

Intégration dans ISIS d'un remaillleur Fluide-Structure

Guillaume De Nayer

Remaillleur Fluide-Structure

14 Mai 2007

Contenu de l'exposé

- 1 Le solveur fluide
- 2 Le remailleur Pseudo-Structure
 - Pourquoi ce remailleur ?
 - Le Problème
 - Discrétisations
 - Algorithme
 - Interpolation aux noeuds
 - Validation
 - Paramètres de contrôle
- 3 Exemples d'utilisation
 - ROBEA
 - Le Batteur-Caisse

Contenu de l'exposé

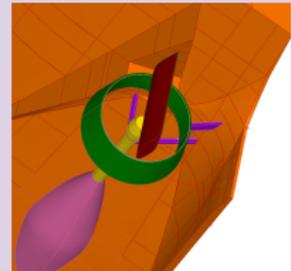
- 1 Le solveur fluide
- 2 Le remaillage Pseudo-Structure
 - Pourquoi ce remaillage ?
 - Le Problème
 - Discrétisations
 - Algorithme
 - Interpolation aux noeuds
 - Validation
 - Paramètres de contrôle
- 3 Exemples d'utilisation
 - ROBEA
 - Le Batteur-Caisse

Simulation d'écoulement avec ISIS-CFD (1/2)

Simulation numérique d'écoulements turbulents incompressibles

- Géométries complexes (maillages non-structurés)
- **Raffinement** automatique de maillage avec une estimation a-posteriori de l'erreur
- Plusieurs modèles statistiques pour la turbulence
- Surface libre ou écoulements cavitants (capture d'interface)

Chute d'un prisme



Bateau complet
avec tous ses
appendices

Simulation d'écoulement avec ISIS-CFD (1/2)

Algorithmes de contrôle/optimisation intégrés à ISIS-CFD

- Algorithmes d'optimisation **Derivative-free** ou **génétiques**
- Algorithmes d'identification **réseau de neurones**

Simulation d'écoulement avec ISIS-CFD (2/2)

Algorithmes de déformation de maillages

- **Déformation automatique** pour des maillages non-structurés

Couplage fort avec la loi de Newton

- Calcul du mouvement d'un ou plusieurs **corps solides ou déformables** dans un fluide

ROBEA

Le solveur fluide ISIS-CFD

- Ecoulements visqueux incompressibles
- Phases non-miscibles
- Equations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds
- Discrétisation volumes-finis entièrement implicite
 - **Volume de contrôle arbitraire**
 - **Précision du second ordre en espace et en temps**
 - Algorithme SIMPLE-like : Equation de pression
 - Solveurs GMRES/CGSTAB + ILU(k)
 - Calcul parallèle (MPI)
- Modélisation de la turbulence
 - 1 Eq : Spalart-Allmaras
 - 2 Eqs : $K - \epsilon$, $K - \omega$ Wilcox/Menter, EASM, ASM
 - 7 Eqs : $R_{ij} - \omega$
 - LES : *D.E.S.*



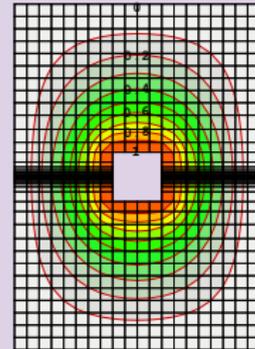
Contenu de l'exposé

- 1 Le solveur fluide
- 2 Le remaillleur Pseudo-Structure
 - Pourquoi ce remaillleur ?
 - Le Problème
 - Discrétisations
 - Algorithme
 - Interpolation aux noeuds
 - Validation
 - Paramètres de contrôle
- 3 Exemples d'utilisation
 - ROBEA
 - Le Batteur-Caisse

Pourquoi ce remaillieur ?

