

# Knowledge Transfer

Les bases de l'Aérodynamique et de la CFD

Aerodynamics dpt.

2025

FORMULE  
ETS



Hugues PERRIN – A24



# SOMMAIRE

Chapitre 1 : Mécanique des Fluides

Chapitre 2 : Turbulences et Tourbillons

Chapitre 3 : Aérodynamique

Chapitre 4 : Simulation numérique et CFD

# DISCLAIMER

CETTE PRESENTATION ET LA FORMATION QUI PEUT Y ÊTRE ASSOCIÉE NE REPRÉSENTENT PAS LA TOTALITÉ DES CONNAISSANCES A SAVOIR POUR ÊTRE A L'AISE EN AÉRODYNAMIQUE ET EN CFD.

CERTAINS CONCEPTS NE SONT QU'EFFLEURÉS TANDIS QUE D'AUTRES NE SONT MÊME PAS MENTIONNÉS, CELA NE SIGNIFIQUE PAS QU'ILS NE SONT PAS IMPORTANTS OU QU'ILS NE DOIVENT PAS ÊTRE APPROFONDIS.

CETTE PRESENTATION N'A VOCATION QUE DE FOURNIR UNE BASE DE TRAVAIL QUI DOIT ÊTRE APPROFONDIE PAR TOUT PERSONNE SOUHAITANT SE FORMER SÉRIEUSEMENT EN AÉRODYNAMIQUE ET EN CFD. LA RECHERCHE PERSONNELLE A TRAVERS DES ARTICLES SCIENTIFIQUES OU D'AUTRES COURS EST NON SEULEMENT ENCOURAGÉE MAIS RECOMMANDÉE POUR FOURNIR UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DES PHÉNOMÈNES COMPLEXES DE LA MÉCANIQUE DES FLUIDES.

PRATIQUER, QUESTIONNER ET S'EXERCER EST LA MEILLEURE MANIÈRE D'APPRENDRE ET COMPRENDRE.

# Chapitre 1

## Mécanique des Fluides

Aerodynamics dpt.

2025

FORMULE  
ETS



Hugues PERRIN



# MMC : Mécanique des Milieux Continus

À l'échelle moléculaire, la répartition de matière est discontinue (vide inter-atomique) : les propriétés du milieu, qu'il soit solide ou fluide, sont également **DISCONTINUES**

À des échelles supérieures (+ de  $10^{15}$  m) il devient **impossible** d'étudier les variations des propriétés locales

On travaille donc dans des ordres de grandeur **supérieurs** au libre-parcours moyen moléculaire pour faire l'hypothèse d'un milieu **CONTINU**. Ce milieu n'a pas de sens physiquement, il est fictif, mais répond parfaitement aux sollicitations.

Exemple de l'air en atmosphère standard, pour étudier des objets de l'ordre du mètre :

20 km d'altitude ->  $LPMm = 10^{-6}m$

70 km d'altitude ->  $LPMm = 10^{-3}m$

110 km d'altitude ->  $LPMm = 10^0 = 1m$  --> **Modèle MMC inadapté**


# Les fluides et leurs propriétés

## Fluide (matière)

75 langues

Article Discussion

Lire Modifier Modifier le code Voir l'historique Outils

 Pour les articles homonymes, voir [Fluide](#).

Un **fluide** est un [milieu matériel](#) parfaitement [déformable](#). On regroupe sous cette appellation les [liquides](#), les [gaz](#) et les [plasmas](#). Gaz et plasmas sont très [compressibles](#), tandis que les liquides le sont très peu (à peine plus que les [solides](#)).

### Propriétés **Mécaniques** :

- Compressibilité
- Viscosité
- Masse volumique
- Rhéologie (déformation)
- [...]

### Propriétés **Thermiques** :

- Capacité thermique
- Expansion thermique
- Conductivité thermique
- Énergie interne
- [...]

**ENTITÉ TRÈS  
COMPLEXE**



# Les fluides et leurs propriétés

## *La masse volumique / densité*

La **masse volumique** d'une **substance**, aussi appelée **densité volumique de masse**, est une **grandeur physique** qui caractérise la **masse** de cette substance par unité de **volume**<sup>1</sup>. C'est l'inverse du **volume massique**. La masse volumique est synonyme des expressions désuètes « densité absolue », « densité propre »<sup>2</sup>, ou encore « masse spécifique ». Unité S.I. : **kg. m<sup>-3</sup>**

La densité ( $\rho$ ) d'un fluide dépend de sa compressibilité : un fluide **sous pression** voit sa densité **augmenter** selon son coefficient de compressibilité ( $\chi_T ; Pa^{-1}$ )

Un liquide (eau, huile, alcool) est généralement considéré **INCOMPRESSIBLE**

Un gaz (vapeur, air ambiant, oxygène) est considéré :

- **Incompressible** à faible vitesse
- **Compressible** pour des vitesses plus élevées (>100 m/s)

Gaz à 0 °C	Formule	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ou g/l)
acétylène	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,170
air	-	1,293
air à 20 °C	-	1,204
hexafluorure de soufre à 20 °C	SF <sub>6</sub>	6,164
ammoniac	NH <sub>3</sub>	0,77
argon	Ar	1,783
diazote	N <sub>2</sub>	1,250
isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,670
butane (linéaire)	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,700
dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	1,804
vapeur d'eau à 100 °C	H <sub>2</sub> O	0,597

Liquides	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
acétone	790
acide acétique	1 049
azote liquide à -195 °C	810
brome à 0 °C	3 087
eau à 4 °C	1 000 <sup>13</sup>
eau de mer	1 000–1 032 <sup>14</sup>
essence	750
éthanol	789

# Les fluides et leurs propriétés

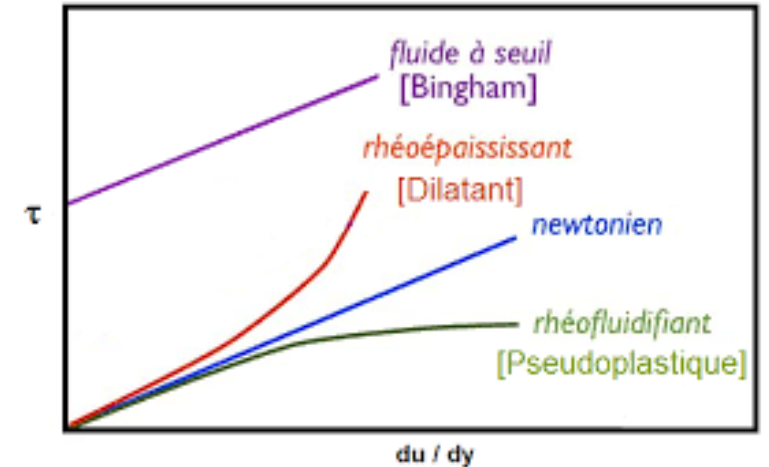
## *La rhéologie – lois de déformation*

La **rhéologie** (du **grec ancien** : ῥέω / *rhéō*, « couler » et λόγος / *lógos*, « étude ») est l'étude de la **déformation** et de l'écoulement de la **matière** sous l'effet d'une **contrainte** appliquée.

Les fluides sont catégorisés de 2 manières selon leur réponse aux contraintes :

- Les fluides **Newtoniens**, la majorité, ont une réponse linéaire
- Les fluides **non-Newtoniens** (rhéofluidifiant, rhéoépaississant, [...])

Dans le cas des fluides newtoniens, la proportionnalité de cette réponse linéaire est caractérisée par la **viscosité** et par une **équation de Navier-Stokes**



$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left( \vec{v} \cdot \vec{\text{grad}} \right) \vec{v} = - \frac{\vec{\text{grad}} P}{\rho} + \vec{f}_m + \nu \Delta \vec{v}$$



# Les fluides et leurs propriétés

## *La viscosité*

La **viscosité** (du latin *viscum*, « **gui** » ou « **glu** ») peut être définie comme l'ensemble des phénomènes de résistance au mouvement d'un **fluide** pour un écoulement avec ou sans **turbulence**. La viscosité diminue la liberté d'écoulement du fluide et dissipe son énergie.

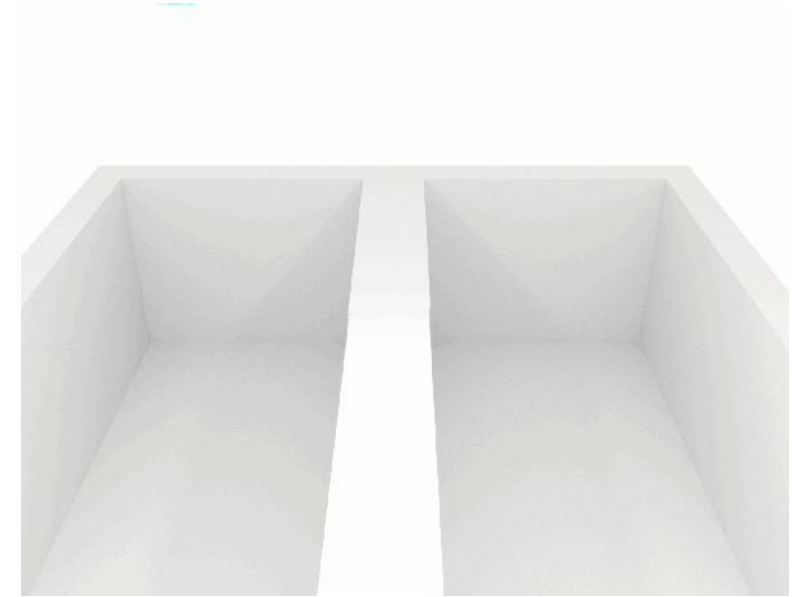
Unité S.I. : **Pa.s (dynamique) – m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> (cinématique)**

La viscosité d'un fluide ( $\mu$  (dynamique)  $\nu$  (cinématique)) dépend majoritairement de la température du fluide. Gaz et Liquides réagissent inversement à une élévation de la température

Un **fluide parfait** est un fluide dont on néglige la viscosité.

Un fluide visqueux est un **fluide réel**.

