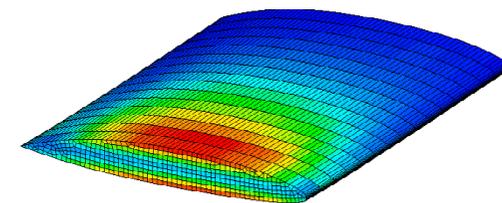
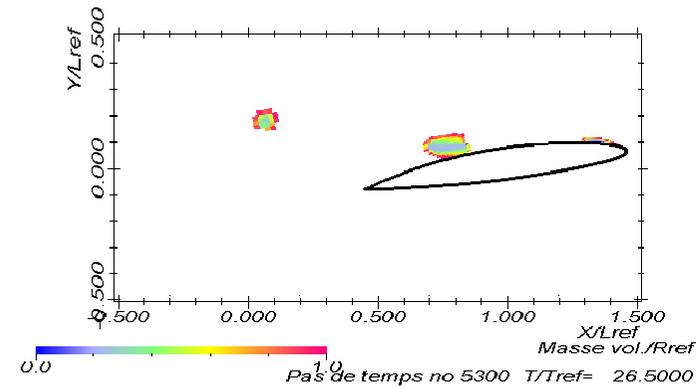


encastrement

Comparaison expé /num



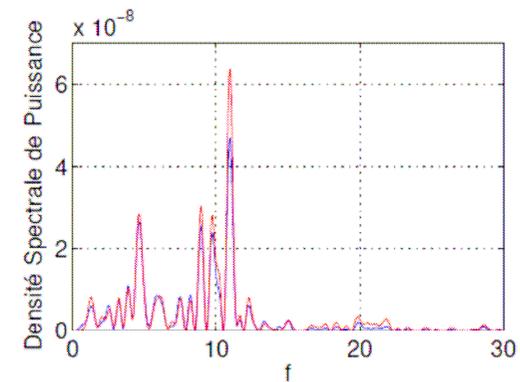
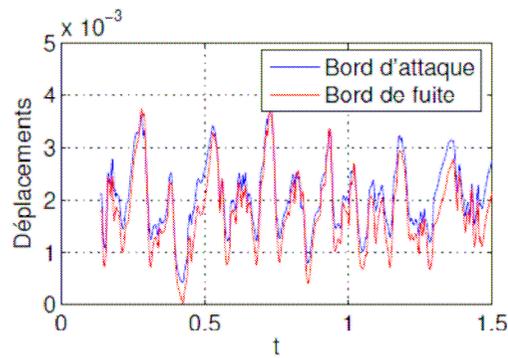
Déplacements instantanés
et contraintes



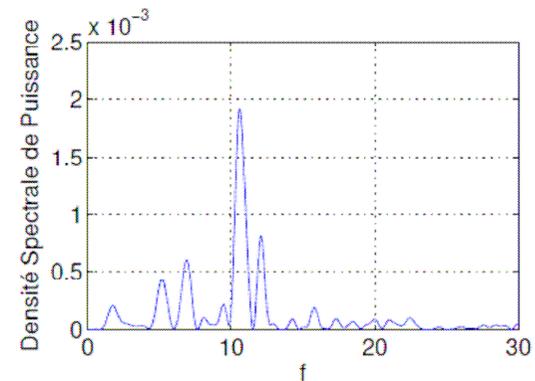
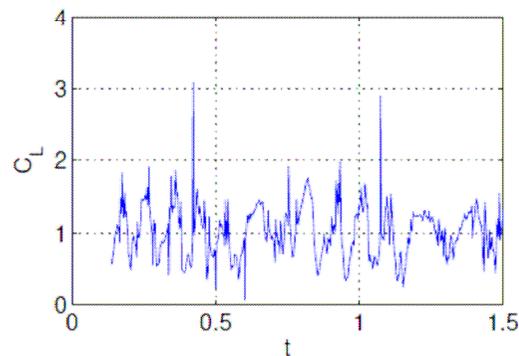
Déplacements et chargement