Méthodes de remailage classiques (intégrées à ISIS-CFD) :

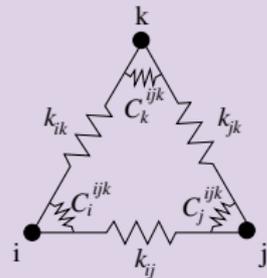
- **Méthode par pondération**
 - Pondération d'un mouvement par un coefficient (1 sur la frontière du corps et 0 sur les autres frontière du domaine)
 - Calcul du coefficient attaché à chaque noeud : résolution d'un Laplacien sur la configuration de référence



Pourquoi ce remaillieur ?

Méthodes de remaillage classiques (intégrées à ISIS-CFD) :

- **Méthode des ressorts linéaires et de torsion**
 - Equilibre $\implies (K_{trac} + K_{tors})q = 0$
avec $q = q_{impose}$ aux frontières,
 K_{trac} et K_{tors} matrices de raideur,
 q vecteur déplacement des noeuds



Pourquoi ce remaillieur ?

Limitation liée à la méthode par pondération

- Non utilisable si le solide est déformable (sauf si la cinématique est de type poutre)

Limitations liées à la méthode des ressorts

- Mise en défaut pour des déformations importantes
- Complexité de codage (de nombreuses nouvelles connectivités, difficilement parallélisable, difficile à coder en 3D)

Pourquoi ce remaillieur ?

Approximation pseudo-solide

- **Approximation pseudo-solide :**
 - le domaine fluide est considéré comme une structure solide élastique (utilisation des équations de structure linéarisées)
- **Paramètres de contrôle :**
 - Module d'Young E
 - Coefficient de cisaillement G
 - Coefficient de Poisson ν

Problème

Résoudre

$$\operatorname{div}(\vec{\sigma}) = 0$$

Contraintes

- Intégration totale dans ISIS-CFD (Volumes finis, MPI...)
- Utiliser les bibliothèques d'ISIS-CFD

Formulation Volumes-Finis

Formulation Volumes-Finis

$$\begin{aligned} \iiint_V \operatorname{div}(\vec{\sigma}) dV = \vec{0} &\iff \oiint_S \vec{\sigma} \cdot d\vec{S} = \vec{0} \\ \implies \sum_{\text{faces } f} \iint_{S_f} \vec{\sigma} \cdot d\vec{S}_f = \vec{0} &\implies \sum_{\text{faces } f} \vec{\sigma}_f \cdot \vec{n}_f S_f = \vec{0} \end{aligned}$$

Formulation Volumes-Finis

Cas isotrope : $\vec{\sigma} = 2\mu \vec{\epsilon} + \lambda \text{tr}(\vec{\epsilon}) \mathbb{I}$

En remplaçant σ , puis ϵ , on obtient :

$$\sum_{\text{faces } f} \mu_f \text{grad}(\vec{U})_f \cdot \vec{n} S_f + \sum_{\text{faces } f} (\mu_f + \lambda_f) \text{div}(\vec{U})_f \cdot \vec{n} S_f = \vec{0}$$

où \vec{U} est le **déplacement des centres des cellules** du maillage

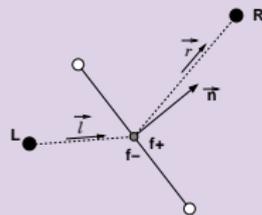
Calcul des gradients en volumes finis

Evaluation du gradient sur la face

$$\Rightarrow \text{grad}(\vec{U}) \cdot \vec{n} = \frac{U_R - U_L}{h} +$$

$$\left(\vec{n} - \frac{\vec{LR}}{LR \cdot \vec{n}} \right) \cdot \left(\frac{h^+}{h} \Rightarrow \text{grad}(\vec{U})_L + \frac{h^-}{h} \Rightarrow \text{grad}(\vec{U})_R \right)$$

$$h^- = \vec{Lf} \cdot \vec{n} \quad h^+ = \vec{fR} \cdot \vec{n} \quad h = h^- + h^+ = \vec{LR} \cdot \vec{n}$$