La viscosité est un facteur **PRINCIPAL** dans l'apparition de turbulences, la résistance du fluide (i.e. de l'air)

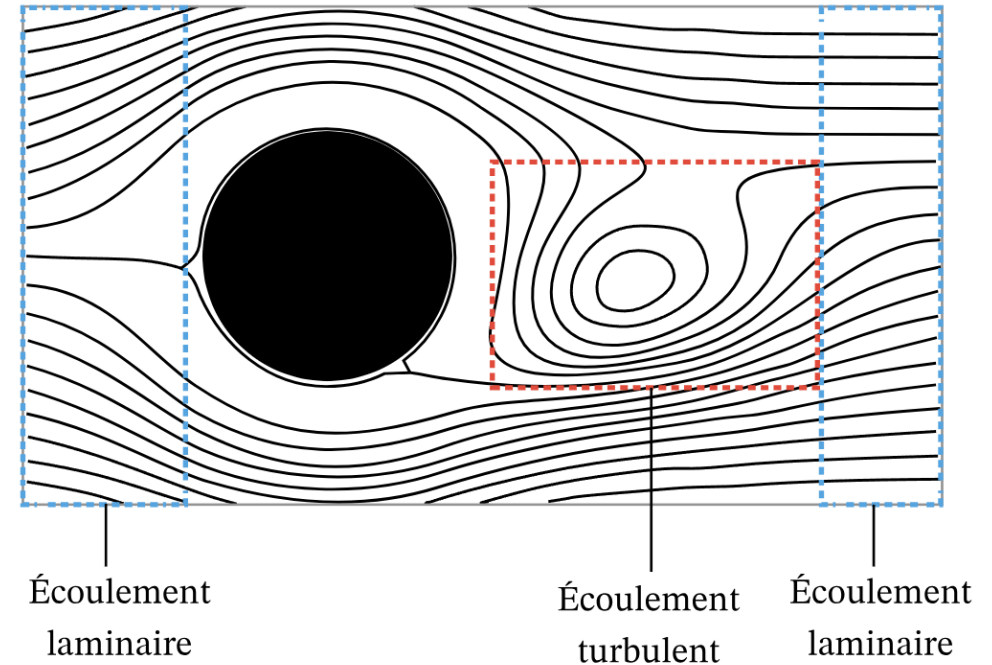
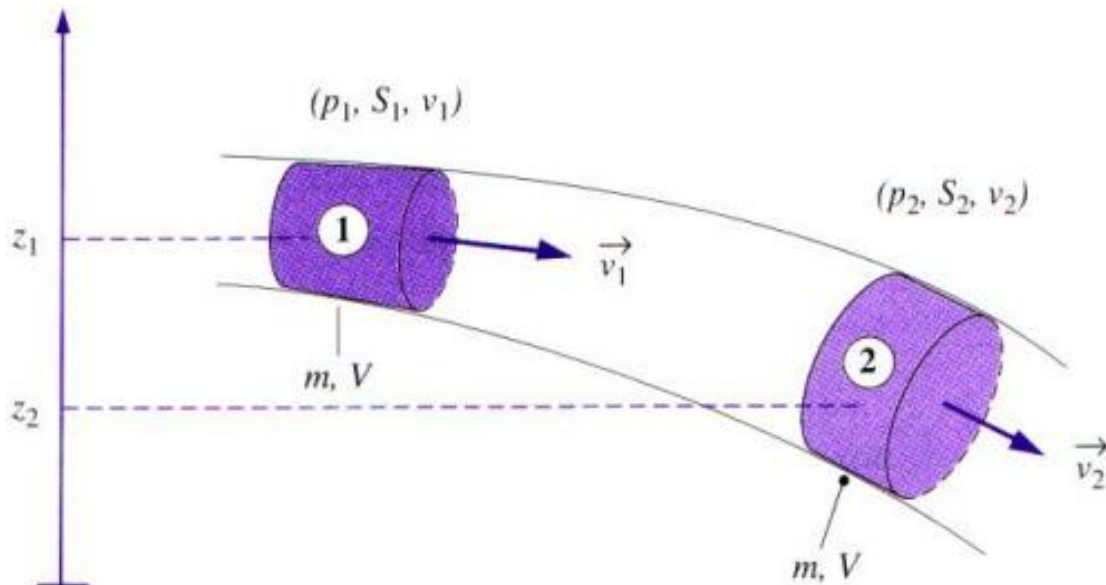


$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

# Écoulements de fluides

Un fluide qui n'est soumis à aucune force, différentiel de pression ou contrainte est **au repos**

Un fluide qui n'est pas au repos présente un **écoulement** de sa matière



# Écoulements de fluides

L'écoulement d'un fluide newtonien est régi par les équations de Navier-Stokes

Il n'existe pas de solution exacte aux équations de Navier-Stokes, son existence n'est du moins pas prouvable



## Navier-Stokes Equations 3 - dimensional - unsteady

Glenn  
Research  
Center

Coordinates: (x,y,z)	Time : t	Pressure: p	Heat Flux: q
Velocity Components: (u,v,w)	Density: ρ	Stress: τ	Reynolds Number: Re
	Total Energy: Et		Prandtl Number: Pr

**Continuity:** 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

**X - Momentum:** 
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

**Y - Momentum:** 
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

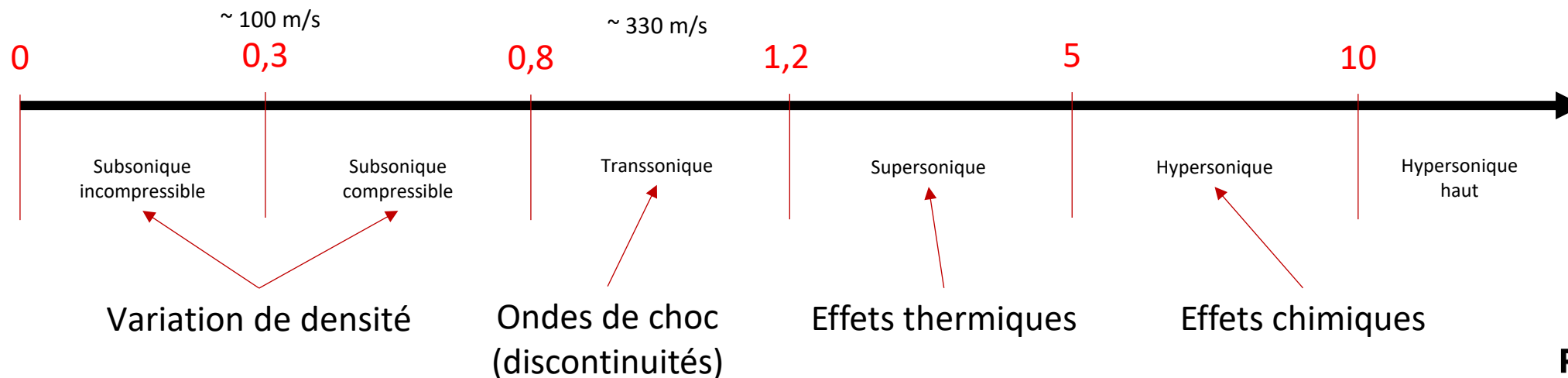
**Z - Momentum** 
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

# Propriétés des écoulements

## *Nombre de Mach (écoulement autour d'un objet)*

Le **nombre de Mach** est un **nombre sans dimension**, noté  $Ma$ , qui exprime le rapport de la **vitesse** d'un objet dans un **fluide** à la **vitesse du son** dans ce même fluide. La vitesse du son dans un gaz variant avec sa nature et sa **température** (dans l'air à 15°C, elle est d'environ  $340 \text{ m s}^{-1}$  soit  $1\,224 \text{ km h}^{-1}$ ), **le nombre de Mach ne correspond pas à une vitesse fixe.**

Le nombre de Mach permet de faire des hypothèses critiques sur le fluide en écoulement :

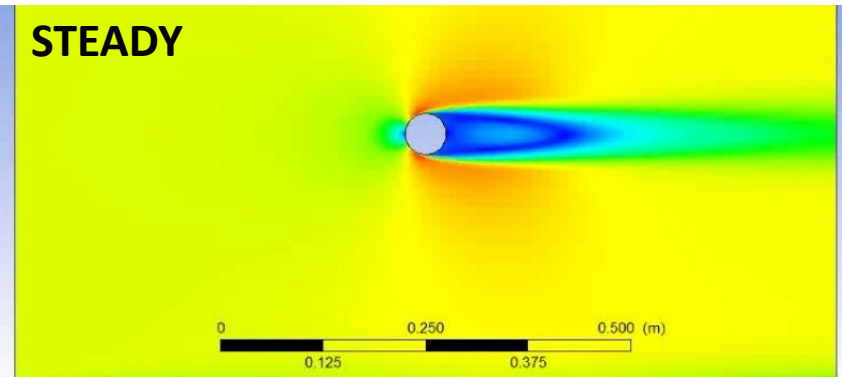
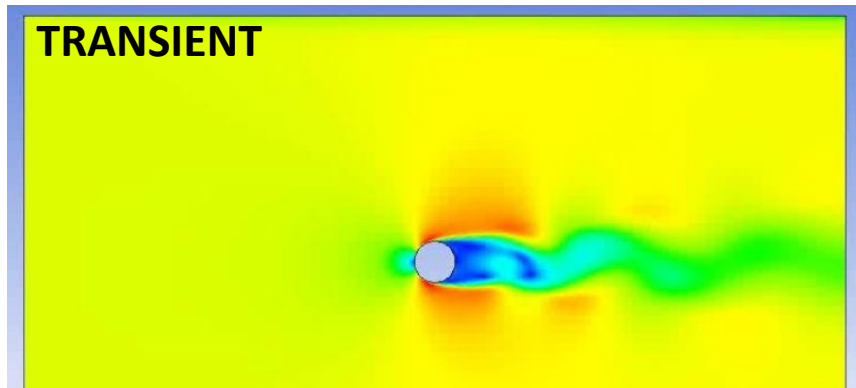


# Propriétés des écoulements

## *Influence du temps*

Tous les écoulements instationnaires sont dépendants du temps : ils sont physiquement **transitoires**

Dans certains cas, cette influence peut être négligée ce qui simplifie grandement la résolution des équations de Navier-Stokes ou des autres équations analytiques de la mécanique des fluides, on parle d'écoulement **permanent établi**



# Propriétés des écoulements

## *Nombre de Reynolds*

Le régime d'écoulement d'un fluide est caractérisé par son nombre de Reynolds.

