



UNIVERSITÉ ECHAHID HAMMA LAKHDAR EL-OUED  
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
Département de Génie Mécanique  
Filière : Energie Renouvelable en Mécanique

# CFD et Logiciels

2020-2021

Semestre : 3  
 Unité d'enseignement : UEM 2.1  
 Matière : CFD et logiciels  
 VHS : 45h (cours : 01h30, TD : 1h30)  
 Crédits : 4  
 Coefficient : 2

#### Objectifs de l'enseignement :

Le but de cette matière est de familiariser l'étudiant avec les techniques et les logiciels de calcul et de post traitement. Dans un premier chapitre une description générale du problème est faite en se basant sur les notions déjà acquises. A partir du deuxième chapitre chaque séance débutera par un cours de 1h ou 1h30 qui introduira les notions qui vont être cernées. Le deuxième chapitre introduit les logiciels de post traitement qui sont primordial dans la visualisations des résultats de calculs, dans ce chapitre des résultat calculés au préalable peuvent servir pour l'apprentissage. Le troisième chapitre introduit les maillages Gambit et Mesh de Ansys. L'étudiant doit apprendre les techniques du traçage des différentes géométries ainsi que la génération des différents types de maillages. Les chapitres restant introduisent les différents types d'écoulements rencontrés dans la pratique à savoir : externes, internes et réactifs, d'autre type d'écoulements peuvent être abordés.

#### Connaissances préalables recommandées :

MDF, Thermodynamique

#### Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Rappels sur les méthodes des différences finies et volumes finis (1 semaine)

1. Forme discrétisée de l'équation de transport de la variable généralisée.
2. Schémas numériques et algorithmes de traitement de la pression (Implicite, SIMPLE, PISO,...).
3. Traitement des termes source.
4. Résolution par balayage.
5. Organigramme général d'un programme de résolution des équations de transport.

Chapitre 2 : Logiciels de post traitement (intégré dans le code ou non)

(2 semaines)

1. Les logiciels traceurs de courbes et de champs : Origin, Tecplot,...
2. Applications sur les traceurs de courbes.
3. Applications sur les traceurs de champs.

Chapitre 3 : Générateurs de maillage

(2 semaines)

1. Le maillleur Gambit : Traçage de la géométrie, maillage et conditions aux limites.
2. Le maillleur de Ansys : Traçage de la géométrie, maillage et conditions aux limites.
3. Traitement du maillage près des parois : Cas des écoulements laminaires et turbulents.

Chapitre 4 : Ecoulements externes (Résolution par Code de calcul: Fluent, CFX...)

(3 semaines)

1. Définitions et cas d'applications.
2. Ecoulement sur une plaque plane (couche limite).
3. Ecoulement autour d'une aube.
4. Ecoulement autour d'un cylindre (stationnaire et instationnaire).

# Contenu de Cours

Partie I  
 Généralités sur le calcul de dynamique  
 des fluides (CFD)

Partie II  
 méthode des différences finis  
 Vs  
 méthode des volumes finis

Partie III  
 Applications sur les Logiciels de  
 Simulation

# Contenu de Cours

Chapitre 5 : Ecoulements internes (Résolution par code de calcul) **(3 semaines)**

1. Définitions et cas d'applications.
2. Ecoulement dans une conduite.
3. Convection dans une conduite : Laminaire (problème de Nusselt) et turbulente.
4. Ecoulement compressible dans une tuyère convergente-divergente.

Chapitre 6 : Ecoulements réactifs (Résolution par Fluent, CFX...) **(4 semaines)**

1. Définitions et cas d'application dans le domaine de la combustion.
2. Flammes turbulentes de diffusion en jet libre (Méthane-air, hydrogène-air,...).
3. Flammes turbulentes de diffusion en co-flow dans une chambre de combustion (Méthane-air, hydrogène-air,...).
4. Flammes de prémélanges.

**Mode d'évaluation :** Contrôle Continu : 40%, Examen : 60%.

**Références bibliographiques:**

1. Guide utilisateur de : Gambit, Mesh, Fluent, CFX, Origin et Tecplot.
2. Pour les TP : voir ANSYS (Fluent ou CFX)  
Exemple:  
<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules>

# Partie I

## Généralités sur le calcul de dynamique des fluides (CFD)

CFD: Computational Fluid Dynamics

Mécanique des Fluides Numérique

## Introduction

Les scientifiques et les ingénieurs utilisent plusieurs techniques pour la résolution des problèmes de champ (diffusion de la chaleur, propagation d'ondes ...etc). Ces techniques peuvent être expérimentales, analytiques ou numériques.

Les méthodes expérimentales sont très chers, prennent beaucoup de temps et dans certains cas, elles sont hasardeuses et même dangereuses. Elles ne permettent pas souvent une grande flexibilité des paramètres de variation.

La plupart des méthodes analytiques ne s'appliquent que dans des cas limites. Pour des problèmes relatifs à des systèmes de forme géométrique complexe ou à des milieux à caractéristiques non uniformes ou non isotropes, qui est le cas de la plupart des problèmes rencontrés en pratique, il est nécessaire de faire appel aux méthodes numériques.

Les problèmes rencontrés dans le domaine des sciences de l'ingénieur sont souvent représentés (ou modélisés) par des équations aux dérivées partielles (EDP) qui modélisent les phénomènes physiques présents (écoulement de fluides, transfert de chaleur, vibration de structures, propagation d'ondes, champ électromagnétique ....

**1. What is Computational Fluid Dynamics (CFD) ?**

**2. Why use CFD ?**

**3. Where is CFD used?**

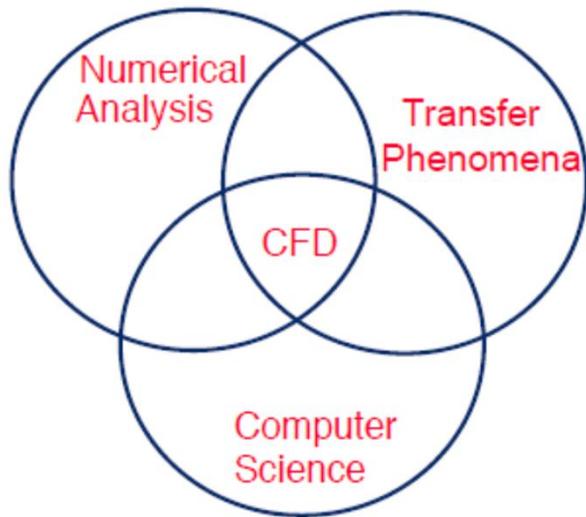
**4. CFD steps**

# 1. What is Computational Fluid Dynamics (CFD) ?



## Computational Fluid Dynamics Introduction

CFD is an interdisciplinary topic



CFD

=

1. Transport Phenomena

+

2. Numerical Analysis

+

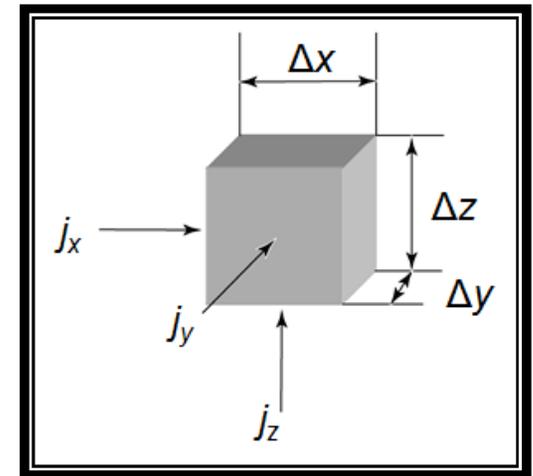
3. Computer Science

# Transport Phenomena: Fluid Flow, Heat Transfer, and Mass Transport

Dans le but de simuler les écoulements de fluides, de transferts thermiques ainsi que d'autres phénomènes physiques relatifs, il est nécessaire de décrire la physique associée par des termes mathématiques. La grande partie des phénomènes qui nous intéressent sont gouvernés par des principes de conservation et sont régis par les EDP exprimant ces principes. Par exemple, les équations de quantité de mouvement expriment la conservation de la quantité de mouvement, l'équation d'énergie exprime la conservation de l'énergie totale, ...etc.

Résoudre les équations qui décrivent les phénomènes de transport et interpréter les résultats est un moyen efficace de comprendre les systèmes étudiés. Cette méthodologie est utilisée avec succès pour étudier l'écoulement des fluides, le transfert de chaleur et le transport des espèces chimiques dans de nombreux domaines, y compris :

- Sciences de l'ingénieur
- La biologie
- Chimie
- Sciences environnementales
- Géologie
- Science matérielle
- Médicament
- Météorologie
- La physique



# Transport Phenomena: Fluid Flow, Heat Transfer, and Mass Transport

Naturels

Météorologie

Océanographie  
Hydraulique,...

Biomécanique, BioMédical,...

énergie éolienne

Transport Phenomena  
c'est le domaine  
d'énergétique

Énergie solaire

Industriels

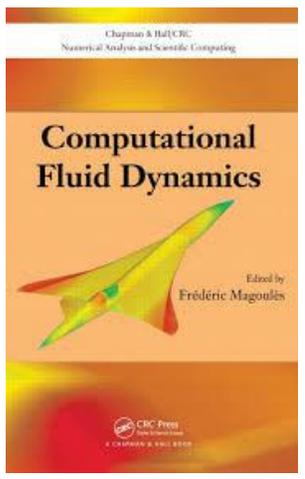
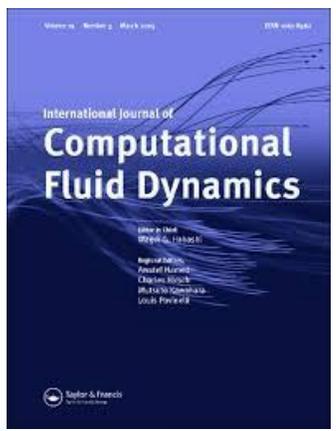
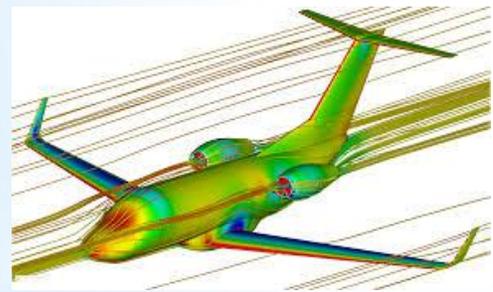
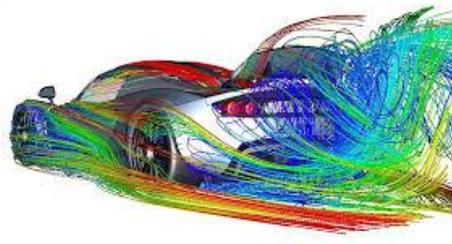
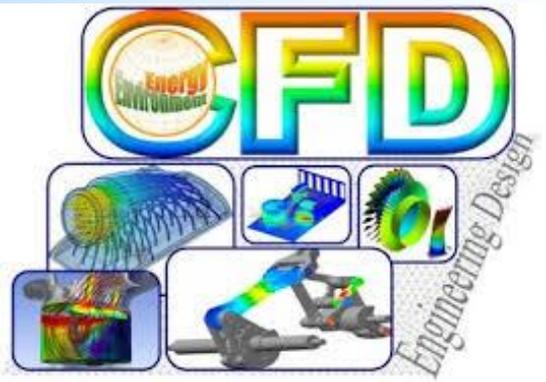
Génie Pétrolier

Génie Nucléaire

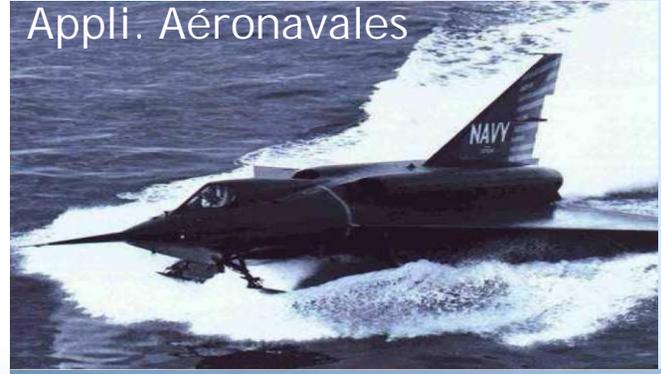
Génie des Procédés

Mécanique des fluides/ transfert de chaleur/ transfert de matière

# Transport Phenomena



Industrie pharmaceutique



Appli. Aéronavales



Centrale thermique

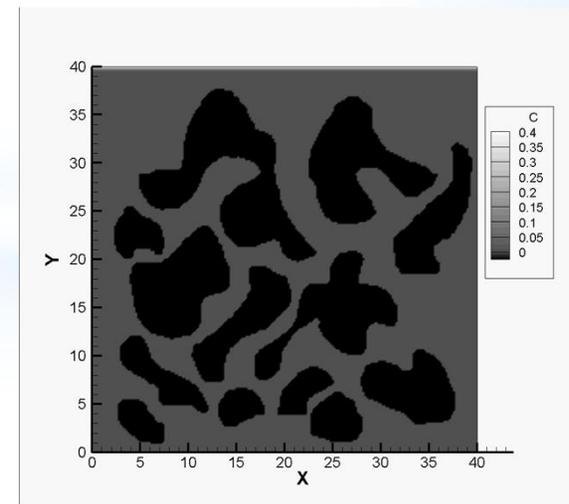
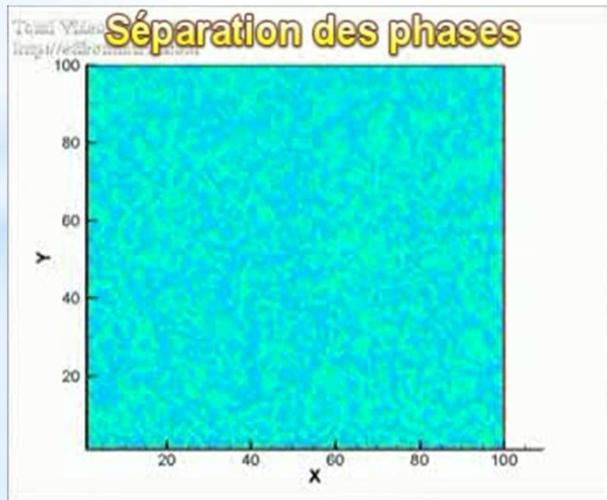
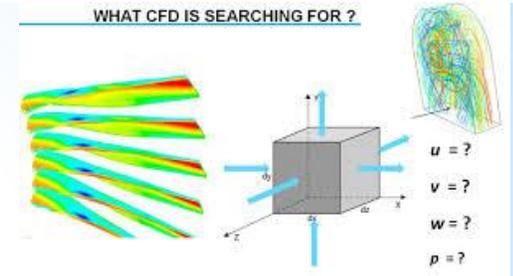