Formulation isotrope 2D / 3D

Cas isotrope : $\vec{\sigma} = 2\mu \vec{\epsilon} + \lambda \text{tr}(\vec{\epsilon}) \mathbb{I}$

$$\iiint_V \text{div}(\vec{\sigma}) dV = \vec{0} \iff \underbrace{\sum_{\text{faces } f} \mu_f \overset{\Rightarrow}{\text{grad}}(\vec{U})_f \cdot \vec{n}}_{\text{Termes en partie implicites}} S_f + \underbrace{\sum_{\text{faces } f} (\mu_f + \lambda_f) \overset{\Rightarrow}{\text{div}}(\vec{U})_f \cdot \vec{n}}_{\text{Termes explicites}} S_f = \vec{0}$$

où \vec{U} est le **déplacement des centres des cellules** du maillage

Discretisation 2D avec coefficient de cisaillement variable

Formulation anisotrope dans la base locale (\vec{n}, \vec{t})

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_t \\ \sigma_{nt} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G}{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_t \\ \epsilon_{nt} \end{bmatrix} \text{ avec } A = \frac{E}{(1 - \nu^2)}$$

Discrétisation 2D avec coefficient de cisaillement variable

Formulation anisotrope dans la base globale (\vec{x}, \vec{y})

$$\sigma(\vec{x}, \vec{y}) = P\sigma(\vec{n}, \vec{t})P^{-1}$$

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} C & D & B \\ D & C & -B \\ B & -B & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

avec

$$\begin{aligned} B &= n_x n_y (n_x^2 - n_y^2) \left(1 - \nu - 2 \frac{G}{A}\right) & C &= n_x^4 + n_y^4 + 2n_x^2 n_y^2 \left(\nu + 2 \frac{G}{A}\right) \\ D &= \nu (n_x^4 + n_y^4) + 2n_x^2 n_y^2 \left(1 - 2 \frac{G}{A}\right) & F &= 2n_x^2 n_y^2 (1 - \nu) + (n_x^2 - n_y^2)^2 \frac{G}{A} \end{aligned}$$

Discretisation 2D avec coefficient de cisaillement variable

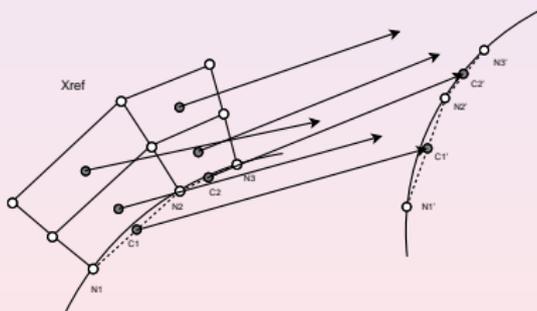
$$\hat{\sigma} = A \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}}_{\text{Formulation isotrope 2D/3D}} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} + A \underbrace{\begin{bmatrix} C-1 & D-\nu & B \\ D-\nu & C-1 & -B \\ B & -B & F - \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}}_{\text{Termes à traiter explicitement}} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

Algorithme

- Initialisation des variables à 0 (pour le calcul parallèle)
- Calcul des déplacements aux frontières
- Initialisation des gradients des déplacements
- Boucle du solveur sur un nombre d'itérations maximum ou sur un gain minimum
 - Calcul des gradients des déplacements (utilisation de la subroutine Gradvec.f)
 - **Discretisations du problème sous la forme $A.U = Src$**
 - Ajout du terme source apporté par l'utilisation d'un pas de temps fictif
 - Calcul du résidu maximum (utilisation de la nouvelle discrétisation avec la solution au pas précédent)
 - Résolution du système $A.U = Src$ à l'aide de la subroutine Solv_PR.f
 - Imposition des conditions aux limites
 - Sous-relaxation de la solution
 - Stockage de la nouvelle solution
- **Interpolation de la solution du centre des cellules aux noeuds**
- Imposition des déplacements exacts aux noeuds frontières
- Calcul des nouvelles positions du maillage déformé

