

Simulations d'écoulements incompressibles par une méthode Volumes-Finis non-structurés

Alban Leroyer

Equipe Modélisation Numérique
Laboratoire de Mécanique des Fluides UMR-CNRS 6598
Ecole Centrale de Nantes, Nantes, FRANCE

19 Décembre 2005, CNAM Paris



Introduction

- Présentation générale du code ISIS-CFD
- Description des méthodes numériques
- Applications [1]
 - écoulement autour de carènes de bateaux
 - écoulement autour d'un palette d'aviron
 - auto-propulsion d'un corps déformable
- Méthodes numériques en développement
 - estimation d'erreur a posteriori
 - adaptation de maillages (raffinement/agglomération)
- Applications [2]
 - écoulement autour d'un multi-profil
 - impact d'un corps prismatique sur une surface libre
- Conclusions et perspectives

Introduction

- Présentation générale du code ISIS-CFD
- Description des méthodes numériques
- Applications [1]
 - écoulement autour de carènes de bateaux
 - écoulement autour d'un palette d'aviron
 - auto-propulsion d'un corps déformable
- Méthodes numériques en développement
 - estimation d'erreur a posteriori
 - adaptation de maillages (raffinement/agglomération)
- Applications [2]
 - écoulement autour d'un multi-profil
 - impact d'un corps prismatique sur une surface libre
- Conclusions et perspectives

Introduction

- Présentation générale du code ISIS-CFD
- Description des méthodes numériques
- Applications [1]
 - écoulement autour de carènes de bateaux
 - écoulement autour d'un palette d'aviron
 - auto-propulsion d'un corps déformable
- Méthodes numériques en développement
 - estimation d'erreur a posteriori
 - adaptation de maillages (raffinement/agglomération)
- Applications [2]
 - écoulement autour d'un multi-profil
 - impact d'un corps prismatique sur une surface libre
- Conclusions et perspectives

Introduction

- Présentation générale du code ISIS-CFD
- Description des méthodes numériques
- Applications [1]
 - écoulement autour de carènes de bateaux
 - écoulement autour d'un palette d'aviron
 - auto-propulsion d'un corps déformable
- Méthodes numériques en développement
 - estimation d'erreur a posteriori
 - adaptation de maillages (raffinement/agglomération)
- Applications [2]
 - écoulement autour d'un multi-profil
 - impact d'un corps prismatique sur une surface libre
- Conclusions et perspectives

Introduction

- Présentation générale du code ISIS-CFD
- Description des méthodes numériques
- Applications [1]
 - écoulement autour de carènes de bateaux
 - écoulement autour d'un palette d'aviron
 - auto-propulsion d'un corps déformable
- Méthodes numériques en développement
 - estimation d'erreur a posteriori
 - adaptation de maillages (raffinement/agglomération)
- Applications [2]
 - écoulement autour d'un multi-profiles
 - impact d'un corps prismatique sur une surface libre
- Conclusions et perspectives

Introduction

- Présentation générale du code ISIS-CFD
- Description des méthodes numériques
- Applications [1]
 - écoulement autour de carènes de bateaux
 - écoulement autour d'un palette d'aviron
 - auto-propulsion d'un corps déformable
- Méthodes numériques en développement
 - estimation d'erreur a posteriori
 - adaptation de maillages (raffinement/agglomération)
- Applications [2]
 - écoulement autour d'un multi-profil
 - impact d'un corps prismatique sur une surface libre
- Conclusions et perspectives

ISIS-CFD

Code "généraliste" développé par l'ensemble de
l'Equipe Modélisation Numérique du L.M.F.

Objectifs

Traiter des écoulements incompressibles et turbulents avec éventuellement différentes phases non-miscibles

✓ Forts nombres de Reynolds

✓ Géométries complexes

Objectifs

Traiter des écoulements incompressibles et turbulents avec éventuellement différentes phases non-miscibles

✓ Forts nombres de Reynolds

✓ Géométries complexes

Thèmes de recherche

- Modélisation physique
 - turbulence, écoulements multi-fluides (surface libre, cavitation)
- Interaction Fluide-Structure
 - couplage avec le P.F.D.
 - algorithme gérant les mouvements et déformation des mailles
- Adaptation locale de maillage, calcul d'erreur
- Optimisation

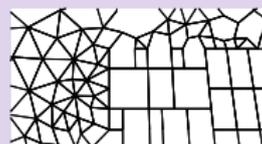
ISIS-CFD

- Résolution RANSE
(équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds)
- Modèles de turbulence
 - 1 Eq : Spalart-Allmaras
 - 2 Eqs: $K - \varepsilon$, $K - \omega$ Wilcox/Menter, (E)ASM
 - 7 Eqs: $R_{ij} - \omega$
 - LES : *D.E.S.* (en développement)
- Discrétisation Volumes-Finis implicite (maillages non-structurés)
 - Cell-centered , Volume de contrôle de forme quelconque
 - Couplage Vitesse-Pression :- algorithme de type SIMPLE
- équation de pression
 - Solveur de pression GMRES/CGSTAB + ILU(k)
 - Parallélisation (MPI)
- Calculs multi-phases : méthode de capture d'interface

Volume de contrôle et localisation des variables

Volume de contrôle

- nombre de faces par volumes quelconque
- nombre de noeuds par faces quelconque



Discrétisation

- boucle sur les faces
- localisation des variables aux centres de cellules (cell-centered)

Algorithme de résolution découplé Vitesse-Pression

Boucle non-linéaire :

- ➊ résolution de la turbulence et éventuellement de la fonction de présence (calculs multi-phases)
→ μ_t, α
- ➋ résolution de l'équation de quantité de mouvement linéarisée
→ \vec{U}
- ➌ utilisation de la contrainte d'incompressibilité transformée en équation de pression
→ P , mise à jour des flux de vitesse $\mathcal{F}(\vec{U})$
- ➍ itération NL -1 ← itération NL
- ➎ → ➊ si gain en résidu non-suffisant

Conservation de la quantité de mouvement

équation locale

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{div}}(\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = \rho \vec{g} - \overrightarrow{\text{grad}}(P) + \underbrace{\overrightarrow{\text{div}}(2\mu \mathbb{D} + \mathbb{R}_t)}_{\mathbb{T}}$$

bilan sur un volume de contrôle Ω de volume \mathcal{V} et de surface \mathcal{S} (maillage fixe)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{V}} \rho \vec{U} dV + \oint_{\mathcal{S}} \rho \vec{U} (\underbrace{\vec{U} \cdot \vec{n} dS}_{d\mathcal{F}(\vec{U})}) = \int_{\mathcal{V}} (\rho \vec{g} - \vec{\nabla} P) dV + \oint_{\mathcal{S}} \mathbb{T} \cdot \vec{n} dS$$

Traitement des termes volumiques

terme instationnaire

$$\int_{\mathcal{V}} \rho \vec{U} dV \approx \rho_C \vec{U}_C V$$

→ 2^{ieme} ordre si C au centre de gravité du volume

terme de pression : obtenu par intégration de Gauss

$$\int_{\mathcal{V}} \vec{\nabla} P dV = \oint_S P \vec{n} dS = \sum_{\text{faces de } S} P_f \vec{S}_f$$

→ reconstruction de P_f aux centres des faces au 2^{ieme} ordre

NB : reconstruction particulière pour les calculs à surface libre (ρ discontinu) afin d'avoir l'équilibre discret entre $\vec{\nabla} P$ et $\rho \vec{g}$.

Traitement des termes surfaciques (convection et diffusion)

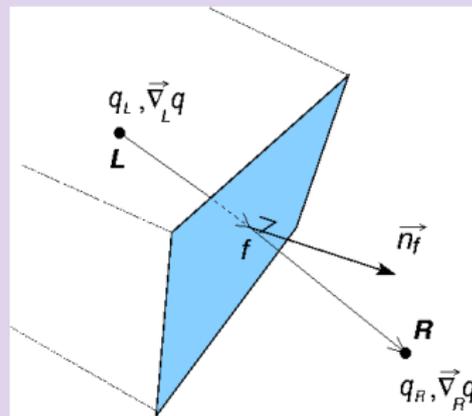
Reconstruction aux faces

Pour une variable q :

- convection : besoin de q_f
- diffusion : besoin de $\vec{\nabla}_f q$

q_f et $\vec{\nabla}_f q$ reconstruit à partir :

- des variables cellulaires L et R de part et d'autre de la face (partie implicite)
- des gradients calculés en L et R (partie explicite)
- de la géométrie : $\vec{L}f$, $\vec{f}R$, \vec{n}_f , S_f



Contrainte d'incompressibilité → équation de pression

équation locale → bilan de flux de vitesse

$$\operatorname{div}(\vec{U}) = 0 \rightarrow \sum_S \vec{U}_f \cdot \vec{S}_f = \sum_S \mathcal{F}(\vec{U}) = 0$$

Equation de pression obtenue en réinterpolant \vec{U} à partir de la forme discrétisée de l'équation de quantité de mouvement :

$$\vec{U}_C = \vec{U}^* - C_p \vec{\nabla} P \xrightarrow{\text{reconstruction}} \mathcal{F}(\vec{U})$$

Reconstruction "basique" du flux : interpolation géométrique directe à partir de chaque forme discrète aux points L et R

Equation de pression mal-conditionnée avec oscillations pair-impair

Reconstruction "Rhie et Chow" des flux de vitesse

Principe : flux de vitesse à travers la face $\mathcal{F}(\vec{U})$ reconstruit à partir de la forme discrétisée de l'équation de quantité de mouvement, en interpolant les termes sauf le gradient de pression rediscrétisé en f .