Centrale nucléaire

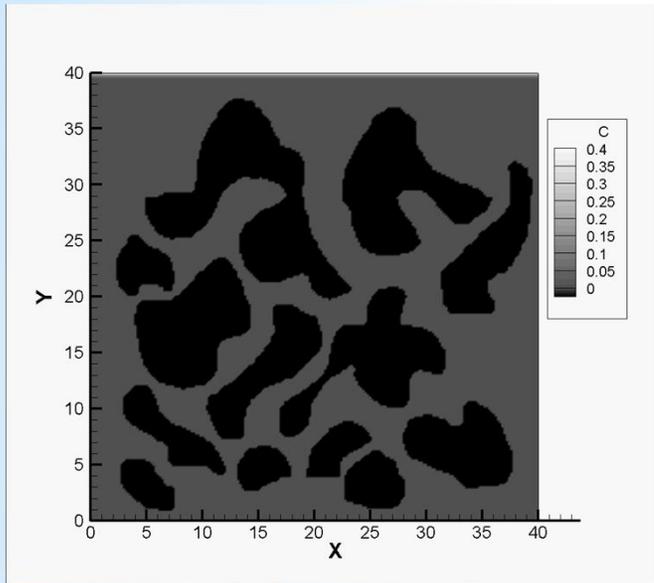


hydrodynamique

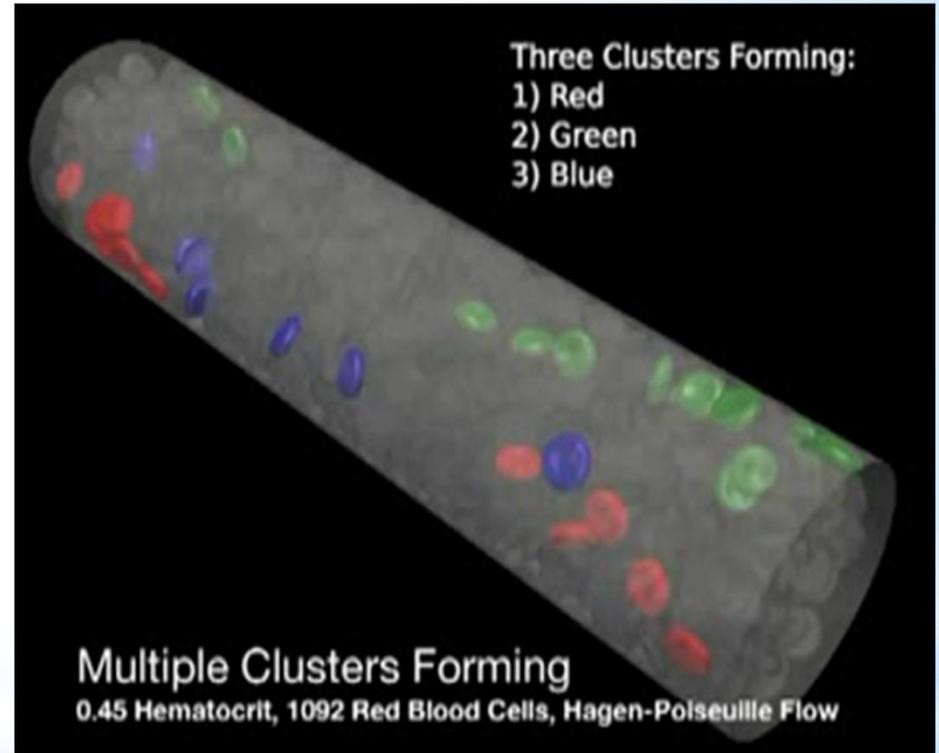
# Transport Phenomena



## Problème de diffusion

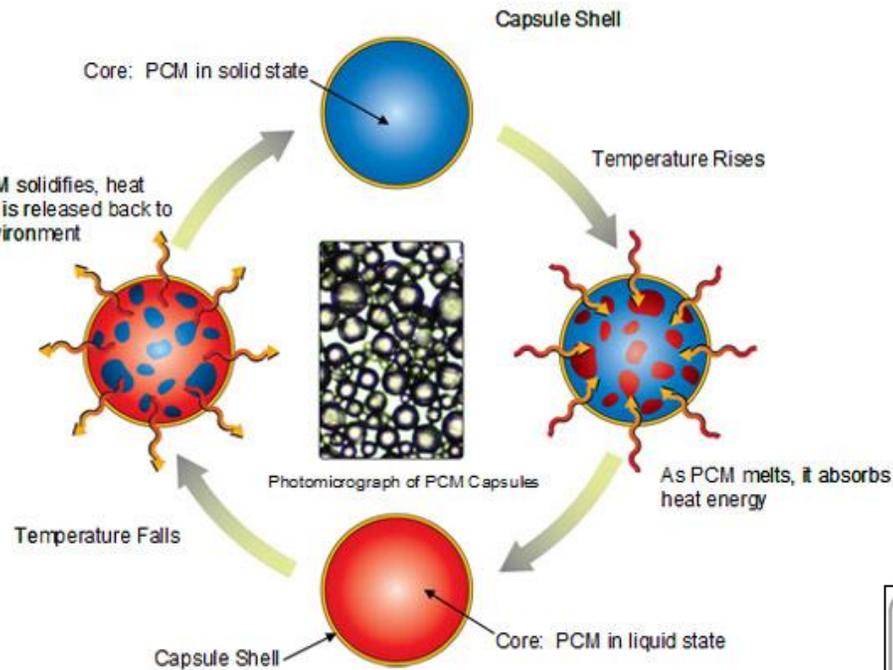


## Problème de advection ou transport

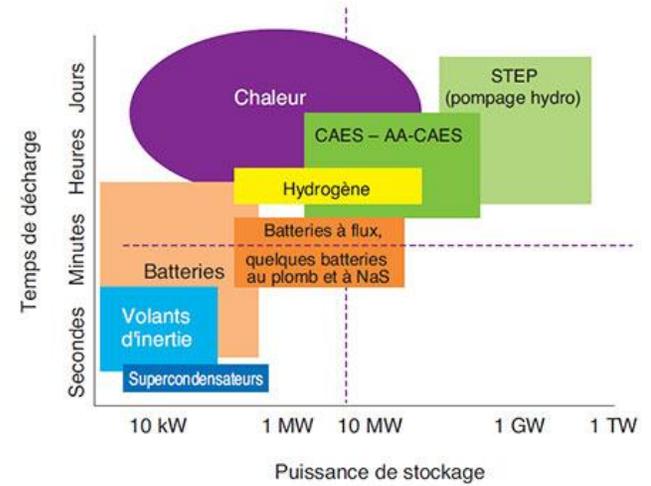


shutterstock

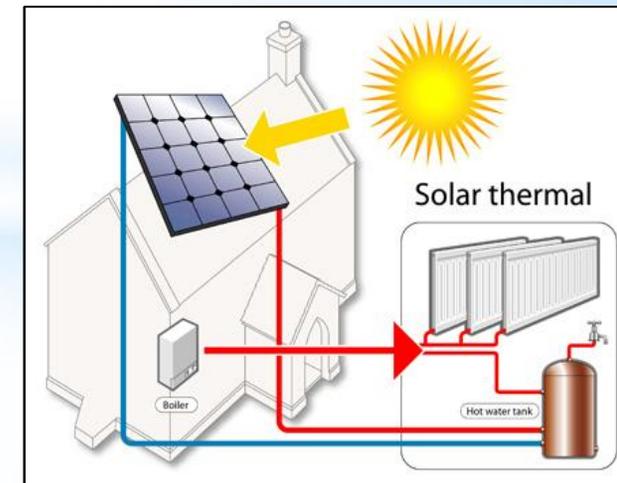
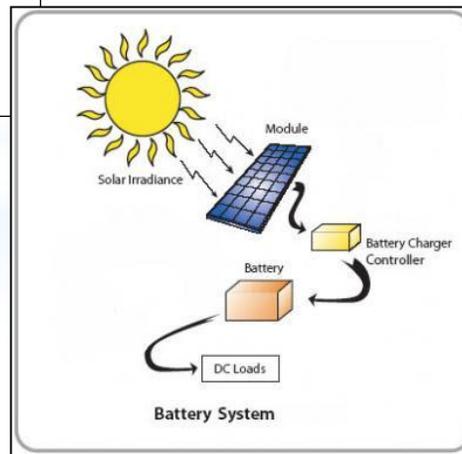
# Problème stockage



Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie)



Source : IFPEN d'après diverses sources



# Numerical Analysis: Méthodes Numériques

Pour comprendre ces phénomènes

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\eta}{\rho} \Delta \vec{v}$$
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0$$

Étude expérimentale

Modélisation  
mathématique

Étude numérique  
(solution approché)

recherche à la solution  
Analytique (solution exacte)

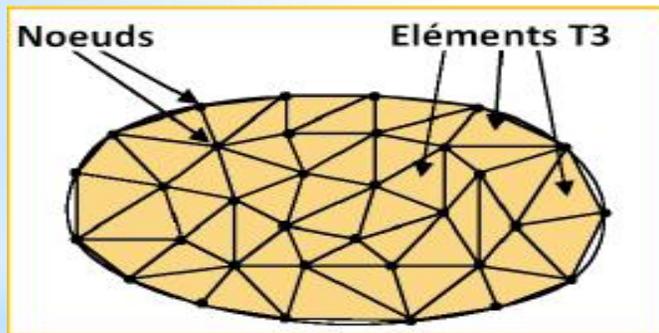
Approach	Advantages	Disadvantages
Experimental	Capable of being most realistic	Equipment required, Scaling problems, Measurement Difficulty, Operating Cost
Theoretical	General Information in Formula form	Restricted to simple geometry and physics, Usually for Linear problems
Computational	Complicated Physics, Details of Flow	Truncation Errors, Computer Costs, Boundary conditions

Numerical  
Analysis:  
Méthodes  
Numériques

# Numerical Analysis: Méthodes Numériques

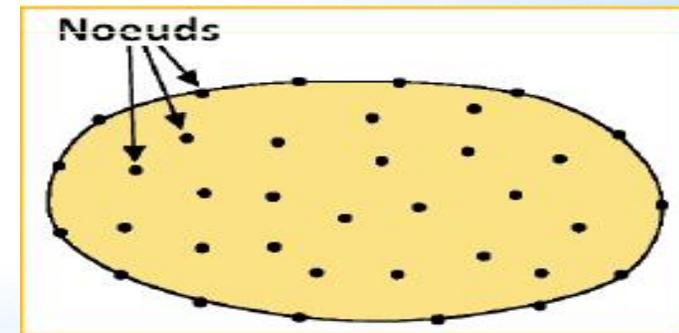
## Les méthodes de simulation numérique

Avec maillage

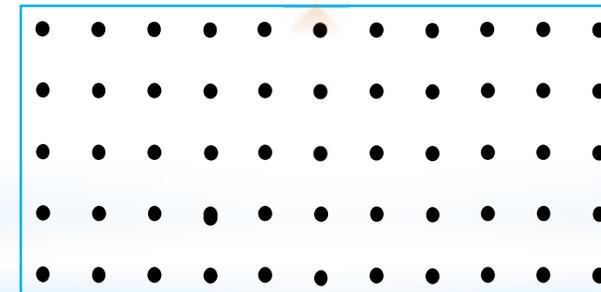


La géométrie est discrétisée par des éléments.

Sans maillage



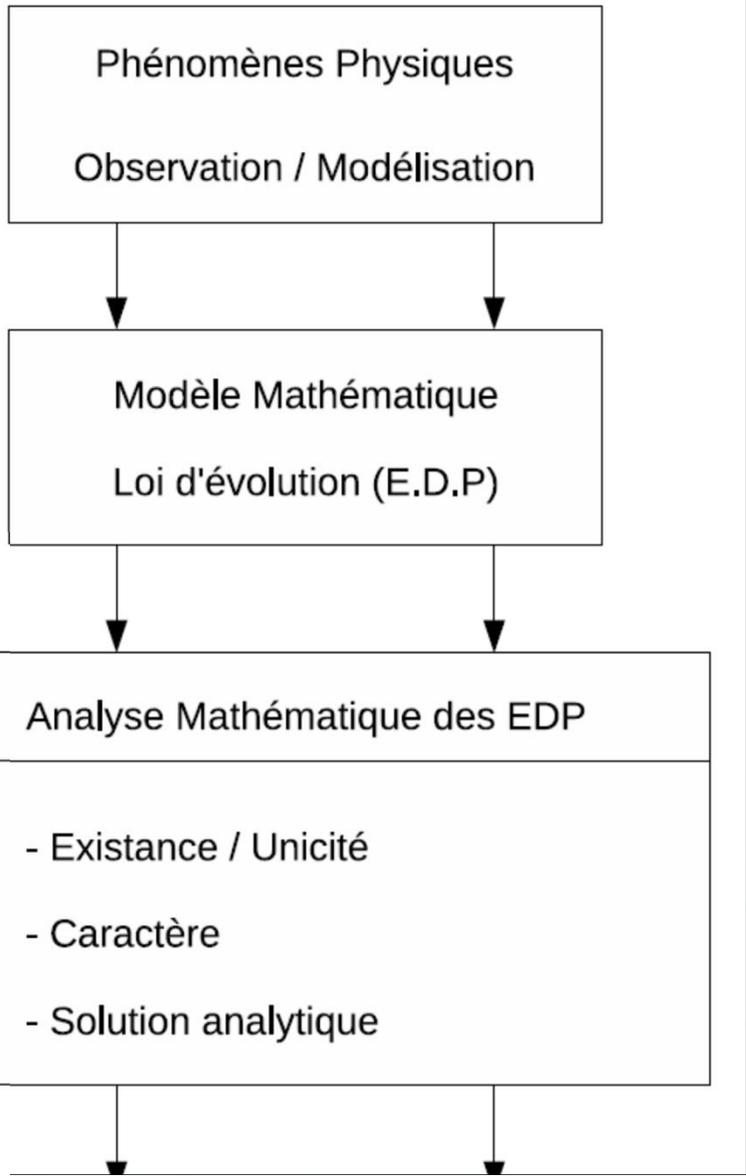
Dans les méthode sans maillage, la géométrie est représentée par des noeuds distribué aléatoirement sur le domaine et son frontière



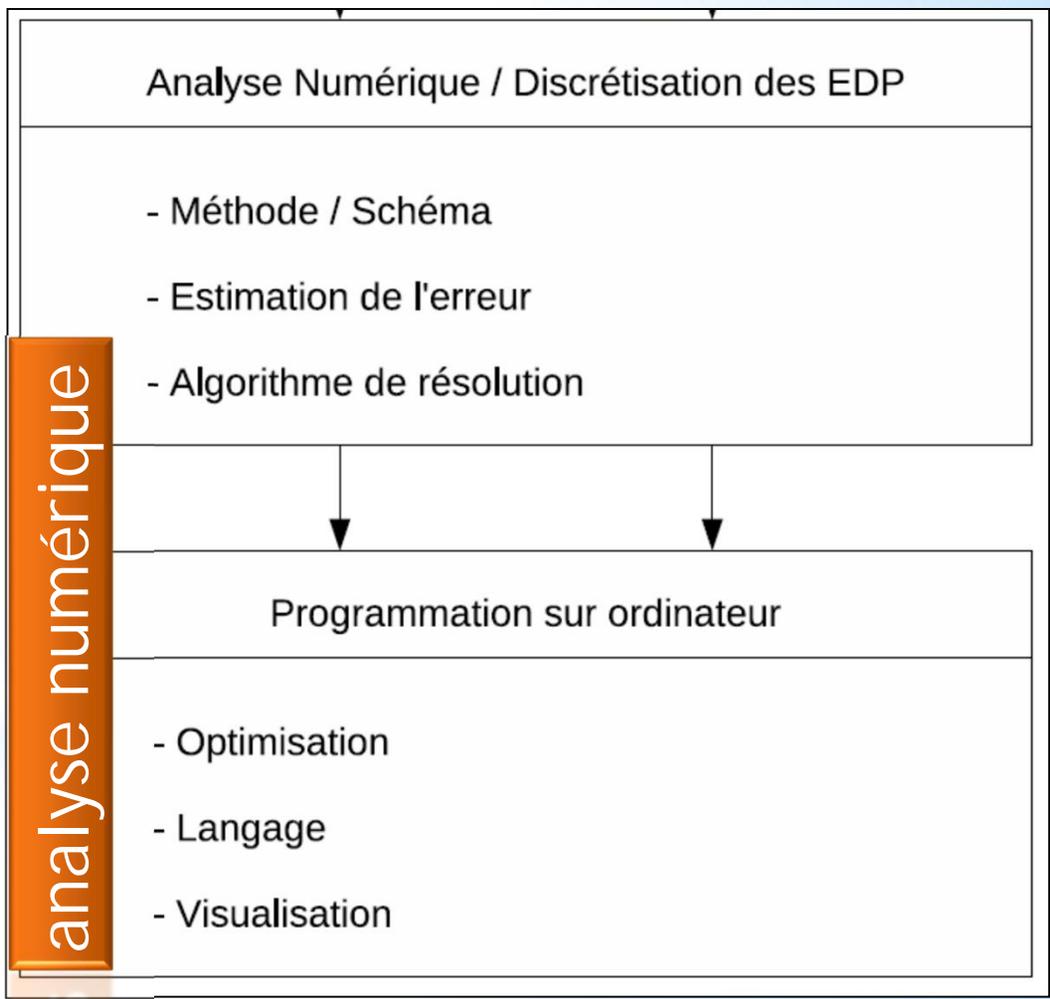
On peut considérer avec maillage et sans maillage au même temps. Dans ces méthodes les noeuds est distribuer d'une façon régulière.

## Analyse analytique vs analyse numérique

### Analyse analytique



### analyse numérique



# Numerical Analysis: Méthodes Numériques

## 1.2. Avantage des méthodes sans maillage

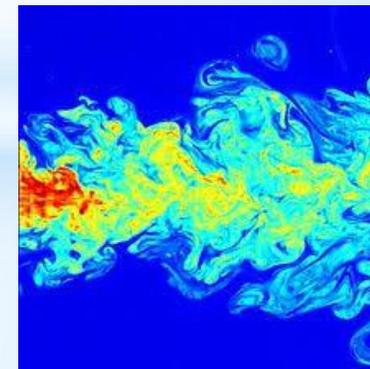
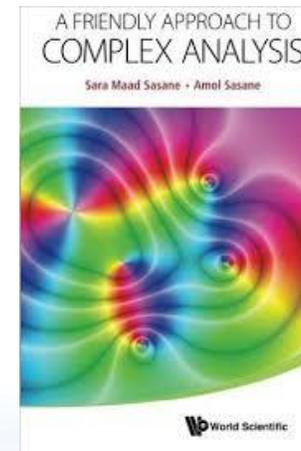
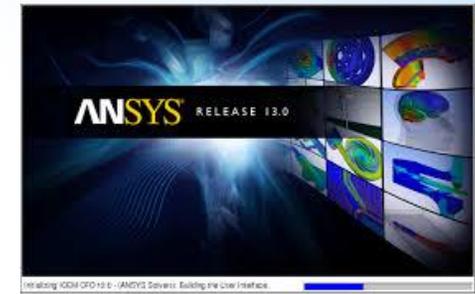
1. Le principal avantage des méthodes sans maillage dans la simulation des procédés est la possibilité de traiter plus facilement les problèmes en grandes transformations que dans les méthodes classiques. Les performances des méthodes meshless sont expliquées par les facteurs suivants :

(a) dans les formulations lagrangiennes, totales, l'opérateur gradient de la transformation calcule en un point d'intégration est construit sur la base d'un voisinage de nœuds généralement plus important que les seuls nœuds de l'élément dans la MEF. Ainsi, la matrice jacobienne associée ne deviendra singulière que pour des distorsions beaucoup plus importantes du voisinage [7].

