

La Méca Flu pour les ... Nuls

Dr Pierre-Sylvain Mirade,
INRA, UR 370 QuaPA,
F-63122 St Genès Champanelle



Séminaire SIMPFRI
14 Mai 2007, Laschamps

1/21

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

INRA

Plan

- ❖ **Quelques définitions : physique, mécanique, fluide...**
- ❖ **Quelques notions : statique/dynamique des fluides, viscosité, turbulence, régime d'écoulement, couche limite, approche Lagrangienne/Eulérienne.**
- ❖ **Quelques équations : Principes de base, Bernoulli, Navier-Stokes.**
- ❖ **Un outil : la Mécanique des Fluides Numérique (ou Computational Fluid Dynamics – CFD).**

Quelques définitions...

- ✓ **Physique** : du grec *nature* – science qui étudie les propriétés générales des corps et des lois modifiant leur état ou leur mvt sans modifier leur nature.
- ✓ **Mécanique** : du grec *machine* – partie de la physique traitant de l'équilibre et du mvt (déplacement, déformation, chgt d'état physique) des corps.
- ✓ **Fluide** : corps, liquide ou gazeux, sans forme propre. Prend la forme du récipient solide qui le contient et se « soude » instantanément à lui-même.
- ✓ **Particule fluide** : portion de fluide de dimension arbitrairement choisie à laquelle correspondent pendant un instant Δt , une vitesse, une pression, une température et une masse volumique.

Mécanique des fluides = branche de la physique étudiant les écoulements de liquides ou de gaz, lorsque ceux-ci subissent des forces et des contraintes. Elle se divise en 2 : statique des fluides (ou hydrostatique) et dynamique des fluides .

Quelques notions (1/9)

Statique des fluides (étude des fluides au repos) :

➤ Poussée d'Archimède (env. 250 av JC) : « *Tout corps plongé dans un fluide (soumis à un champ de gravité) subit une force verticale, dirigée de bas en haut et égale au poids du volume de fluide déplacé* » ; cette force est appelée « **poussée d'Archimède** ».

➤ Cette force provient de l'augmentation de la pression du fluide avec la profondeur : la pression étant plus forte sur la partie inférieure d'un objet immergé que sur sa partie supérieure, il en résulte une poussée globalement verticale orientée vers le haut.



$$P_A = \rho V g$$

Archimède (287-212 av JC)



P_A en Newton (N) avec ρ en kg/m^3 , V le volume de fluide déplacé en m^3 et g la pesanteur en N/kg.

Quelques notions (2/9)

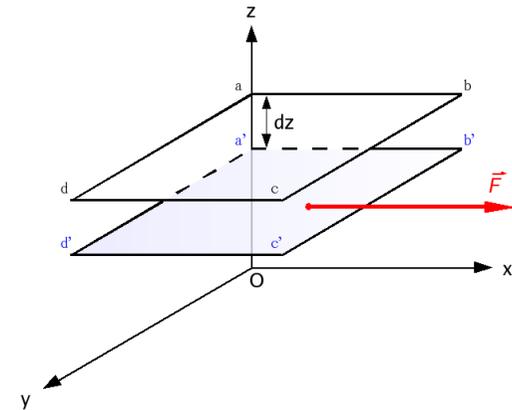
Dynamique des fluides (étude des fluides en mvt) :

- La résolution d'un problème de dynamique des fluides demande normalement de calculer diverses propriétés des fluides comme la **vitesse**, la **pression**, la **densité** et la **température** en tant que fonctions de **l'espace** et du **temps**.
- Apparaît la notion de **viscosité** : La viscosité désigne la capacité d'un fluide à s'écouler (on parle aussi de *fluidité*).
- Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue. La viscosité tend à diminuer lorsque la température augmente.
- Les fluides peuvent être classés en 2 familles relativement à leur viscosité : les fluides "**newtoniens**" (comme l'eau, l'air et la plupart des gaz) et les fluides "**non newtoniens**" (quasiment tout le reste...).