Interpolation au premier ordre

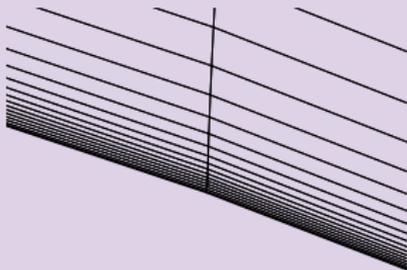
$$\vec{U}_{node} = \frac{\sum_{cellules\ voisines} \frac{\vec{U}_{cell} + \overset{\Rightarrow}{grad}(\vec{U}_{cell}) \cdot \vec{CN}}{|\vec{CN}|}}{\sum_{cellules\ voisines} \frac{1}{|\vec{CN}|}}$$



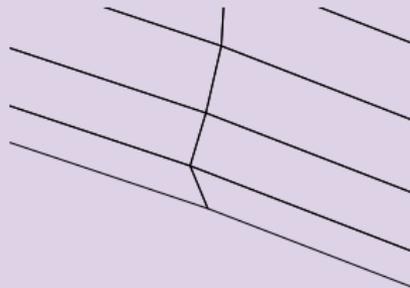
- Méthode exacte pour les mouvements de translation pure
- Très bons résultats pour les mouvements de rotation pure

Géométries problématiques

Vue d'ensemble

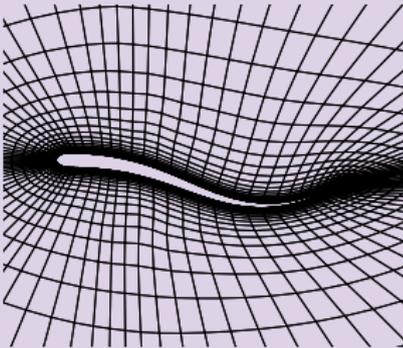


Problème d'interpolation aux noeuds

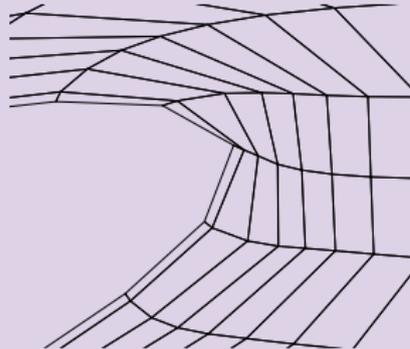


Géométries problématiques

Vue d'ensemble



Zoom sur la queue



Méthode de correction d'erreur d'interpolation

- Initialisation
- Calcul des centres des cellules à partir du maillage de base et du déplacement cellulaire calculé par le remaillieur
- Boucle sur la correction d'erreur aux centres des cellules
 - Calcul géométrique des centres des cellules à partir du maillage déformé
 - Calcul de l'erreur entre ces deux positions de centre de cellule
 - Sous-relaxation avec l'erreur de l'itération précédente
 - Stockage de l'erreur
 - Si l'erreur augmente localement on impose une erreur nulle, i.e la position du centre de cellules calculé à partir du maillage de base
 - Interpolation de l'erreur aux noeuds
 - Calcul du nouveau maillage déformé

Améliorations

- Disparitions des problèmes dans le cas des cellules très étirées
- Faibles améliorations dans le cas de cellules formant un angle important (queue de ROBEA)

Comparaison avec une solution exacte

- Le problème :

Une sphère de rayon R_1 et de centre O est comprise dans une sphère de rayon R_2 ($R_2 > R_1$) et de centre O . La sphère de rayon R_1 subit une expansion de uR_1 suivant \vec{e}_r . La sphère de rayon R_2 est figée. Les coefficients E et ν sont invariants.