(b) la qualité de la solution est beaucoup moins sensible à la position relative des nœuds, autorisant, de construire la solution à partir de positions relatives entre les nœuds, ce qui interdites dans les méthodes classique.

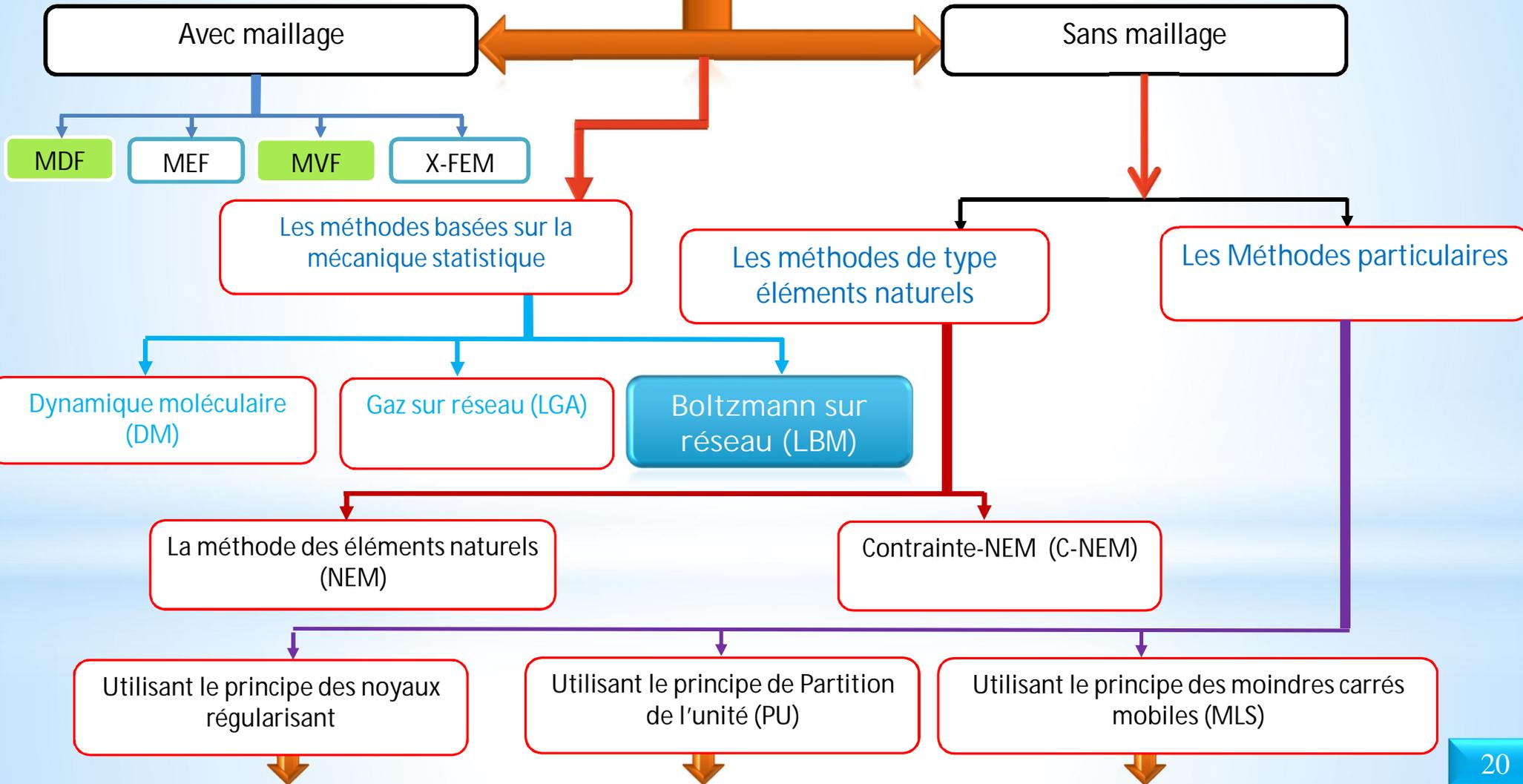
(c) la non-nécessite de construire un maillage pour la construction de l'approximation permet de traiter des domaines de géométries complexes, en 2D et en 3D, en utilisant seulement le nuage de nœuds [8].

2. Un autre avantage majeur des méthodes sans maillage est la possibilité d'insérer, ou de retirer des nœuds très facilement, la position relative des nœuds entre eux étant très peu influente sur la qualité de la solution.

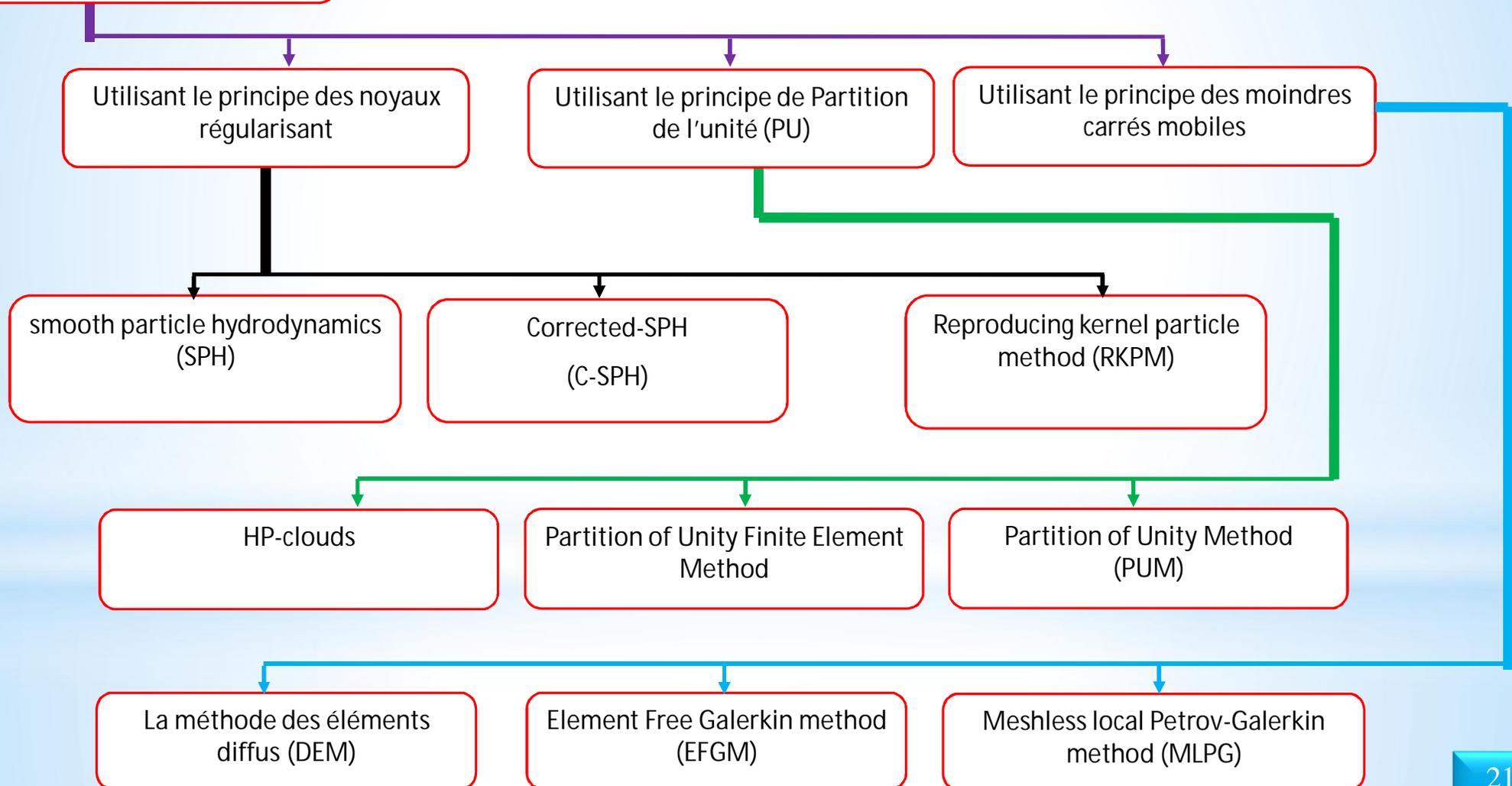


# Numerical Analysis

## Les méthodes de simulation numérique



## Les Méthodes particulières





### 3. Computer Science



#### Logiciels

- Codes CFD commerciaux: ANSYS FLUENT, ANSYS CFX ([www.ansys.com](http://www.ansys.com)) , Star-CD ([www.cd-adapco.com](http://www.cd-adapco.com)), CFDRC, CFD2000, Comsol Multiphysics ([www.comsol.com](http://www.comsol.com)), etc.
- Codes CFD de recherche: CFDSHIP-IOWA
- Logiciel de domaine public (Open source CFD) : FEATFLOW ([www.featflow.de](http://www.featflow.de)), OpenFOAM ([www.openfoam.com](http://www.openfoam.com)), PHI3D, HYDRO & WinpipeD, SU2([su2.stanford.edu](http://su2.stanford.edu)), etc.)
- D'autres logiciels CFD comprennent le logiciel de génération de maillage(par exemple Gridgen, Gambit, Gmesh, TGrid) , & le logiciel de visualisation d'écoulement (Tecplot, FieldView, Paraview, GnuPlot)





### 3. Computer Science



### Outils de programmation





### 3. Computer Science



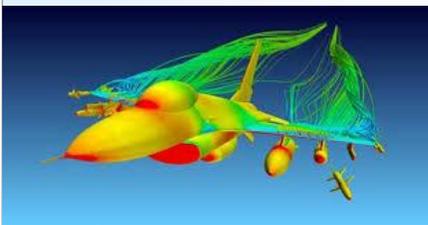
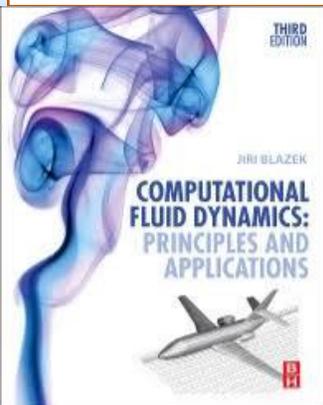
### Outils de visualisation



## 2. Why use CFD ?

## 2. Why use CFD ?

- Analyse & Conception
  1. Conception basée sur la simulation au lieu de "construire & tester"
    - Plus rentable et plus rapide que la EFD
    - CFD fournit une base de données haute fidélité pour le diagnostic du champ d'écoulement
  2. Simulation de phénomènes d'écoulements physiques difficiles à expérimenter
    - Simulations à grande échelle (ex. navires, avions)
    - Effets environnementaux (vent, météo, etc.)
    - Risques (ex. explosions, rayonnements, pollution)
    - Physique (ex. couche limite planétaire, évolution stellaire)
- Connaissance & exploration de la physique des écoulements

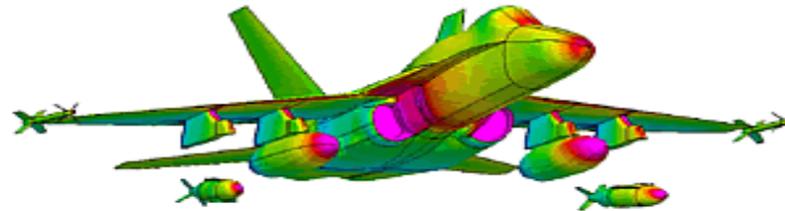


### **3. Where is CFD used?**

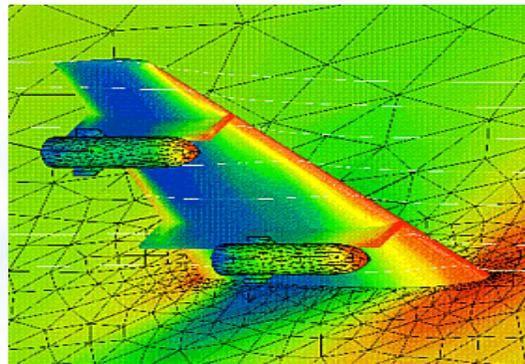
# Where is CFD used? (Aerospace)

- Where is CFD used?

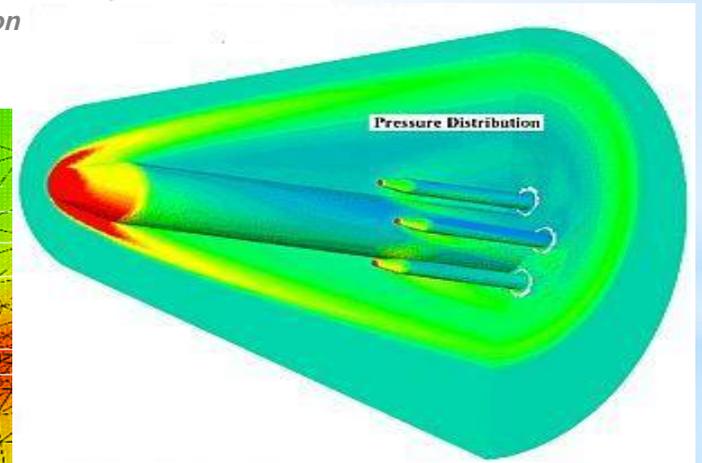
- Aerospace
- Appliances
- Automotive
- Biomedical
- Chemical Processing
- HVAC&R
- Hydraulics
- Marine
- Oil & Gas
- Power Generation
- Sports



*F18 Store Separation*



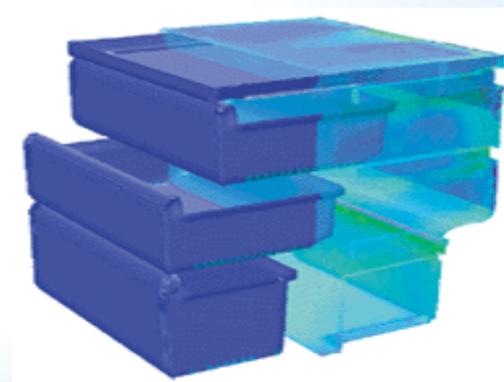
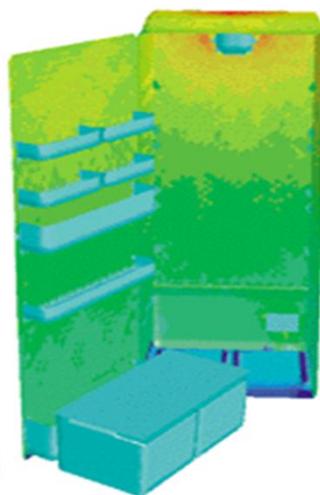
*Wing-Body Interaction*



*Hypersonic Launch Vehicle*

## Where is CFD used? (Appliances)

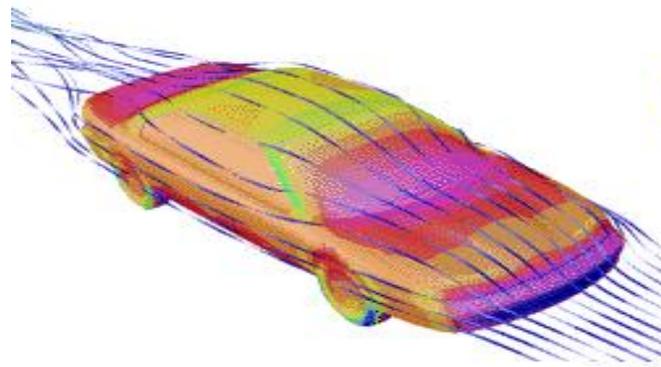
- Where is CFD used?
  - [Aerospace](#)
  - [Appliances](#)
  - [Automotive](#)
  - [Biomedical](#)
  - [Chemical Processing](#)
  - [HVAC&R](#)
  - [Hydraulics](#)
  - [Marine](#)
  - [Oil & Gas](#)
  - [Power Generation](#)
  - [Sports](#)



