

# **UTILISATION DES LOGICIELS EN CFD**

## 1. Qu'est-ce que CFD?

La CFD ou, Computational Fluid Dynamics, pourrait se traduire par Simulation numérique de la Dynamique des Fluides. Elle consiste à étudier les écoulements d'un fluide, le transfert de chaleur et de masse, les réactions chimiques et des phénomènes connexes, en résolvant numériquement l'ensemble des équations mathématiques gouvernantes :

- Conservation de la masse
- Conservation de la quantité de mouvement
- Conservation de l'énergie
- Conservation des espèces

La CFD est actuellement un passage obligé avant tout développement de dispositifs dont le fonctionnement est lié à la circulation d'un fluide. Comparées aux essais expérimentaux, la CFD permet de faire plus de simulations avec la possibilité de faire varier plus de paramètres et de configurations à moindre coût.

Même si les essais expérimentaux sont toujours nécessaires notamment pour valider les simulations numériques, la CFD permet de réduire le nombre d'essais des nouveaux dispositifs. L'analyse CFD complète les tests et l'expérimentation en réduisant l'effort total et le coût requis pour l'expérimentation et l'acquisition de données. Elle est donc devenue un outil indispensable pour le développement de la recherche et de l'industrie.

La CFD est particulièrement utile pour :

- Pre-dimensionnement
- Optimisation de forme/process
- Calcul/Dimensionnement d'efforts sur des structures
- Visualisation des champs de pression, vitesse, etc

## 2. Domaines d'applications de la CFD

L'analyse CFD a des applications dans de nombreux secteurs pour concevoir ou améliorer les systèmes ou développer de nouveaux produits. On peut citer celles de :

- Industries de l'automobile et de l'aérospatiale
- Industries des procédés et de la chimie
- Turbomachines (ventilateur, turbine, compresseur, soufflantes et pompes, etc.)
- Centrale thermique et nucléaire
- Combustion, incendie et pollution de l'environnement
- Chauffage et ventilation des bâtiments, des voitures, des bus et des avions civils
- Prédiction météo
- Applications de défense et spatiales
- Applications biomédicales

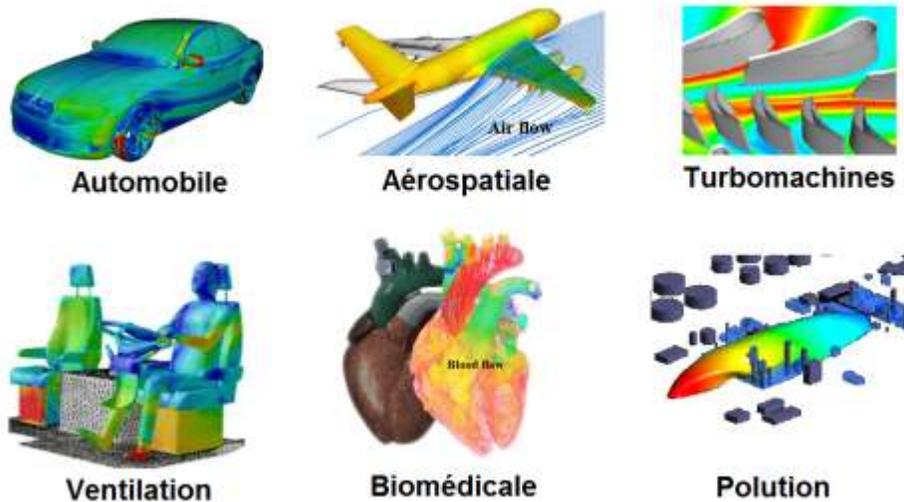


Fig. 1-1 Quelques domaines d'application de la CFD

## 2.1 Exemple d'application

Sur la figure 1-2, on peut visualiser quelques résultats de calculs CFD que l'on peut obtenir. La connaissance de l'écoulement autour d'un profil d'aile nous permet d'évaluer les forces aérodynamiques exercées par le fluide sur les pales d'une éolienne à axe vertical. Cela permet d'estimer le couple fourni par l'éolienne en rotation.

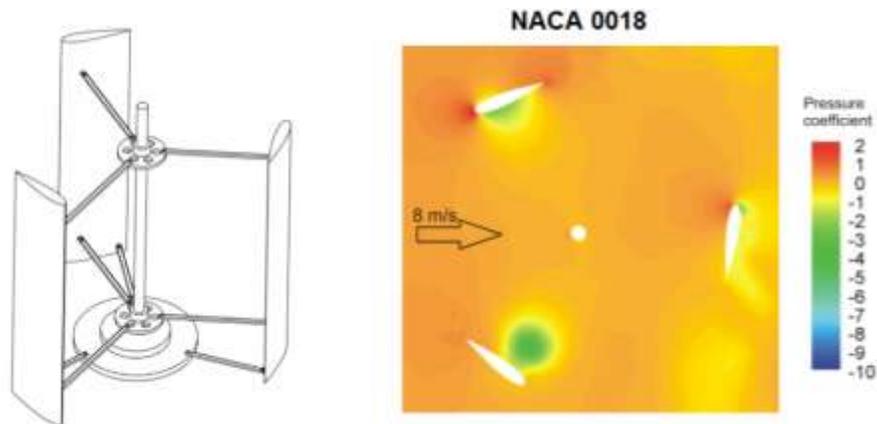


Fig. 1-2 Simulation du l'écoulement de l'air autour d'une éolienne à axe vertical en rotation

### 3. Logiciels populaires pour l'analyse CFD

De nombreux logiciels d'analyse CFD sont disponibles. Les logiciels commerciaux sont faciles à apprendre pour les débutants car ils fournissent un guide de l'utilisateur complet et du matériel de formation avec un support technique. Cependant, ils ont des frais de licence élevés. Certains outils d'analyse CFD open source sont disponibles gratuitement, mais les utilisateurs CFD ne peuvent pas obtenir de matériel de formation détaillé. Par conséquent, les utilisateurs de CFD prennent plus de temps pour apprendre.