- L'équation générale :

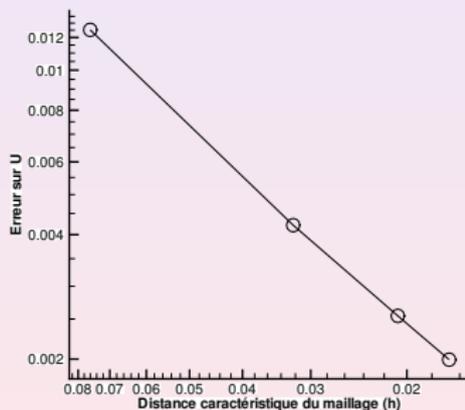
$$\frac{\partial^2 U_r}{\partial r^2} + 2\frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial r} - 2\frac{1}{r^2} U_r = 0$$

- La solution exacte :

$$U_r = uR_1 \frac{R_1^2}{(R_1^3 - R_2^3)} \left(r - \frac{R_2^3}{r^2} \right)$$

Courbe d'erreur

géométrie retenue pour la validation : $R_1 = 1$, $R_2 = 2$, $uR_1 = 0.1$



l'erreur sur le déplacement diminue d'un facteur 1.2 avec la distance caractéristique du maillage

Paramètres de contrôle

Rappel des différents paramètres

- Module d'Young E
- Coefficient de cisaillement G
- Coefficient de Poisson ν

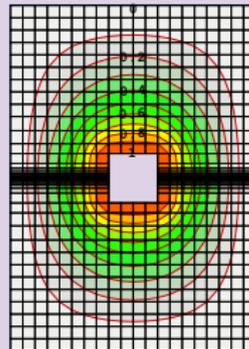
Caractéristiques particulières

- E et G sont variables spatialement (dépendent du coefficient de pondération)
- ν est fixé à 0.20

Paramètres de contrôle

Module d'Young E

- Nombreuses distributions de E par rapport au coefficient de pondération (linéaire, parabolique...)
- La plus performante : 10^{aX^b} où a et b constants et X coefficient de pondération relatif à la cellule



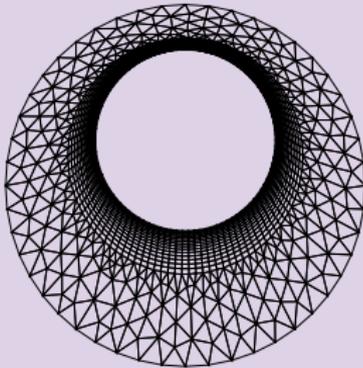
Coefficient de cisaillement G

- Nombreuses distributions de G disponibles (linéaire, parabolique...)
- La plus performante : $G = \alpha\mu(E, \nu)$ où α constant

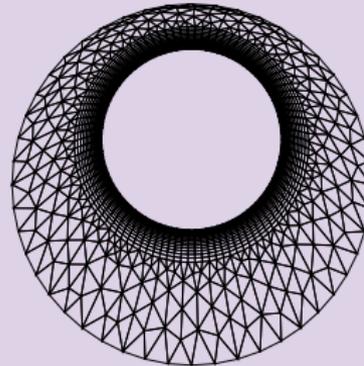
Paramètres de contrôle

Influence de E

Cas E uniforme



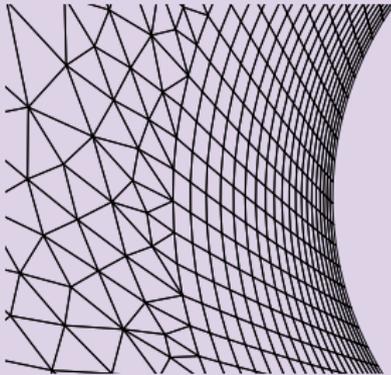
Variation parabolique de E



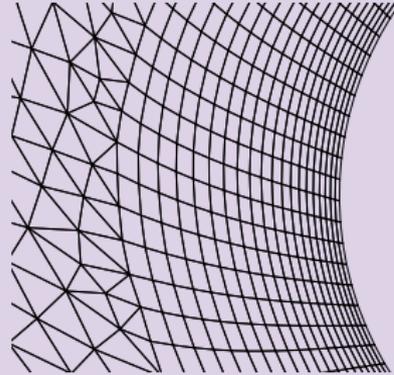
Paramètres de contrôle

Influence de G

Cas isotrope ($G = \mu$)