Quelques notions (3/9)

Viscosité (suite) :

$$F/S = \mu \, dv/dz$$



➤ Il existe 2 types de viscosité :

✓ La **viscosité dynamique** μ (Pa.s) qui est le coefficient de proportionnalité de la force s'appliquant entre 2 couches fluides de vitesse \neq .

✓ La **viscosité cinématique** ν égale au rapport de la viscosité dynamique sur la masse volumique du fluide. Elle est exprimée en Stoke (St) ou centiStoke (cSt). L'unité légale est le $m^2/s = 10^4$ St.

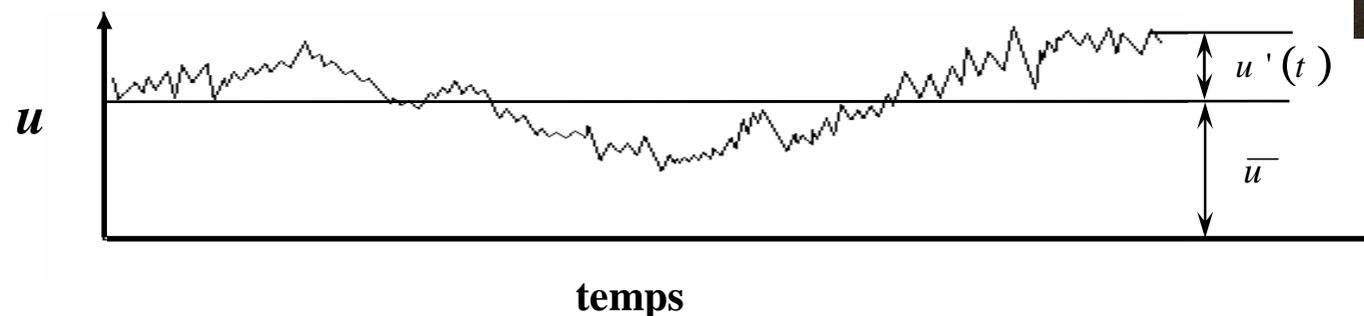
➤ Les fluides « **newtoniens** » ont une viscosité dynamique constante (ou qui ne varie qu'en fonction de la t°), indépendante du gradient de vitesse.

➤ Les fluides « **non newtoniens** » ont la particularité d'avoir leur viscosité dynamique qui varie en fonction de la vitesse et des contraintes qu'ils subissent lorsque ceux-ci s'écoulent (leur étude relève de la rhéologie).

Quelques notions (4/9)

Turbulence :

- La **turbulence** désigne l'état d'un fluide dans lequel la vitesse présente en tout pt un caractère tourbillonnaire : tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment.
- Les écouls turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement non prévisible (chaos) et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles.
- De tels écouls apparaissent lorsque l'Ec qui met le fluide en mvt est relativement intense devant les forces de viscosité que le fluide oppose pour se déplacer.
- On qualifie de **laminaire** un écoult régulier et prévisible.

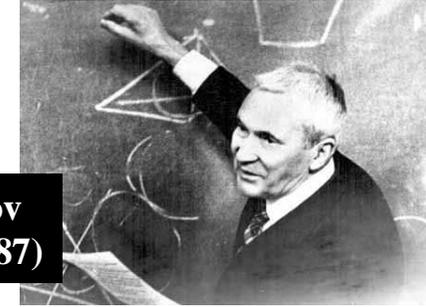


$$u = \bar{u} + u'(t)$$

Quelques notions (5/9)

Turbulence (suite) :

Andrei Kolmogorov
Math Rus (1903-1987)