Déplacements section libre

structure

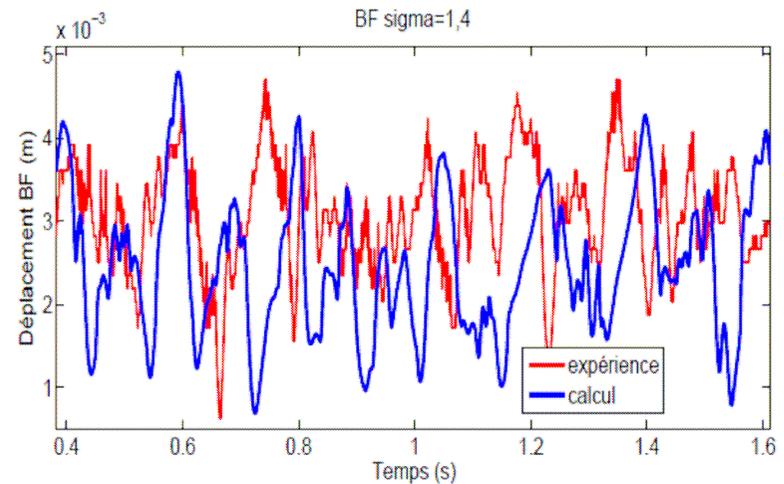
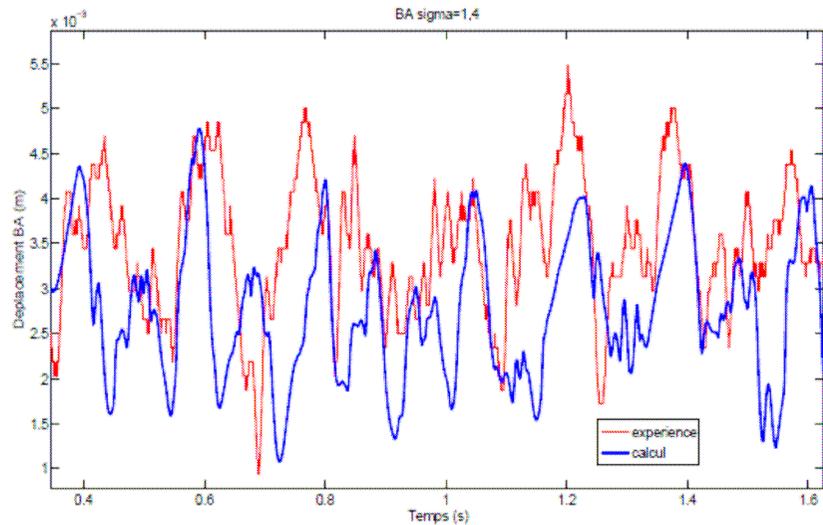


fluide



Coefficient de portance

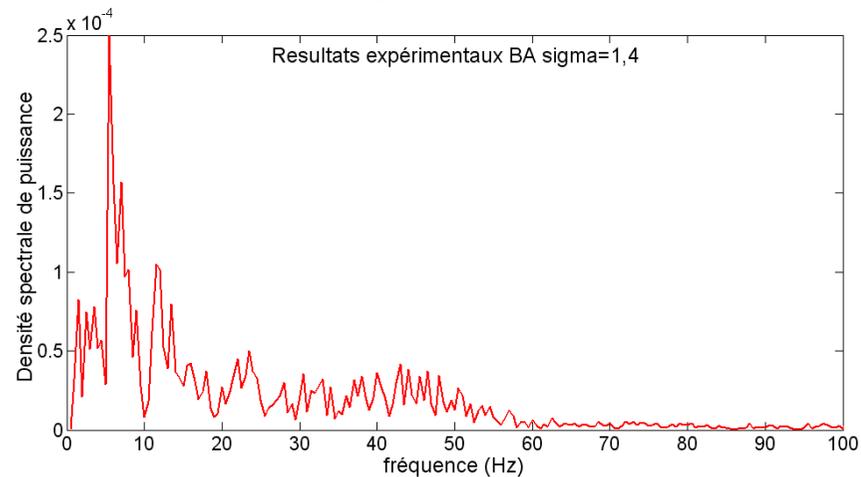
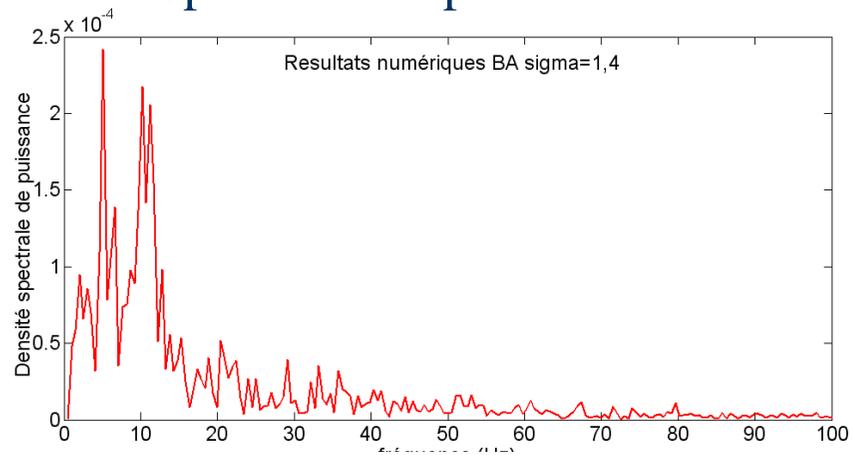
comparaison expé/num