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}(\vec{U}) &= (\vec{U}_f \cdot \vec{S}_f) \\
 &= [\vec{U}^* - C_p \vec{\nabla} P]_f \cdot \vec{S}_f \\
 &= \left[\underbrace{\vec{U}_f^*}_{\text{interpolé}} - \underbrace{(C_p)_f}_{\text{interpolé}} \underbrace{\vec{\nabla}_f P}_{\text{rediscrétisé en } f} \right] \cdot \vec{S}_f
 \end{aligned}$$

Cette reconstruction "pseudo-physique" a été introduite par **Rhie & Chow (1982)** et a permis l'essor du positionnement colocalif des variables dépendantes dans les codes FV.

Calculs multi-phases

Vision "mono-fluide"

- fluide unique dont les propriétés physiques (ρ , μ) varient en fonction d'une fonction de présence α
- calcul à surface libre : $\alpha = 0 \rightarrow$ air, $\alpha = 1 \rightarrow$ eau
 $\rightarrow \rho = \alpha\rho_{eau} + (1 - \alpha)\rho_{air}$, $\mu = \dots$

Exemple



Calculs multi-phases

Equation pour la fonction de présence : équation de convection

$$\frac{D\alpha}{Dt} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \text{div}(\alpha \vec{U}) = 0$$

- Spécificités "numériques" :
 - Utilisation des schémas particuliers compressifs pour limiter la diffusion à l'interface
 - Besoin d'une épaisseur de mailles fine dans la zone d'interface

Caractéristiques

- Méthode "souple" et robuste (% méthode de suivi d'interface)
- capture des surfaces libres complexes, déferlement,...
- schéma contraint en nombre de Courant

Calculs avec corps en mouvement

Caractéristiques

Mouvement 3D d'un nombre de corps quelconques

Corps

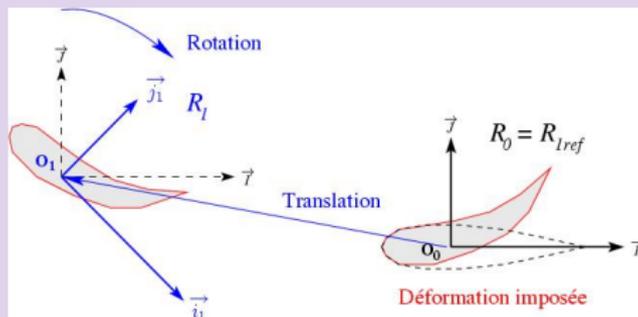
- solide indéformable
- déformable à déformation imposée

Mouvement → 6 ddl

- imposé
- résolu à chaque pas de temps

- Paramétrage du mouvement et résolution du P.F.D.
- Algorithmes de remaillage
- Couplage écoulement-mouvement

Calculs avec corps en mouvement

Paramétrage : Décomposition *Déformation - Déplacement*

NB : Rotation \rightarrow utilisation d'un **quaternion**

Résolution du P.F.D.

- inconnues : paramètres de la transformation $\mathcal{R}_0 \rightarrow \mathcal{R}_1$
- déformation imposée \rightarrow terme source supplémentaire
 \rightarrow nécessite un maillage volumique du corps

Calculs avec corps en mouvement

Stratégies de remaillage

- Besoin d'adapter le maillage : - nouvelle position
- nouvelle forme
- Nécessité d'avoir des procédures internes au code
- Un seul maillage

3 outils complémentaires, utilisables conjointement

Calculs avec corps en mouvement

Stratégies de remaillage

- Besoin d'adapter le maillage : - nouvelle position
- nouvelle forme
- Nécessité d'avoir des procédures internes au code
- Un seul maillage

① Remaillage par analogie "structure"

- maillage fluide \approx ensemble de ressort traction-torsion
pseudo-structure élastique
- déplacement imposé aux frontières
- capable de traiter des déplacements de frontières limités en amplitude mais quelconques
- nécessite de résoudre un système \Rightarrow temps CPU \nearrow

exemple

Calculs avec corps en mouvement

Stratégies de remaillage

- Besoin d'adapter le maillage : - nouvelle position
- nouvelle forme
- Nécessité d'avoir des procédures internes au code
- Un seul maillage

① Remaillage par analogie "structure"

② Repositionnement par mouvement en bloc

- pas de déformation : mvt maillage = mvt du corps
- qualité du maillage conservée
- pas de limitation en amplitude
- **application** : corps unique en milieu infini

Calculs avec corps en mouvement

Stratégies de remaillage

- Besoin d'adapter le maillage :
 - nouvelle position
 - nouvelle forme
- Nécessité d'avoir des procédures internes au code
- Un seul maillage

❶ Remaillage par analogie "structure"

❷ Repositionnement par mouvement en bloc

❸ Remaillage par pondération analytique exemple

- pondération du mouvement (rigide ou poutre) par un coefficient
= 1 sur les noeuds frontières du corps, = 0 sur les autres frontières
- calcul des coefficients de pondération en début de simulation
- pas de résolution de système au cours du calcul

Calculs avec corps en mouvement

Prise en compte des mouvements du maillages

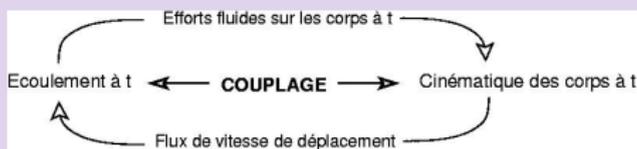
Bilan EQM : maillage fixe

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{V}} \rho \vec{U} dV + \oint_S \rho \vec{U} (\vec{U} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\mathcal{V}} (\rho \vec{g} - \vec{\nabla} P) dV + \oint_S \mathbb{T} \cdot \vec{n} dS$$

Bilan EQM : maillage mobile et/ou déformable

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_{\mathcal{V}} \rho \vec{U} dV + \oint_S \rho \vec{U} (\vec{U} - \vec{U}_d) \cdot \vec{n} dS = \dots$$

Couplage écoulement-mouvement



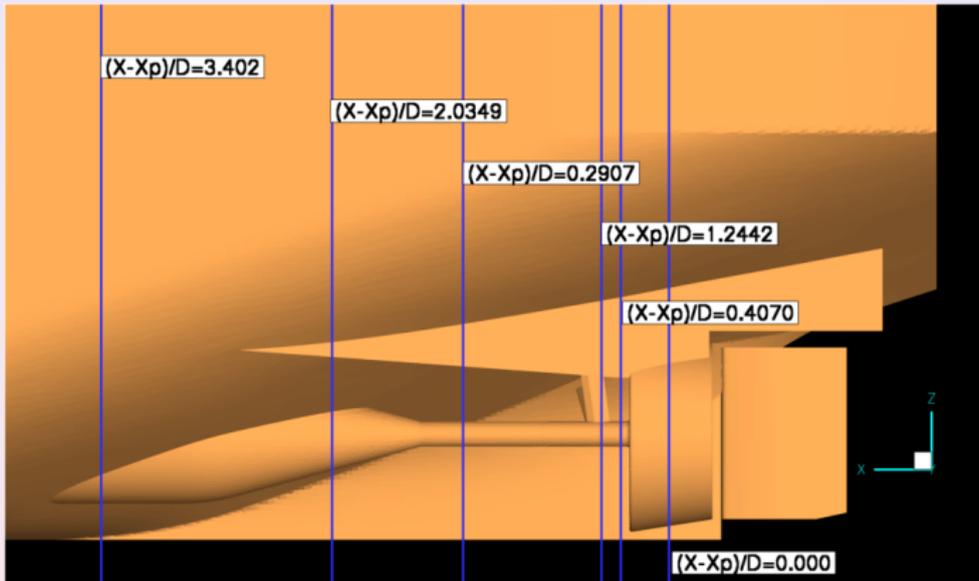
The Eulenspiegel - The real ship before the launch