#### 3.1 Les logiciels commerciaux

Depuis de nombreuses années, les standards de référence en matière de simulation CFD sont **Fluent** et **Star-CCM+** et ce sont des outils excellents et diversifiés. **Fluent** semble conquérir plus de parts de marché sur les marchés des produits électroniques et industriels et **Star-CCM+** dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile et de l'énergie. Le module CFD de **COMSOL** et l'AcuSolve d'**Altair** sont moins largement utilisés et sont des composants de plates-formes de simulation multiphysique plus larges. Néanmoins, ils ont rapidement pris de l'ampleur avec des capacités supplémentaires qui se rapprochent désormais de celles des deux grands. Tous les quatre sont équipés de capacités de maillage et de post-traitement et peuvent accepter et générer tous les types de fichiers et formats populaires. Le principal inconvénient de ces logiciels est leur prix.

### 3.2 Les logiciels libres "Open Source"

L'utilisation de logiciels open source présente de nombreux avantages. En plus d'être libres d'utilisation et de distribution, les logiciels open source fournissent aux utilisateurs la licence pour modifier le code source selon leurs besoins. Certains des plus courants incluent **OpenFOAM**, **SU2**, **Palabos**, **Fire Dynamics Simulator** et **MFIX**. Parmi ces logiciels **OpenFOAM** est de loin le plus utilisé. **OpenFOAM** a acquis une crédibilité considérable ces dernières années grâce à des études de vérification et de validation réalisées par une base d'utilisateurs croissante. Un nombre croissant d'universités et de sociétés (telles que Mercedes Benz, BASF, BMW, Volkswagen et Intel) utilisent également **OpenFOAM**, à la fois indépendamment et conjointement avec d'autres codes commerciaux.



Fig. 1-3 Exemples de logo de logiciels CFD

### 4. Comment fonctionne la CFD?

Le solveur CFD utilisé dans ce cours est le logiciel Fluent, il est basé sur la méthode des volumes finis. Dans cette méthode :

- Le domaine est discrétisé en un ensemble fini de volumes de contrôle (Fig. 1-4)

- Les équations générales de conservation (transport) pour la masse, la quantité de mouvement, l'énergie, les espèces, etc. sont résolues sur cet ensemble de volumes (Tableau 1-1)
- Les équations différentielles partielles sont discrétisées en un système d'équations algébriques  $[A]\{\phi\}=\{b\}$
- Toutes les équations algébriques sont ensuite résolues numériquement pour avoir la solution

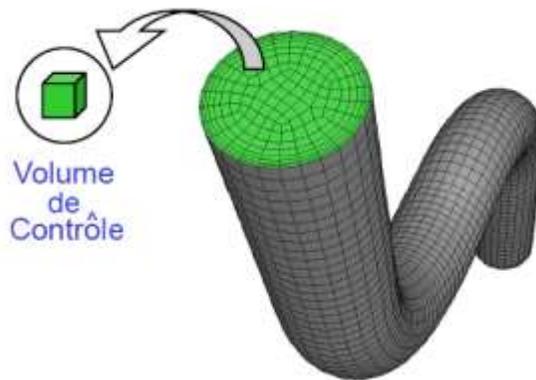


Fig. 1-4 Discrétisation du domaine fluide en un ensemble fini de volumes de contrôle

FORME GÉNÉRALE DE L'ÉQUATION	$\phi$	NOM
$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Transitoire}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \vec{V} \cdot d\vec{A}}_{\text{Convection}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \vec{\nabla} \phi \cdot d\vec{A}}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Generation}}$	1	Continuité
	$u$	Mouvement X
	$v$	Mouvement Y
	$w$	Mouvement Z
	$h$	Energie

Tableau 1-1 Forme générale de l'équation de conservation intégrée sur le volume de contrôle

## 5. Étapes de la CFD

En pratique, les simulations CFD s'effectuent en quatre grandes étapes (Fig. 1-5) :

1. Identification du problème
2. Pré-traitement (Pre-processing)

3. Résolution
4. Post-traitement (Post-processing)

Au cours de la première étape, on définit les objectifs de notre simulation et le domaine d'étude.

Dans la deuxième étape, «**Pré-traitement**», on construit la géométrie qui contient le domaine d'étude. Le maillage est ensuite généré à l'intérieur de ce domaine. Ensuite, on spécifie les propriétés physiques du fluide et on choisit les modèles à appliquer, l'algorithme de calcul, les méthodes d'interpolation et autres schémas.

La troisième étape, «**Résolution**», c'est la phase de calcul, ou de résolution des équations algébriques.

La quatrième et dernière étape, «**Post-traitement**», c'est la phase de traitement et d'interprétation des résultats.

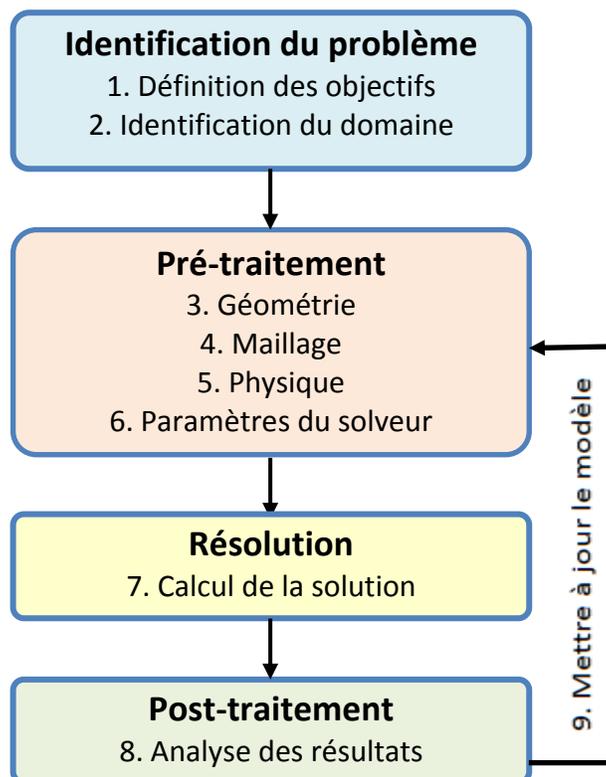


Fig. 1-5 Étapes de la CFD

## 5.1 Définition des objectifs

La première étape de la CFD est la définition des objectifs de notre simulation. Dans ce cas il faut répondre à un certain nombre de question :

- Quels sont les résultats recherchés (Débit massique, perte de charge...etc.) et comment seront-ils utilisés?
- Quels sont les modèles physiques qui devront être inclus dans l'analyse et quelles hypothèses simplificatrices (Symétrie, périodicité...etc.) doivent être faites?
- Quel degré de précision est requis et dans combien de temps on a besoin des résultats?
- La CFD est-elle un outil approprié?