En [mécanique des fluides](#), le **nombre de Reynolds**, noté  $Re$ , est un [nombre sans dimension](#) caractéristique de la [transition laminaire-turbulent](#). Il est mis en évidence en 1883 par [Osborne Reynolds](#).

Le nombre de Reynolds est adimensionnel et représente le **rapport des forces d'inerties sur les forces visqueuses** :

$$\text{En écoulement 3D : } Re = \frac{\rho |[\vec{v} \cdot \text{grad}] \vec{v}|}{\mu |\Delta \vec{v}|}$$

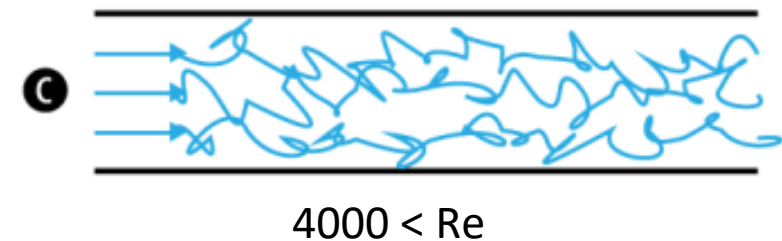
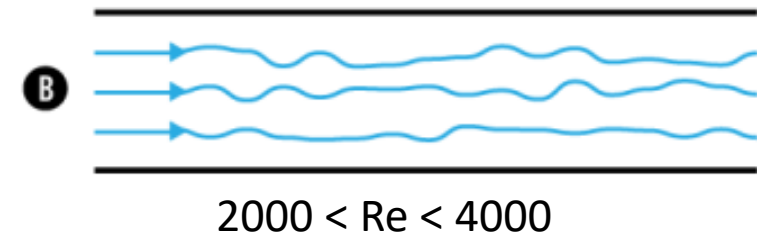
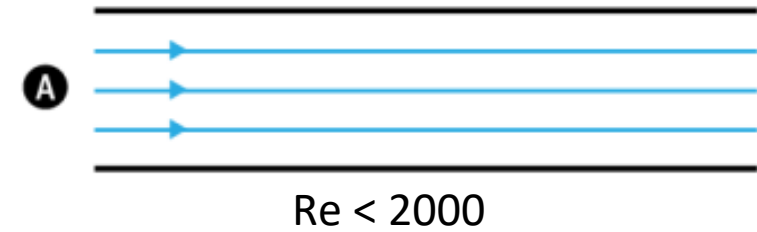
$$\text{En écoulement 1D : } Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$



# Propriétés des écoulements

## *Nombre de Reynolds*

- A** L'écoulement est **laminaire**  
Les couches de fluides sont **parallèles** et **ne se mélangent pas**
- B** L'écoulement est **transitionnel**  
L'écoulement bascule entre un régime turbulent et laminaire
- C** L'écoulement est **turbulent**  
Les couches de fluides **se mélangent de manière chaotique**



# Propriétés des écoulements

## *Éléments de turbulence*

La turbulence ou l'écoulement turbulent est un régime d'écoulement caractérisé par des changements chaotiques de pression et de vitesse d'écoulement. La turbulence est causée par **l'excès d'énergie cinétique** dans certaines parties de l'écoulement du fluide, l'énergie cinétique en excès venant **contrecarrer l'effet d'amortissement** apporté par la viscosité du fluide

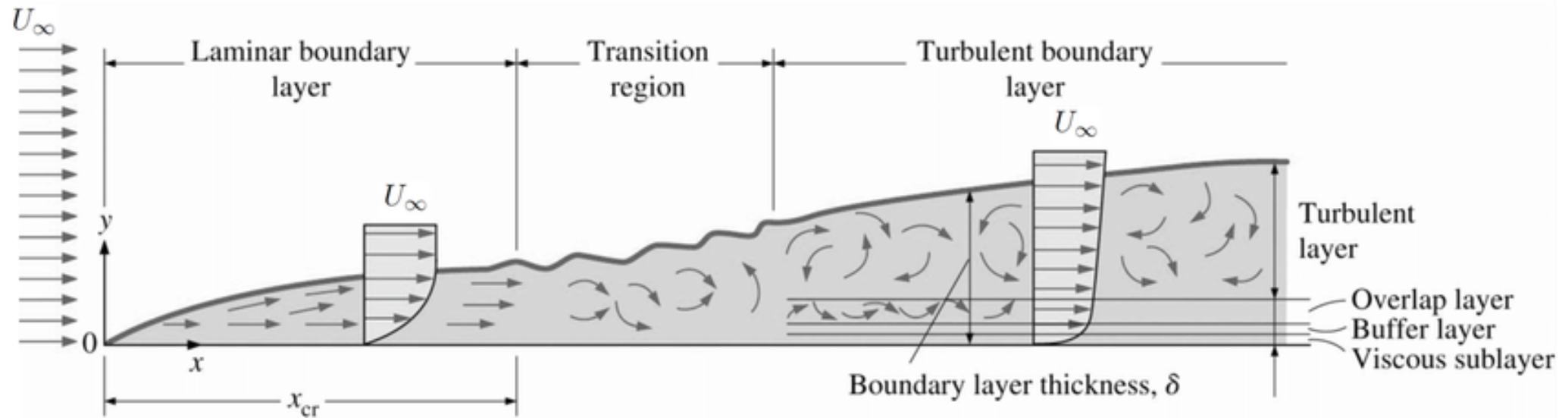
Un écoulement **porte** et **dissipe** l'énergie cinétique.

Un écoulement turbulent est par nature instable, et tend à se stabiliser par l'effet de **cascade turbulente** qui est à l'origine de la dégénérescence des cyclones tropicaux, ou de la **disparition du sillage**. Le sillage (**wake effect**) n'est cependant pas systématiquement tourbillonnaire et ne symbolise que la **perturbation causée dans le fluide par un objet s'y déplaçant**.

# Introduction à la Couche Limite

## *Définitions*

La couche limite est la partie du fluide qui est aérodynamiquement affectée par la **présence d'une surface**. L'altération de la vitesse du fluide est causée par le **frottement** entre celui-ci et la surface.

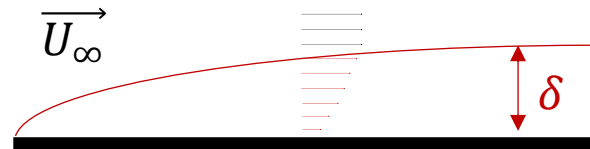


# Introduction à la Couche Limite

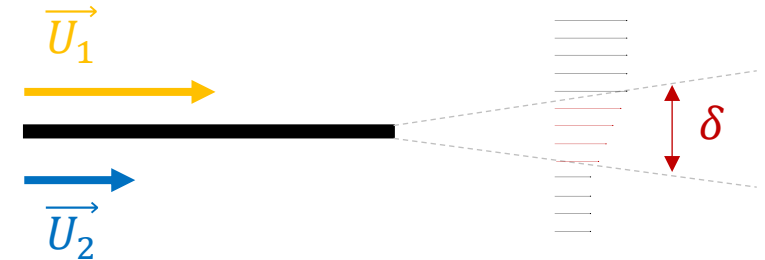
## *Couche limite laminaire*

La couche limite est une zone de transition entre deux régions du fluide dont la **vitesse est différente**, ou variable. Elle se développe à partir d'un **point d'arrêt**. C'est la zone dans laquelle s'opèrent les **transferts** de quantité de mouvement, de chaleur et de masse. Il en existe plusieurs types.