The Eulenspiegel - Details of the nozzle-rudder geometry

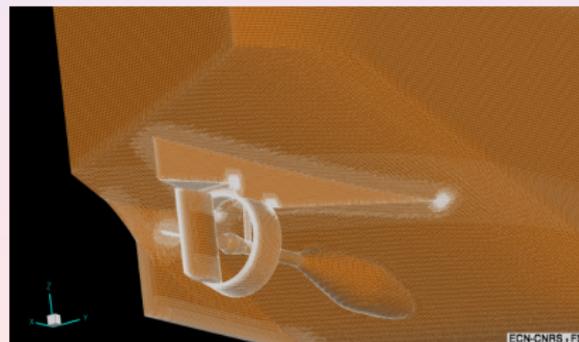
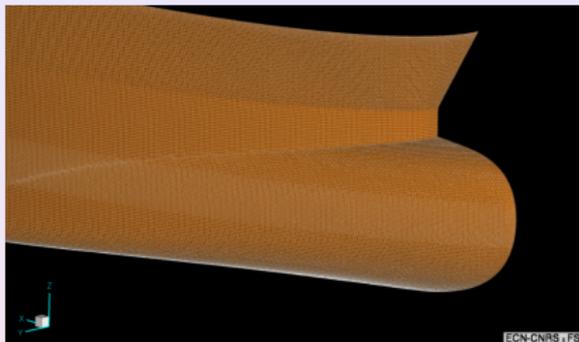


The Eulenspiegel - the geometry and the unstructured grid

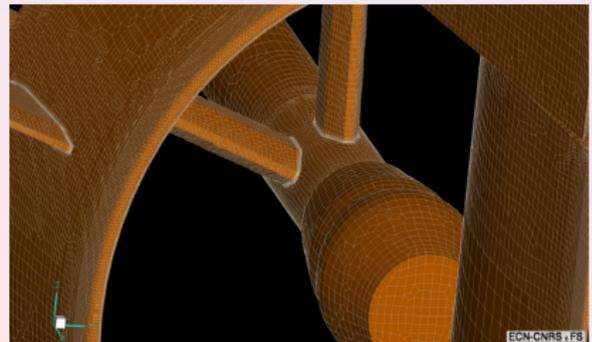
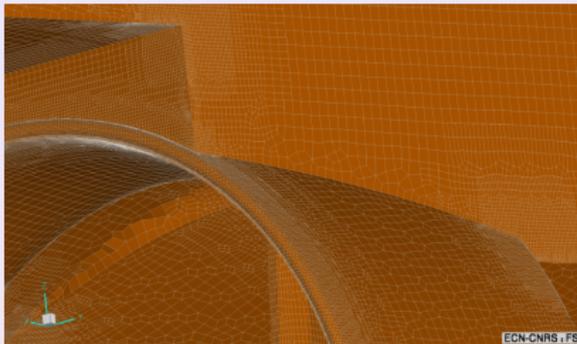


Study performed in the framework of the **EFFORT**
EU Research Project

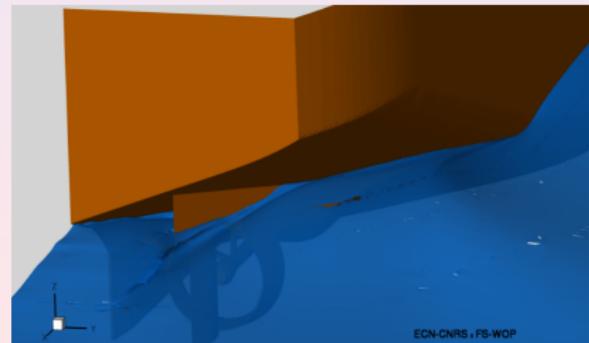
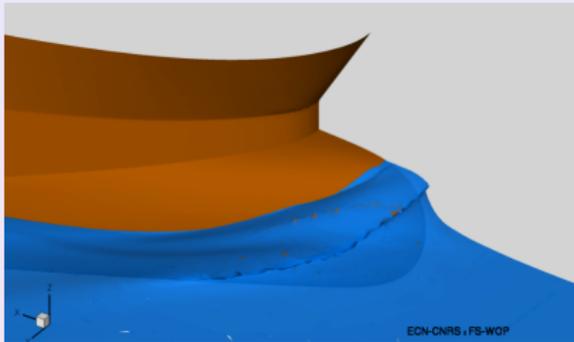
Details of the grid : bow and stern