## 5.2 Identification du domaine

Dans cette étape il faut identifier les frontières du domaine de calcul pour l'isoler du système physique globale. Dans ce cas il faut s'assurer d'avoir des informations sur les conditions aux limites à ses frontières, et que les types de conditions aux limites peuvent fournir ces informations. Pour gagner en terme de temps de calcul il faut voir si le problème peut être simplifié ou approché comme un problème 2D ou axisymétrique.

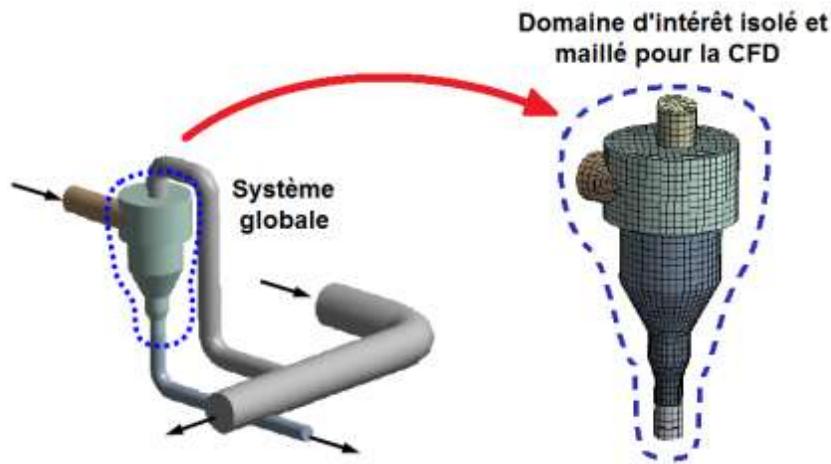


Fig. 1-6 Isolation du domaine de calcul

## 5.3 Géométrie

Toute simulation CFD commence par la réalisation de la géométrie, soit avec un logiciel intégré au code de calcul CFD soit à l'aide d'un logiciel de CAO. Dans le deuxième cas, la

géométrie doit être exportée en un format lisible par le logiciel de maillage. Les formats STEP ou IGES sont les plus couramment utilisés. Dans certains cas au lieu de créer la géométrie à partir de zéro on peut utiliser les modèles CAO existants, ou extraire la région fluide d'une pièce solide (Fig. 1-7). Pour les problèmes de transfert de chaleur conjugué ou d'interaction fluide-structure, le domaine doit inclure toutes les parties solides présentes (Fig. 1-8).

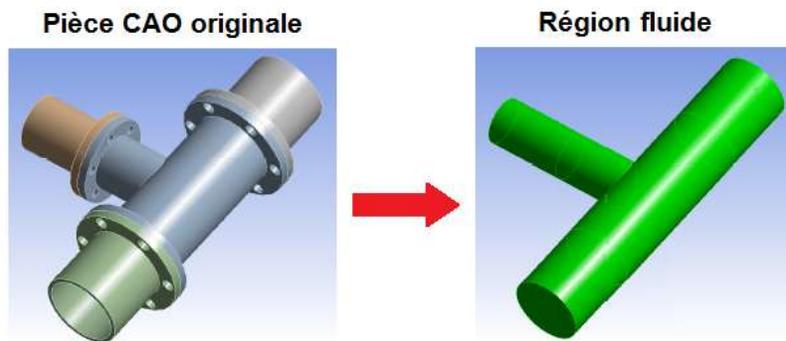


Fig. 1-7 Région fluide extraite d'une pièce solide

Il faut essayer de voir si la géométrie peut être simplifiée, comme par exemple en supprimant les éléments inutiles qui compliqueraient le maillage (congés, boulons...), ou en utilisant la symétrie ou la périodicité.

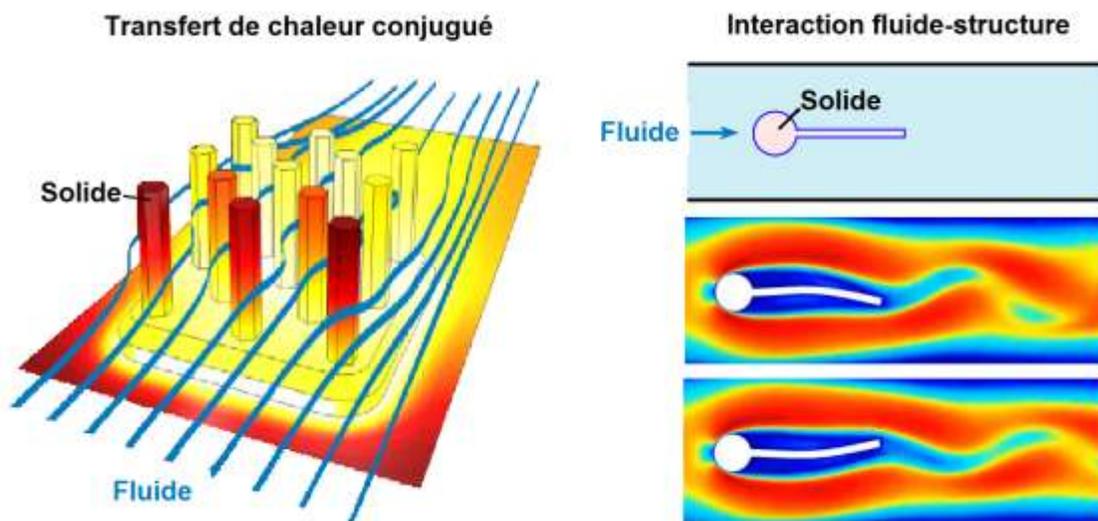


Fig. 1-8 Problème dans lesquels le domaine doit inclure les parties solides

## 5.4 Maillage

Un maillage divise une géométrie en plusieurs éléments. Ceux-ci sont utilisés par le solveur CFD pour construire les volumes de contrôle. La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu son influence sur la solution calculée. Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant.