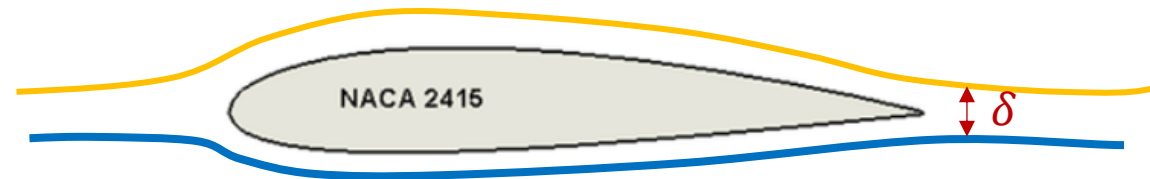
### 1. La couche limite **pariétale**



### 2. Les zones de mélanges

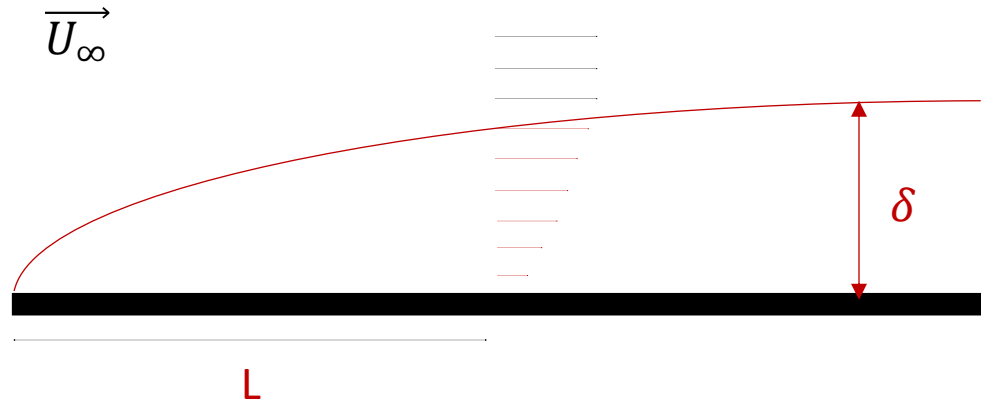


### 3. Les sillages



# Introduction à la Couche Limite

## *Couche limite transitionnelle – Plaque plane*

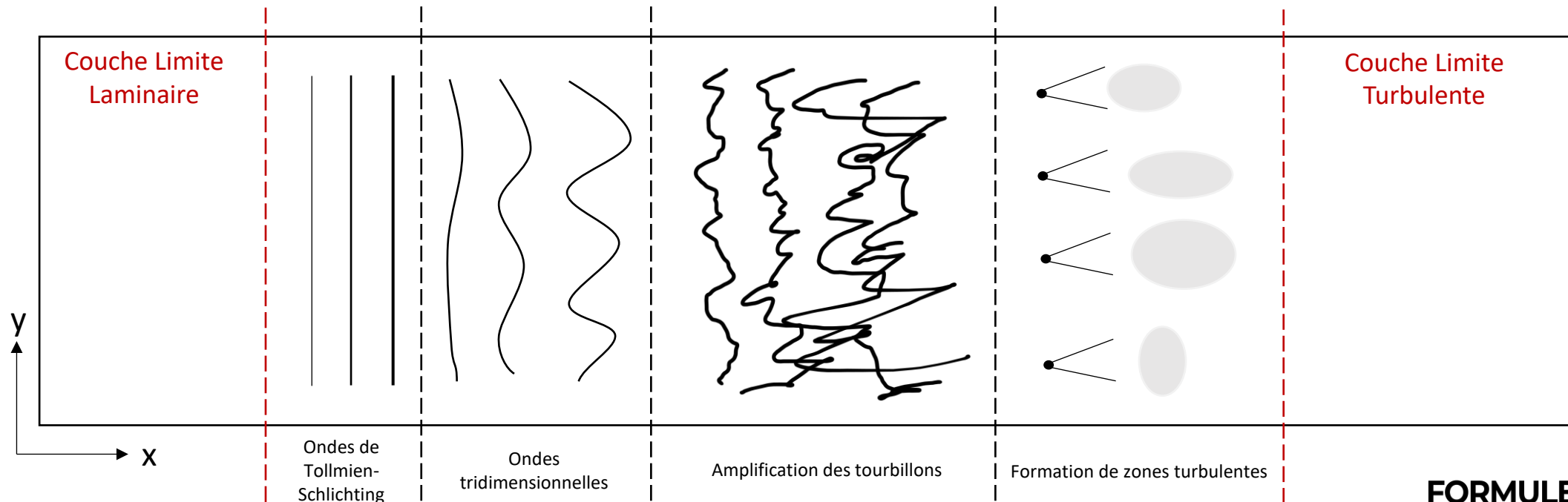


$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$  implique que si  $L$  augmente,  $Re$  augmente

# Introduction à la Couche Limite

## *Couche limite transitionnelle*

La couche limite laminaire peut dégénérer en une **couche limite turbulente** si les gradients de pression lui sont trop défavorables. Cette transition n'est pas ponctuelle et apparaît graduellement.

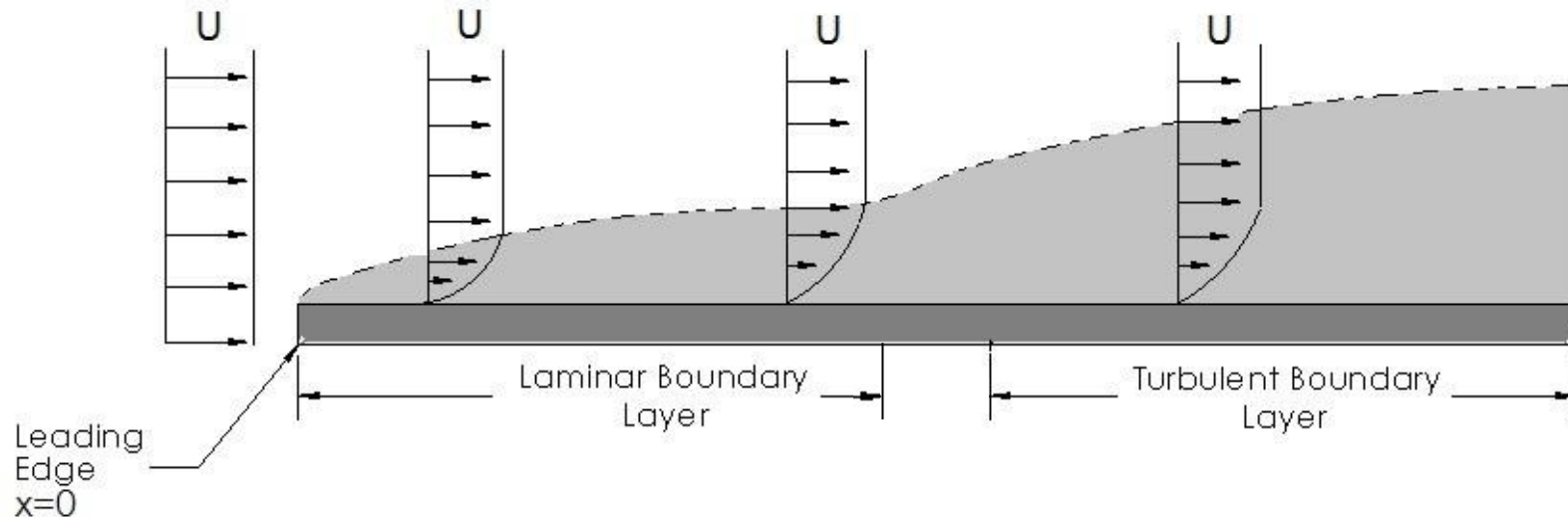




# Introduction à la Couche Limite

## *Couche limite turbulente*

Après transition, la couche limite peut devenir **turbulente** si elle reste **attachée à une surface**. Le fluide y contient donc **plus d'énergie**, ce qui **augmente les frottements** entre le fluide et l'objet dans l'écoulement. Le développement de la couche limite turbulente adopte des lois différentes de la couche limite laminaire.



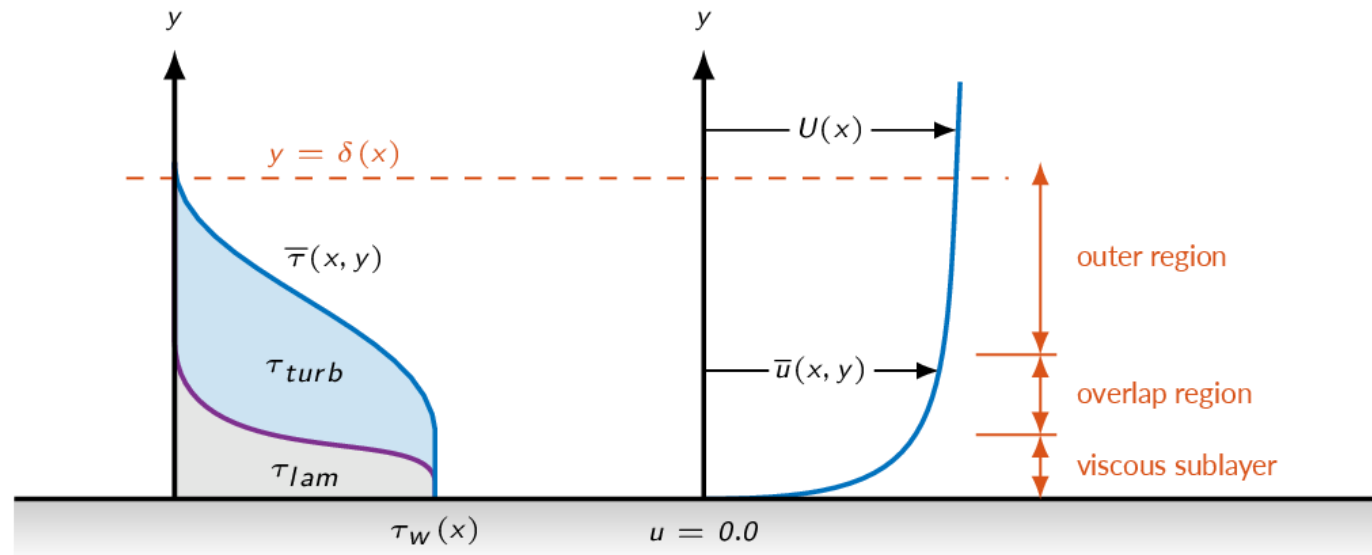
# Introduction à la Couche Limite

## *Couche limite turbulente*

Après transition, la couche limite peut devenir **turbulente** si elle reste **attachée à une surface**. Le fluide y contient donc **plus d'énergie**, ce qui **augmente les frottements** entre le fluide et l'objet dans l'écoulement. Le développement de la couche limite turbulente adopte des lois différentes de la couche limite laminaire.

La sous-couche visqueuse se comporte comme une couche limite laminaire, on parle de **sous couche-laminaire**.

$\tau$  représente la **contrainte pariétale** due au frottement du fluide sur l'objet.



# Décollement / Décrochage

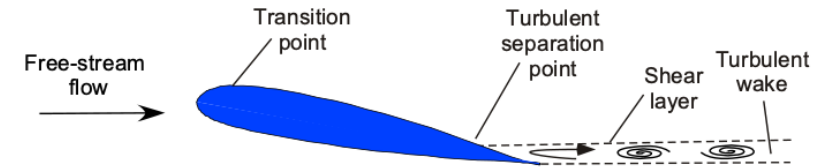
## Définitions

On parle de décollement quand il y a **séparation** de la couche limite et de la surface en contact de l'écoulement.

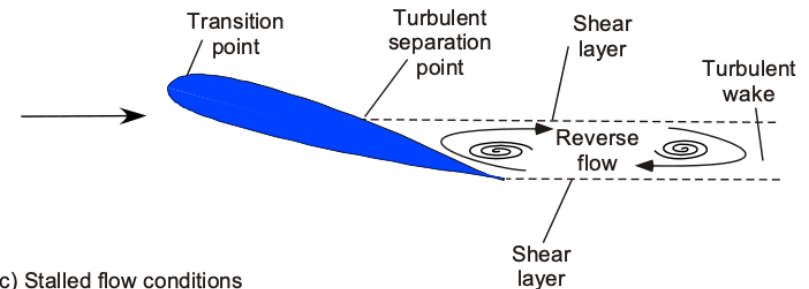
On parle de décrochage quand il y a une perte de portance (ou de propriétés aérodynamiques), généralement dû à un **décollement généralisé** de la surface résultant en une perte de contrôle de l'appareil.