Déplacements bord d'attaque (à gauche) et bord de fuite (à droite).

comparaison expé/num

Spectre du déplacements bord d'attaque

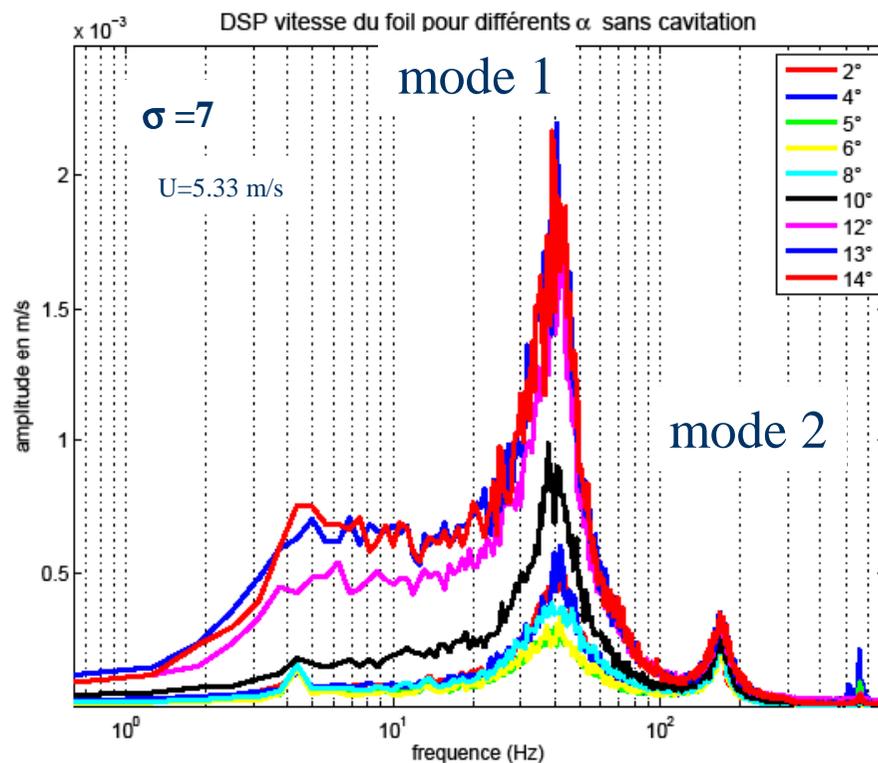


Perspectives

- Prise en compte de la distribution spatiale et temporelle de la masse volumique du fluide (vapeur-liquide) sur l'interface
 - Effets de masse ajoutée en écoulement cavitant :
- Calcul cavitant 3D et couplage « fort » ...