Details of the grid : complex structures



Free-surface elevation at bow and stern

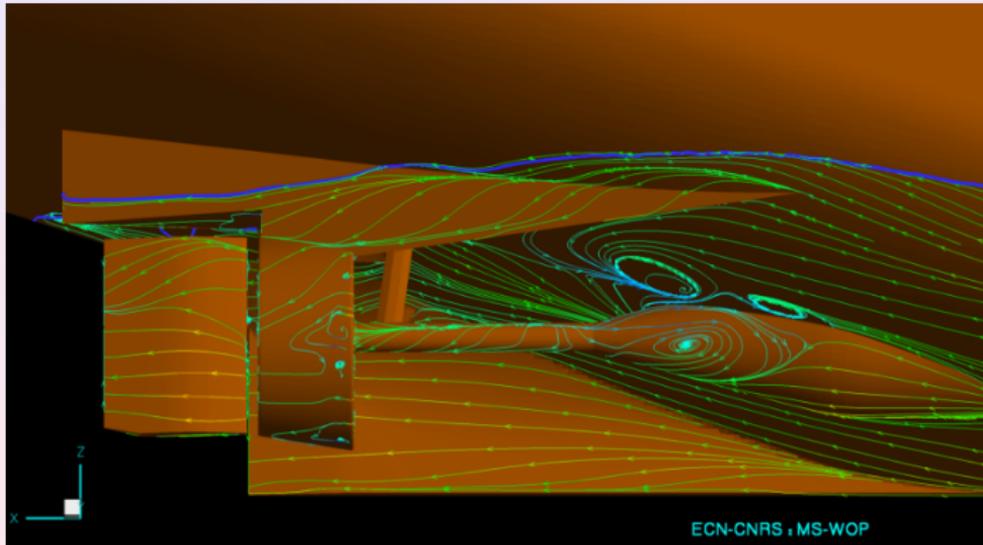


Experimental free-surface elevation

Experiments performed at Helsinki University of Technology

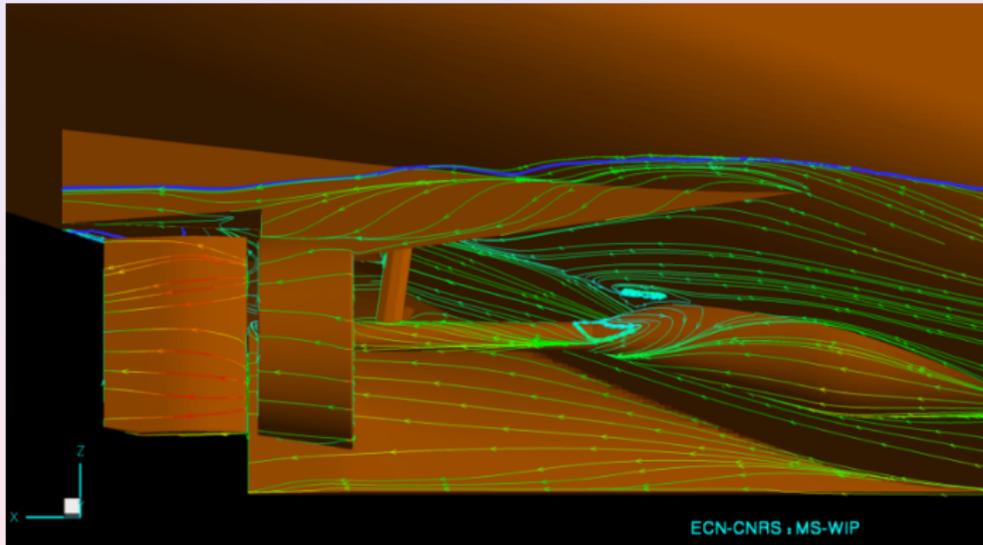


Wall streamlines without propeller - Model - $Re = 4.010^6$



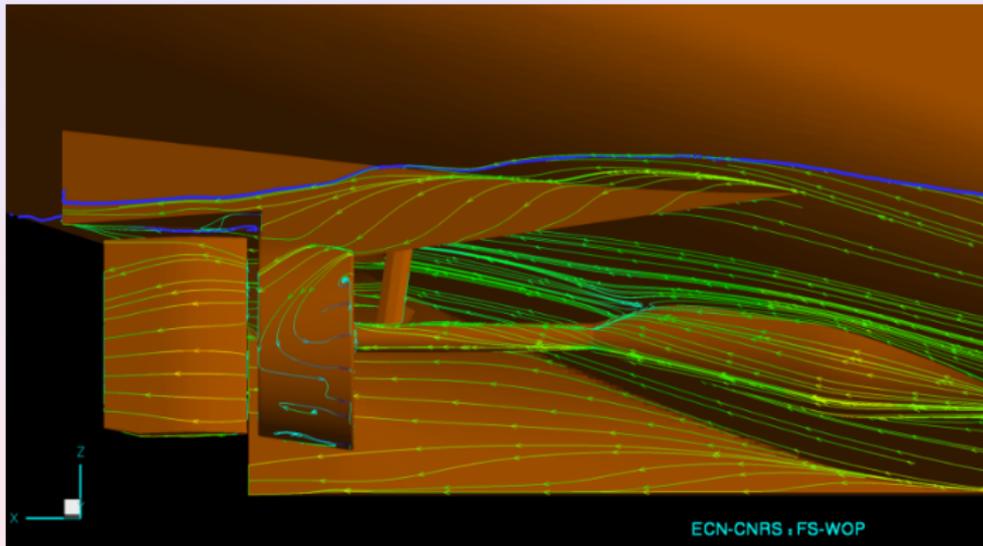
Isowakes at different transversal stations - Influence of the propeller

Wall streamlines with propeller - Model - $Re = 4.010^6$



Isowakes at different transversal stations - Influence of the propeller

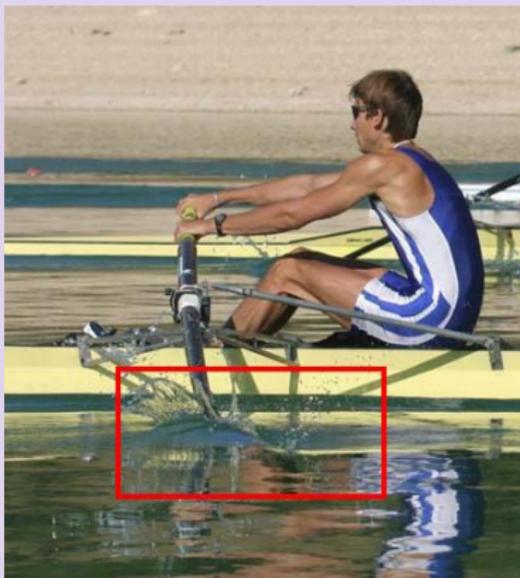
Wall streamlines without propeller - Ship - $Re = 4.010^8$



Isowakes at different transversal stations - Model vs Full scale ship

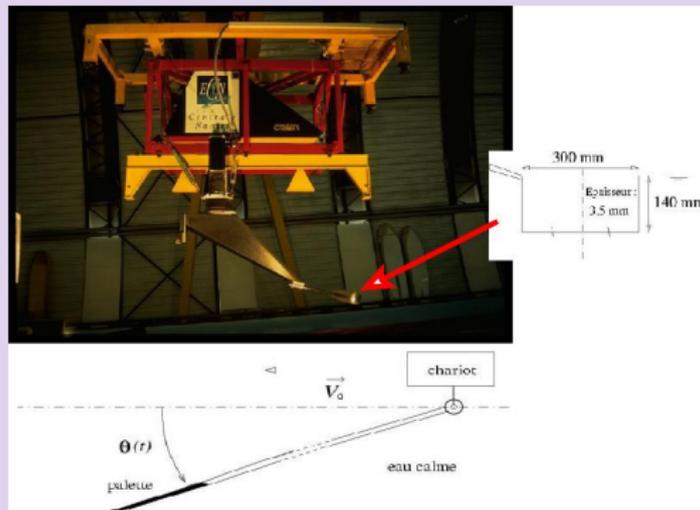
Écoulement autour d'une palette d'aviron

Le cas réel



Le dispositif expérimental

Expérience réalisée sur le bassin de traction de l'ECN

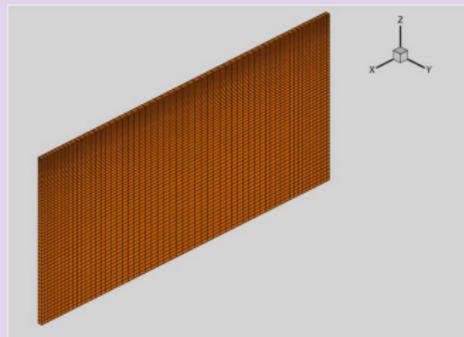


Caractéristique de la simulation

Objectif : validation expérimentale sur un cas simple

Calcul propectif ...

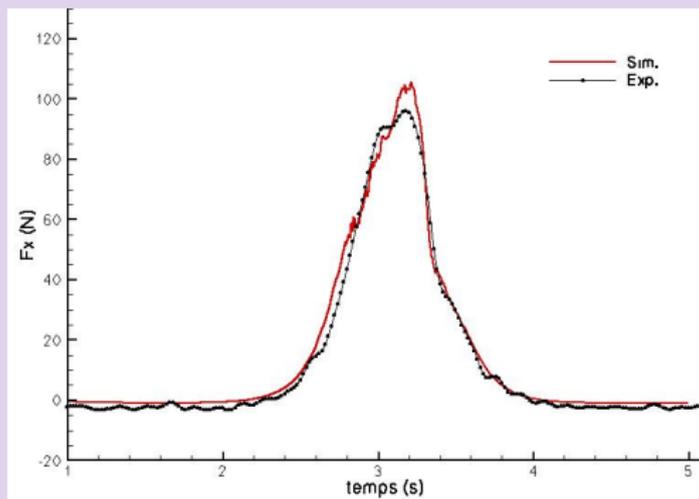
- mouvement imposé, corps rigide
- mouvement en bloc du maillage
- calcul parallèle : 16 blocs
- pas de raffinement automatique



Maillage : 1 400 000 cellules

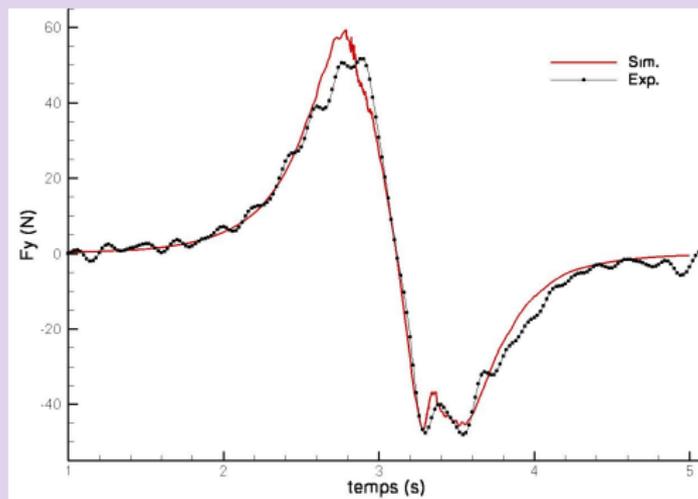
Comparaison expérimentale

Effort propulsif F_x



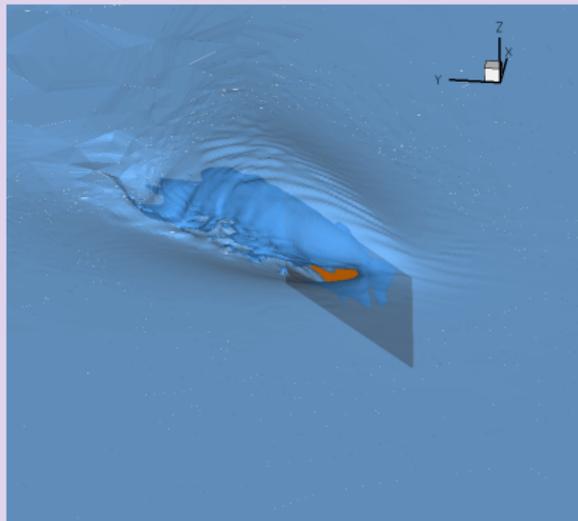
Comparaison expérimentale

Effort F_y transversal à la direction d'avance du chariot



Evolution de la surface libre

Creux derrière la palette et déferlement au dessus



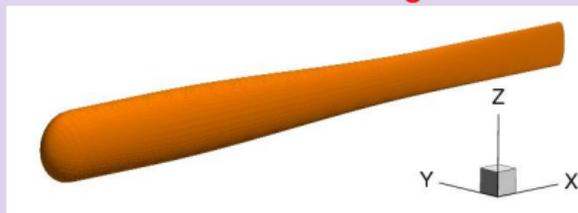
visualisation de la surface libre

idem petit cadre

Auto-propulsion d'un corps déformable : application au projet ROBEA

Objectif du P.I.R. CNRS ROBEA

Concevoir et réaliser un robot anguille auto-propulsé



forme temporaire du robot pour les simulations

Objectif des simulations

- Valider un modèle simplifié de contact → commande
- Etude des mécanismes de nage
- Etude énergétique (rendement)
- Optimisation des lois de déformation