Cas $G = 25\mu$

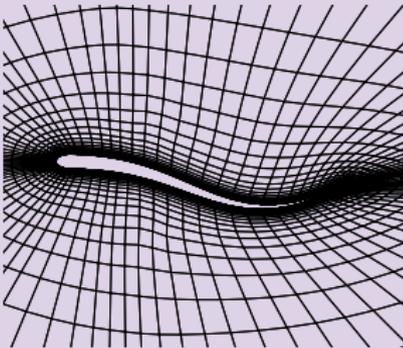


Contenu de l'exposé

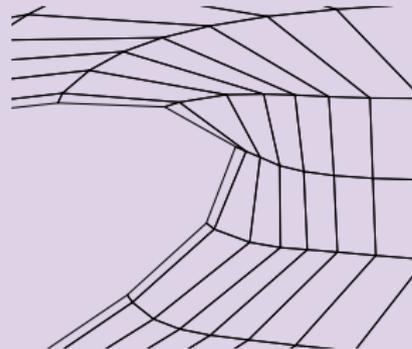
- 1 Le solveur fluide
- 2 Le remaillieur Pseudo-Structure
 - Pourquoi ce remaillieur ?
 - Le Problème
 - Discrétisations
 - Algorithme
 - Interpolation aux noeuds
 - Validation
 - Paramètres de contrôle
- 3 Exemples d'utilisation
 - ROBEA
 - Le Batteur-Caisse

Premiers résultats (maillage léger 2D GRIDGEN)

Vue d'ensemble

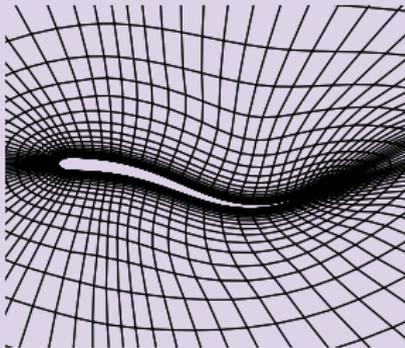


Zoom sur la queue

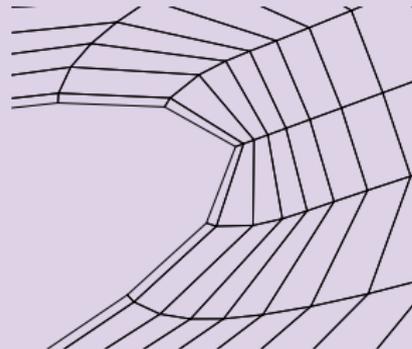


Couplage remaillieur FS + pondération (maillage léger 2D GRIDGEN)