Réponse vibratoire de la structure

- Analyse modale : f_{mn} , η_{mn} , Z_{mn}
Spectre de vibration (non cavitant)

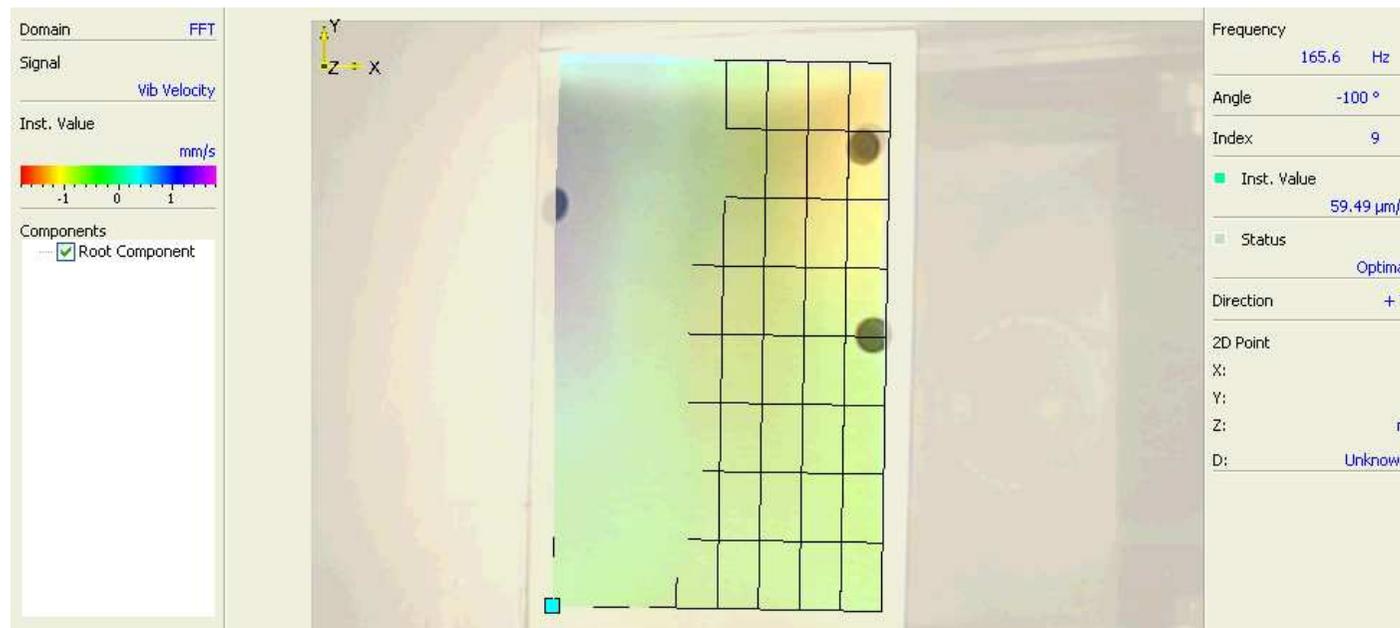


Mode	Fréquence propre Hz
1	41.25
2	168.8
3	293.1
4	556.1
5	1033.5

Réponse vibratoire de la structure

- Déformée modale (opérationnelle)