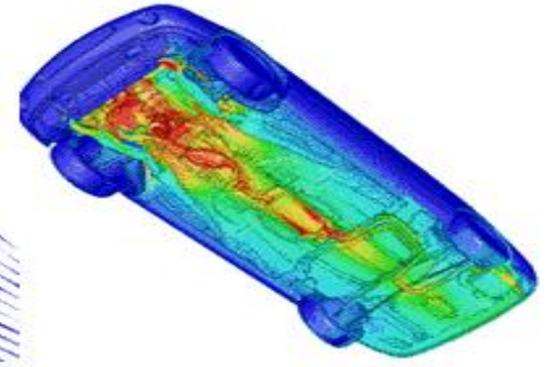
**Surface-heat-flux plots of the No-Frost refrigerator and freezer compartments helped BOSCH-SIEMENS engineers to optimize the location of air inlets.**

# Where is CFD used? (Automotive)

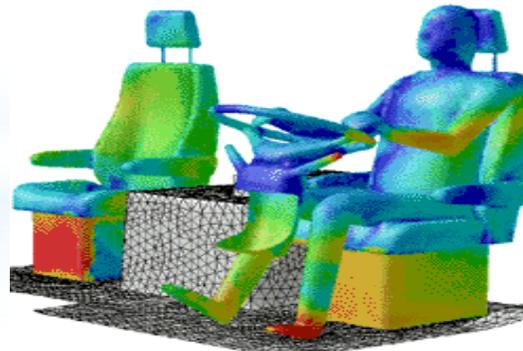
- Where is CFD used?
  - [Aerospace](#)
  - [Appliances](#)
  - [Automotive](#)
  - [Biomedical](#)
  - [Chemical Processing](#)
  - [HVAC&R](#)
  - [Hydraulics](#)
  - [Marine](#)
  - [Oil & Gas](#)
  - [Power Generation](#)
  - [Sports](#)



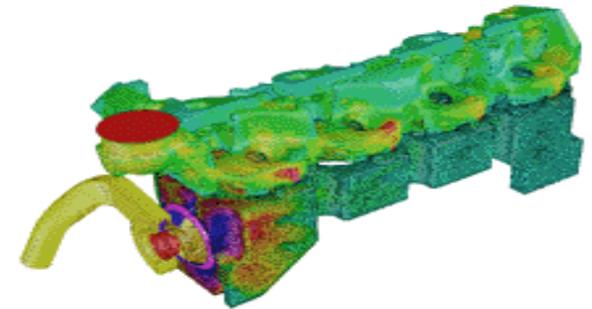
*External Aerodynamics*



*Undercarriage Aerodynamics*



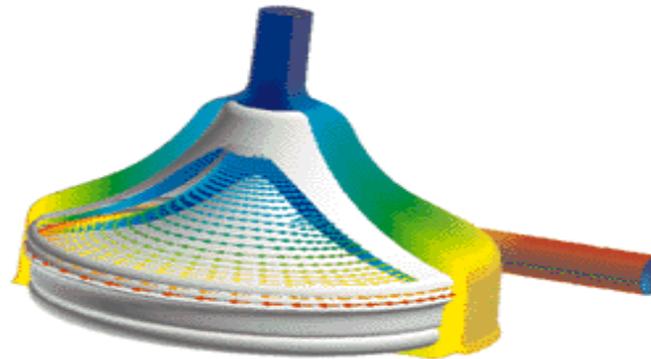
*Interior Ventilation*



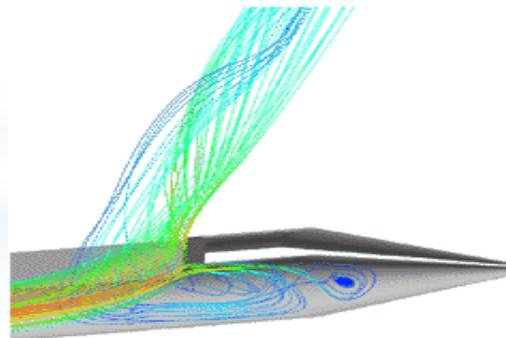
*Engine Cooling*

# Where is CFD used? (Biomedical)

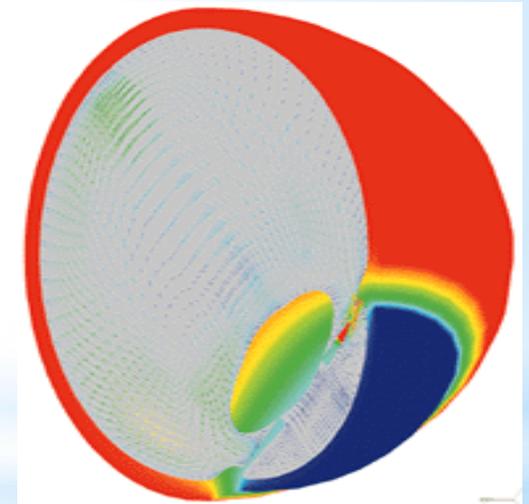
- Where is CFD used?
  - [Aerospace](#)
  - [Appliances](#)
  - [Automotive](#)
  - [Biomedical](#)
  - [Chemical Processing](#)
  - [HVAC&R](#)
  - [Hydraulics](#)
  - [Marine](#)
  - [Oil & Gas](#)
  - [Power Generation](#)
  - [Sports](#)



*Medtronic Blood Pump*



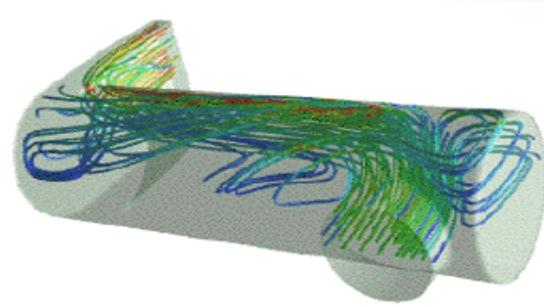
31  
*Spinal Catheter*



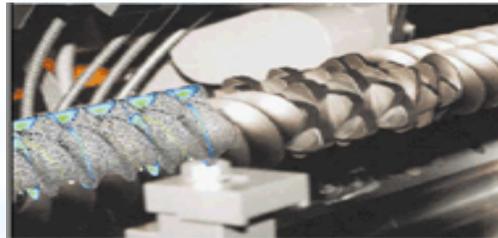
*Temperature and natural convection currents in the eye following laser heating.*

# Where is CFD used? (Chemical Processing)

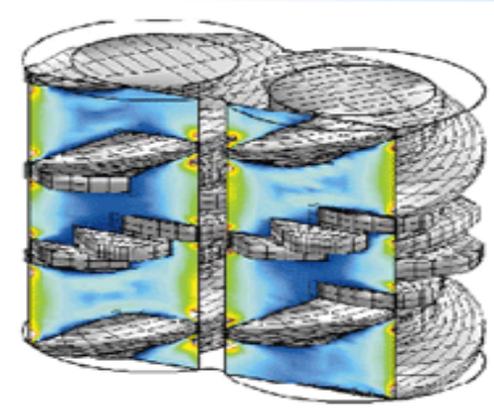
- Where is CFD used?
  - [Aerospace](#)
  - [Appliances](#)
  - [Automotive](#)
  - [Biomedical](#)
  - [Chemical Processing](#)
  - [HVAC&R](#)
  - [Hydraulics](#)
  - [Marine](#)
  - [Oil & Gas](#)
  - [Power Generation](#)
  - [Sports](#)



*Polymerization reactor vessel - prediction of flow separation and residence time effects.*



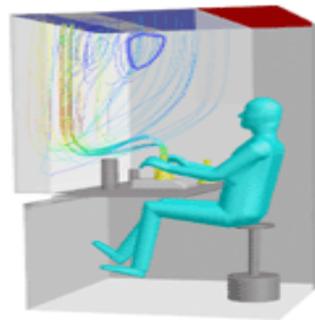
*Twin-screw extruder modeling*



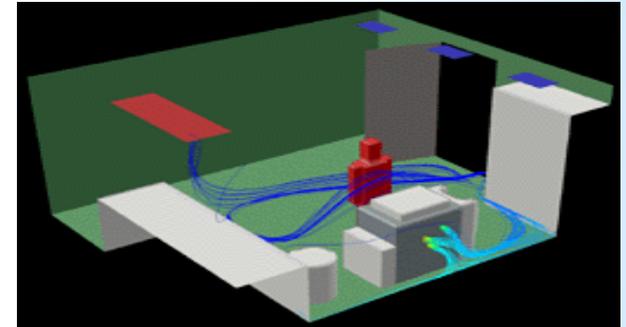
*Shear rate distribution in twin-screw extruder simulation*

# Where is CFD used? (HVAC&R)

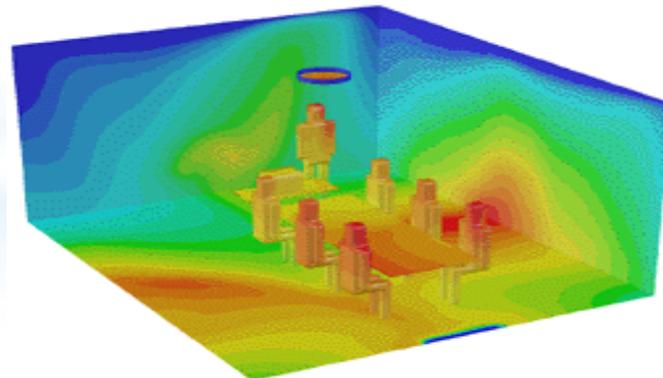
- Where is CFD used?
  - [Aerospace](#)
  - [Appliances](#)
  - [Automotive](#)
  - [Biomedical](#)
  - [Chemical Processing](#)
  - [HVAC&R](#)
  - [Hydraulics](#)
  - [Marine](#)
  - [Oil & Gas](#)
  - [Power Generation](#)
  - [Sports](#)



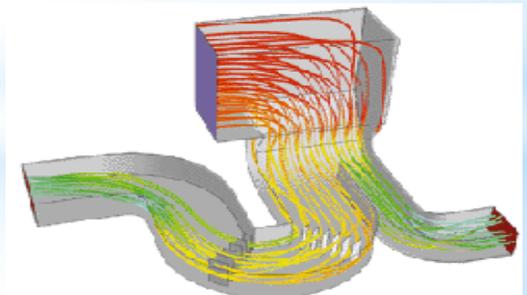
*Streamlines for workstation ventilation*



*Particle traces of copier VOC emissions colored by concentration level fall behind the copier and then circulate through the room before exiting the exhaust.*



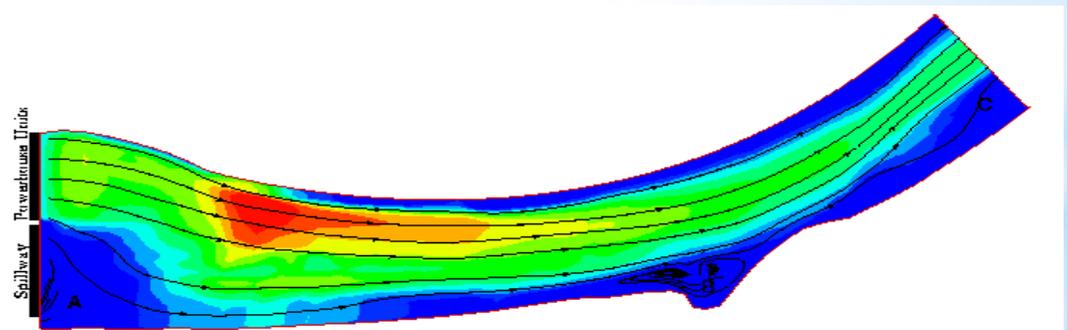
*Mean age of air contours indicate location of fresh supply air*



*Flow pathlines colored by pressure quantify head loss in ductwork*

# Where is CFD used? (Hydraulics)

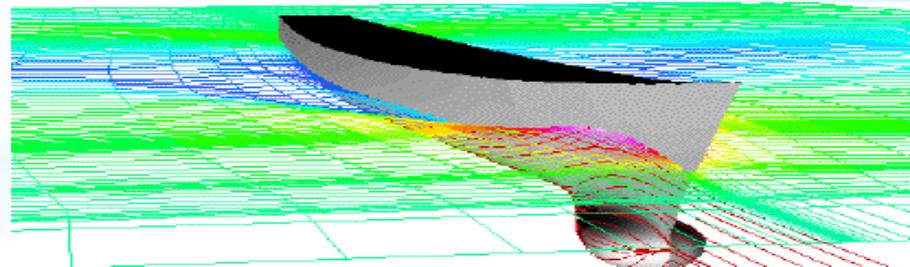
- Where is CFD used?
  - [Aerospace](#)
  - [Appliances](#)
  - [Automotive](#)
  - [Biomedical](#)
  - [Chemical Processing](#)
  - [HVAC&R](#)
  - [Hydraulics](#)
  - [Marine](#)
  - [Oil & Gas](#)
  - [Power Generation](#)
  - [Sports](#)



**Total Discharge = 125,000 cfs (no flow through spillway)**

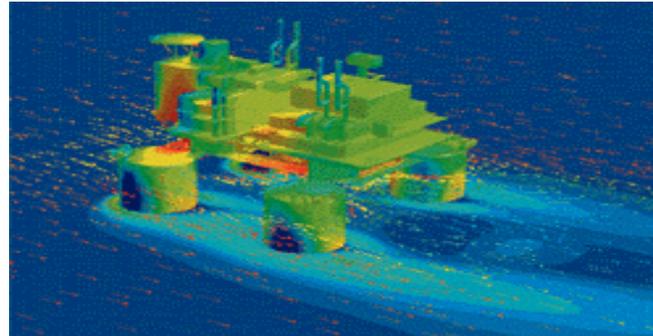
# Where is CFD used? (Marine)

- Where is CFD used?
  - [Aerospace](#)
  - [Appliances](#)
  - [Automotive](#)
  - [Biomedical](#)
  - [Chemical Processing](#)
  - [HVAC&R](#)
  - [Hydraulics](#)
  - [Marine](#)
  - [Oil & Gas](#)
  - [Power Generation](#)
  - [Sports](#)

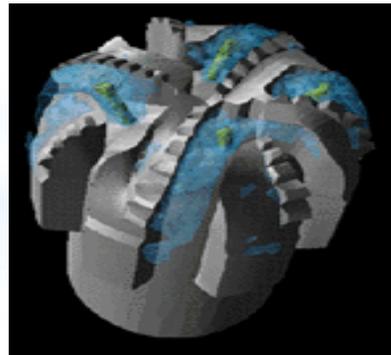


# Where is CFD used? (Oil & Gas)

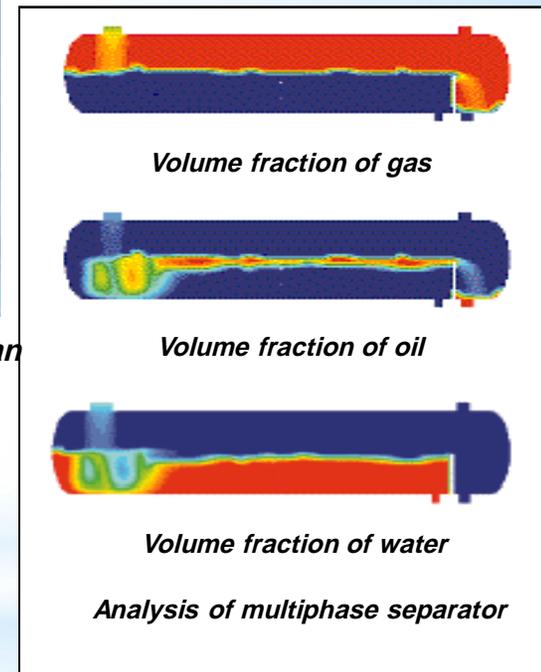
- Where is CFD used?
  - [Aerospace](#)
  - [Appliances](#)
  - [Automotive](#)
  - [Biomedical](#)
  - [Chemical Processing](#)
  - [HVAC&R](#)
  - [Hydraulics](#)
  - [Marine](#)
  - [Oil & Gas](#)
  - [Power Generation](#)
  - [Sports](#)



*Flow vectors and pressure distribution on an offshore oil rig*



*Flow of lubricating mud over drill bit*



*Volume fraction of gas*

*Volume fraction of oil*

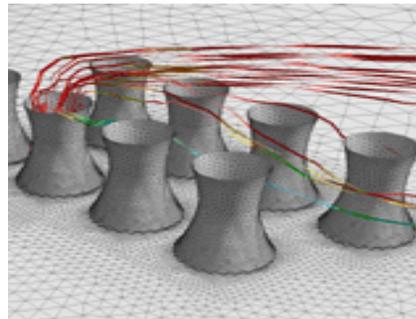
*Volume fraction of water*

*Analysis of multiphase separator*

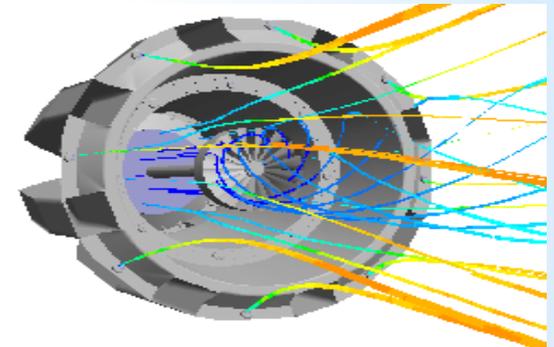
# Where is CFD used? (Power Generation)

- Where is CFD used?