Le domaine de calcul est défini par un maillage qui représente le fluide et les faces solides qui interviennent. Les entités de maillage obéissent à la hiérarchie suivante:

- **"Cell"** : volume de contrôle divisant la géométrie
- **"Face"** : frontière d'une "cell", où sont définies les conditions aux limites
- **"Edge"** : frontière d'une "face"
- **"Node"** : point de maillage
- **"Zone"** : groupe de "nodes", "faces" et/ou "cells"

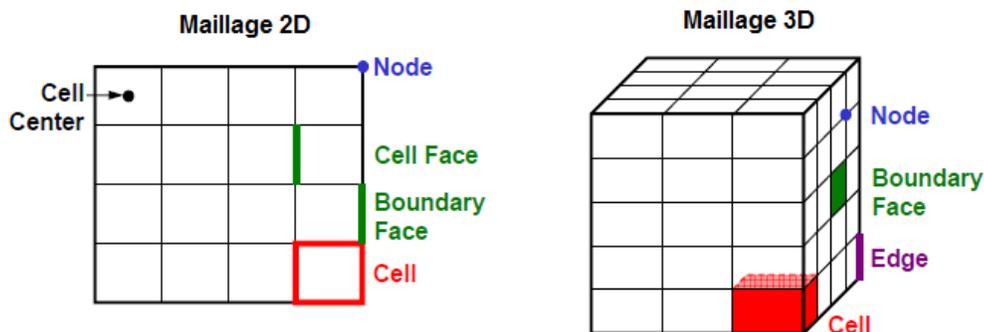


Fig. 1-9 Entités composant un maillage

La grille de maillage peut avoir plusieurs formes et tailles. En 2D par exemple, les éléments sont des **Quad**rilatères ou des **Tri**angles (Figure 1-8). Ils peuvent être **Té**traédriques, Prismes, Pyramides ou **Hex**aèdres. La différence entre les formes est juste le nombre de côtés et d'angle.

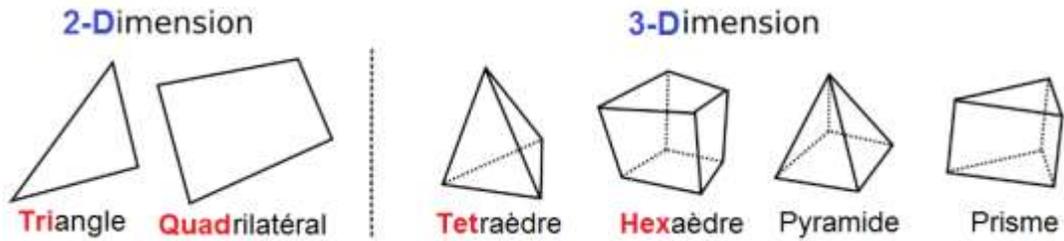


Fig. 1-10 Types de maillage en 2D et 3D

### 5.4.1 Types de maillage

Il existe deux types de maillage: **structuré** et **non structuré** (Fig. 1-11). Lorsqu'on utilise les deux type de maillage en même temps on appelle le maillage **hybride**.

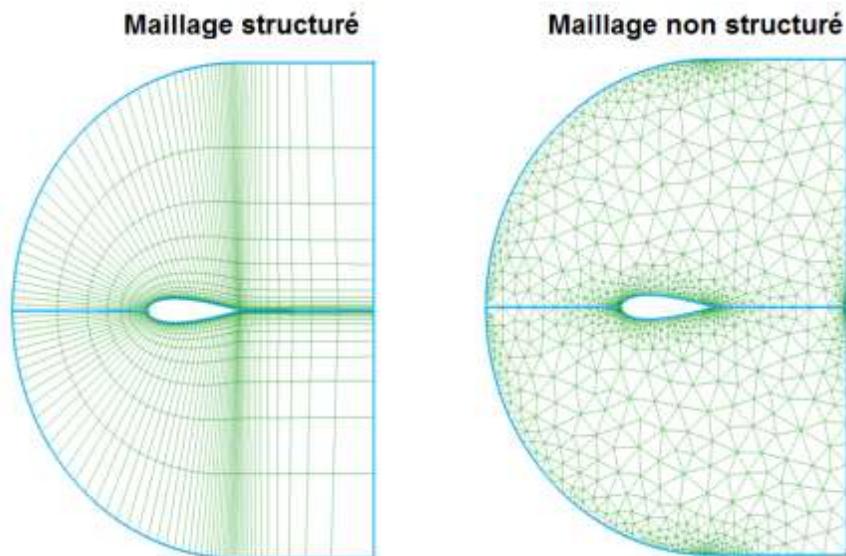


Fig. 1-11 Exemple de maillage structuré et non structuré

Une erreur courante est de croire qu'un maillage **Quad** est structuré et un maillage **Tri** n'est pas structuré. Cependant, un maillage **Quad** peut également être non structuré (Fig. 1-12). Un maillage structuré peut aussi être composé d'éléments triangulaires.

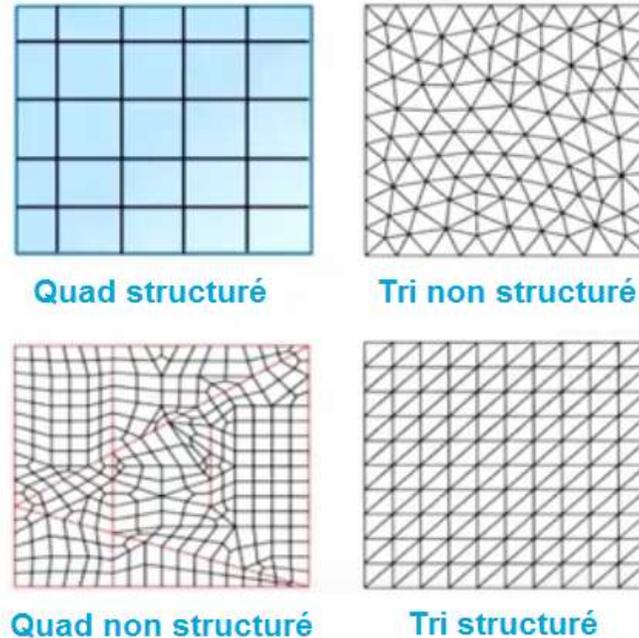


Fig. 1-12 Maillage **Quad** et **Tri** structuré et non structuré

#### a) Maillage structuré

Un maillage structuré est un maillage qui peut être généré en reproduisant plusieurs fois une maille élémentaire. Dans ce type de maillage, tout nœud peut être repéré par un doublet ou un triplet  $(i, j, k)$ . Le maillage structuré tire profit de la numérotation et la topologie est implicite (stockage quasi-nul).