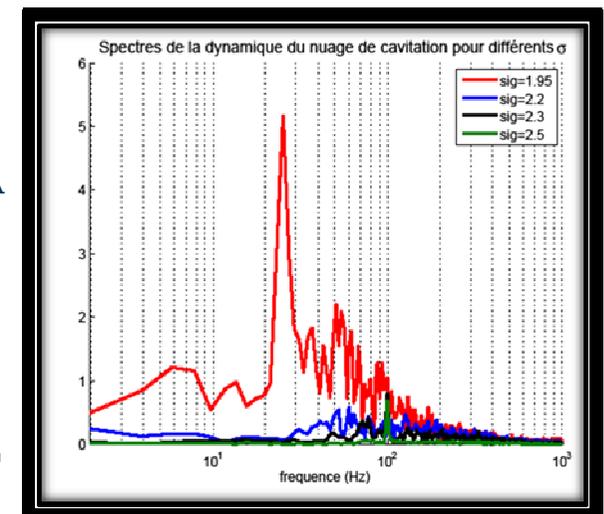
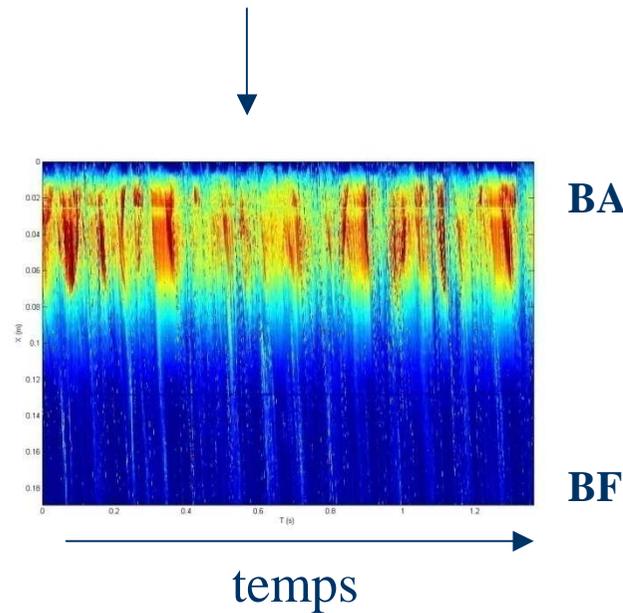
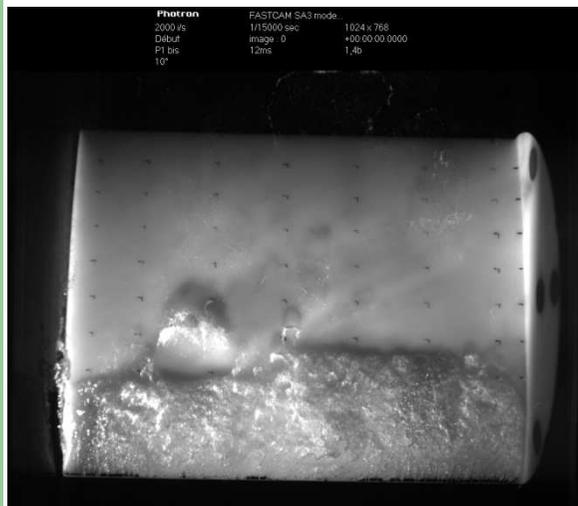
Mode 2 (torsion)



