

Introduction à la CFD

F. Ravelet

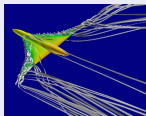
Laboratoire DynFluid, Arts et Métiers-ParisTech

17 mars 2010

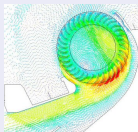
Computational Fluid Dynamics

Moyens de calculs et Méthodes numériques pour problèmes liés aux écoulements fluides.

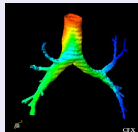
- Aérodynamique



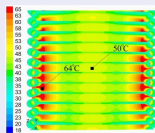
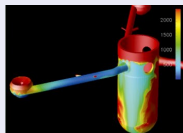
- Turbomachines



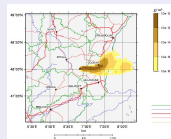
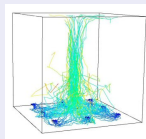
- Ecoulements biologiques



- Transferts thermiques



- Transport de polluants, météorologie



Rappels de mécanique des fluides

- Un fluide se déforme sous un cisaillement infiniment faible.
- Liquides, Gaz.
- Compressibilité.
- Fluide parfait, écoulements laminaires et turbulents.

Rappels de mécanique des fluides

- Un fluide se déforme sous un cisaillement infiniment faible.
- Liquides, Gaz.
 - ▶ Liquide : surface libre et volume défini.
 - ▶ Gaz : remplit un réservoir de forme quelconque.
- Compressibilité.
- Fluide parfait, écoulements laminaires et turbulents.

Rappels de mécanique des fluides

- Un fluide se déforme sous un cisaillement infiniment faible.
- Liquides, Gaz.
- Compressibilité.
 - ▶ Tous les fluides sont compressibles.
 - ▶ Si $\frac{\partial \rho}{\partial p} \ll 1$: écoulement incompressible.
C'est le cas quand $u \ll c$, *i.e.* $M \ll 1$.
Eau : $c = 1480\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, Air : $c = 340\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Fluide parfait, écoulements laminaires et turbulents.

Rappels de mécanique des fluides

- Un fluide se déforme sous un cisaillement infiniment faible.
- Liquides, Gaz.
- Compressibilité.
- Fluide parfait, écoulements laminaires et turbulents.
 - ▶ Le Fluide Parfait n'existe pas.
 - ▶ Ecoulement laminaire : les couches adjacentes glissent l'une sur l'autre.
 - ▶ Ecoulement turbulent : fluctuations "aléatoires" autour d'un écoulement moyen. A haut Re c'est la règle.

Rappels de mécanique des fluides

- Un fluide se déforme sous un cisaillement infiniment faible.
- Liquides, Gaz.
 - ▶ Liquide : surface libre et volume défini.
 - ▶ Gaz : remplit un réservoir de forme quelconque.
- Compressibilité.
 - ▶ Tous les fluides sont compressibles.
 - ▶ Si $\frac{\partial \rho}{\partial p} \ll 1$: écoulement incompressible.
C'est le cas quand $u \ll c$, *i.e.* $M \ll 1$.
Eau : $c = 1480 \text{m.s}^{-1}$, Air : $c = 340 \text{m.s}^{-1}$.
- Fluide parfait, écoulements laminaires et turbulents.
 - ▶ Le Fluide Parfait n'existe pas.
 - ▶ Écoulement laminaire : les couches adjacentes glissent l'une sur l'autre.
 - ▶ Écoulement turbulent : fluctuations "aléatoires" autour d'un écoulement moyen. A haut Re c'est la règle.

Etapes d'une simulation

La CFD consiste à résoudre les équations *que l'on a choisies* pour représenter *au mieux* la physique du problème, de manière approximative sur un domaine discrétisé.

- **Preprocesseur.**

- ▶ Définition du domaine fluide, par CAO.
- ▶ Maillage (Gambit, I-DEAS).

- **Solveur.**

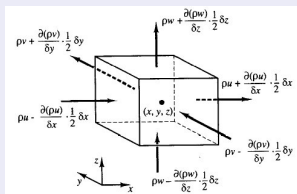
- ▶ Stationnaire, 2D, Axisymétrique, 3D, ...
- ▶ Modèle de turbulence, écoulement compressible, ...
- ▶ Volumes finis (90% des codes, Fluent, CFX, Star-CCM+), Différences finies, Eléments finis.

- **Post-traitement.**

- ▶ Visualisation (ParaView).
- ▶ Analyse (Matlab, Octave).

Méthode des Volumes Finis

- La méthode des volumes finis est basée sur des équations de bilans exprimés sur des *volumes de contrôle*. Les termes de divergence sont transformés en *flux surfaciques*, les calculs sont effectués directement sur les flux.

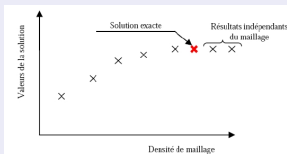


Avantages et inconvénients :

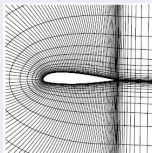
- ▶ Bien adaptée aux lois de conservation.
- ▶ Permet des maillages non-structurés (géométries complexes).
- ▶ Difficulté à monter en ordre.