- Une propriété fondamentale d'un écoulement turbulent réside dans un processus appelé **cascade d'énergie** : *la division des gds tourbillons en tourbillons + petits permet un transfert d'énergie des gdes échelles vers les petites échelles.*
- Kolmogorov (1941) a émis l'hypothèse d'une **cascade auto-similaire** : les tourbillons se divisent tous de la même manière q.q.s. leur échelle, tant qu'elle n'est ni trop petite (sinon viscosité), ni trop grande (les grands tourbillons dépendent de la géométrie de l'écoulement). Il a exprimé une loi (loi en $-5/3$) pour caractériser l'autosimilarité de la turbulence.
- La turbulence augmente la traînée des objets en mouvement pour des grandes vitesses. A faible vitesse mais écoulement toujours turbulent, la turbulence va retarder le décollement de la **couche limite** et de ce fait, diminuer le coefficient de traînée (ex : combinaisons des nageurs munies d'écaillés) + agro-alimentaire.

Quelques notions (6/9)

Nb de Reynolds (1883) :

➤ Le **'Re'** caractérise **l'écoult et la nature de son régime** (laminaire, transitoire, turbulent), de par le rapport entre forces d'inertie et forces visqueuses.

➤ Il est égal à : $Re = \rho V L / \mu = V L / \nu$

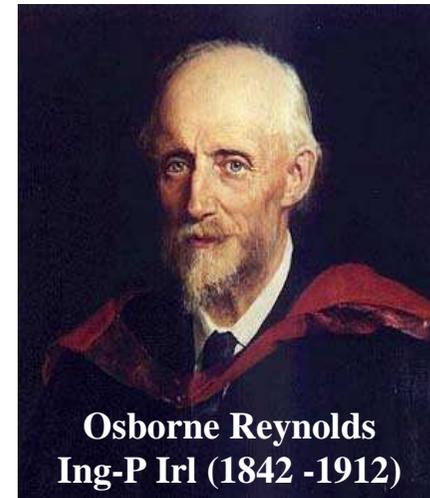
où **V** vitesse (m/s), **L** dimension caractéristique (m) du phénomène (diam. pour une conduite circulaire, dim. jugée la plus pertinente pour un obstacle de forme quelconque), **ρ** masse volumique (kg/m³), **μ** viscosité dynamique (Pa.s), et **ν** viscosité cinématique (m²/s).

✓ A **'faible Re'**, les forces de viscosité sont prépondérantes.

L'écoult est **laminaire** : les éléments de fluide voisins demeurent voisins.

✓ A **'Re intermédiaire'**, les forces d'inertie deviennent prépondérantes mais l'écoult reste laminaire (régime **transitoire**).

✓ A **'fort Re'**, les forces d'inertie sont si imptes que l'écoult devient **turbulent**.



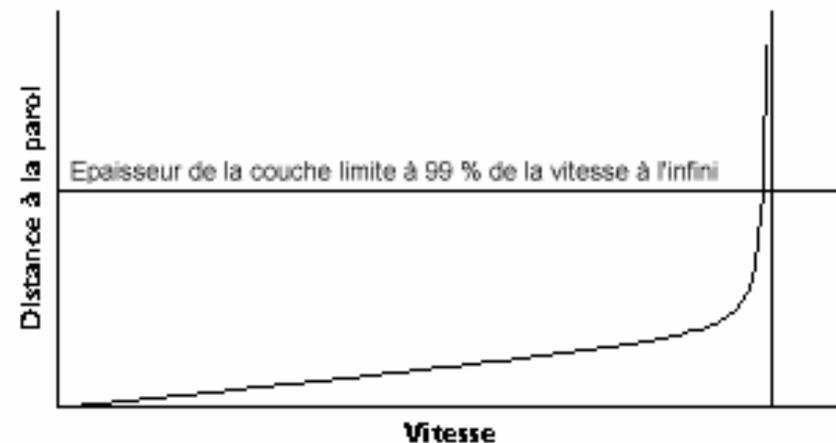
Quelques notions (7/9)

Couche limite :

➤ La **couche limite** est une zone d'interface entre un corps et le fluide environnant lors d'un mvt relatif entre les 2. On y observe les effets de la **viscosité**. Elle est un élément impt en méca flu, en météo, en océanographie...