Un décollement n'est pas forcément un décrochage

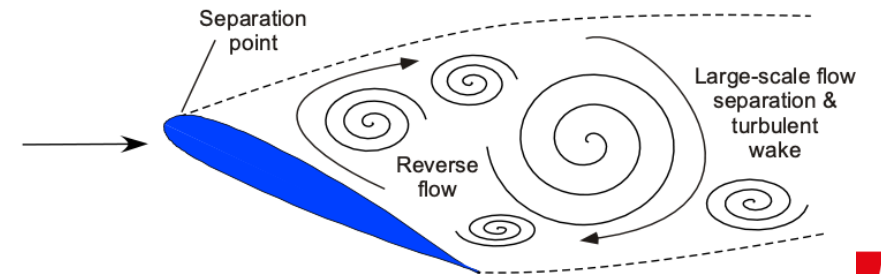
(a) Lower angle of attack



(b) Higher angle of attack



(c) Stalled flow conditions



# Chapitre 2

## Turbulence et Tourbillons

Aerodynamics dpt.

2025

FORMULE  
ETS



# Définitions

## *Tourbillon*

Un **tourbillon** est, en [dynamique des fluides](#), une région d'un fluide dans laquelle l'écoulement est principalement un mouvement de rotation autour d'un axe, rectiligne ou incurvé. Ce type de mouvement s'appelle écoulement tourbillonnaire.

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2}\vec{\omega} = \frac{1}{2}\overrightarrow{\text{rot}} \vec{V}$$

Lorsque le vecteur tourbillon est nul en tout point, on parle d'écoulement non tourbillonnaire (ou irrotationnel). Lorsqu'il est non nul dans une région, l'écoulement est dit tourbillonnaire.

# Définitions

## *Turbulence*

La **turbulence** désigne l'état de l'écoulement d'un **fluide**, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire : **tourbillons** dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment.

$$\text{Turbulent si } Re = \frac{\rho V L}{\mu} > 2000$$

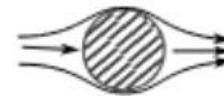
Un écoulement turbulent est tourbillonnaire.

Un écoulement tourbillonnaire n'est pas forcément turbulent

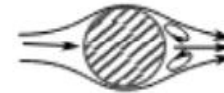


# Tourbillons en régime laminaire

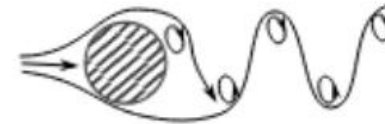
## *Allées de Von Karman*



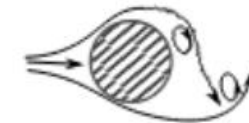
$Re < 5$   
Sillage attaché



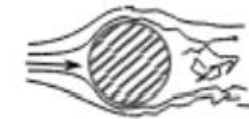
$5 < Re < 40$   
Tourbillons contra-rotatifs  
stationnaires



$40 < Re < 150$   
Allées de Von Karman laminares



$150 < Re < 300$   
Transition vers la turbulence  
des allées de Von Karman



$300 < Re < 3 \cdot 10^5$   
Allées de Von Karman turbulentes



$3 \cdot 10^5 < Re < 3.5 \cdot 10^5$   
Sillage désorganisé et moins large

$3.5 \cdot 10^5 < Re$   
Réapparition des allées de  
Von Karman turbulentes

# Échelles de la turbulence

## *Influence de Reynolds*

« Tous les écoulements laminaires sont turbulents, tous les écoulements turbulents sont laminaires »

$$\text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Vitesse →  $V$   
Densité →  $\rho$   
Viscosité →  $\mu$

**L** : échelle d'observation de l'écoulement

# Échelles de la turbulence

## *Influence de Reynolds*

« Tous les écoulements laminaires sont turbulents, tous les écoulements turbulents sont laminaires »



MAIS



Faire varier l'échelle d'observation fait varier la nature de l'écoulement

# Échelles de la turbulence

## Utilisation du nombre de Reynolds

Deux écoulements sont comparables si ils ont le même Reynolds :



$$\begin{aligned}\rho &= 1,220 \text{ kg.m}^{-3} \\ \mu &= 1,825 * 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}\text{s}^{-1} \\ V &= 16 \text{ m.s}^{-1} \\ L &= 2 \text{ m} \\ \text{Re} &= 2\,139\,178\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\rho &= 1,220 \text{ kg.m}^{-3} \\ \mu &= 1,825 * 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}\text{s}^{-1} \\ V &= \cancel{16} \text{ m.s}^{-1} \quad 160 \text{ m.s}^{-1} \\ L &= \cancel{0,2} \text{ m} \\ \text{Re} &= \cancel{213\,917} \quad 2\,139\,178\end{aligned}$$



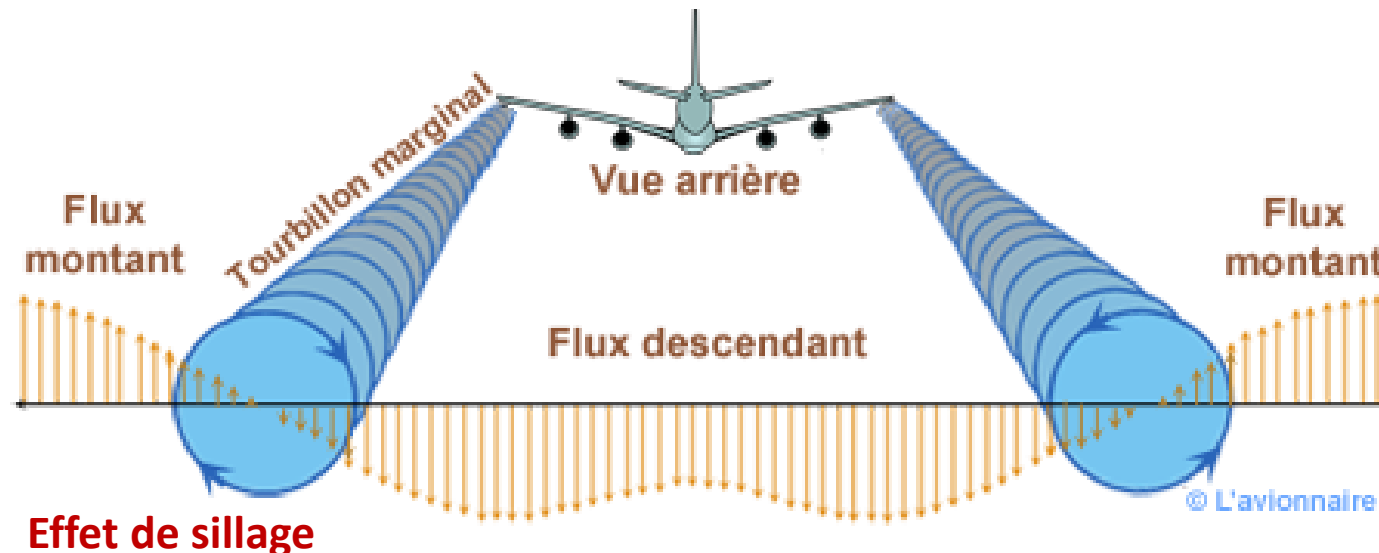
$$\begin{aligned}\rho &= 1000 \text{ kg.m}^{-3} \\ \mu &= 1 * 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}\text{s}^{-1} \\ V &= 10,7 \text{ m.s}^{-1} \\ L &= 0,2 \text{ m} \\ \text{Re} &= 2\,140\,000\end{aligned}$$

# Effets de la turbulence

## *Influence sur la traînée*

Les turbulences, du fait de leur caractère aléatoire, **augmentent les trainées de surface** liées à la friction entre l'air et l'objet. Elles créent également un **effet de sillage** plus important augmentant sensiblement la traînée de pression de l'objet tout en détériorant les qualités aérodynamiques de l'air (**dirty air**).

A contrario, une bonne gestion des turbulences et tourbillons peut aider à **réduire la traînée de pression**.



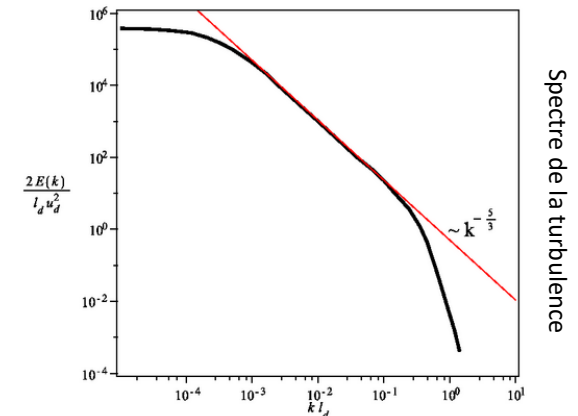


# Effets de la turbulence

## *Dissipation d'énergie cinétique*

La **cascade turbulente** est une forme de transfert d'énergie entre les tourbillons à grande **énergie cinétique** et les plus petits qui absorbent et dissipent celle-ci. Ce mécanisme est à l'origine du spectre d'énergie turbulente dans un écoulement.

**Lewis Fry Richardson** a décrit qualitativement en 1922 le processus par lequel un tourbillon cède de l'énergie à des tourbillons plus petits. Ce processus, appelé « cascade de Richardson », concerne les échelles où les termes inertiels sont dominants et où le transfert d'énergie s'effectue par l'intermédiaire des termes non-linéaires des équations. L'équilibre production-dissipation entraîne l'**auto-similarité** du phénomène pour la partie centrale du spectre d'énergie.