Dynamique de la poche de cavitation

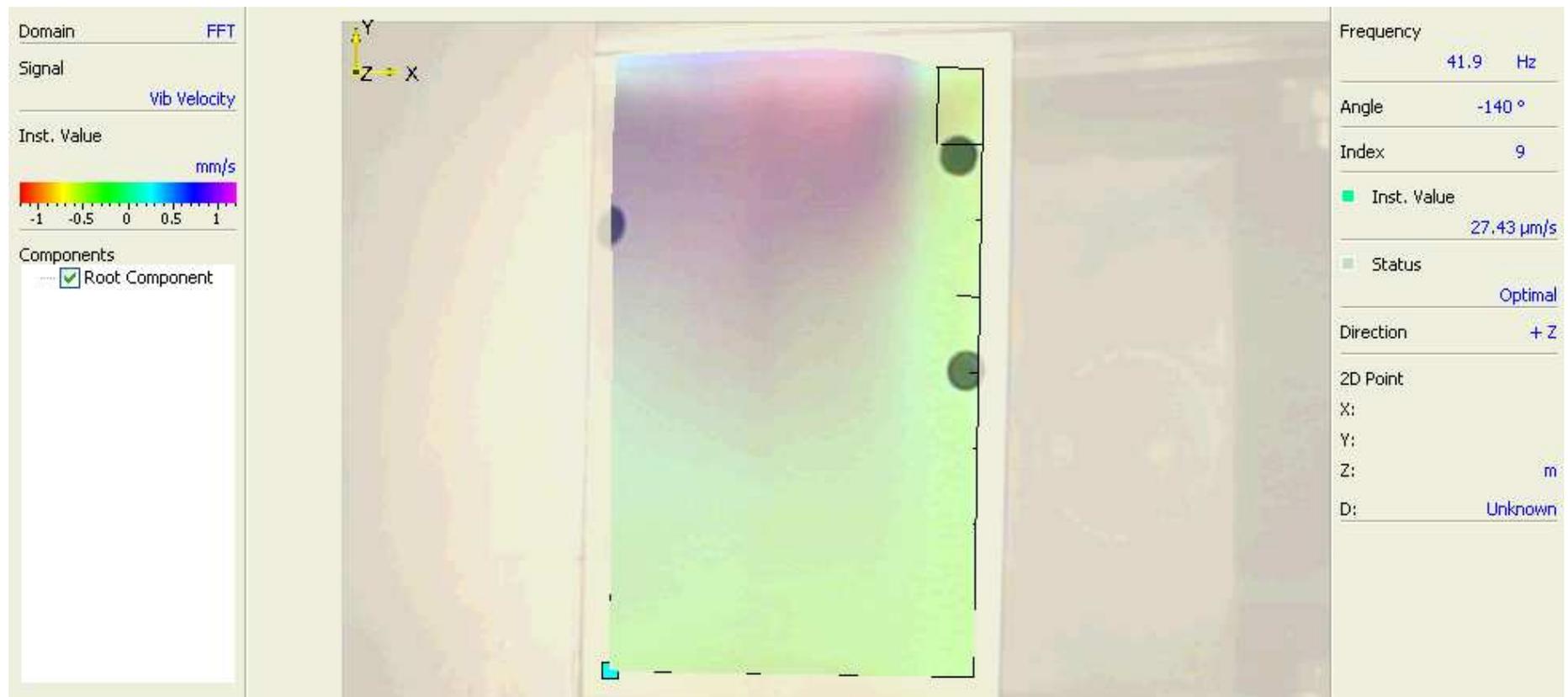
- Vidéo rapide + traitement d'images

2000 images/s



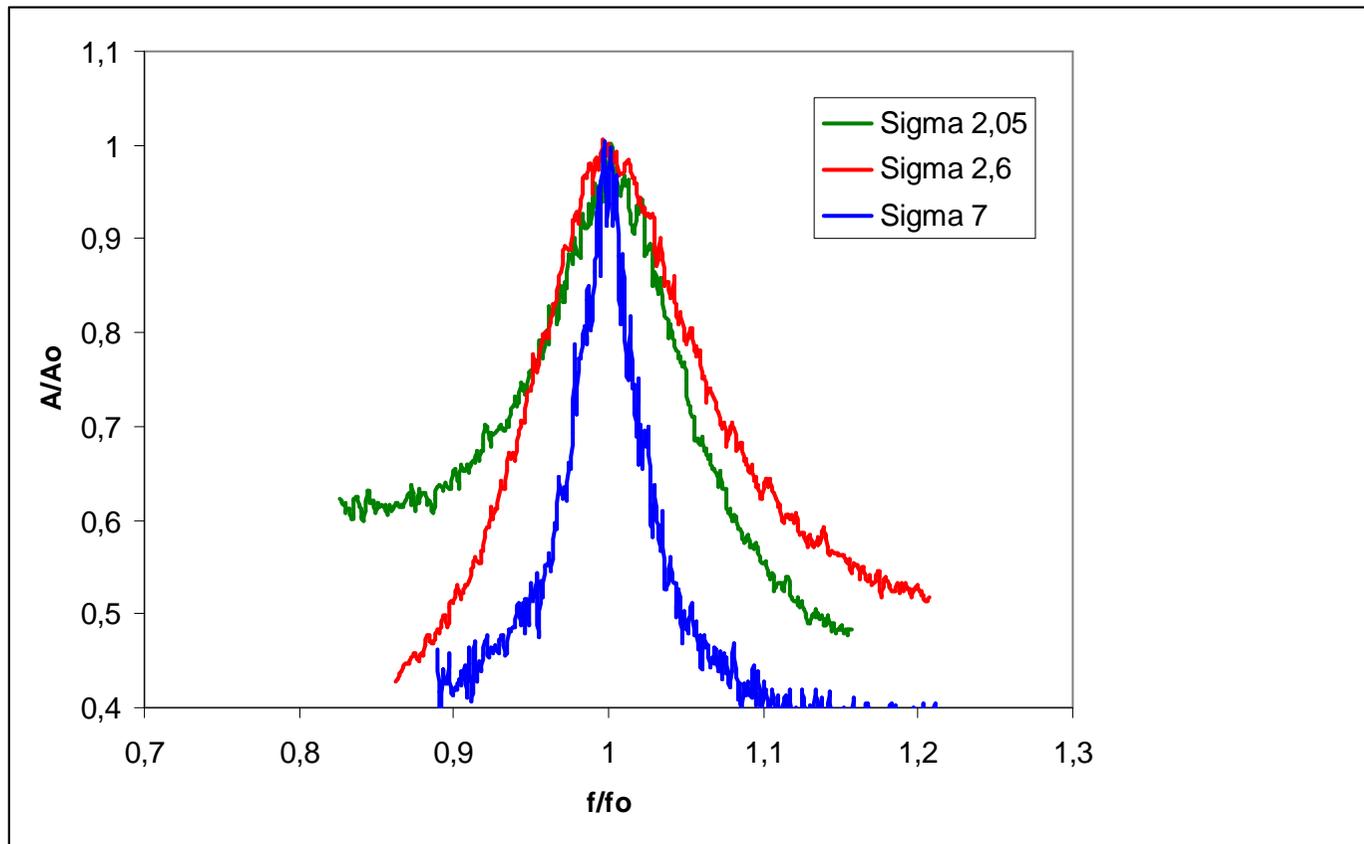
Spectre de
dynamique de poche

Résultats : influence de la cavitation sur les formes propres