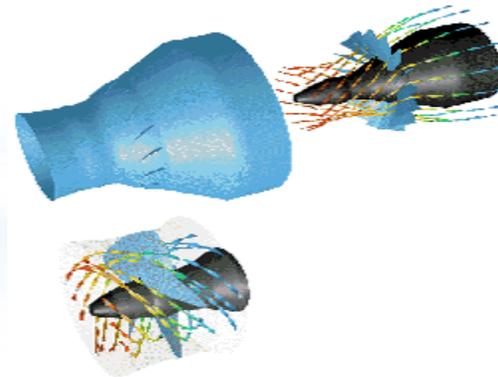
- [Aerospace](#)
- [Appliances](#)
- [Automotive](#)
- [Biomedical](#)
- [Chemical Processing](#)
- [HVAC&R](#)
- [Hydraulics](#)
- [Marine](#)
- [Oil & Gas](#)
- [Power Generation](#)
- [Sports](#)



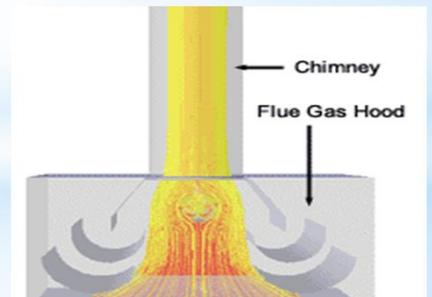
*Flow around cooling towers*



*Flow in a burner*



*Flow pattern through a water turbine.*

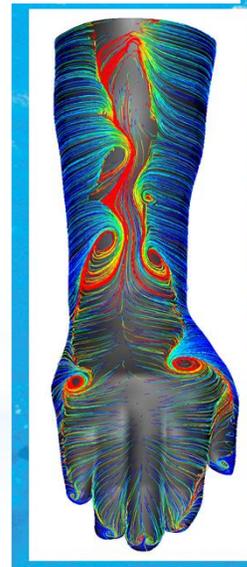
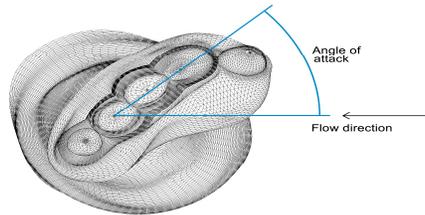


*Pathlines from the inlet colored by temperature during standard operating conditions*

# Where is CFD used? (Sports)

- Where is CFD used?

- [Aerospace](#)
- [Appliances](#)
- [Automotive](#)
- [Biomedical](#)
- [Chemical Processing](#)
- [HVAC&R](#)
- [Hydraulics](#)
- [Marine](#)
- [Oil & Gas](#)
- [Power Generation](#)
- [Sports](#)



## 4. CFD steps

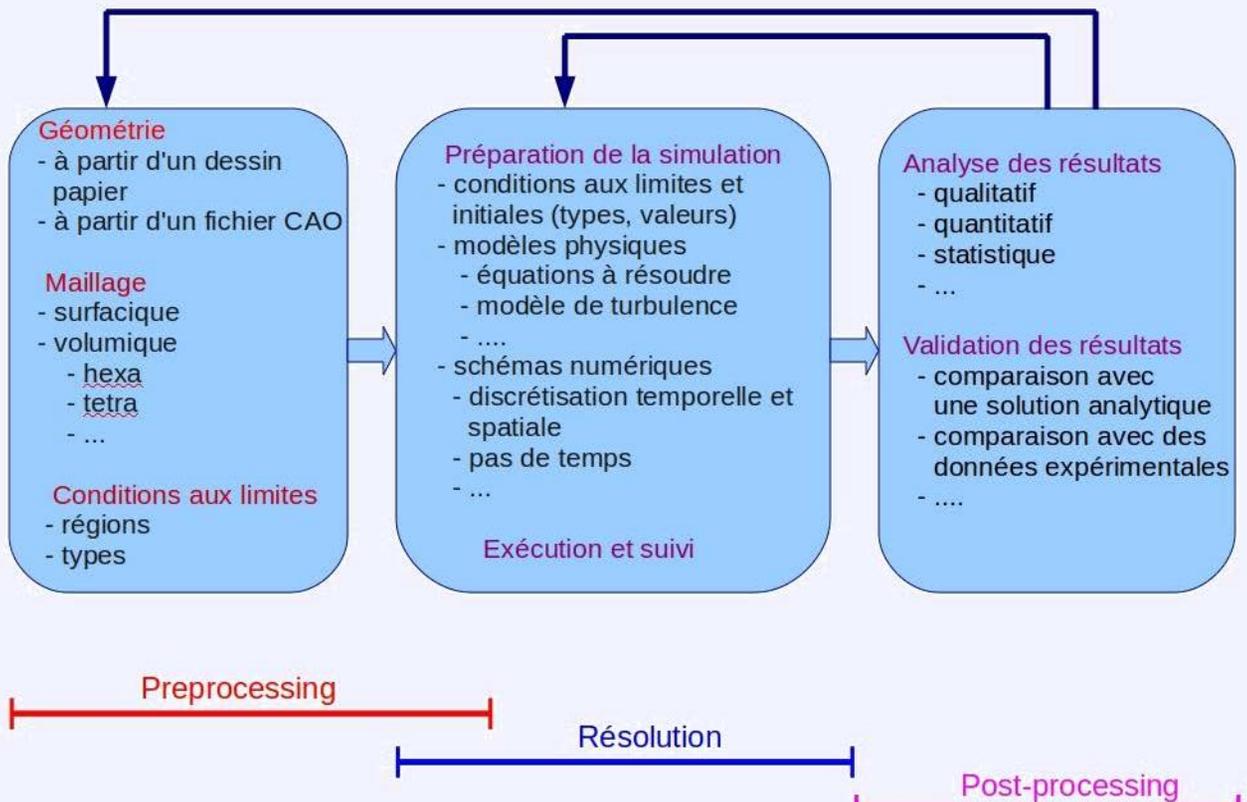
## 4. CFD steps

### Mécanique des Fluides Numérique Computational Fluid Dynamics - méthodologie

- Résolution numérique des problèmes de la Mécanique des Fluides
- Grandes étapes :
  - Problème physique continu est décrit par un modèle mathématique continu (mis en équations)
  - Modèle mathématique continu est discrétisé en s'appuyant sur une(des) méthode(s) numérique(s)
  - Equations discrétisées sont approximées à l'aide des schémas numériques appropriés, l'algorithme de résolution est établie
  - Algorithme est codé (C, Fortan, Matlab, Java,...)
  - Code est exécuté sur un ordinateur
  - Si tout va bien, la solution approchée du problème initial est obtenue

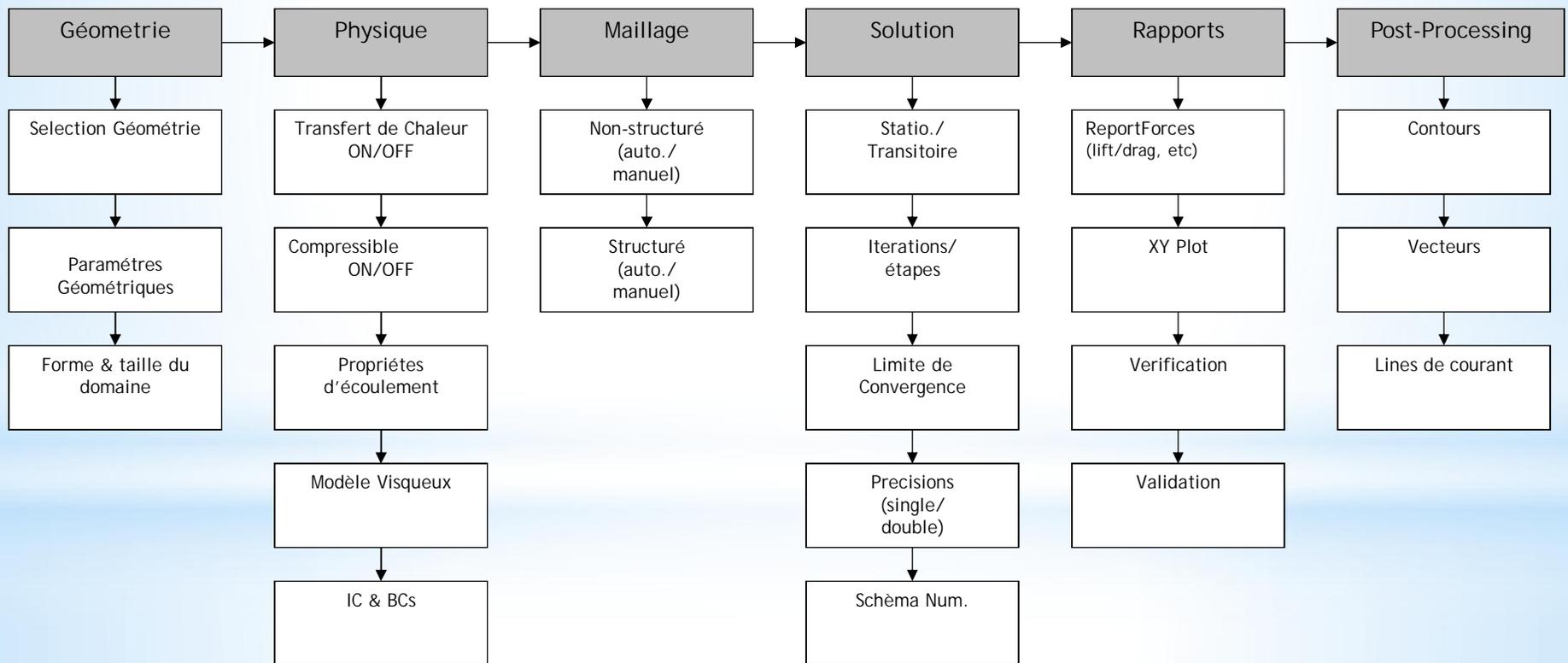
# 4. CFD steps

## Processus de la CFD industrielle : étapes typiques



# 4. CFD steps

## EXEMPLE DE PROCESSUS CFD



## 4. CFD steps

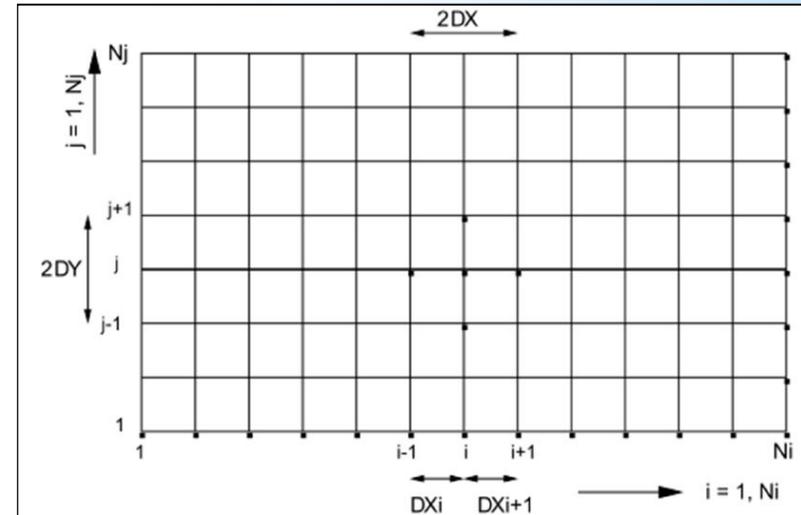
### Pre - Processing

- ① Géométrie et domaine de calcul
- ② Génération de maillage :
  - plus de 50% du temps sont consacrés à la définition du maillage
- ③ Sélection du phénomène à modéliser (fluide visqueux ou non visqueux, laminaire ou turbulent, compressible ou incompressible, écoulement stationnaire ou instationnaire)
- ④ Propriétés physiques du fluide (densité, viscosité)
- ⑤ Conditions aux limites
- ⑥ Conditions initiales

# Géométrie + maillage

## Maillage structuré

Avant de commencer la résolution des problèmes de type numérique, il faut trouver un moyen qui nous permettra de localiser spatialement et temporellement tous les points de la solution numérique. C'est ce qu'on va appeler création de la grille de calcul « **Maillage** ». Dans la suite, on va résonner sur un espace plan (2D) et l'extension pour le 3D sera faite de manière intuitive. La Figure suivante représente la manière la plus directe pour repérer les points suivant **la procédure structurée**. C'est un peu comme une matrice, chaque point sera affecté de deux indexes **(i,j)** qui le positionneront par rapport à ces voisins. Soit **U**, la variable à calculer. Sa valeur aux différents points de la grille s'écrit de la manière suivante :



Grille de calcul structurée 2D.

$$U_{i+1,j} = U(x_0 + \Delta x, y_0)$$

$$U_{i-1,j} = U(x_0 - \Delta x, y_0)$$

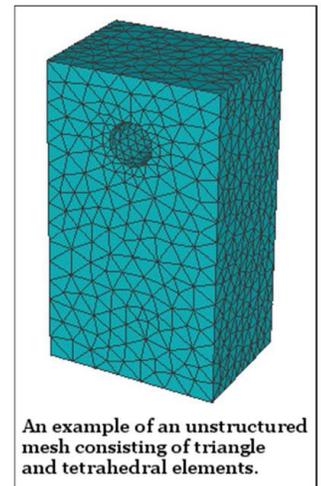
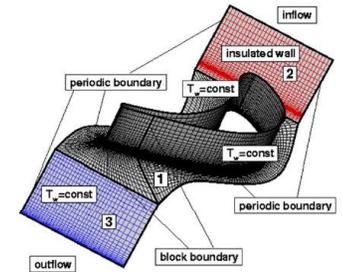
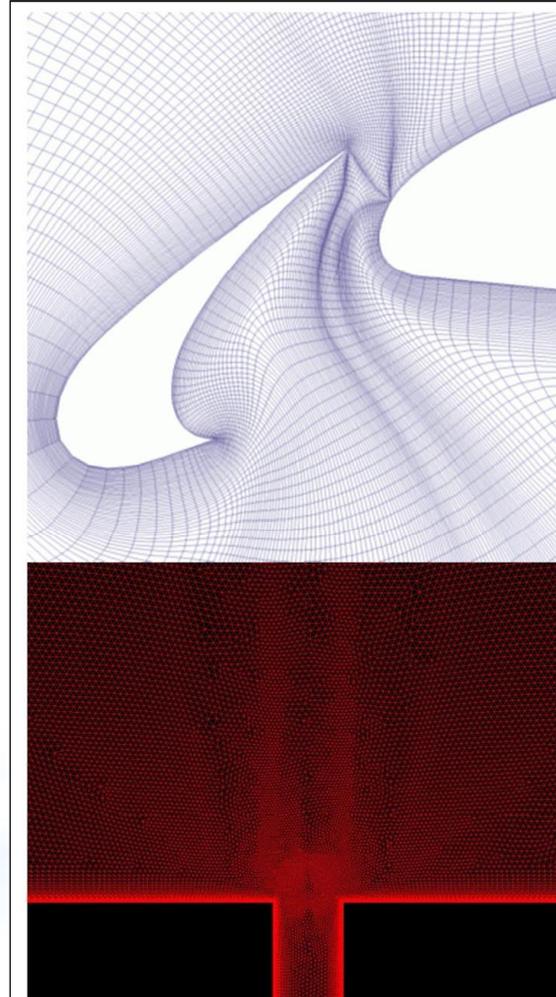
$$U_{i,j+1} = U(x_0, y_0 + \Delta y)$$

$$U_{i,j-1} = U(x_0, y_0 - \Delta y)$$

# Géométrie + maillage

## Maillage non structuré

**Maillage non-structuré** : L'autre façon de mailler un domaine de calcul est de définir un nuage de points, pas nécessairement structuré. Dans ce cas-là, il faudra numéroter les points de calcul un par un. Chaque point aura ces coordonnées  $x$  et  $y$ . En plus il faudra relier ces points entre eux de façon à créer des éléments (généralement des triangles, voir Figure 1). Le fichier de la grille de calcul sera compléter par une liste des éléments (eux-mêmes numéroter) et les points composants chaque élément.