➤ Lorsqu'un fluide réel s'écoule le long d'une paroi supposée fixe, les vitesses sur la paroi sont nulles et à l'infini, loin de l'obstacle, elles sont égales à la vitesse de l'écoult non perturbé. La vitesse doit donc varier entre 0 et un maximum. La loi de variation dépend de la **viscosité** du fluide qui induit un frottement entre les couches voisines : la couche la + lente tend à freiner la couche la + rapide qui, en retour, tend à l'accélérer.

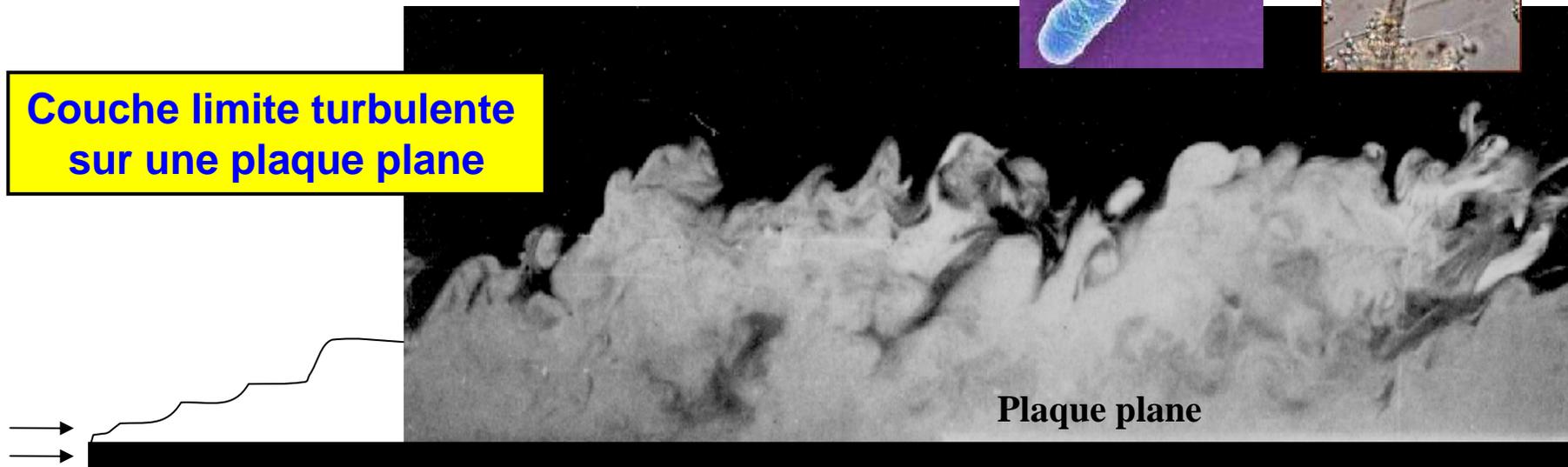
Profil de vitesses au voisinage d'une paroi
Faible viscosité



Quelques notions (8/9)

Couche limite (suite) :

Couche limite turbulente
sur une plaque plane

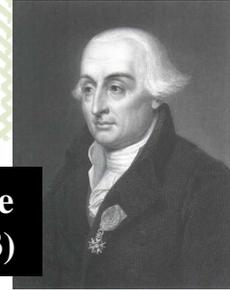


✓ Importance de la **couche limite** dans les **transferts** (chaleur, matière) et **l'aérocontamination** (dépôt, remise en suspension, rebond de particules contaminantes).

Quelques notions (9/9)

Quelle approche ?