# Contrôle de la turbulence par les tourbillons

## *Générateurs de vortex*

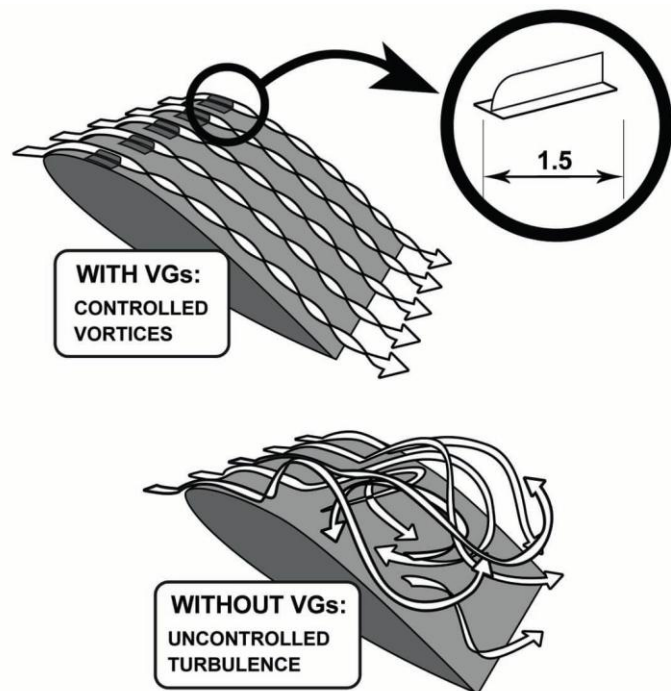
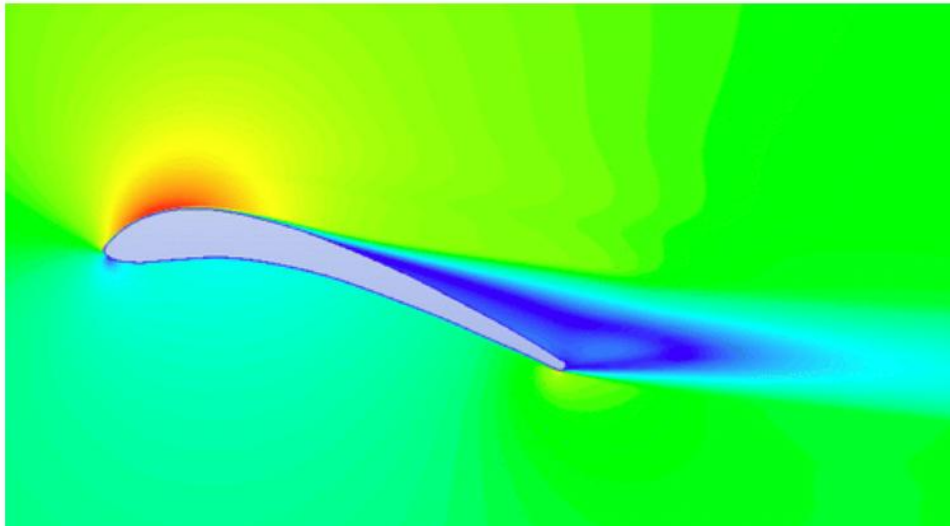


Image Courtesy of Micro AeroDynamics, Inc.

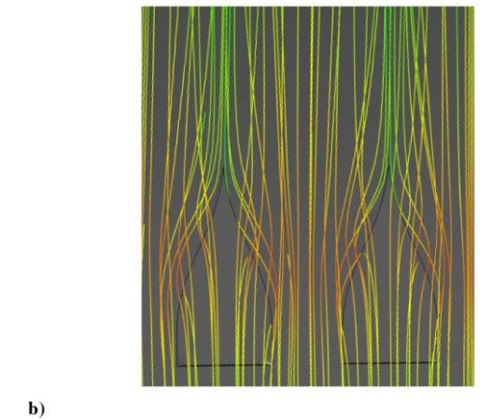
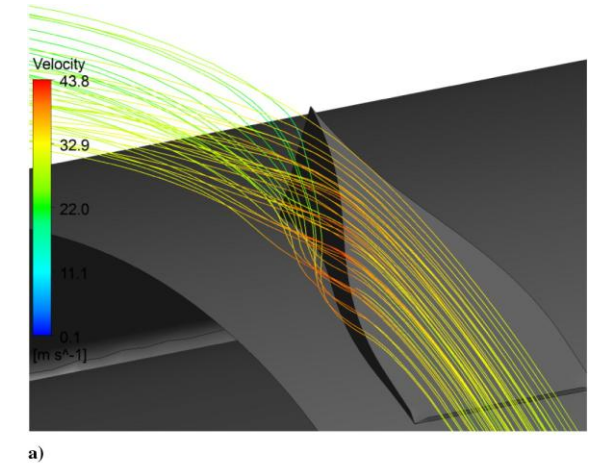
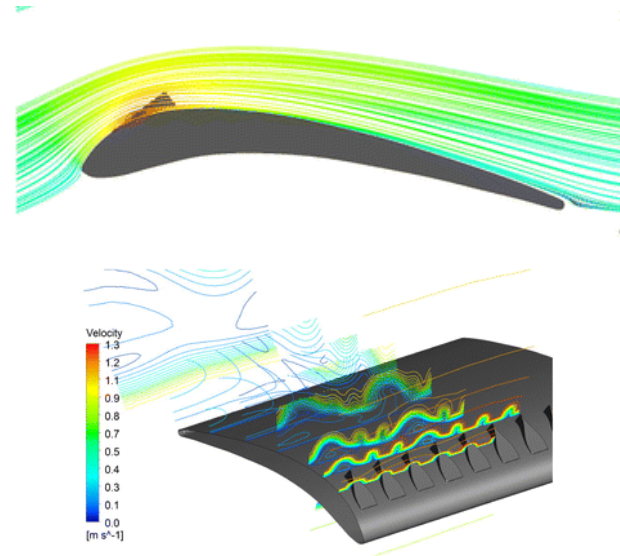


# Contrôle de la turbulence par les tourbillons

## *Générateurs de vortex*



Overall, it was found that the effects of the vortex generators could be distinctly qualified from a flowfield point of view, allowing for further application of the model to other scenarios. In particular, the gains produced by the vortex generators on this highly cambered wing were more substantial than those noted by others on less cambered airfoils. As such, it is likely that the generators will have substantial impact on wings with flaps or multi-element wings because they have similar overall flow properties to highly cambered wings. The findings from this research may also be further applied to development of vortex generator systems for practical wings without having to model entire aircraft to establish a theoretical basis.



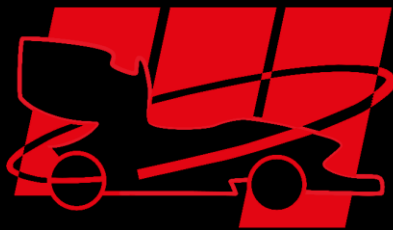
# Chapitre 3

## Aérodynamique

Aerodynamics dpt.

2025

FORMULE  
ETS





# Types d'ailes et de profils

## *Définitions d'une aile*

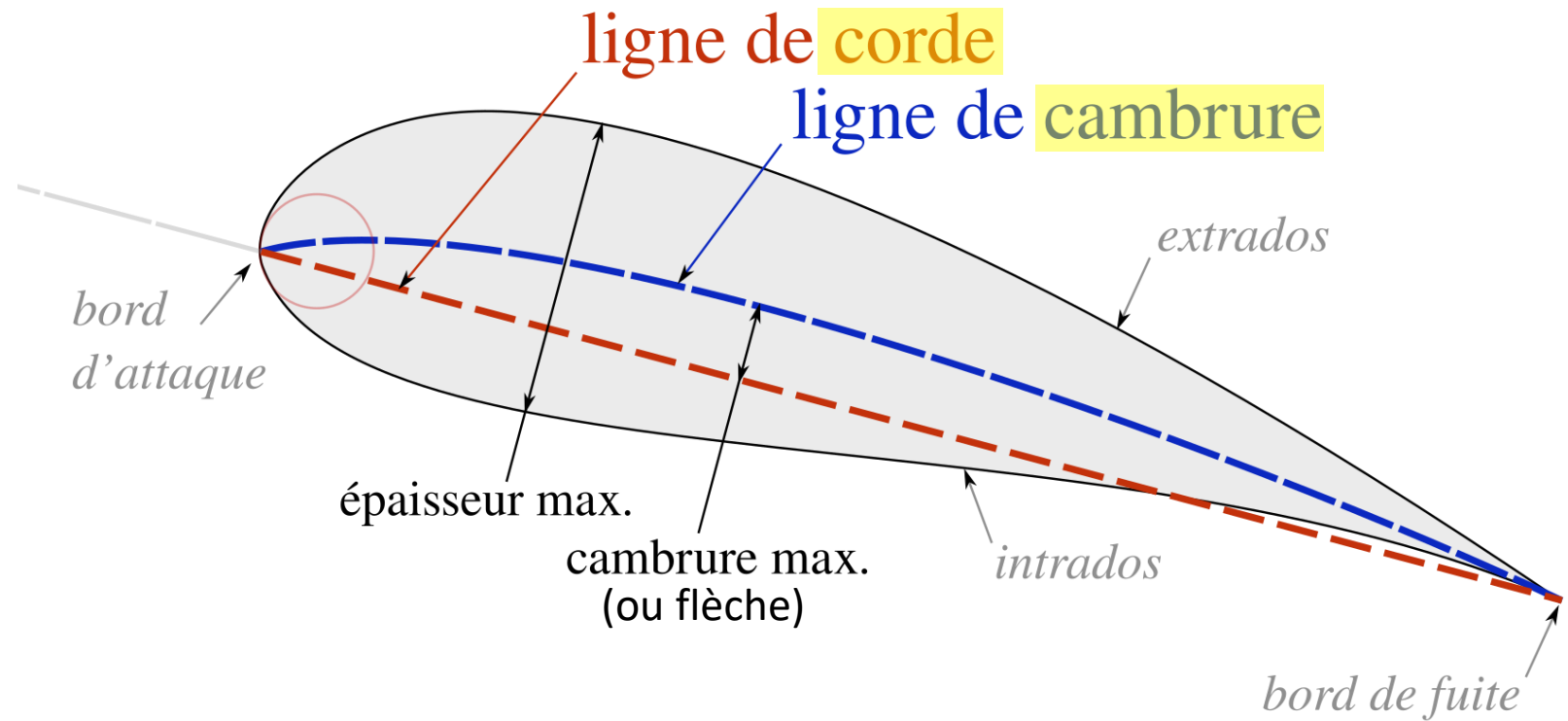
**Corde** : ligne droite reliant le bord d'attaque au bord de fuite