# Maillage structuré .vs Maillage non structuré

## Maillages structurés

### Avantages

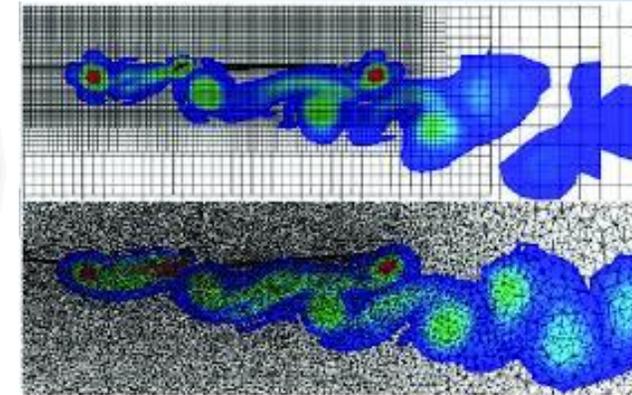
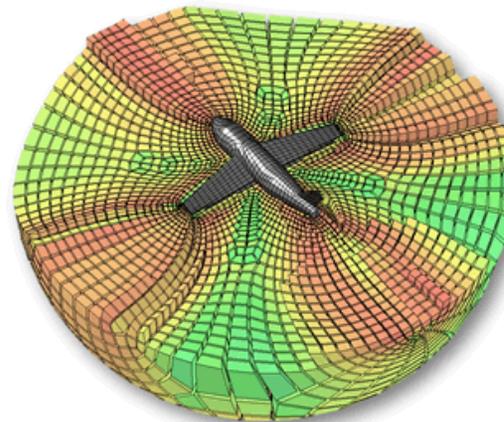
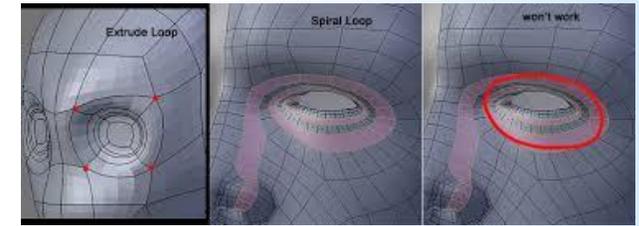
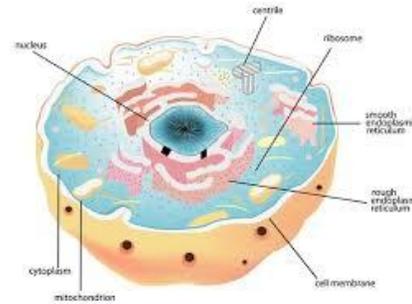
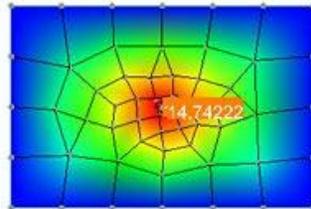
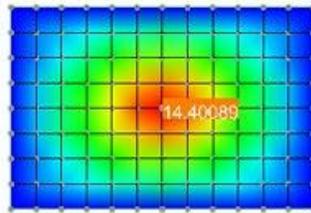
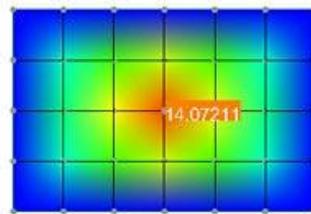
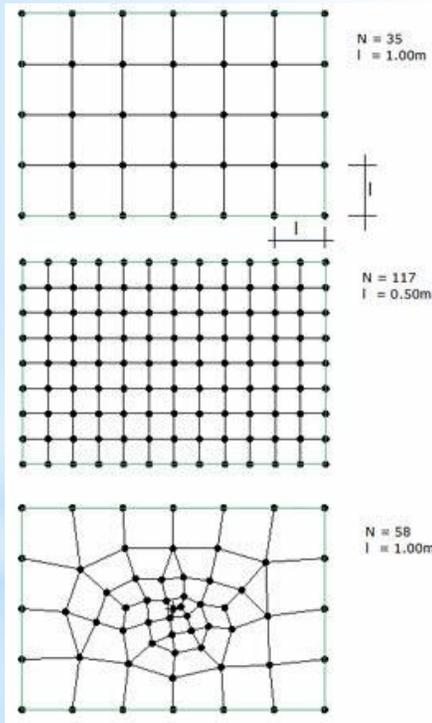
- Leur description est légère, avec un petit nombre de paramètres, il est possible de définir un maillage entier.
- Leur modification est très aisée, d'une part par le peu de paramètres à modifier, et d'autre part par la possibilité d'utiliser des algorithmes de projection. Par exemple AIRBUS peut réutiliser un maillage d'A320 sur tous les autres avions de sa gamme biréacteurs grâce à la grande similitude dans leur forme géométrique. Cette opération peut être partiellement automatisée, ce qui procure un gros gain de temps.
- L'opérateur a le contrôle total de la qualité du maillage, contrairement aux maillages non structurés plus dépendants de l'algorithme de maillage. Il est donc plus facile de faire varier la densité du nombre de mailles selon les phénomènes physiques observés.
- Les calculs sont généralement plus rapides dans un maillage structuré que dans un maillage non structuré.

### Inconvénients

- L'expertise humaine est nécessaire. Un maillage structuré doit répondre à un cahier des charges précis. L'exemple de la jonction en T montre qu'il n'est pas facile d'obtenir un résultat satisfaisant.
- Sa mise en oeuvre est difficile pour les géométries complexes.

# Maillage structuré .vs Maillage non structuré

Parfois il est difficile de générer un Maillages Structurés



# Maillage structuré .vs Maillage non structuré

## Maillages non structurés

### *Avantages*

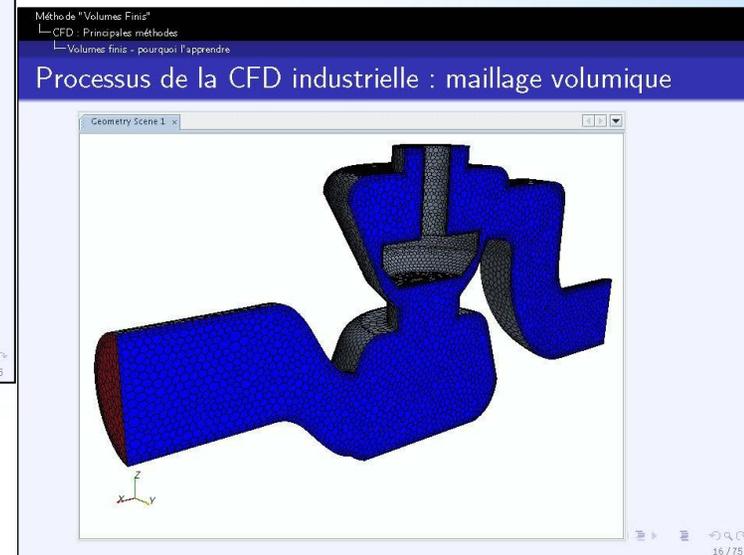
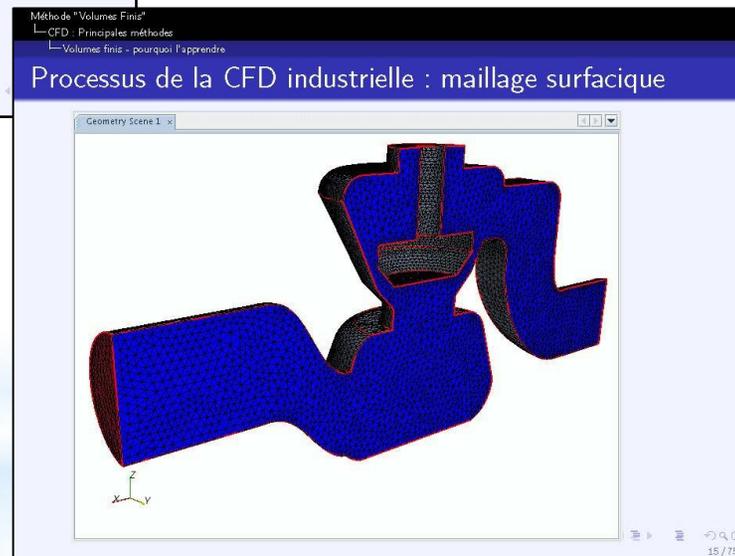
- Leur génération est plus automatique. **SALOME** est un outil très efficace pour cet usage.
  - Ils sont adaptés aux formes complexes sans que l'opérateur n'aie à trop intervenir.
  - Ils nécessitent moins de points par rapport aux maillages structurés

### *Inconvénients*

- Ils augmentent les erreurs, au moins localement.
- Le temps de calcul est en général plus long et il est plus difficile de stocker les données de calcul.
- Il est difficile de contrôler localement la densité des mailles.

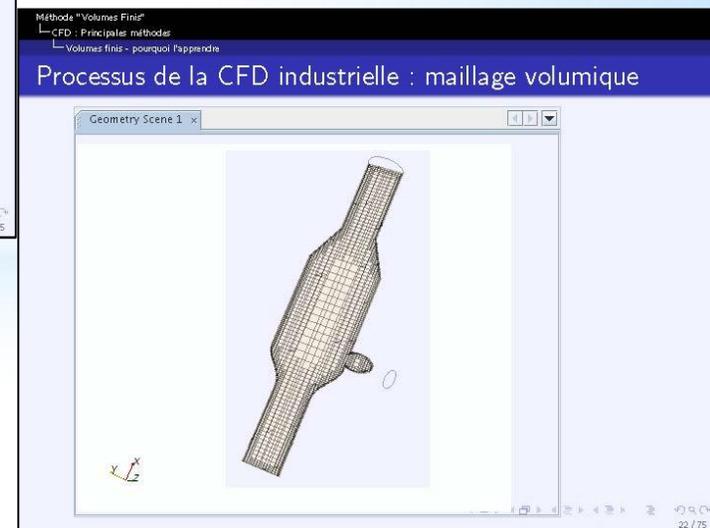
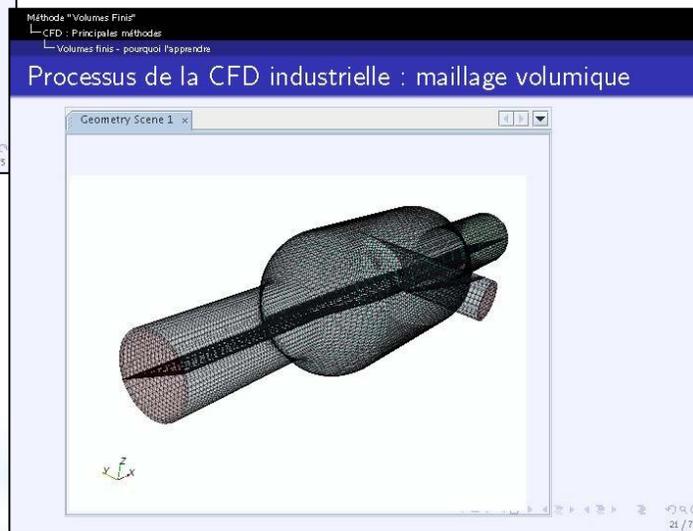
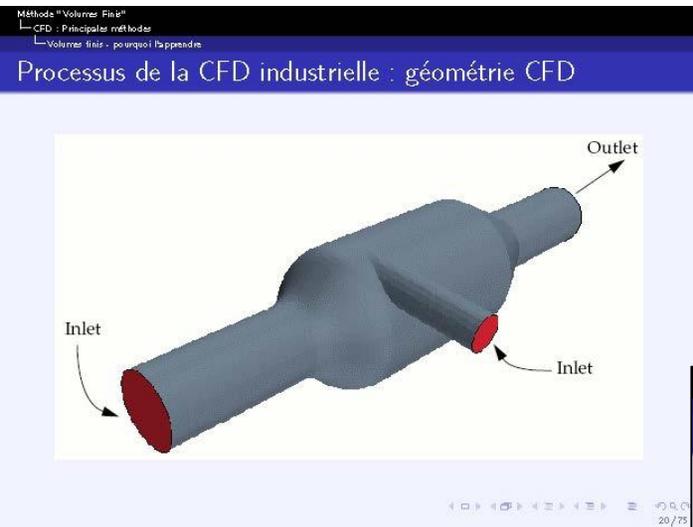
# 4. CFD steps

## Géométrie + maillage



# 4. CFD steps

## Géométrie + maillage



## 4. CFD steps

## Conditions aux limites

### 1.4 Différents types de conditions aux limites (C.L)

#### 1.4.1 Conditions de Dirichlet (ou 1<sup>er</sup> type)

Dans ce cas, la valeur de la variable dépendante est spécifiée le long de la frontière du domaine.

$$\phi(r) = 0, \quad r \text{ sur } S \quad \text{condition homogène.}$$

$$\phi(r) = p(r), \quad r \text{ sur } S \quad \text{condition non homogène.}$$

$r$  étant la variable indiquant la position et  $S$  la frontière du domaine.

## 4. CFD steps

## Conditions aux limites

### 1.4.2 Conditions de Neumann (ou 2<sup>ème</sup> type)

Dans ce cas, le gradient normal de la variable dépendante est spécifié le long de la frontière du domaine.

$$\frac{\partial\phi(r)}{\partial n} = 0, \quad r \text{ sur } S \quad \text{condition } \textit{homogène}.$$

$$\frac{\partial\phi(r)}{\partial n} = q(r), \quad r \text{ sur } S \quad \text{condition } \textit{non homogène}.$$

$\frac{\partial\phi(r)}{\partial n}$  étant la dérivée normale de  $\phi$  le long de la frontière  $S$  du domaine.

## 4. CFD steps

## Conditions aux limites

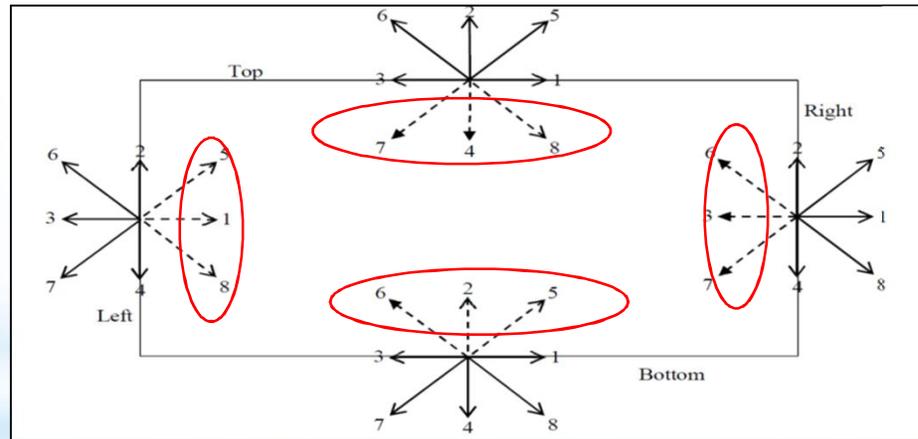
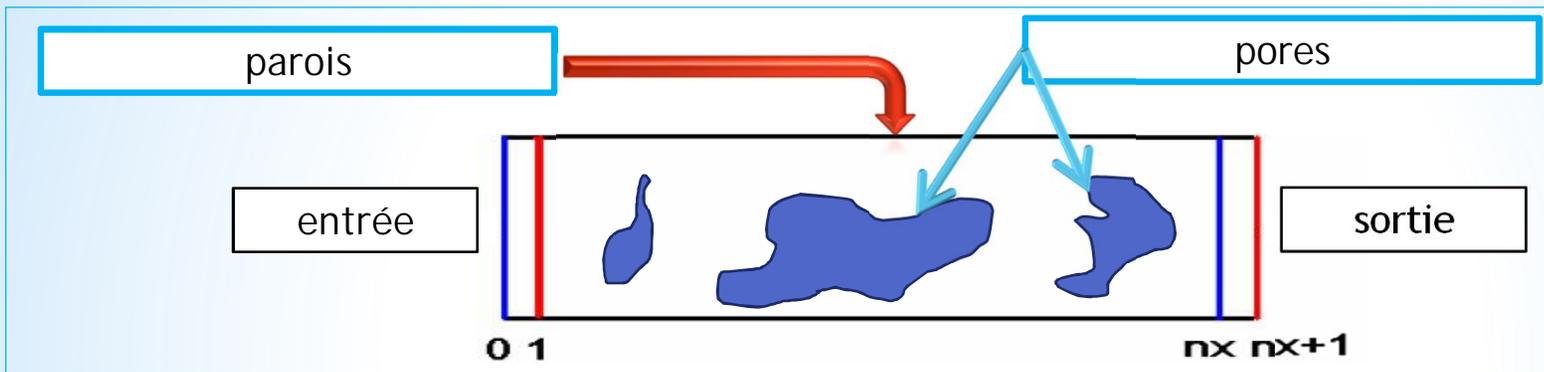
### 1.4.3 Conditions mixtes (ou 3<sup>ème</sup> type)

Dans ce cas, une combinaison des deux C.L précédentes spécifiée le long de la frontière du domaine.

$$\frac{\partial \phi(r)}{\partial n} + h(r) \phi(r) = 0, \quad r \text{ sur } S \quad \text{condition } \textit{homogène}.$$

$$\frac{\partial \phi(r)}{\partial n} + h(r) \phi(r) = w(r), \quad r \text{ sur } S \quad \text{condition } \textit{non homogène}.$$