Caractéristiques des simulations

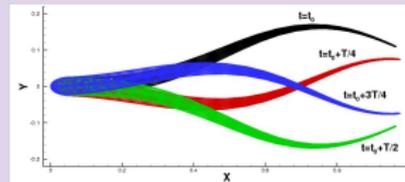
- déformation imposé au corps, déplacement résolu
- Gestion du mouvement au niveau du maillage
 - partie déformation : remaillage par pondération
 - partie déplacement : mouvement en bloc du maillage déformée
- Couplage écoulement/mouvement
 - remise à jour dans la boucle de résolution non-linéaire

Loi d'avance périodique

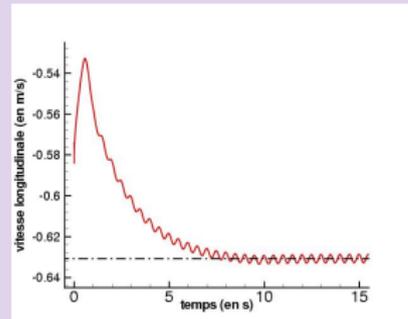
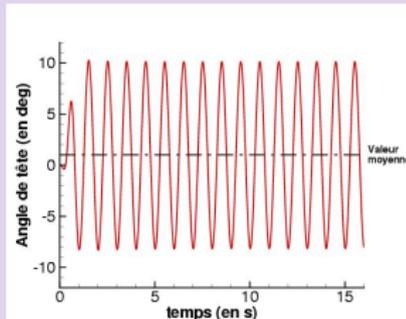
Courbure imposée c_F

$$c_F(s,t) = A(s) \cdot \sin\left[2\pi \cdot \left(\frac{s}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$

$$\text{avec } A(s) = A_2 \cdot s^2 + A_1 \cdot s + A_0$$



Mouvement résolu \longrightarrow état périodique

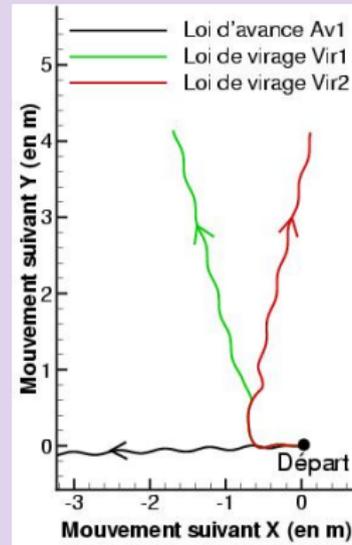
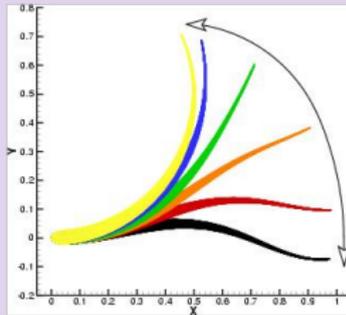


Loi de virage

Courbure imposée c_T

$$c_T(s,t) = \alpha(t) c_F(s,t) + \frac{1-\alpha(t)}{R_T}$$

Phase	P1	P2	P3
	Début du virage	Virage	Fin du virage
Durée	$\alpha_{T1} T$	$\alpha_{T2} T$	$\alpha_{T3} T$
α	$1 \rightarrow 0$	$0 \rightarrow 0$	$0 \rightarrow 1$



trajectoire

Estimation d'erreur

méthode à équation de transport pour l'erreur

Deux dénominations différentes :

- Error Transport Equation Method
- Defect Error Correction Method

Caractéristiques :

- Estimation d'erreur *a posteriori* monogrigille
- erreur de discrétisation : $E_h(x) = \phi(x) - \phi_h(x)$
- équations différentielles auxiliaires sur $E_h(h, x)$ sur la même grille

Plus d'information : thèse A. Hay

[ftp : //ftp.ec – nantes.fr /pub/DMN/Thesis/these_hay.ps.gz](ftp://ftp.ec-nantes.fr/pub/DMN/Thesis/these_hay.ps.gz)

méthode à équation de transport pour l'erreur

cas 2D stationnaire

- Equations de Navier-Stokes :

$$\mathcal{N}(u, p) = \vec{\nabla} \cdot (\vec{U}u) - \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{\mathcal{R}e} \vec{\nabla} u \right) + \vec{\nabla} p \cdot \vec{i}_x = 0$$

$$\mathcal{N}(v, p) = \vec{\nabla} \cdot (\vec{U}v) - \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{\mathcal{R}e} \vec{\nabla} v \right) + \vec{\nabla} p \cdot \vec{i}_y = 0$$

$$\mathcal{D}(\vec{U}) = \vec{\nabla} \cdot (\vec{U}) = 0$$

- Equations pour les erreurs formées à partir de :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{U} = \vec{U}_h + \vec{E}_h \\ \end{array} \right. \quad \text{soit} \quad \begin{array}{l} u = u_h + E_h^u \\ v = v_h + E_h^v \\ p = p_h + E_h^p \end{array}$$

méthode à équation de transport pour l'erreur

Equations linéarisées au sens de Newton :

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{U}_h E_h^u) - \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{\mathcal{R}_e} \vec{\nabla} E_h^u \right) + \vec{\nabla} \cdot (\vec{E}_h u_h) + \vec{\nabla} E_h^p \cdot \vec{i}_x = -\mathcal{N}(R_*(u_h, p_h))$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{U}_h E_h^v) - \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{\mathcal{R}_e} \vec{\nabla} E_h^v \right) + \vec{\nabla} \cdot (\vec{E}_h v_h) + \vec{\nabla} E_h^p \cdot \vec{i}_y = -\mathcal{N}(R_*(v_h, p_h))$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{E}_h) = -\mathcal{D}(R_*(\vec{U}_h))$$

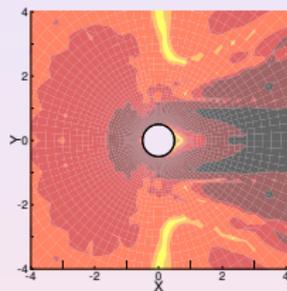
Les résidus différentiels sont évalués à partir d'un opérateur de reconstruction d'ordre élevé R_*

Termes sources de ces équations : indicateur efficace dans le cadre de l'adaptation de maillage

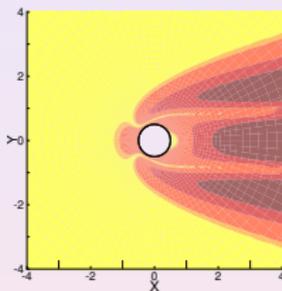
écoulement laminaire autour d'un cylindre à $Re=20$ - champ d'erreur

Evaluation de plusieurs estimateurs d'erreur a posteriori

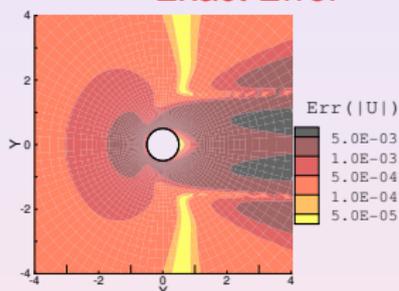
REEE



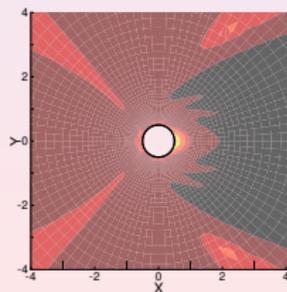
DTSEE



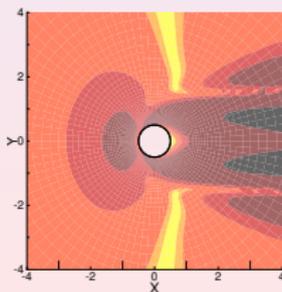
Exact Error



MEE



EEE

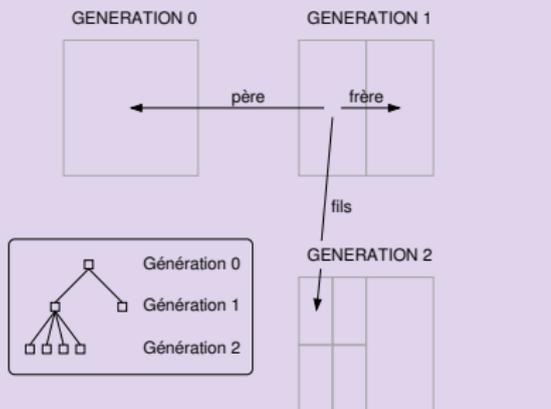


Adaptation de maillage : caractéristiques principales

Méthode h :