Vue d'ensemble

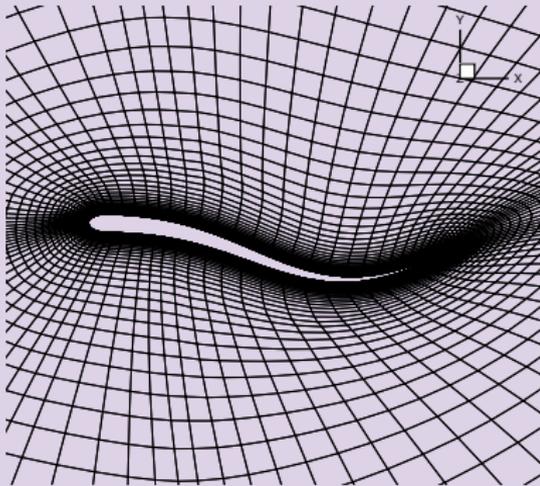


Zoom sur la queue

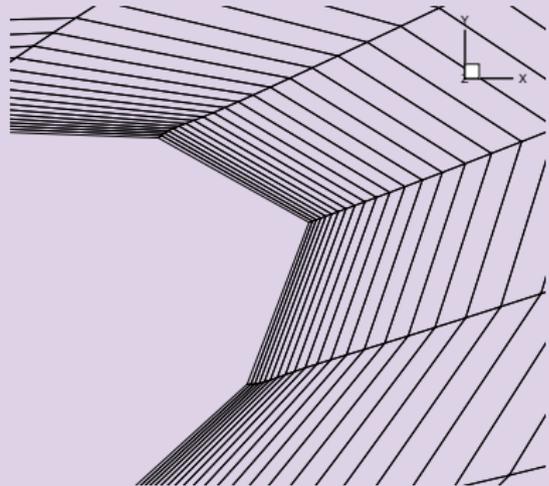


Couplage remaillieur FS + pondération (maillage fin 3D GRIDGEN)

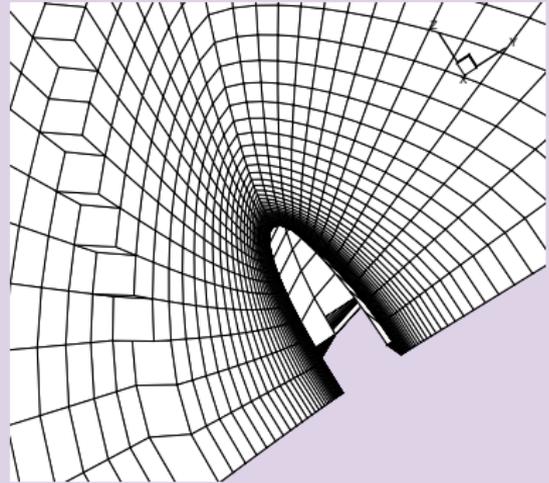
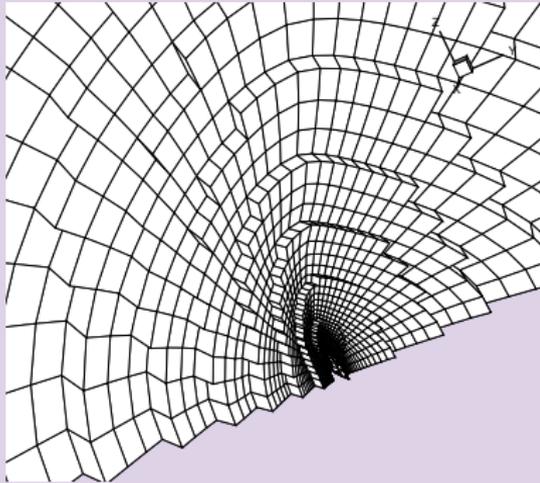
Vue d'ensemble



Zoom sur la queue



Couplage remaillieur FS + pondération (maillage fin 3D GRIDGEN)