**Cambrure** : ligne équidistante à l'intrados et l'extrados reliant le bord d'attaque au bord de fuite

**Intrados** : côté du profil soumis à une pression relative positive

**Extrados** : côté du profil soumis à une pression relative négative

**Flèche** : distance maximale entre la ligne de corde et de cambrure



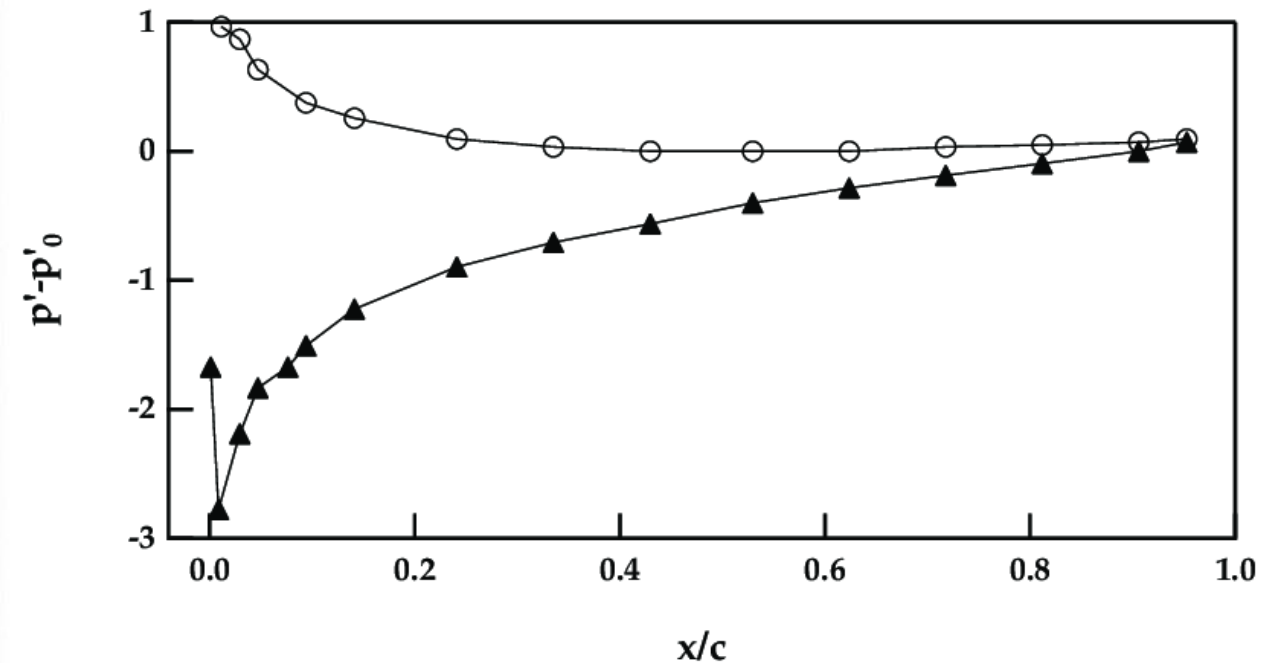
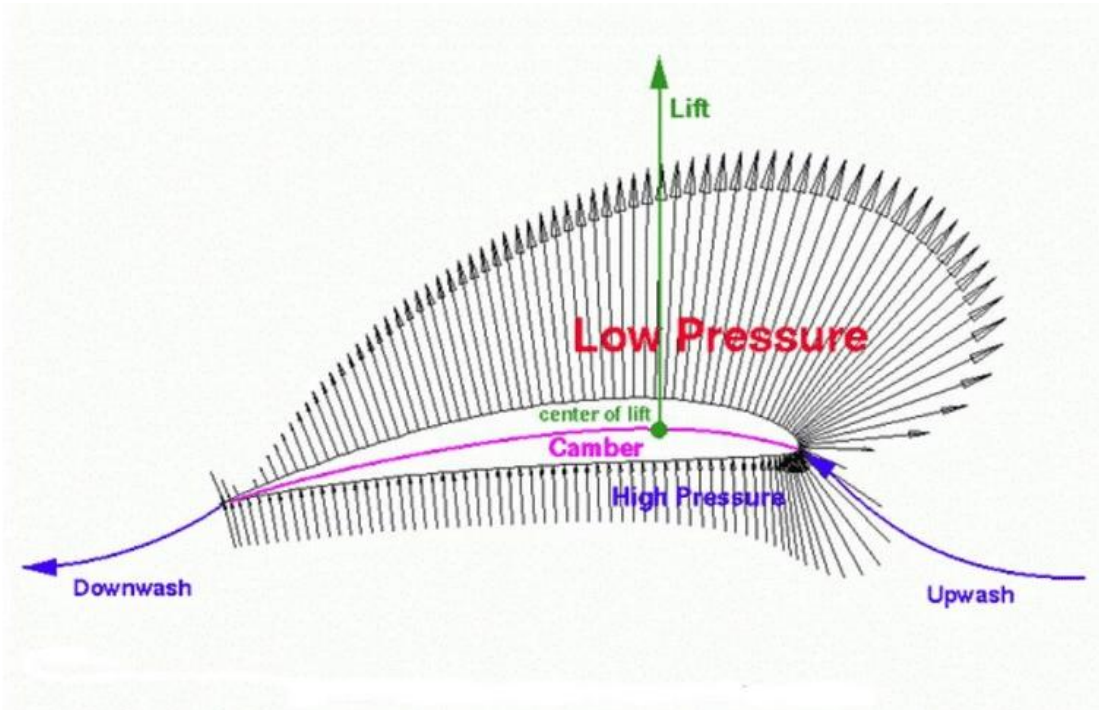
# Fonctionnement d'une aile

*Approche par pression*

$$\Delta P = \frac{F}{S}$$



$$\Delta P \cdot S = F$$



# Fonctionnement d'une aile

## *Théorème de Kutta-Joukowski*

L'approche de **Kutta-Joukowski** s'affranchit de la formulation par pression en proposant une définition de la portance impliquant la vitesse, sa circulation et la densité tel que, dans un écoulement **potentiel** :

$$L' = \rho V_{\infty} \Gamma \quad \Gamma = \oint_C \vec{V} \cdot d\vec{l}$$

$L'$   
 $\rho$   
 $V_{\infty}$   
 $\Gamma$

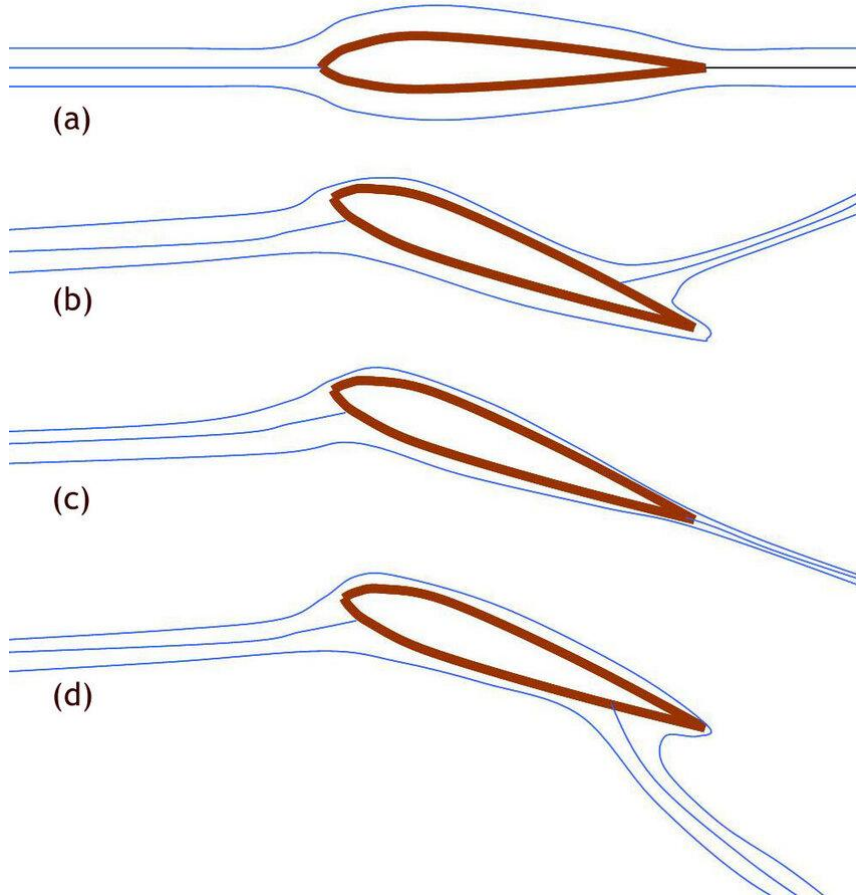
La portance par unité d'envergure  
La masse volumique du fluide  
La vitesse de l'écoulement libre  
La circulation de la vitesse autour du profil

La portance n'est **pas seulement due à une différence de pression** mais découle d'un **mouvement global du fluide** autour de l'aile, modélisé par la circulation. Cette circulation peut être vue comme un **tourbillon** fixé au profil, qui accélère le flux sur l'extrados et le ralentit sur l'intrados.



# Fonctionnement d'une aile

## *Condition de Kutta-Joukowski*



(a) : **Respecte la condition de Kutta (pas de circulation)**

(b) : **Ne respecte pas la condition de Kutta**

(c) : **Respecte la condition de Kutta**

(d) : **Ne respecte pas la condition de Kutta**

La condition de Kutta représente une solution mathématique **unique** pour un écoulement. Elle impose une réalité physique à l'écoulement au niveau du **bord de fuite**

# Écoulements potentiels

## *Définition*

En **mécanique des fluides**, la **théorie des écoulements à potentiel de vitesse** est une théorie des écoulements de fluide où la **viscosité** est négligée. Elle est très employée en **hydrodynamique**.

La théorie se propose de résoudre les **équations de Navier-Stokes** dans les conditions suivantes :

- l'écoulement est stationnaire
- le fluide n'est pas visqueux
- il n'y a pas d'action externe (flux de chaleur, **électromagnétisme**, gravité ...)

Les écoulements potentiels sont un **outil** qui permet de calculer facilement et analytiquement des **profils de vitesse** dans des cas **simples** de mécanique des fluides.



# Écoulements potentiels

## *Théorème de Bernoulli*

La théorie des écoulements potentiels conduit à une version simplifiée de l'équation de Bernoulli :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z = cste$$

Dans le cadre d'un écoulement incompressible ( $\rho$  constant) et stationnaire,  
si la pression baisse, la vitesse augmente.