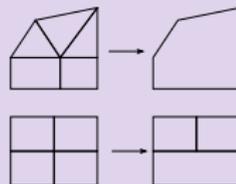
- Raffinement/Agglomération de cellules selon un indicateur d'erreur
- adaptation dynamique (interne)

Parenté entre les éléments



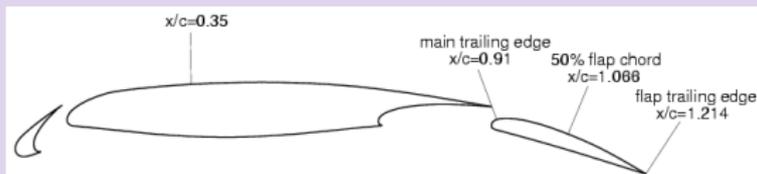
Déraffinement par agglomération

- algorithmes permettant la formation de groupements de cellules qui seront fusionnées
- critères permettant le contrôle des formes des cellules agglomérées



AGARD Advisory Report 303 - CASE A2

Configuration géométrique



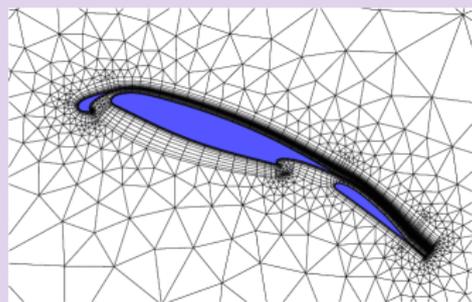
- $Re = 3.52 \cdot 10^6$, angles d'incidence 20.18° et 4.01°

Simulations avec adaptation automatique

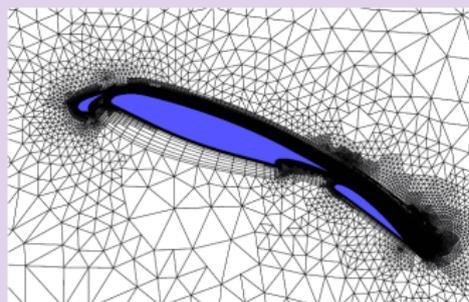
Cas : $Re=3.52 \cdot 10^6$, incidence : 20.18°

- modèle de turbulence : Spalart-Allmaras
- Evaluation de l'erreur sur U , p et v_T
- Procédure adaptative guidée par les résidus différentiels (termes sources des équations d'erreur)

Maillage grossier initial

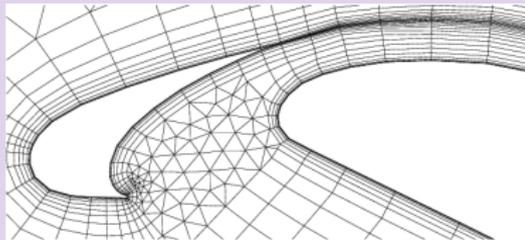


Maillage adapté

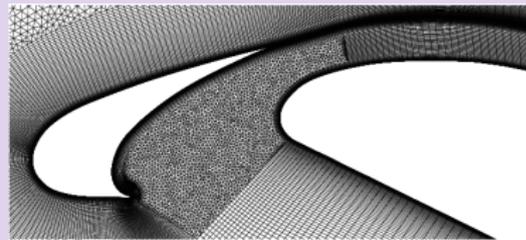


Simulations avec adaptation automatique

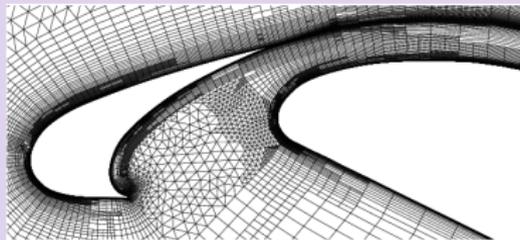
Maillage grossier initial



Maillage fin de référence

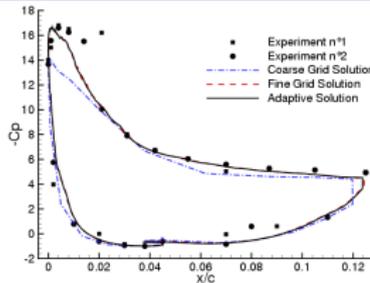


Maillage adapté

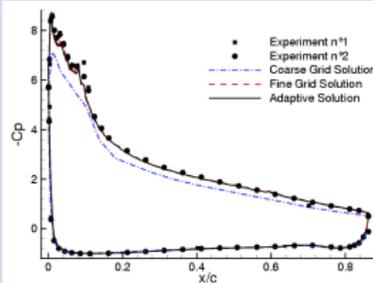


Comparison Exp/Sim : coefficients de pression

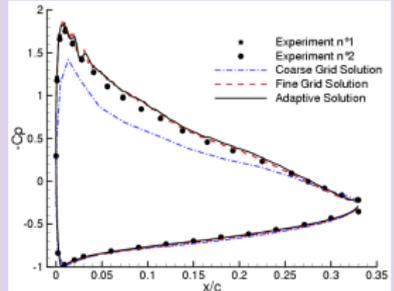
Slat



Main

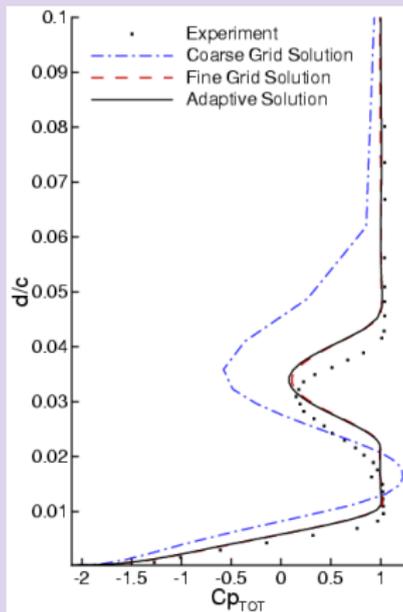


Flap

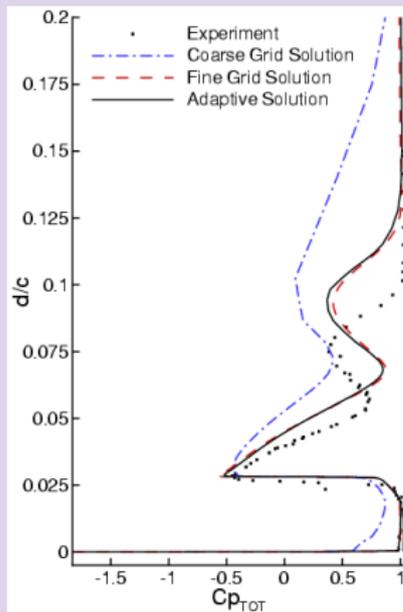


Comparaison Exp/Sim : distribution de pressions totales

$x/c = 0.35$

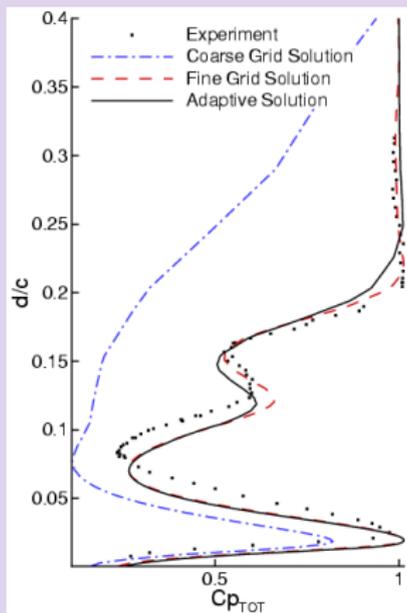


$x/c = 0.91$

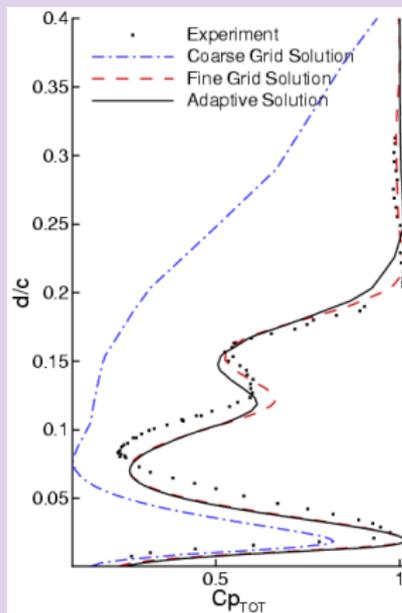


Comparaison Exp/Sim : distribution de pressions totales

$x/c = 1.066$



$x/c = 1.214$



Comparaison des temps de calculs

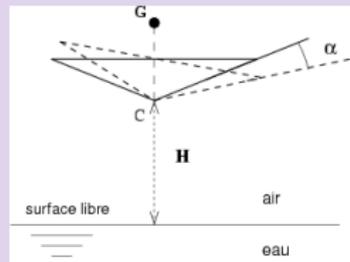
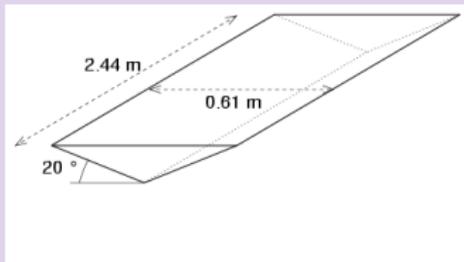
Temps CPU : incidence 20.18°

	Nb Cellules	temps CPU *
grossier	4563	1
fin	337500	1153
adapté	64872	71

* rapport avec le temps CPU sur maillage grossier

⇒ Réduction du temps CPU par un facteur **16** (en 2D) !