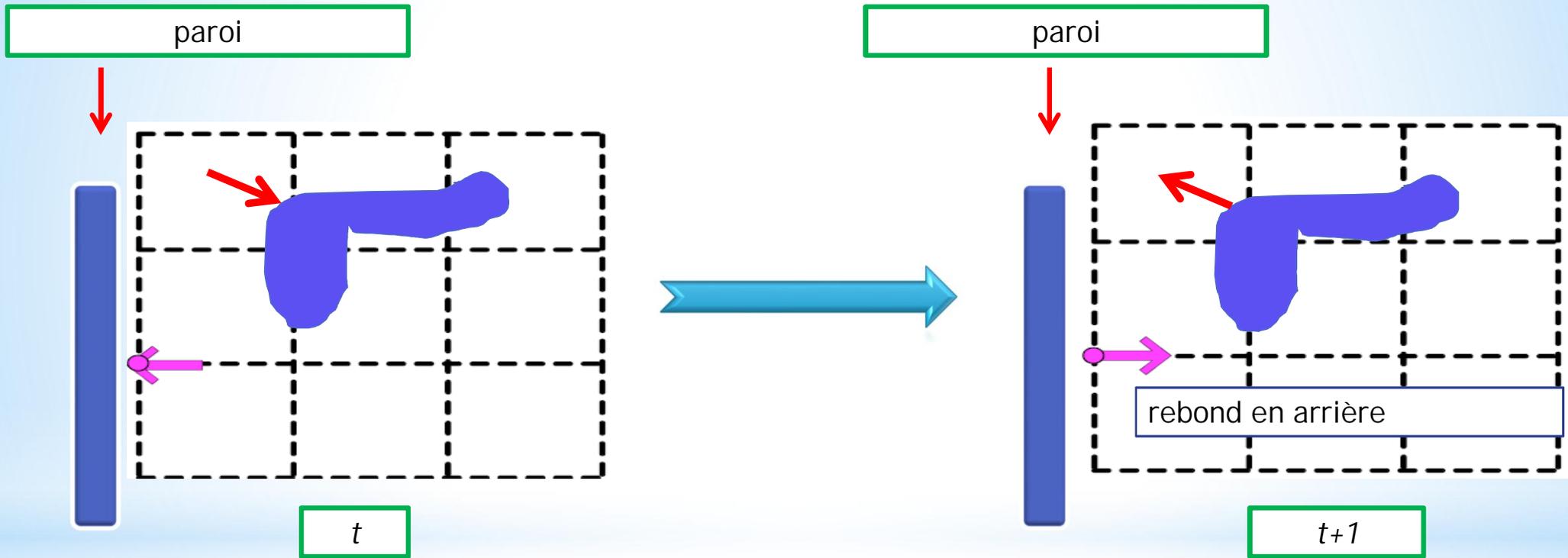
## Conditions aux limites



--- : qui entre dans le domaine de calcul (Fonctions de distributions inconnues)

— : qui sort du domaine de calcul (Fonctions de distributions connues d'après l'étape de calcul précédente)

1. Conditions aux limites de rebond en arrière (bounce-back)



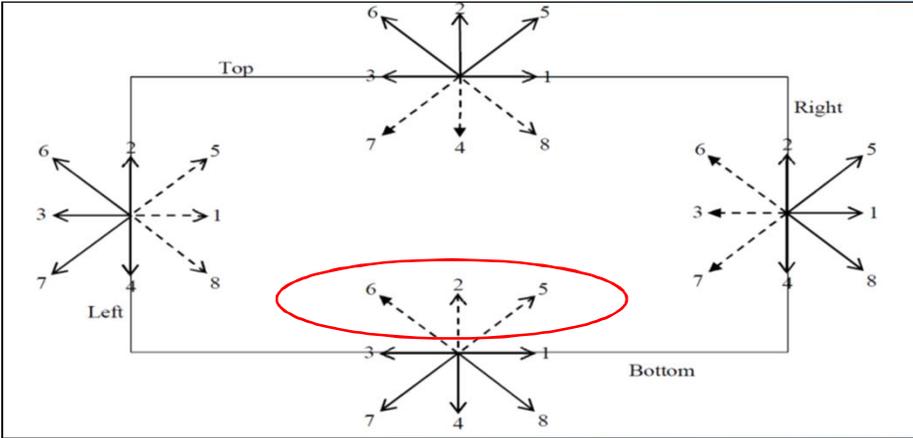
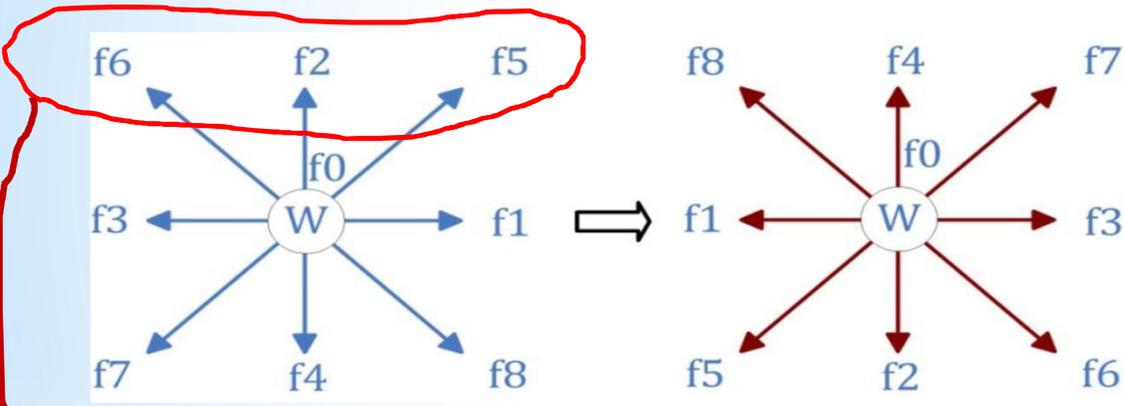
rebond en arrière

$$f_i(x, t) = f_{opp(i)}(x, t)$$

1. Conditions aux limites de rebond en arrière (bounce -back)

rebond en arrière

$$f_i(x, t) = f_{opp(i)}(x, t)$$



Fonctions inconnues

$$f_5(x, y) = f_7(x, y)$$

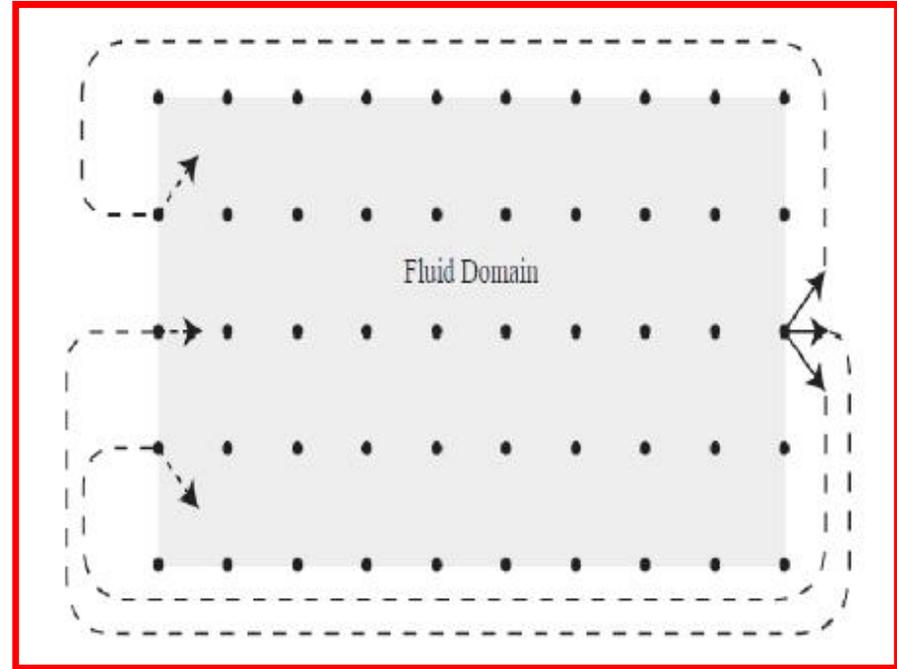
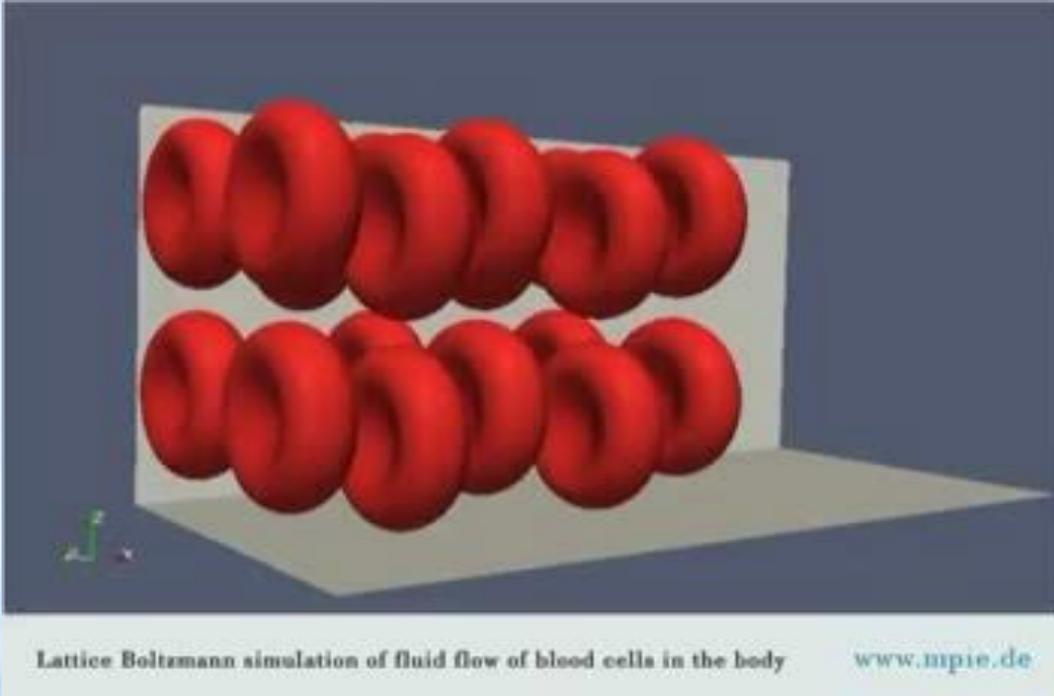
$$f_2(x, y) = f_4(x, y)$$

$$f_6(x, y) = f_8(x, y)$$

## 2. Conditions aux limites périodiques

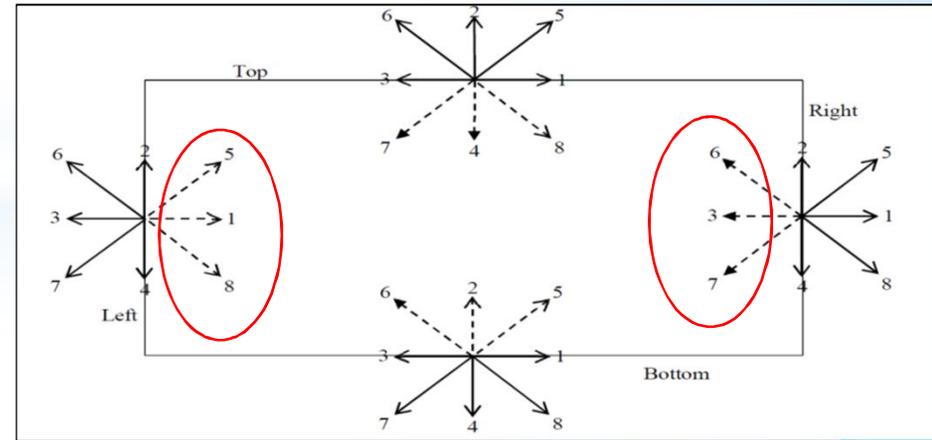
$x = 0$

$x = n$



$$f_{1,x=0} = f_{1,x=n}, f_{5,x=0} = f_{5,x=n} \quad \text{et} \quad f_{8,x=0} = f_{8,x=n}$$

$$f_{6,x=n} = f_{6,x=0}, f_{3,x=n} = f_{3,x=0} \quad \text{et} \quad f_{7,x=n} = f_{7,x=0}$$



### Connaissance : Outil de description d'un comportement

Egalement, afin de simuler le **comportement** d'une structure ou d'un objet, le concepteur peut positionner les **efforts** à l'aide de différents logiciels qui font apparaître les **déformations** qui en résultent.

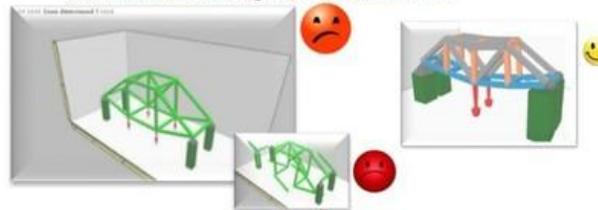
#### Comportement d'une structure de ponts face à des forces avec le logiciel Bridge construction



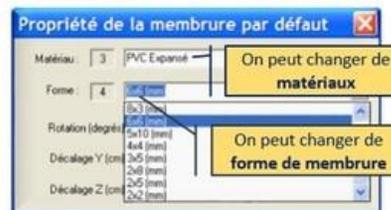
Une correction peut être réalisée en modifiant:  
-les formes  
-les matériaux.



#### Comportement d'une structure de ponts face à des forces avec le logiciel Modelsmart 3D



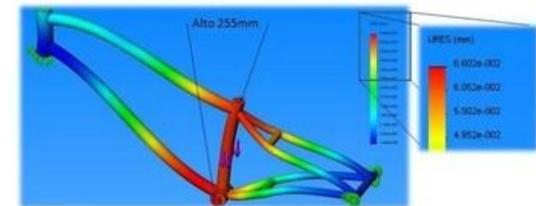
Une correction peut être réalisée en modifiant:  
-les formes  
-les matériaux.  
-les sections des différents éléments



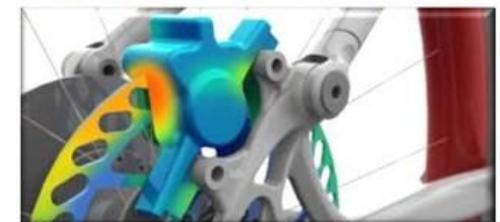
On peut changer de matériaux

On peut changer de forme de membrure

#### Comportement d'un cadre de vélo avec le logiciel SolidWorks



Des **couleurs** sont généralement utilisées pour **visualiser** les **sollicitations** (compression, traction, flexion,...), mais aussi les **températures**, ou les **pressions** sur les objets.



Les **déformations** des structures, le **comportement** thermique, peuvent être **simulées numériquement** à l'aide de logiciels adaptés.

Le **choix des matériaux**, les **formes** des structures, les **liaisons internes** à l'objet, ... peuvent ainsi être déterminé avant la réalisation du **prototype**.

La **modélisation** et les **simulations de comportements** permettent donc de faire **des économies de recherche et développement** sur les produits.

### Connaissance : Sources d'énergies

Les sources d'énergies issues de phénomènes naturels : ce sont des sources renouvelables.

Ces sources  
d'énergies sont  
renouvelables !!!

**Le vent** : l'énergie éolienne utilise la force du vent.



Eoliennes

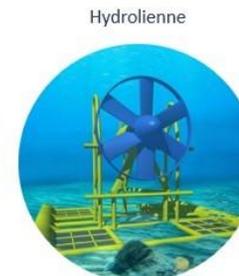
**La biomasse** : elle comprend les produits solides, bois et dérivés, les biogaz et les biocarburants issus de la transformation de **végétaux** ou de **déchets d'animaux**.



**L'eau** : l'exploitation de l'eau sous toutes ses formes (chutes, cours d'eau, houle, marée, ...) va créer de l'énergie appelée **énergie hydraulique**.



Barrage



Hydrolienne



Usine marémotrice

**Le soleil** : produit de la chaleur ou de l'électricité à partir du **rayonnement solaire**. L'énergie lumineuse du soleil est recueillie grâce à des capteurs sur des panneaux solaires et est convertie en énergie électrique (solaire photovoltaïque) ou thermique (solaire thermique).