Joseph-Louis Lagrange
M-Astr Ita (1736-1813)



Leonhard Euler
M-P Sui
(1707-1783)

- ✓ Pour décrire mathématiquement les propriétés d'un fluide en mvt, 2 systèmes cohabitent : **Approche Lagrangienne et approche Eulérienne**.
- ✓ La description **Lagrangienne** consiste à observer les modifications des propriétés d'une particule fluide que l'on suit dans son mvt. Cette description donne une bonne idée de ce qui se passe dans le fluide. L'inconvénient est que le référentiel se déplace avec le fluide, et donc, qu'il est difficile de connaître l'état du fluide en un pt donné de l'espace et du temps.
- ✓ La description **Eulérienne** consiste à se placer en un pt fixe du milieu étudié et à observer les modifications des propriétés du fluide qui défile en ce pt. C'est la description la + souvent utilisée en dynamique des fluides, car elle permet de calculer facilement la variation spatiale d'une propriété du fluide au temps t.

Quelques équations (1/3)

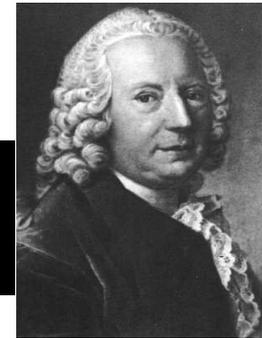
Bases : lois de conservation

- ✓ En physique, une **loi de conservation** (*rien ne se perd, rien ne se crée*) exprime qu'une propriété mesurable particulière d'un système physique isolé reste constante au cours de l'évolution de ce système.
- ✓ Les axiomes fondamentaux de la dynamique des fluides sont les **lois de conservation** comme la conservation de la **masse**, la conservation de la **quantité de mouvement** et la conservation de **l'énergie**.
- ✓ Les équations les + importantes sont les **équations de Navier-Stokes**.

Quelques équations (2/3)

Théorème de Bernoulli

Daniel Bernoulli
Med-M-P Sui
(1700 -1782)



➤ Ce théorème, établi en 1739 par Daniel Bernoulli, exprime **le bilan hydraulique simplifié d'un fluide dans une conduite**. Il a posé les bases de l'hydrodynamique et, d'une façon plus générale, de la mécanique des fluides.

➤
$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} = \text{cte}$$

où **v** vitesse du fluide en $m.s^{-1}$, **g** accélération de la pesanteur en $N.kg^{-1}$ ou $m.s^{-2}$,
z altitude en m , **p** pression dans la conduite en Pa ou $N.m^{-2}$, **ρ** masse volumique du fluide en $kg.m^{-3}$.

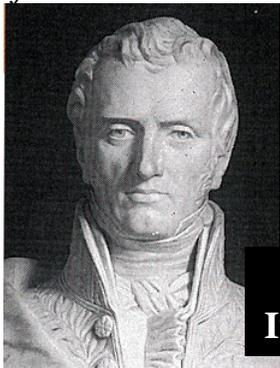
➤ Ce théorème suppose un fluide **incompressible** (ρ constant), « **parfait** » (sans viscosité), en régime permanent et sans transfert de chaleur.

Quelques équations (3/3)

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f}$$

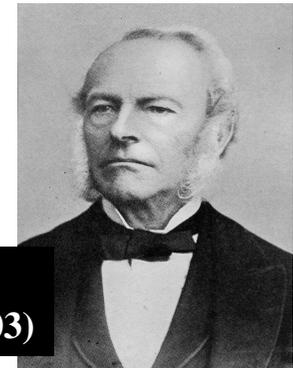
Equations de Navier- Stokes (1821-1822) :

- ✓ Les **éq. de N-S** sont des **éq. aux dérivées partielles non-linéaires** qui décrivent le mvt des fluides. Elles gouvernent les mvts de l'air de l'atmosphère, l'écoult de l'eau ds un tuyau, ds une chambre froide, un réfrigérateur, un MFV et de nbreux autres phénomènes d'écoult de fluides.
- ✓ Pour un fluide newtonien et un écoult incompressible, l'éq. de l'énergie est découplée des éq. de continuité et de qté de mvt, c-à-d que la vitesse et la pression peuvent être déterminées indépendamment de l'éq. de l'énergie.
- ✓ Ces équations, lorsqu'elles ne sont pas simplifiées, n'ont pas de solutions analytiques et ne sont donc utiles que pour des **simulations numériques**.