Maillage

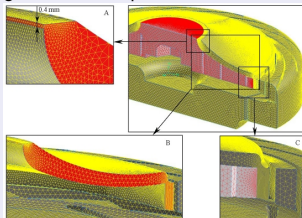
- Qualité du maillage.
 - ▶ Qualité : éléments réguliers, minimiser la "Skewness" (distorsion).
 - ▶ Résolution : raffiner dans régions de forts gradients, au moins 10 nœuds entre deux parois.
 - ▶ Lissage : taille progressive, variation max. 20%.
 - ▶ Total : à minimiser.
- Convergence en maillage



- Maillage structuré par blocs



- Maillage non structuré pour géométrie complexe



Notions importantes sur la turbulence

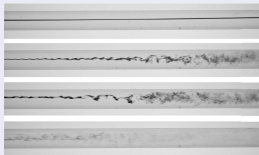


FIG.: Expérience de Reynolds : écoulement de Poiseuille cylindrique. Toutes les photos sont prises au même $Re = 5000$.

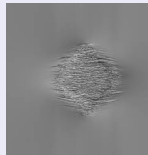


FIG.: Spot turbulent dans un écoulement de Couette plan



FIG.: Visualisation de la vorticité dans un jet turbulent

- Un écoulement peut être instable. Il y a alors des solutions multiples. Le monde n'est pas linéaire.
- Etymologie de la turbulence : "une foule de tourbillons", *i.e.* des structures   toutes les échelles, fluctuantes.

Modèles de turbulence

- Reynolds-Average Navier-Stokes. Très largement utilisé dans l'industrie.

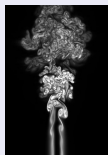


FIG.: Jet turbulent : champ de vitesse instantané

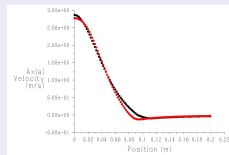
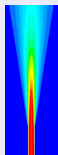


FIG.: Simulation par méthode RANS d'un jet turbulent : champ et profil de vitesse moyen. Différents modèles ($k - \epsilon$ et *Realizable* $k - \epsilon$) donnent différents résultats.

- ▶ Décomposition en partie moyenne et partie fluctuante : $u(t, x) = \langle U \rangle + u'$.
 - ▶ Moyenne d'ensemble ou moyenne temporelle ?
 - ▶ Equation pour $\langle U \rangle$: fait apparaître un terme en $\text{div} \langle u' u' \rangle$, le tenseur de Reynolds.
 - ▶ Problème de fermeture et hypothèse de Boussinesq : on remplace le tenseur de Reynolds par une "viscosité turbulente" ν_t qui dépend de l'espace.
 - ▶ Multiples modèles pour ν_t (longueur de mélange, modèles $k - \epsilon$, RSM ...)
 - ▶ Modèles semi-empiriques aux constantes ajustées à des expériences de référence.
- Large Eddy Simulation. Lourd dans un contexte industriel, peu de recul.
 - ▶ Filtrage des équations et résolution des échelles jusqu'à la taille de la maille.
 - ▶ Termes liés aux échelles sous-mailles de la turbulence modélisés.

Modèles RANS

<i>Modèles</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Spalart-Allmaras	Economique (1 equ). Bon pour les écoulements moyennement complexes, et les écoulements sur profil.	N'est pas largement testé.
Standard $k - \epsilon$	Robuste, économique et relativement précis.	Résultats médiocre pour des écoulements complexes (fort gradient de pression, rotation et swirl).
RNG $k - \epsilon$	Dérivé par une méthode statistique rigoureuse (Renormalization Group theory). Bon pour des écoulements moyennement complexes (impact de jet, séparation d'écoulements, recirculations).	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
Realizable $k - \epsilon$	Respecte une contrainte physique que peut violer le modèle $k - \epsilon$. Offre les mêmes avantages que le RNG. Recommandé dans le cas des turbomachines.	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
SST et Standard $k - \omega$	Modèle le plus recommandé pour les problèmes liés aux turbomachines, meilleur que le Realizable $k - \epsilon$. Le SST $k - \omega$ fait une transition entre le $k - \omega$ (faibles nombres de Reynolds et couche limites) et une version haut Re du $k - \epsilon$ lorsqu'on est loin des parois.	Nécessite une plus grande résolution du maillage aux frontières (pas de lois aux murs).
Reynolds-Stress Model (RSM)	Le modèle le plus complet physiquement (transport et anisotropie de la turbulence sont pris en compte).	Requiert plus de temps CPU. Les équations de quantité de mouvement et turbulence sont étroitement liées.

Compléments à creuser par vous-même

- Couches limites turbulentes, décollements, ...
- Traitement des parois par “lois de paroi”. Notions de y^+ .
- Importance des symétries (la solution moyenne issue d'un calcul RANS doit *a priori* restaurer les symétries du problème).
- Il existe des instabilités purement numériques.