- Il présente les avantages suivants :
  - ❖ Économique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent
  - ❖ Lorsque l'écoulement moyen est aligné avec le maillage (Fig. 1-13), un maillage structuré réduit les risques d'erreurs numériques
- Ses inconvénients :
  - ❖ Difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe
  - ❖ Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes. Il est beaucoup plus facile à générer en utilisant une géométrie à blocs multiples

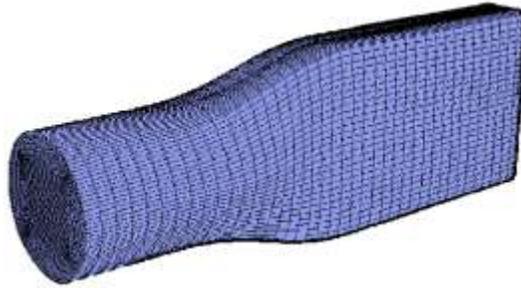


Fig. 1-13 Exemple d'un maillage aligné sur l'écoulement

### b) Maillage non structuré

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte par rapport à leur disposition.

- Ses avantages :
  - ❖ Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments
  - ❖ Les algorithmes de génération de ce type de maillage sont très automatisés
- Ses inconvénients :
  - ❖ Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré
  - ❖ Impose une structure de données gourmande en capacités de stockage
  - ❖ Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importantes si on le compare avec le maillage structuré

Parametre	Structuré	Non structuré
Efficacité de la mémoire et stockage		
Vitesse de génération du maillage		
Convergence et temps de résolution		

Tableau 1-2 Résumé des avantages et inconvénients du maillage structuré et non structuré

### c) Maillage hybride

Pour les géométries complexes il ne serait pas pratique de générer un maillage structuré (aligné sur l'écoulement). Dans ce cas on peut économiser l'effort de maillage en utilisant un maillage hybride (Fig. 1-14). C'est un maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. Il combine les avantages des maillages structurés et non structurés.

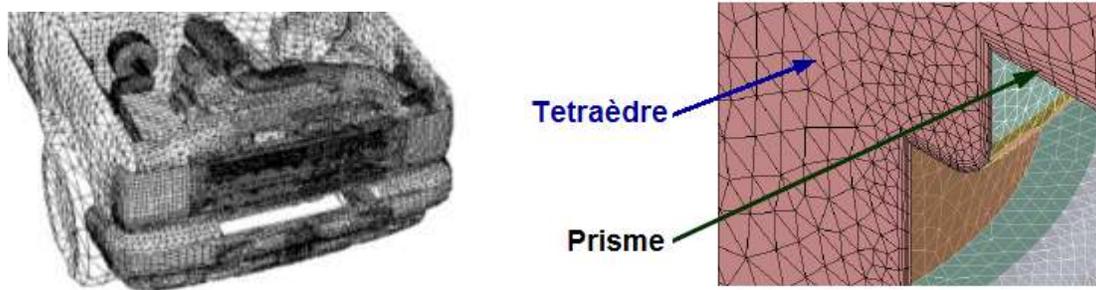


Fig. 1-14 Maillage hybride d'une géométrie complexe

#### 5.4.2 Qualité du maillage

La qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul. Une bonne qualité de maillage repose sur la minimisation des éléments présentant des «**distorsions**» (skewness en anglais), et sur une bonne «**résolution**» dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc...etc.). Un bon maillage doit également être suffisamment «**lisse**».

En pratique, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- ❖ Maintenir une bonne **Q**ualité des éléments
- ❖ Assurer une bonne **R**ésolution dans les régions à fort gradient
- ❖ Assurer un bon **L**issage dans les zones de transition entre les parties maillage à fin et les parties à maillage grossier
- ❖ Minimiser le nombre **T**otal des éléments (temps de calcul raisonnable)

On peut se souvenir de ces règles en utilisant la formulation mnémotechnique **QRLT**.

a) Distorsion

Une bonne qualité de maillage est synonyme d'absence de grandes distorsions d'éléments. Le facteur de distorsion  $F_d$  (skewness) se calcule par la relation donnée dans le tableau 1-3.

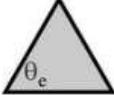
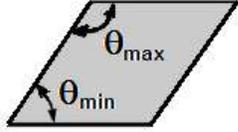
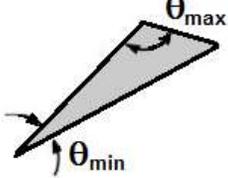
Facteur de distorsion $F_d$	Quad/Hex	Tri/Tet
$F_d = \max\left\{\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e}\right\}$	$\theta_e = 90^\circ$ 	$\theta_e = 60^\circ$ 
<p><math>F_d = 0 \rightarrow</math> Élément parfaitement <b>Orthogonale</b></p> <p><math>F_d = 1 \rightarrow</math> Élément complètement <b>Distordu</b></p>		

Tableau 1-3 Formule du facteur de distorsion

Les grandes valeurs du facteur de distorsion induisent des erreurs de calcul et ralentissent considérablement le processus de convergence. Quelques distorsions peuvent être tolérées si elles sont situées dans des régions à faible gradient. Le tableau 1-4 illustre la variation de la qualité des éléments de maillage en fonction de la valeur du coefficient de distorsion.