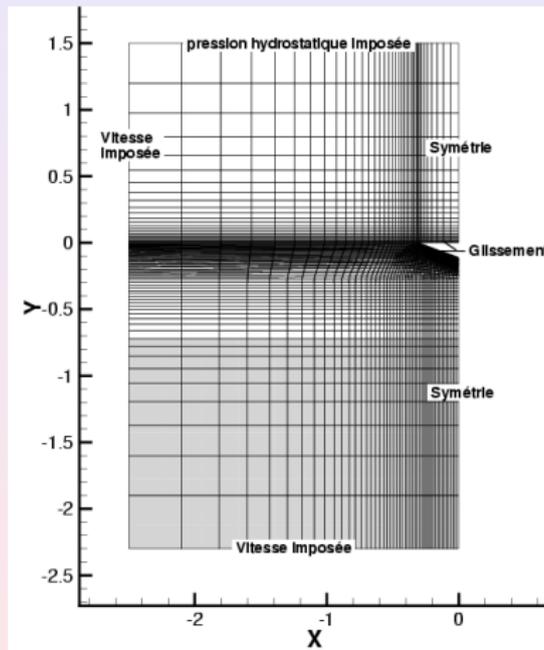
Définition du corps et des paramètres expérimentaux



Exp. de R. Peterson et al. (1997)

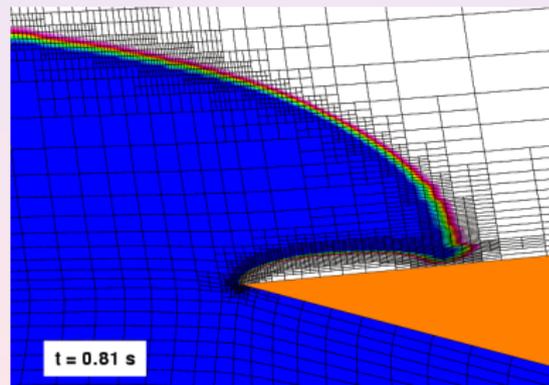
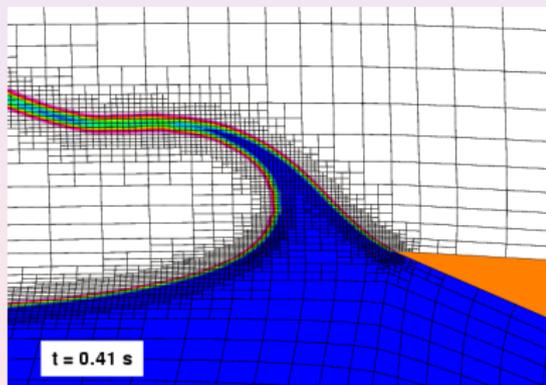
Cas-test	SymLight	SymMedium	AsymLight	AsymMedium
hauteur H	0.61 m	0.61 m	0.61 m	0.61 m
Angle α	0°	0°	5°	5°
Masse M	122 kg	291 kg	124 kg	293 kg

Configuration numérique



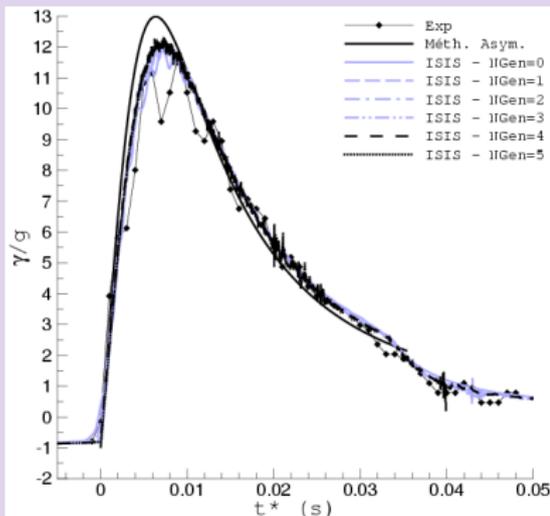
Raffinement automatique autour de l'interface

indicateur d'erreur : présence de l'interface (valeur de α)
+ marge d'évolution

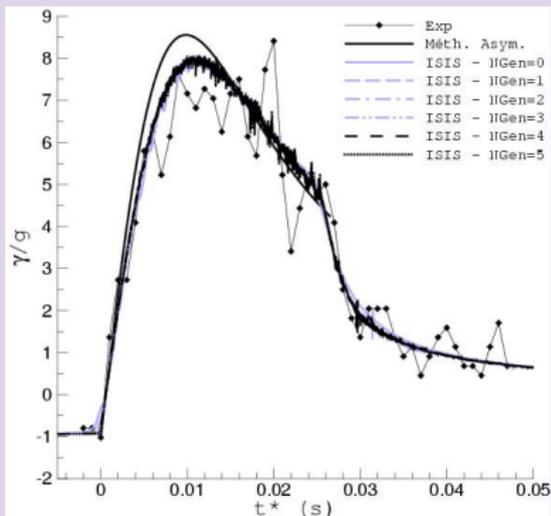


Evolution temporelle de l'accélération

Configuration SymLight

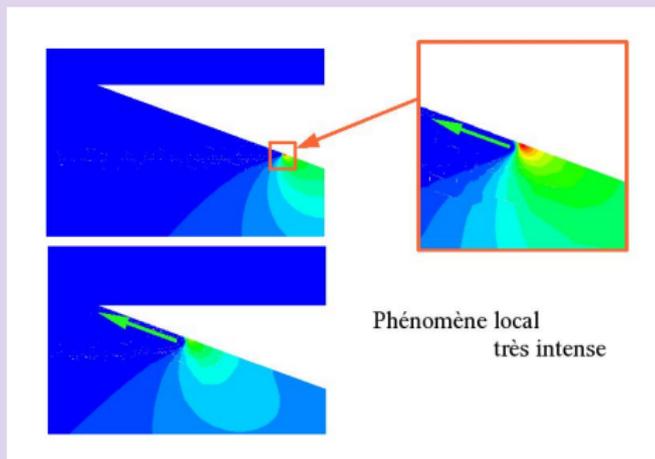


Configuration SymMedium



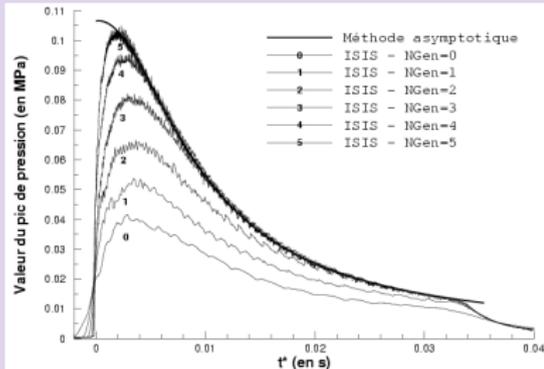
Capture du pic de pression : critère dimensionnant