Panneau photovoltaïque

**La géothermie** : elle exploite la **température du sous-sol**. Ce type d'énergie ne dépend pas des conditions atmosphériques et a donc l'avantage d'être quasi continu

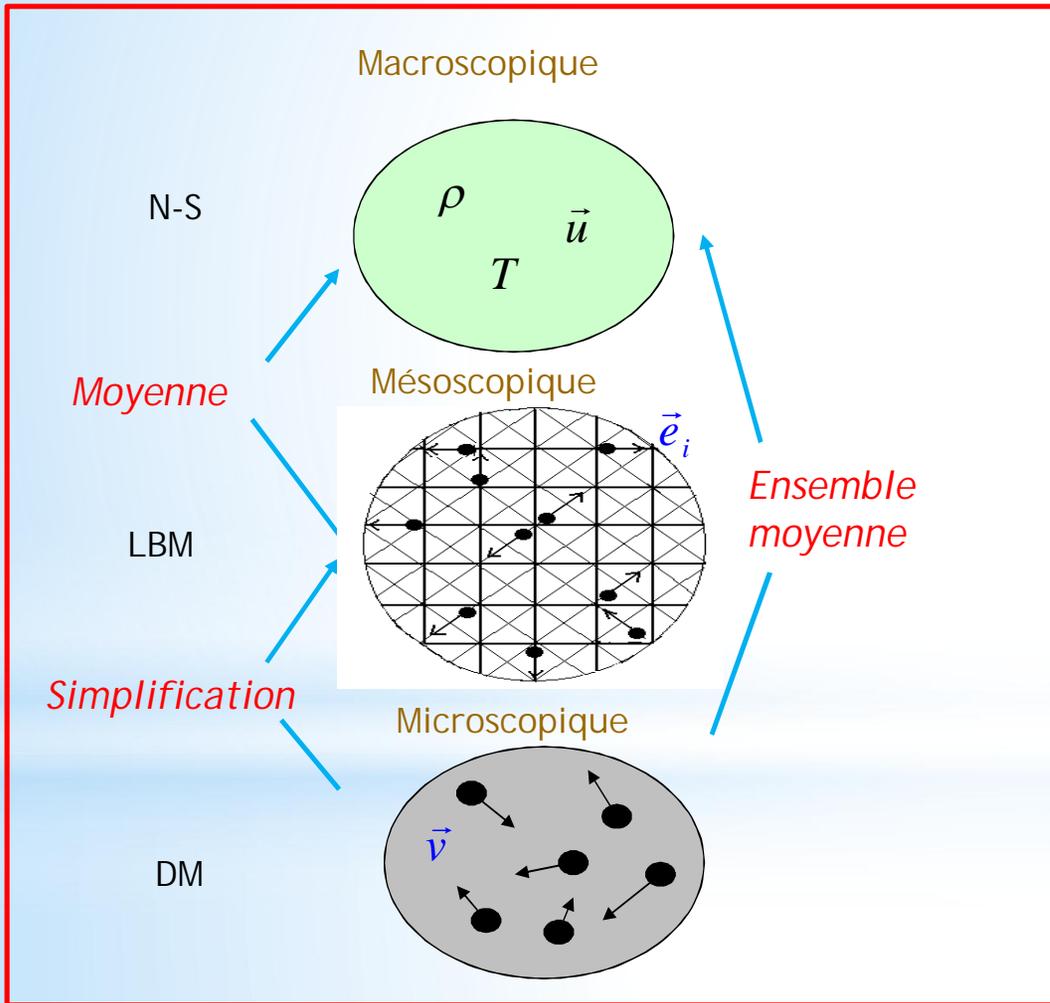


Pompe à chaleur, échangeur et serpentin

Une **source d'énergie** est issue d'une **matière première**, non renouvelable, comme l'uranium, le pétrole, le gaz, qui fournissent de l'énergie grâce à la combustion, la fission nucléaire... ou issue d'un **phénomène naturel**, renouvelable, comme l'action de l'eau, le vent, le soleil, la chaleur du sous-sol, l'activité musculaire. Ces différentes sources permettent de produire de l'**énergie mécanique, thermique ou électrique**.

# Physique : Modélisation

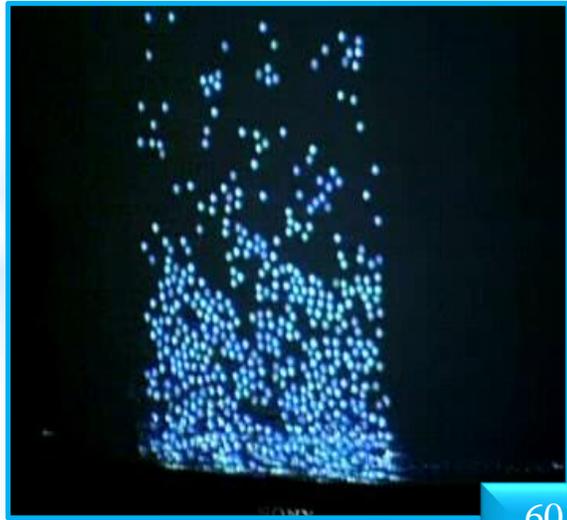
Différents échelles de CFD



Simulation à l'échelle macroscopique



Simulation à l'échelle microscopique



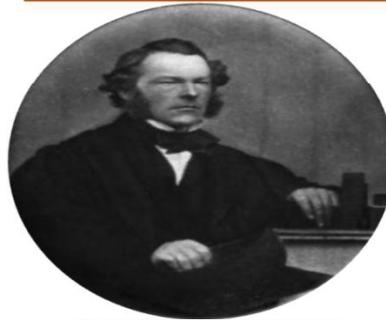
# 4. CFD steps

Navier



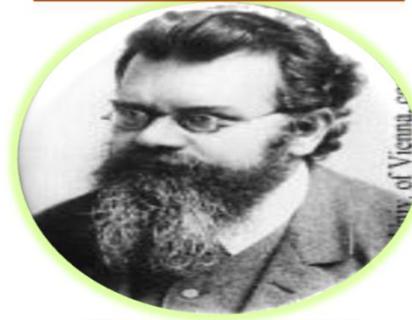
1785- 1836

Stokes



1819- 1903

Boltzmann



1844- 1906

Newton



1643- 1727

Equations de Navier-Stokes

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\eta}{\rho} \Delta \vec{v}$$

Equation de continuité

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \cdot \nabla_x f + \mathbf{a} \cdot \nabla_\xi f = Q(f, f)$$

Décomposition de Chapman-Enskog



1912

# Processus de la CFD industrielle : préparation de la modélisation / modélisation

Modèle de l'écoulement : steady, unsteady ?

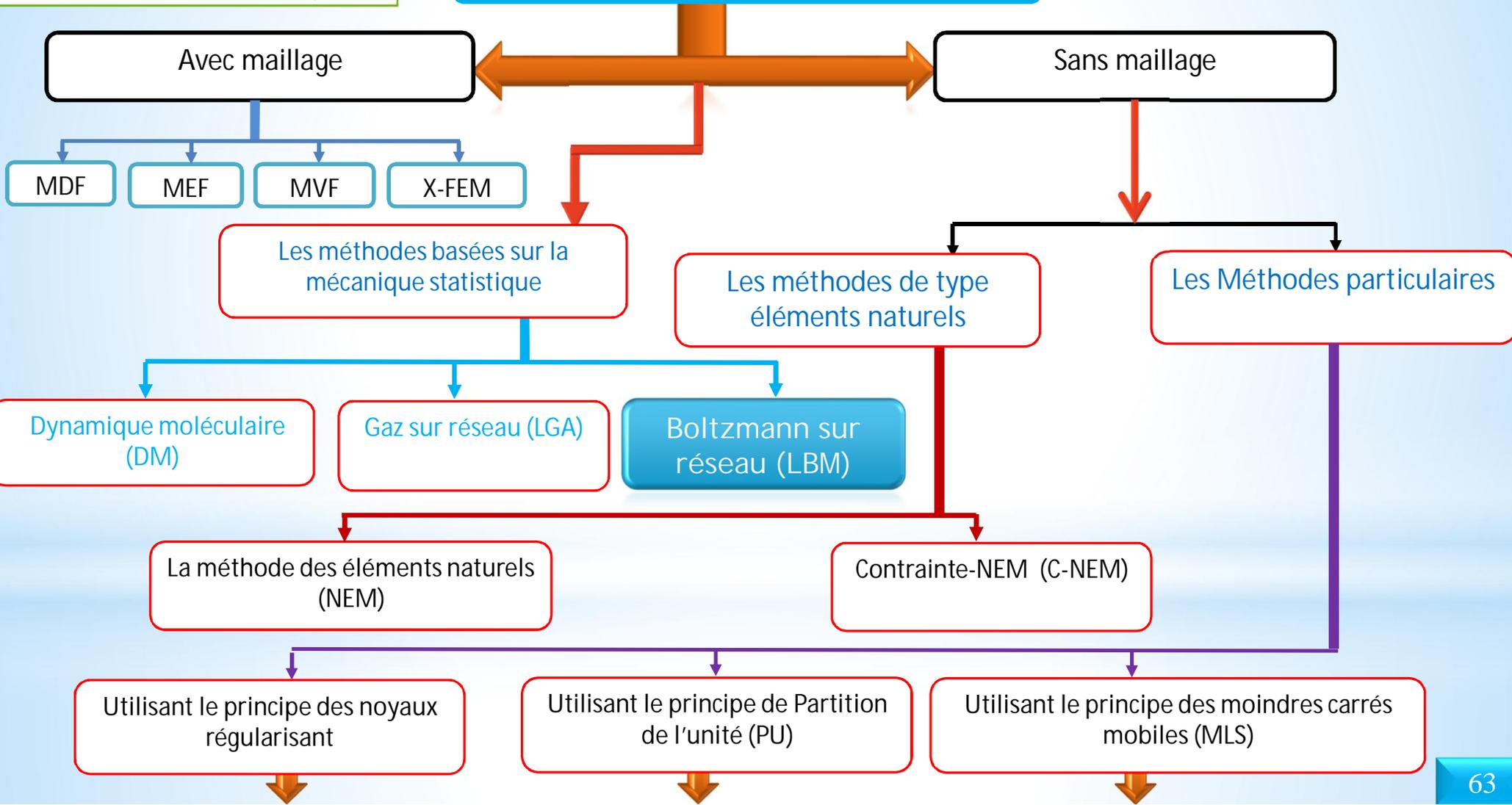
- Unsteady

- ① Implicite unsteady

- Solveur : segregated ou coupled ?
    - $\Delta t$  ?
    - Schéma de discrétisation : SIMPLE, QUICK, CD, MARS, ... ?
    - Options du solveur : Gauss-Zeidel, GC, ... ?

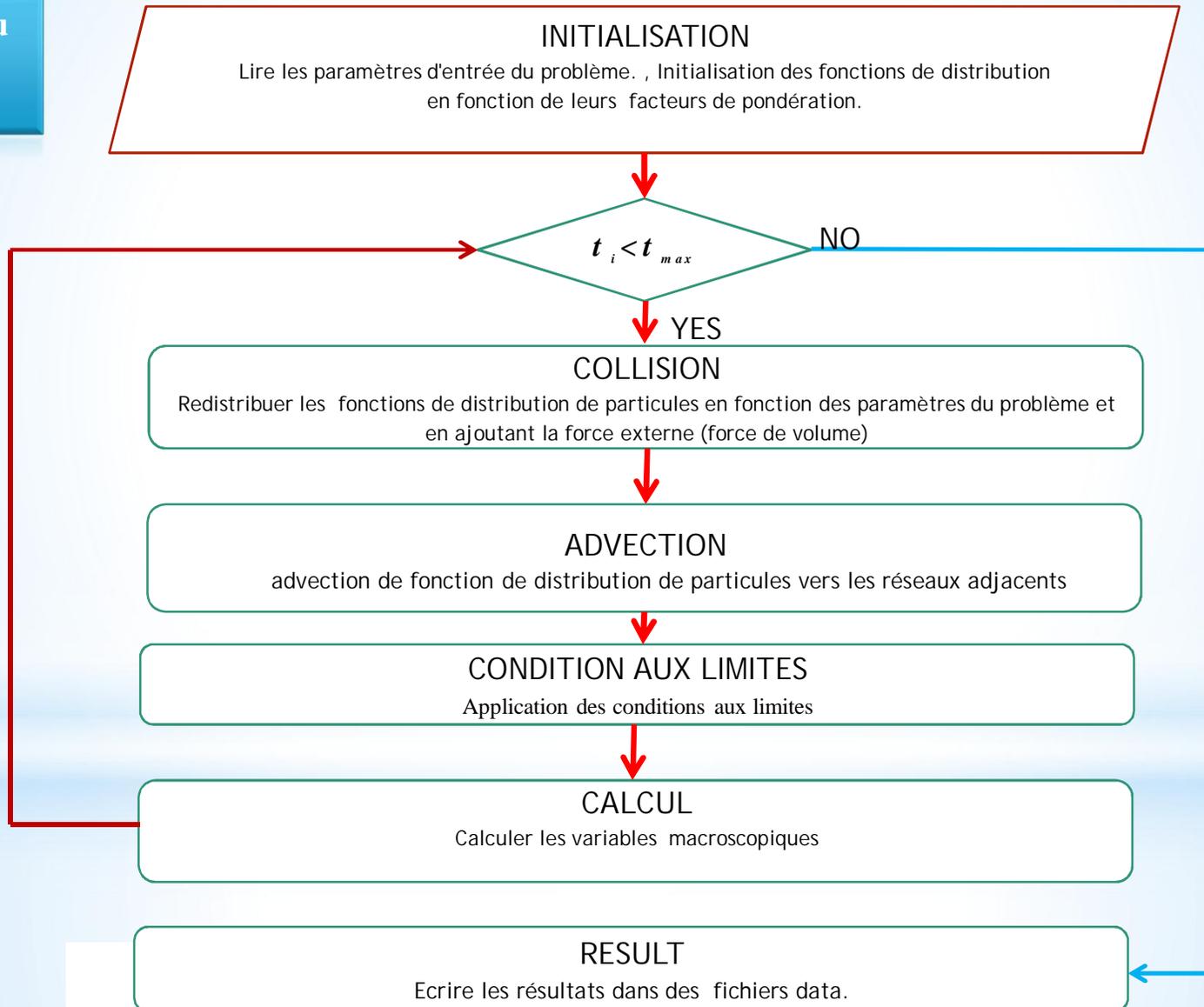
- ② Explicite unsteady

- CFL ?
    - Fractional step time advancement ?
    - ...



choix du logiciels ; outil de programmation; outil de visualisation





# 4. CFD steps

# Post-Traitement

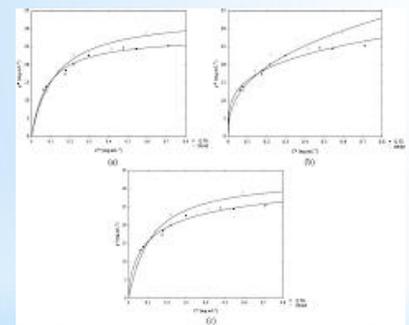
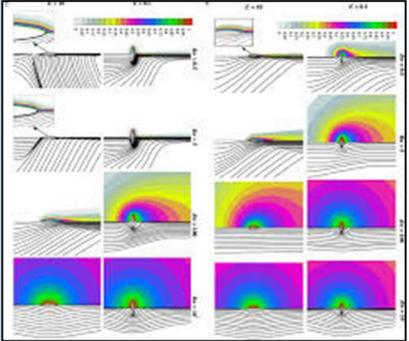
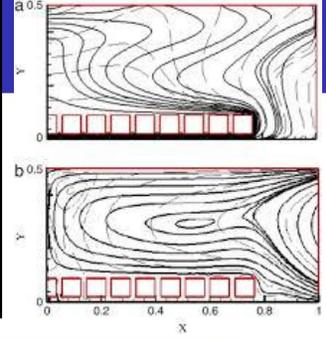
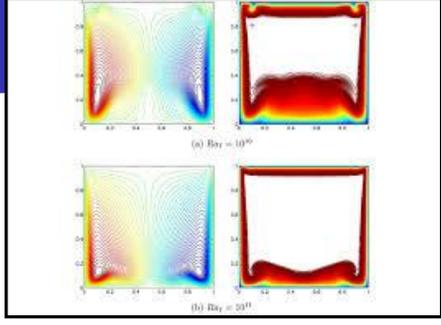
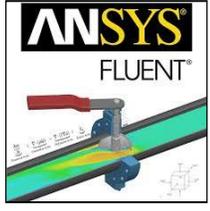
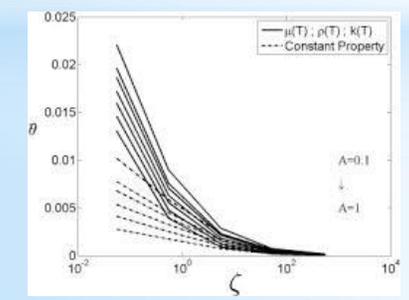


Figure 4: Equilibrium adsorption isotherms according to the (a) Langmuir equation; (b) Freundlich equation and (c) Langmuir-Freundlich equation for the adsorption of C<sub>2</sub> phytylamine onto the Stenandis D6-AL and Q XL carriers.



## Exploitation des résultats

- Représentation des contours de vitesses et de température
- Tracé des champs de vecteurs
- Représentation des distributions de pression ou de température ou autres variables suivant une ligne donnée
- Animation des résultats