$F_d$	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.99	0.99-1.00
Qualité	Excellente	Bonne	Acceptable	Pauvre	Très pauvre	Mauvaise

Tableau 1-4 Qualité associée au facteur de distorsion

La valeur maximale du facteur de distorsion tolérée pour un maillage volumique doit être inférieure à 0.90. La valeur maximale du facteur de distorsion tolérée pour un maillage surfacique structuré ou non, hexaédrique ou tétraédrique doit être inférieure à 0.75

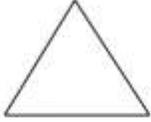
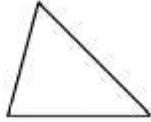
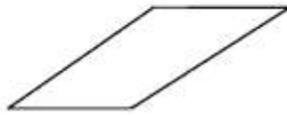
Forme	Équilatéral $F_d = 0$	Peu distordu $F_d < 0.2$	Très distordu $F_d > 0.9$
Triangle			
Quadrilatéral			

Tableau 1-5 Facteur de distorsion pour un triangle et un Quadrilatéral

### b) Lissage

Le changement dans la taille des éléments de maillage d'une zone maillée à une autre doit être graduel, la variation de la taille des éléments de deux zones adjacentes ne doit pas dépasser 20%.

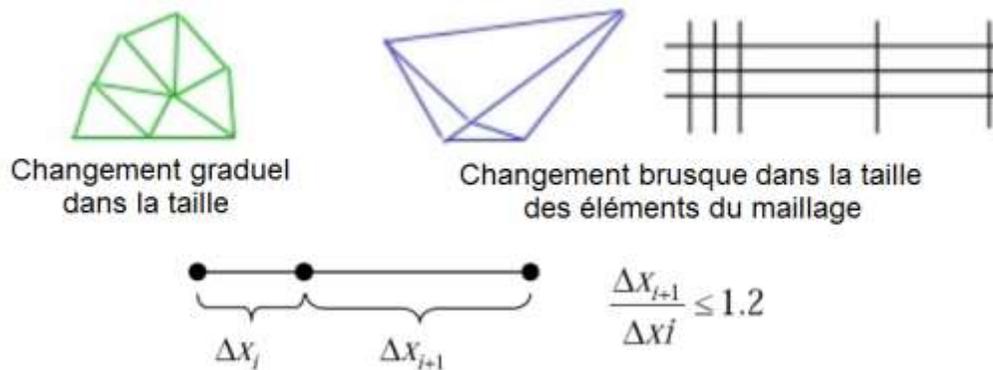


Fig. 1-15 Lissage entre les éléments du maillage

### c) Facteur de forme

Le facteur de forme est le rapport entre le côté le plus long et le côté le plus court d'une cellule. Idéalement, il devrait être égal à 1 pour garantir les meilleurs résultats. Le fait d'avoir un facteur de forme élevé peut entraîner une erreur d'interpolation d'une ampleur inacceptable.

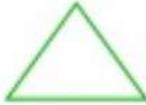
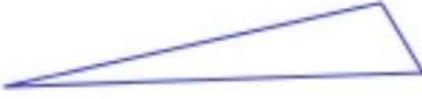
Forme	Facteur de forme = 1	Grand facteur de forme
Quad		
Tri		

Tableau 1-6 Exemple de facteur de forme pour un triangle et un Quadrilatéral

#### d) Résolution

La notion de résolution concerne plus particulièrement les zones qui présentent un fort gradient, ainsi une bonne résolution permet de mieux décrire les phénomènes physiques qui existent dans ces zones telles que les ondes de choc, ou les phénomènes liés à la couche limite.

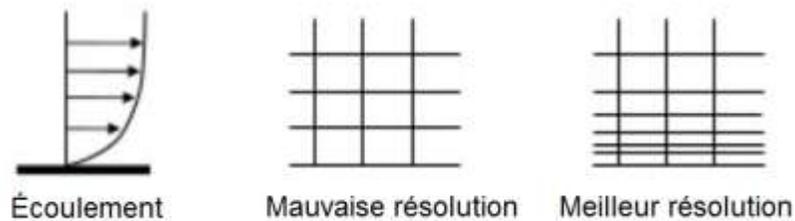


Fig. 1-15 Génération d'un maillage couche limite

#### e) Nombre total d'éléments

Un nombre important d'éléments de maillage permet sans doute d'améliorer la précision des calculs, mais pénalise les ressources informatiques en terme de mémoire et alourdit le système. Par conséquent, un compromis entre précision et temps de calcul s'impose. Des techniques existent pour économiser un certain nombre d'éléments :

- Utilisation des maillages non uniformes, en concentrant la bonne qualité du maillage uniquement dans les zones où c'est nécessaire

- Utilisation de la fonction adaptation de maillage pour raffiner uniquement sur des zones bien précises
- Utilisation des éléments de maillage hexaédriques dans les zones adéquates

### 5.4.3 Indépendance de la solution du maillage

Dans une modélisation CFD, la solution doit être indépendante de la densité du maillage pour être sûr du réalisme de la solution que donne le solveur après convergence.

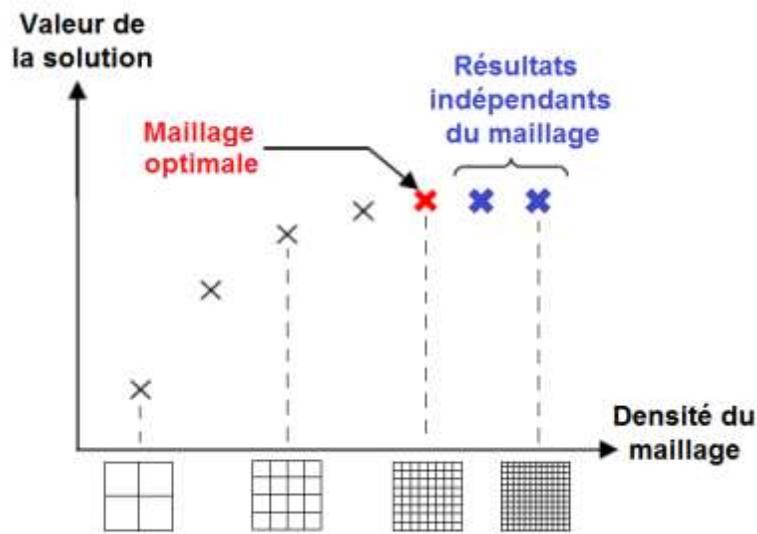


Fig. 1-16 Test de convergence en maillage

### 5.4.3 Adaptation du maillage

Le raffinement du maillage peut se faire aussi dans le logiciel CFD, dans Fluent par exemple en utilise la fonction «ADAPT». Cette fonction adapte la grille de maillage à l'écoulement en intervenant particulièrement sur :

- Les zones à fort gradient
- les zones définissant les frontières des volumes fluides
- À l'intérieur de certaines zones

La figure 1-17 montre un exemple d'adaptation de maillage dans les régions à fort gradient de pression afin de mieux résoudre le saut de pression au travers du choc.