Claude Navier
Ing-Sc-Méca Fra (1785 -1835)

d'où la **Mécanique des Fluides Numérique**
(ou **CFD**)

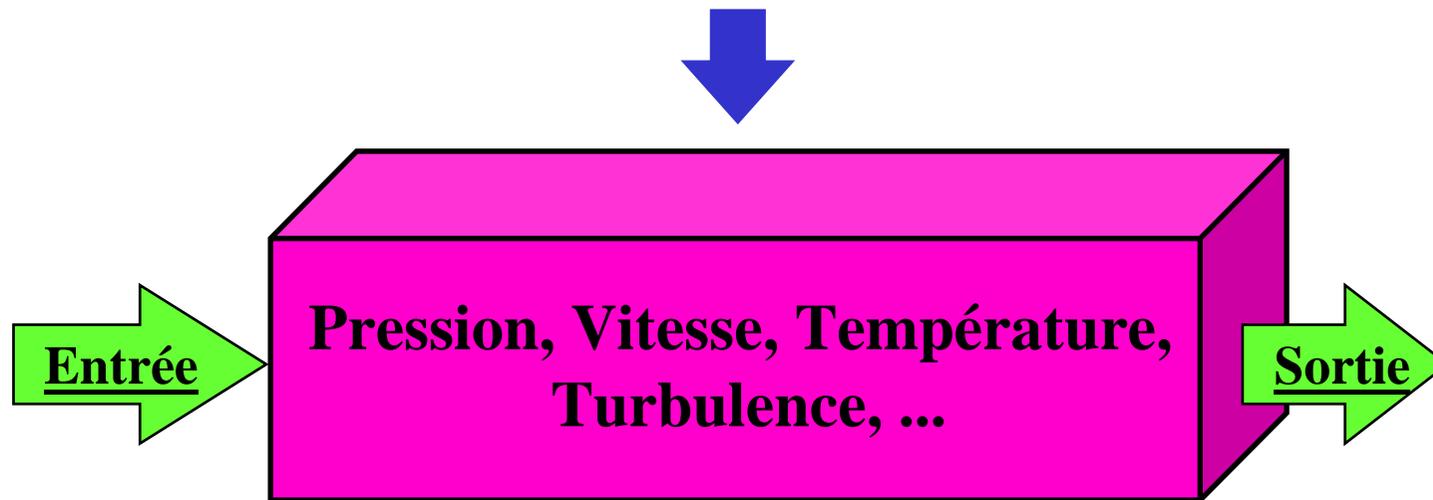


George Stokes
M-P-RU (1819 -1903)

Un outil – La MFN / CFD (1/5)

MFN – Quesako ?

Outil permettant de résoudre numériquement, sur un **maillage** 2D ou 3D, les éq. de Navier-Stokes couplé ou non à des transferts de chaleur/matière au sein d'une géométrie donnée



 **Moyens informatiques puissants**

Un outil – La MFN / CFD (2/5)

MFN – Quelques chiffres

Origines :

- ✓ 1960 : industries du nucléaire, de l'aéronautique et de l'automobile
- ✓ 1970-75 : industrie HVAC (confort dans les bâtiments)
- ✓ 1980 : chimie (réacteur, cuve agitée...)
- ✓ **Et ... seulement en 1990 : agro-alimentaire**
- ✓ Autre domaine d'utilisation : prévisions météo.