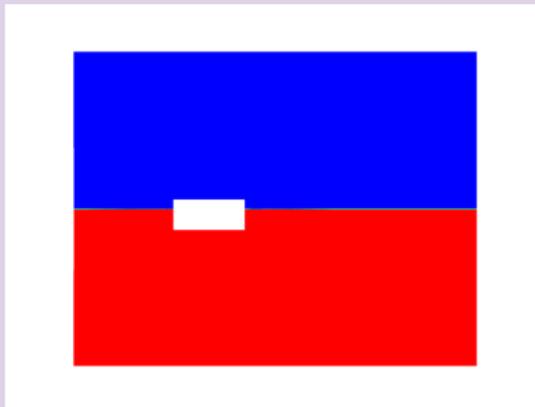


Le Batteur-Caisse : Description

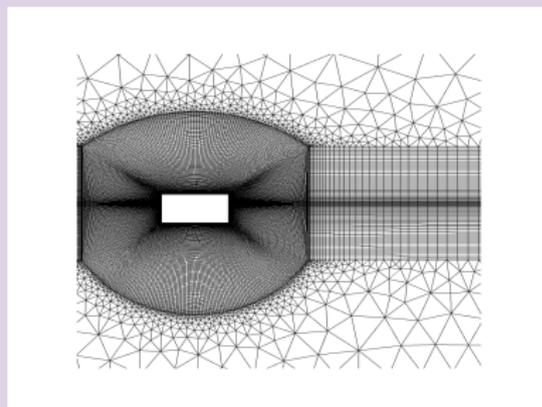


Remaillieur FS + mouvement en bloc (maillage fin 2D GRIDGEN)

Écoulement

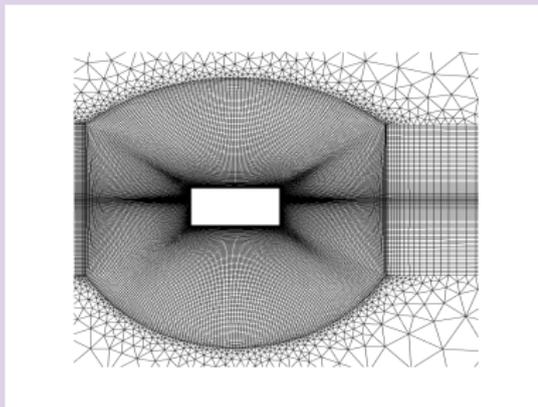


Maillage

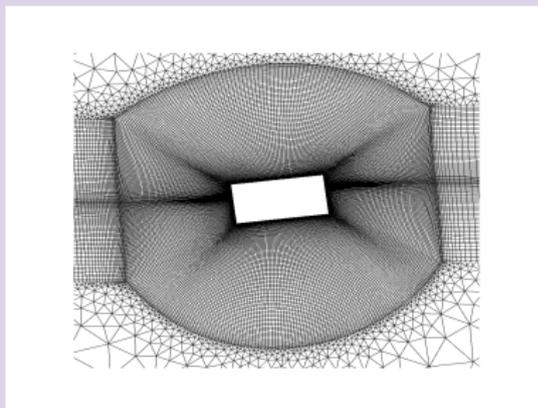


Grandes déformations pour le batteur et la caisse

Translation



Rotation (+ - 45°)



Caractéristiques du remaillage FS

- **Remaillage Fluide-Structure seul :**
 - Déformation de maillage parfaite dans le cas de corps solides en translation pure
 - Problème aux frontières dans le cas de corps solide en grande rotation pure (problèmes disparus avec G en 2D)
 - Problème aux frontières dans le cas de corps déformables en grande déformation
- **Couplage du remaillage Fluide-Structure avec la pondération ou le mouvement en bloc proche corps :**
 - Disparition des problèmes autour des corps déformables (pondération)
 - Disparition de tous les problèmes aux frontières (mvt en bloc)

Caractéristiques du remaillage FS

- **Remaillage Fluide-Structure seul :**
 - Déformation de maillage parfaite dans le cas de corps solides en translation pure
 - Problème aux frontières dans le cas de corps solide en grande rotation pure (problèmes disparus avec G en 2D)
 - Problème aux frontières dans le cas de corps déformables en grande déformation
- **Couplage du remaillage Fluide-Structure avec la pondération ou le mouvement en bloc proche corps :**
 - Disparition des problèmes autour des corps déformables (pondération)
 - Disparition de tous les problèmes aux frontières (mvt en bloc)

A l'étude

- Lissage entre la zone pondération/mvt en bloc et la zone du remaillieur FS
- Discrétisation 3D avec du cisaillement G