pic de pression : phénomène local et intense

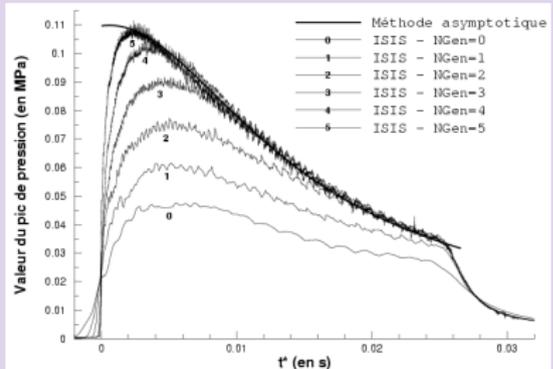


Evolution temporel du pic de pression

Configuration SymLight



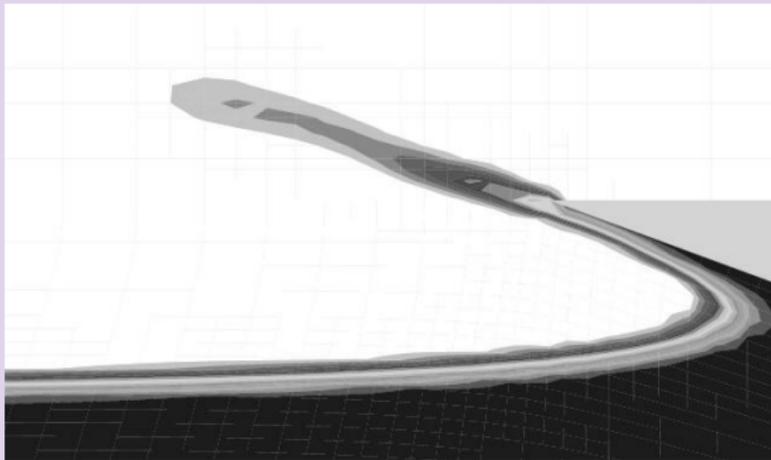
Configuration SymMedium



Le raffinement local est crucial pour la capture du pic !

Influence du raffinement sur la description du jet

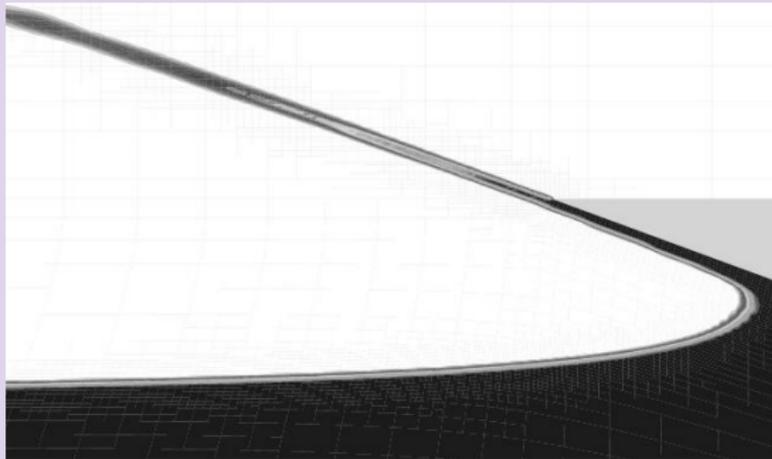
Ngen = 1



Asymmetric impact

Influence du raffinement sur la description du jet

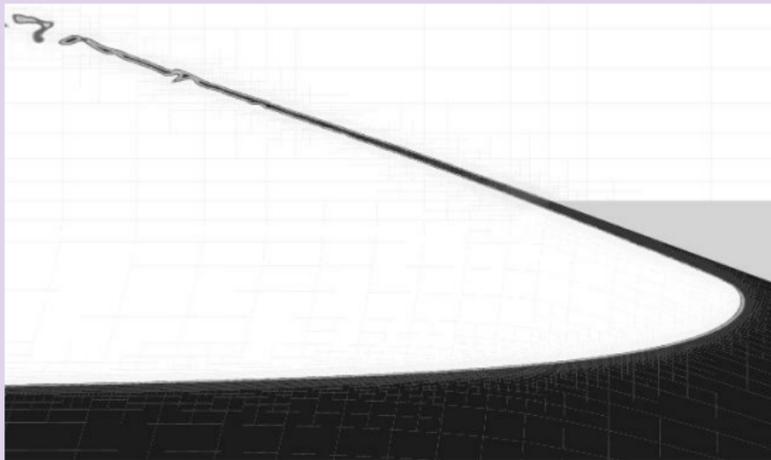
Ngen =3



Asymmetric impact

Influence du raffinement sur la description du jet

Ngen =5



Asymmetric impact

Conclusions et perspectives

- Méthodologies implémentées dans le solveur Volumes-Finis non-structurés (ISIS-CFD) opérationnelles pour des applications complexes
 - ➔ calculs avec surface libre, avec corps en mouvement, ...
 - Cas de validation à venir : mouvement libre d'une barge amarrée soumise à une houle transverse
- Continuer le développement des méthodes d'adaptation automatique de maillage
 - ➔ résultats 2D prometteurs : ↗ flexibilité, ↘ temps CPU
 - extension 3D : principale difficulté
parallélisation avec équilibrage dynamique des charges de calculs
- Cavitation, interaction fluide-structure avec déformation résolue (corps élancé de type poutre ou plaque dans un premier temps), amélioration des schémas de discrétisation (diffusion),...

Conclusions et perspectives

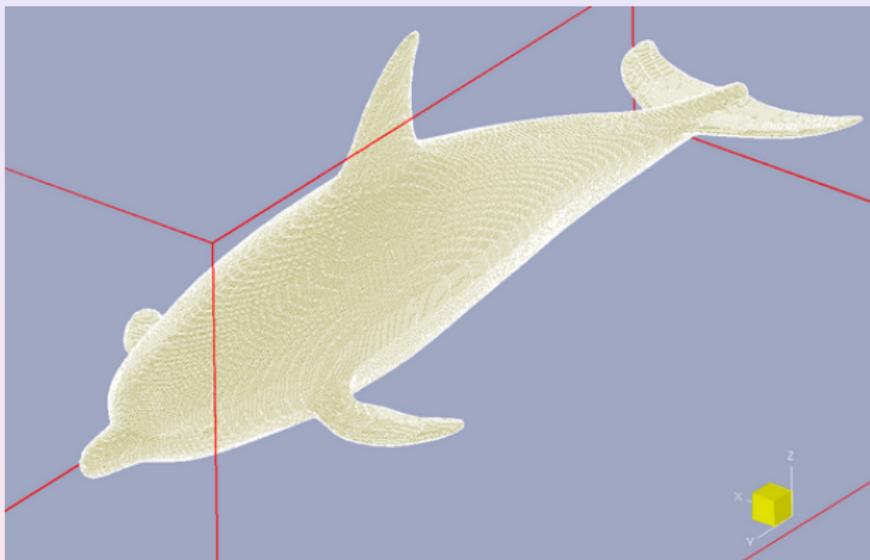
- Méthodologies implémentées dans le solveur Volumes-Finis non-structurés (ISIS-CFD) opérationnelles pour des applications complexes
 - ➔ calculs avec surface libre, avec corps en mouvement, ...
 - Cas de validation à venir : mouvement libre d'une barge amarrée soumise à une houle transverse
- Continuer le développement des méthodes d'adaptation automatique de maillage
 - ➔ résultats 2D prometteurs : ↗ flexibilité, ↘ temps CPU
 - extension 3D : principale difficulté
 - parallélisation avec équilibrage dynamique des charges de calculs
- Cavitation, interaction fluide-structure avec déformation résolue (corps élancé de type poutre ou plaque dans un premier temps), amélioration des schémas de discrétisation (diffusion),...

Conclusions et perspectives

- Méthodologies implémentées dans le solveur Volumes-Finis non-structurés (ISIS-CFD) opérationnelles pour des applications complexes
 - ➔ calculs avec surface libre, avec corps en mouvement, ...
 - Cas de validation à venir : mouvement libre d'une barge amarrée soumise à une houle transverse
- Continuer le développement des méthodes d'adaptation automatique de maillage
 - ➔ résultats 2D prometteurs : ↗ flexibilité, ↘ temps CPU
 - extension 3D : principale difficulté
parallélisation avec équilibrage dynamique des charges de calculs
- Cavitation, interaction fluide-structure avec déformation résolue (corps élancé de type poutre ou plaque dans un premier temps), amélioration des schémas de discrétisation (diffusion),...

Et à très court terme ...

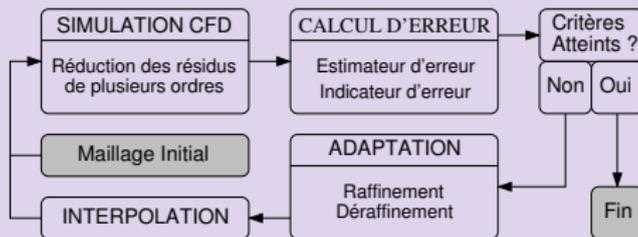
Et à très court terme ...



Merci de votre attention,
et **Bonnes fêtes de fin d'année**

Algorithme adaptatif

Cas stationnaire



Cas instationnaire : calcul à surface libre

- indicateur d'erreur : fonction de présence
- marge d'évolution nécessaire autour de la zone détectée
- capture précise et dynamique de la surface libre