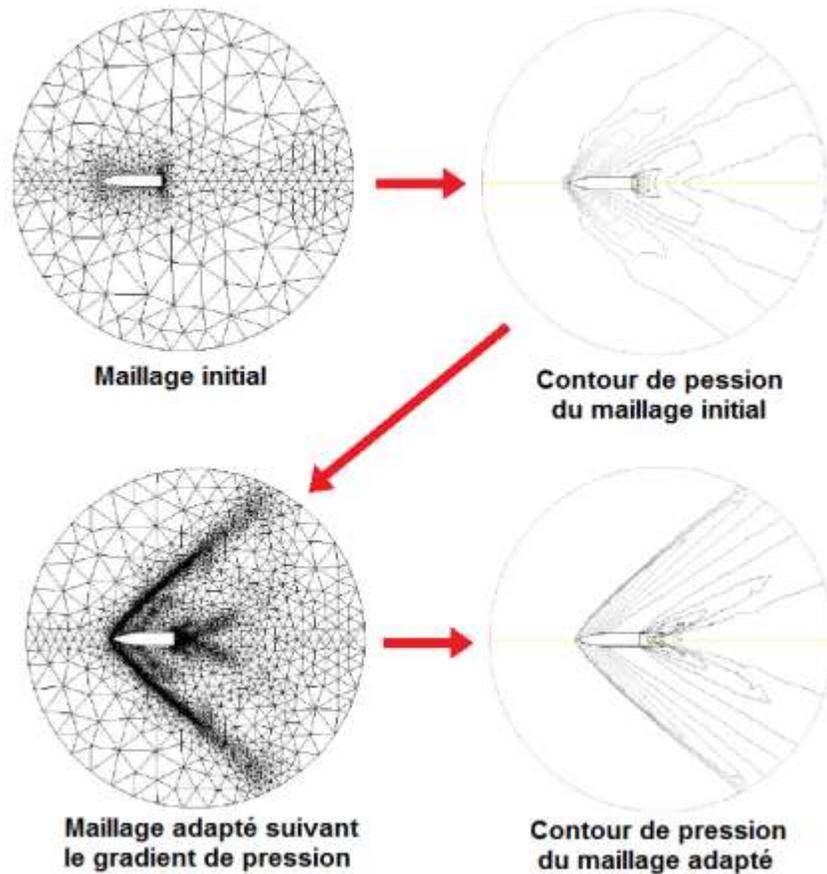


Fig. 1-17 Adaptation du maillage suivant le gradient de pression

## 5.5 Physique

Pour les problèmes complexes, la résolution d'un problème simplifié ou 2D fournira une expérience précieuse avec les modèles et les paramètres du solveur pour votre problème dans un court laps de temps. Pour un problème donné, on doit :

- Définir les propriétés des matériaux: Fluide, Solide ou Mixture
- Sélectionnez les modèles physiques appropriés: Turbulence, Combustion, Multiphasique...etc.
- Prescrire les conditions de fonctionnement
- Prescrire les conditions aux limites à toutes les frontières du domaine
- Fournir des valeurs initiales ou une solution précédente

## 5.6 Paramètres du solveur

Cette étape d'un processus de simulation CFD implique la sélection du type de solveur (basé sur la pression ou basé sur la densité, à l'état stationnaire ou transitoire), la sélection du modèle de turbulence, schéma de discrétisation spatiale (Upwind, différence centrale), schéma de discrétisation temporelle (Euler forward, Euler Backward, schéma Crank-Nicolson, explicite), facteur de relaxation, méthode de couplage PV, pas de temps pour les simulations transitoires, nombre d'itérations, fréquence de sauvegarde des données de sortie...etc. Le but de tous ces réglages est d'obtenir un schéma numérique cohérent, stable et convergent. À Noter que les variables de champ résolues pendant la simulation CFD sont le vecteur vitesse, la pression, la température (enthalpie).

## 5.7 Calcul de la solution

Les équations de conservation discrétisées sont résolues de manière itérative jusqu'à convergence. Un certain nombre d'itérations est nécessaire pour atteindre une solution convergée. La convergence est atteinte lorsque les changements des variables de solution d'une itération à l'autre sont négligeables. Les résidus fournissent un mécanisme pour aider à surveiller cette tendance (Fig. 1-15).

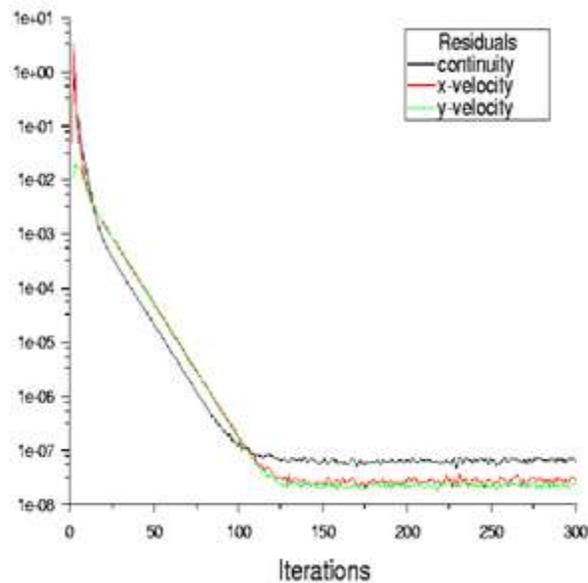


Fig. 1-15 Évolution des résidus en fonction des itérations

La précision d'une solution convergée dépend de la pertinence et l'exactitude des modèles physiques utilisées, de la résolution et indépendance du maillage et des erreurs numériques. Une solution convergée et indépendante du maillage sur un problème bien posé fournira des résultats d'ingénierie utiles.