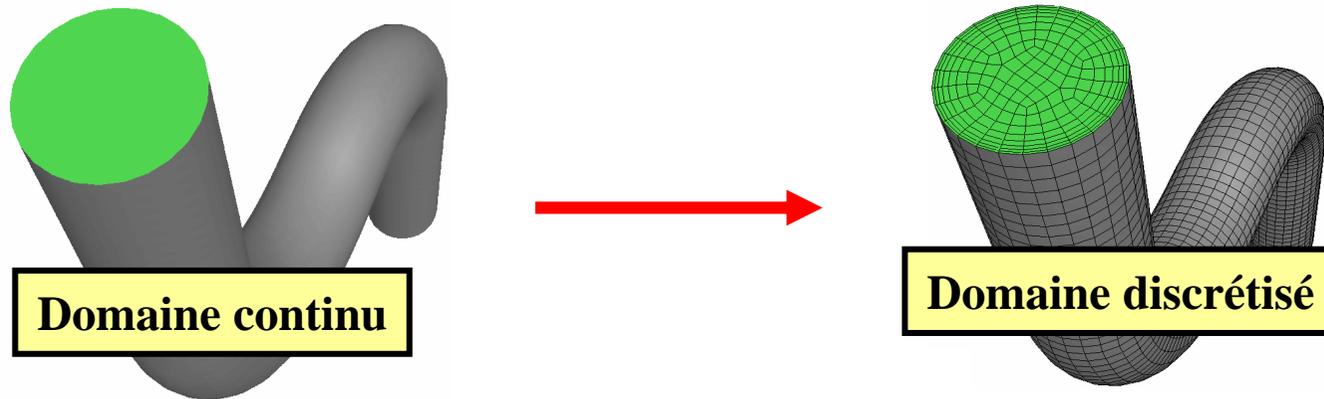
MFN et informatique :

- Pour le même calcul d'écoult d'air autour d'un profil d'aile d'avion :
*1960 : 10 M d'€ et 30 ans de calcul // 1980 : 1000 € et 30 min de calcul
2000 : ce n'est même plus la peine d'en parler ...*
- Pour le même calcul d'écoult d'air dans un séchoir saucisson :
*1993 : 48 h sur station Unix d'un coût de 21 k€
1998 : 15 min sur PC NT d'un coût de 4 k€
2003 : < 10 s sur PC Win2000 d'un coût de 3 k€.*

Un outil – La MFN / CFD (3/5)

Maillage = discrétisation

Transformer le domaine physique pour résoudre les équations décrivant les phénomènes physiques se dit *discrétiser le domaine*



Il y a création de **nœuds de maillage** ou de **cellules**.

L'info. continue de la solution exacte est remplacée par des valeurs discrètes.

EDP (impossible à résoudre) deviennent des équations algébriques (possibles à résoudre).

Un outil – La MFN / CFD (4/5)