Déformée modale du mode 1 avec cavitation $\sigma=2.05$

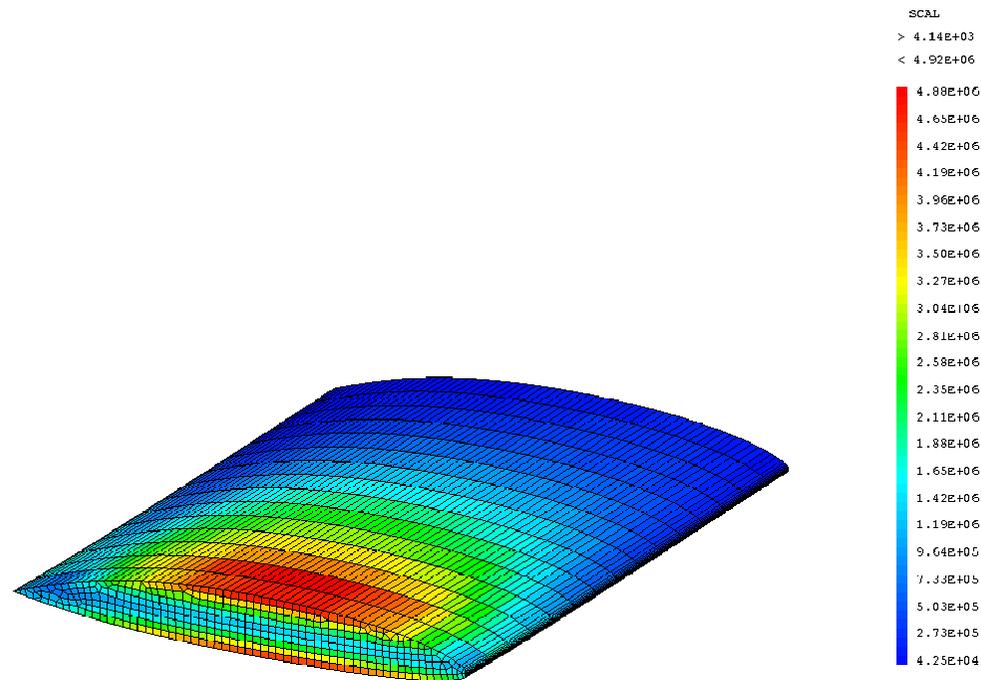
Résultats : influence de la cavitation sur les amortissements modaux



Élargissement
de la bande
passante

Modification
amortissements modaux
avec la cavitation

Contraintes et déplacements



GIBI FECT