## 5.8 Analyse des résultats

Dans cette étape il faut examiner les résultats pour analyser la solution et extraire les données utiles. Les outils de visualisation peuvent être utilisés pour répondre à des questions telles que:

- Quel est le modèle d'écoulement global?
- Y a-t-il une séparation?
- Où se forment les chocs, les couches de cisaillement? etc.
- Les principales caractéristiques de l'écoulement sont-elles résolues?

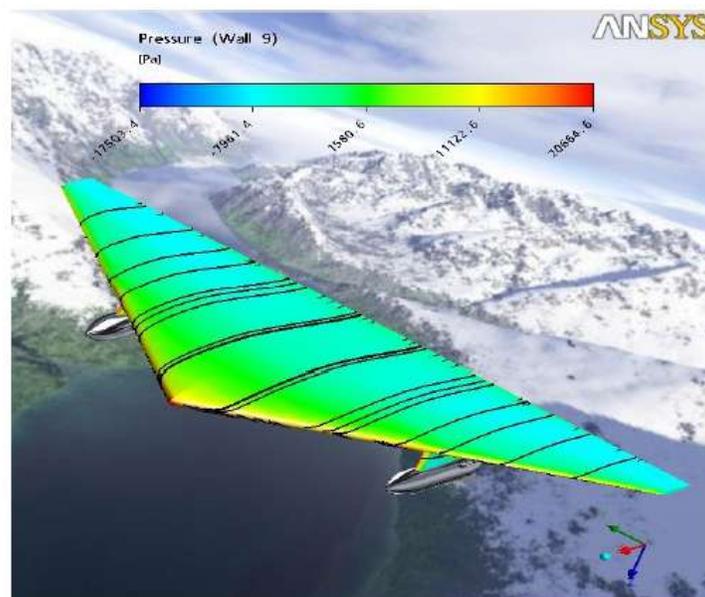


Fig. 1-16 Résultat CFD du champs de pression sur une aile delta

Des outils d'établissement de rapports numérique peuvent être utilisés pour calculer des résultats quantitatifs comme par exemple :

- Les forces et moments
- Les coefficients de transfert de chaleur moyens
- Les quantités intégrées de surface et de volume

## **5.9 Envisagez de mettre à jour le modèle**

Après l'analyse des résultats il se peut que des révisions doivent être envisagée sur les modèles, les conditions aux limites et le maillage.

Pour les modèles physiques il faut se poser les questions suivantes :

- Le régime est-il turbulent?
- L'écoulement est-il transitoire?
- Y a-t-il des effets de compressibilité?
- Y a-t-il des effets 3D?

Pour les conditions aux limites il faut :

- Vérifier que le domaine de calcul est assez grand
- Voir si les conditions aux limites sont appropriées
- Juger si les valeurs limites sont raisonnables

Pour le maillage il faut se poser les interrogations suivantes :

- Le maillage peut-il être affiné pour améliorer les résultats?
- La solution change-t-elle significativement avec un maillage raffiné, ou la solution est-elle indépendante du maillage?
- La résolution du maillage de la géométrie doit-elle être améliorée?

## **6. Avantages de la CFD**

### **6.1 Coût relativement faible**

Utiliser des expériences et des tests physiques pour obtenir des données d'ingénierie essentielles pour la conception peut être coûteux. Les simulations CFD sont relativement peu

coûteuses et les coûts sont susceptibles de diminuer à mesure que les ordinateurs deviennent plus puissants.

## **6.2 La rapidité**

Les simulations CFD peuvent être exécutées dans un court laps de temps. Un délai d'exécution rapide signifie que les données d'ingénierie peuvent être introduites tôt dans le processus de conception.

## **6.3 Capacité à simuler des conditions réelles**

De nombreux processus d'écoulement et de transfert de chaleur ne peuvent pas être (facilement) testés, par ex. écoulement hypersonique. La CFD offre la possibilité de simuler théoriquement n'importe quelle condition physique.

## **6.4 Capacité à simuler des conditions idéales**

La CFD permet un grand contrôle sur le processus physique et offre la possibilité d'isoler des phénomènes spécifiques pour étude. Exemple: un processus de transfert de chaleur peut être idéalisé avec des limites adiabatiques, à flux thermique constant ou à température constante.

## **6.5 Informations complètes et compréhensibles**

Les expériences ne permettent d'extraire les données qu'à un nombre limité d'emplacements dans le système (par ex. Sondes de pression et de température, jauges de flux thermique...etc.). La CFD permet d'examiner un grand nombre d'emplacements dans la région d'intérêt et fournit un ensemble complet de paramètres de l'écoulement.

## **7. Limitations de la CFD**

### **7.1 Modèles physiques**

Les solutions CFD reposent sur des modèles physiques de processus du monde réel (par exemple, turbulence, compressibilité, chimie, écoulement multiphasique...etc.). Les solutions CFD ne peuvent être aussi précises que les modèles physiques sur lesquels elles sont basées.

## **7.2 Erreurs numériques**

La résolution d'équations sur un ordinateur introduit invariablement des erreurs numériques, il y a deux types d'erreur possible dans ce cas.

### **7.2.1 Erreur d'arrondi**

Elle est due à la taille finie des nombres utilisée dans un ordinateur. Les erreurs d'arrondi existeront toujours (bien qu'elles puissent être minimales dans la plupart des cas).

### **7.2.2 Erreur de troncature**

Elle est due à des approximations dans les modèles numériques. Les erreurs de troncature passeront à zéro lorsque la grille est affinée. Le raffinement du maillage est une façon de traiter les erreurs de troncature.

## **7.3 Conditions initiales et aux limites**

Comme pour les modèles physiques, la précision de la solution CFD dépend des conditions initiales et aux limites fournies au modèle numérique. Exemple: Un écoulement dans un conduit à expansion soudaine. Si le l'écoulement est fourni au domaine par un tuyau, il faut utiliser une condition d'entrée avec un profil entièrement développé pour la vitesse plutôt que de supposer une vitesse uniforme.