Codes de calcul en MFN

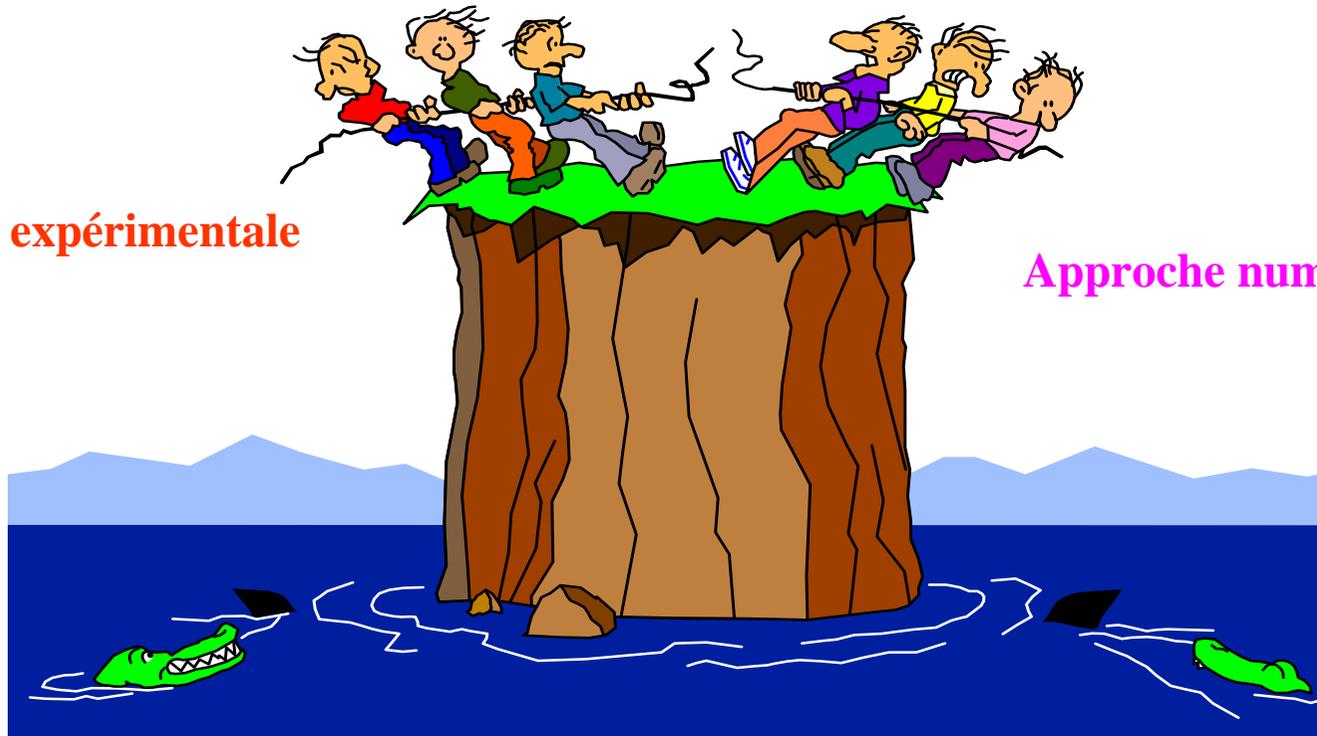
- Un code est structuré autour d'algorithmes numériques permettant de résoudre les problèmes d'écoult régis par les éq. de Navier-Stokes.
- Codes commerciaux MFN/CFD : **Fluent** (50% / 75%), **Fluent**, **Star-CD**, **CFX**...
- Ils contiennent tous 3 éléments :
 - un pré-processeur : création de la géométrie et du domaine de calcul, génération du maillage, définition des phénomènes physiques à modéliser, définition des propriétés des fluides et des solides et transfo. du modèle en une forme utilisable par le solveur
 - un solveur : discrétisation des éq. de conservation gouvernant l'écoult et transformation en éq. algébriques, résolution des éq. algébriques
 - un post-processeur : visu. des résultats sous forme de tracés de champs, tracés de vecteurs, graphes, trajectoires de particules... *Très développé*

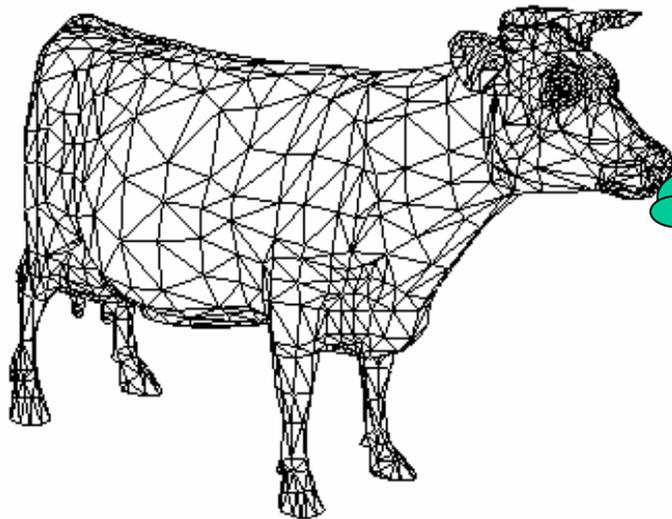
Un outil – La MFN / CFD (5/5)

Attention : Les solutions obtenues par MFN ne sont pas + précises que les modèles physiques sur lesquelles elles sont basées ! Elles se doivent absolument d'être validées, si cela est possible, par des données expérimentales !

Approche expérimentale

Approche numérique





*Merci de votre attention et
j'espère que les "nuls" en
sauront un peu plus et donc,
le seront un peu moins !!!*