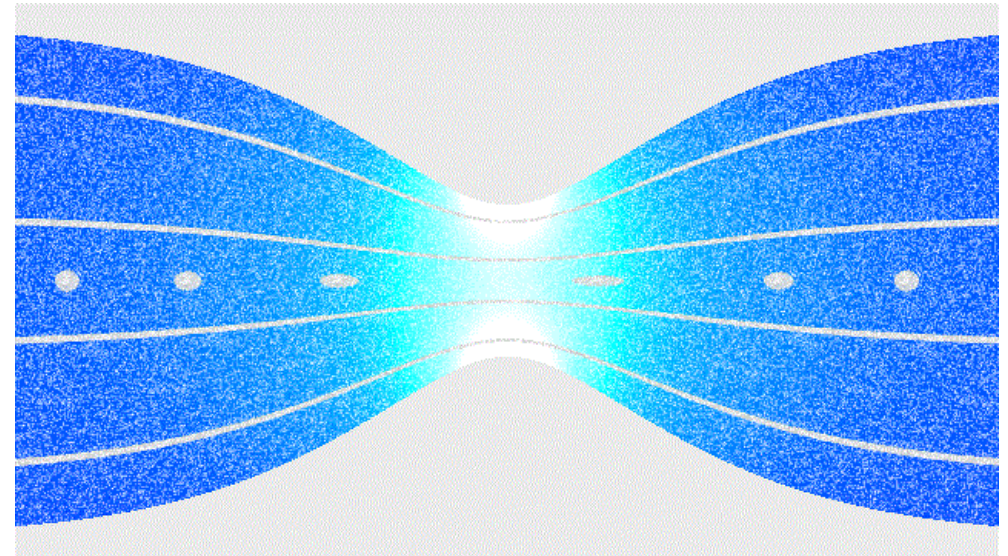
# Extension du théorème de Bernoulli

## *Application à l'effet de sol – Effet Venturi*

L'équation de Bernoulli est généralisable à tous les écoulements incompressibles, dont ceux en canalisations.

En négligeant les pertes de charge, en faisant l'hypothèse de la conservation du débit-masse et en utilisant l'équation de Bernoulli, on peut déduire que la vitesse de l'écoulement dépend :

- De sa vitesse et section initiale
- **De la section de la canalisation**



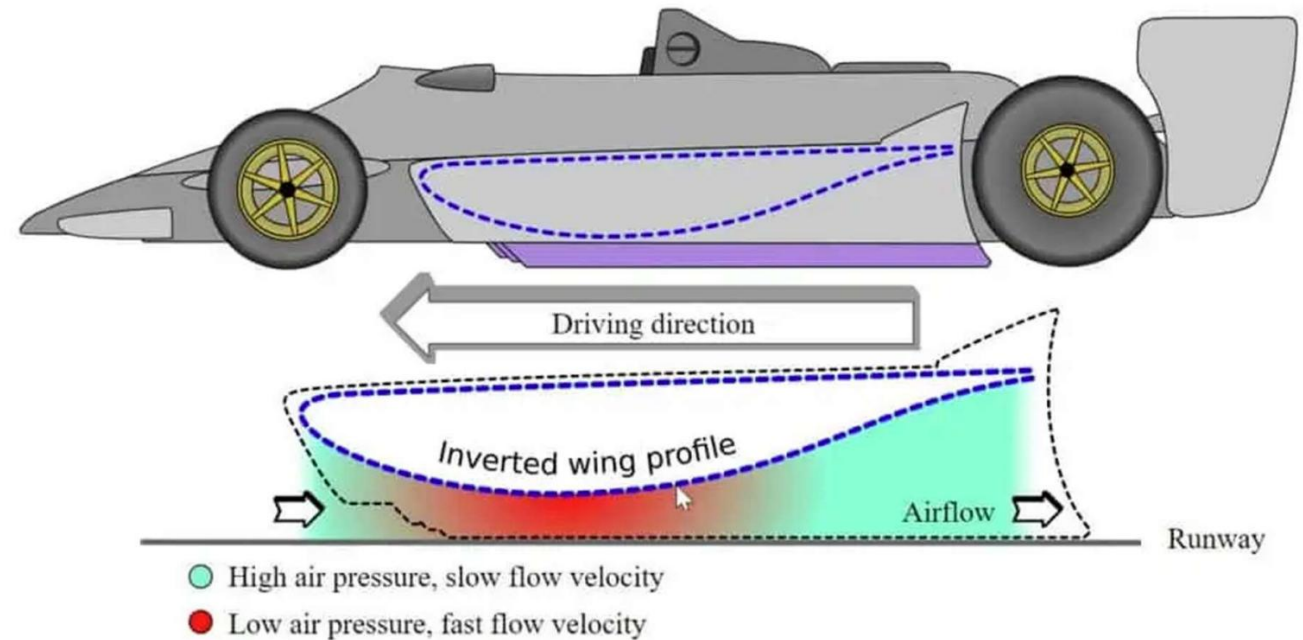
# Extension du théorème de Bernoulli

## *Application à l'effet de sol – Effet Venturi*

C'est exactement cet effet qui est mis en jeu quand on parle de « **ground effect** ».

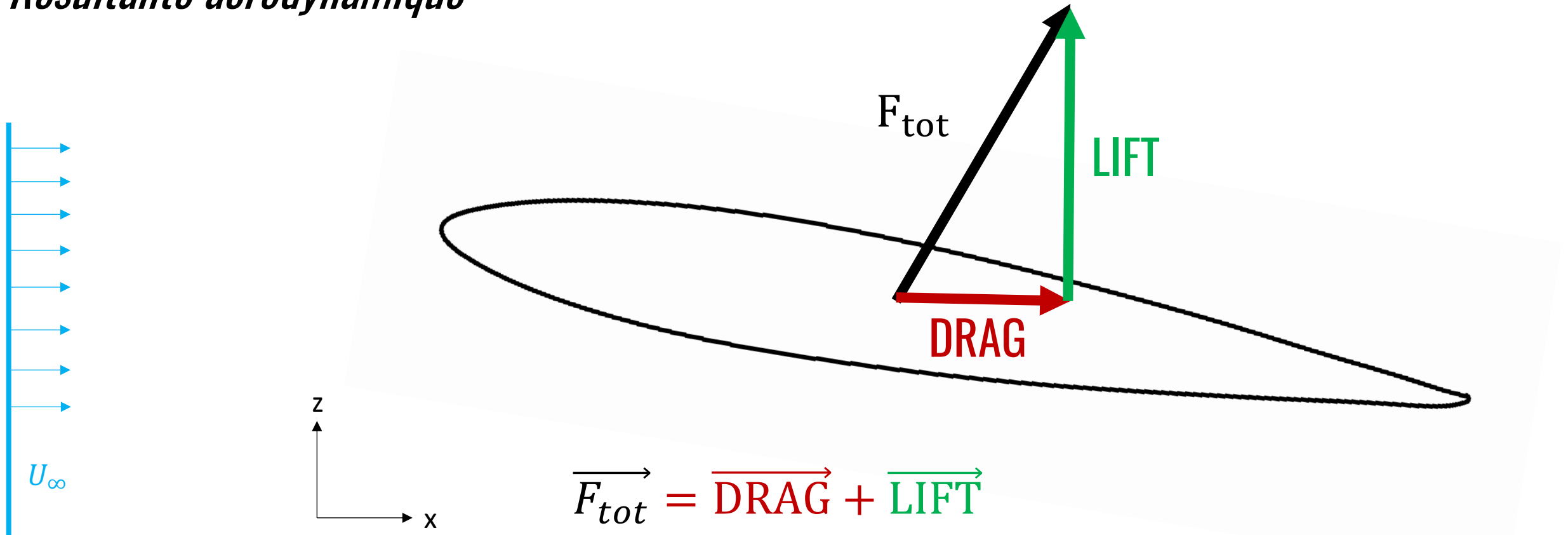
Le fluide n'est **PAS** compressé ( $M \gg 0,3$ ), c'est un abus de langage

On dit seulement que la section se réduit, et que **le fluide accélère**.



# Effets et Coefficients Aérodynamiques

## *Résultante aérodynamique*



On définit la **finesse** comme le rapport du lift sur le drag pour représenter l'efficacité d'une aile  
La finesse d'ailerons en **sports mécaniques** s'approche de 3. En **aéronautique** elle dépasse 10 à 15.

# Effets et Coefficients Aérodynamiques

## *Coefficients aérodynamiques*

A des fins de comparaison entre des configurations/ailes différentes dont la surface **A** (le maître-couple) est différente, on utilise des coefficients **dimensionnels** pour la portance, la trainée et la dérive.

Ce sont les **CDA**, **CLA** et **CSA**.

Ces coefficients ont pour unité le **m<sup>-2</sup>**.

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \rightarrow \textcolor{red}{C_D A} \cdot A = \frac{2F_x}{\rho \cdot v^2}$$

$$\text{avec } C_D A = C_D \cdot S_{unit} = C_D \cdot 1$$

# Effets et Coefficients Aérodynamiques

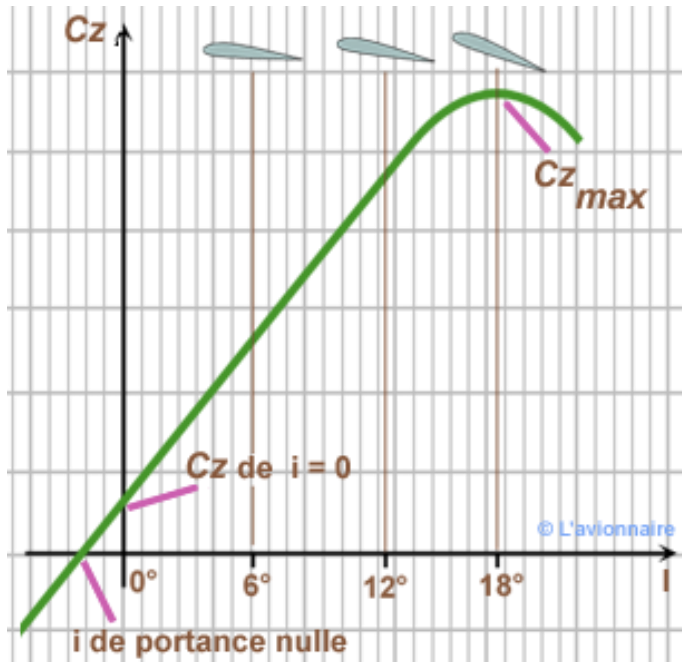
---

## *Polaires aérodynamiques*

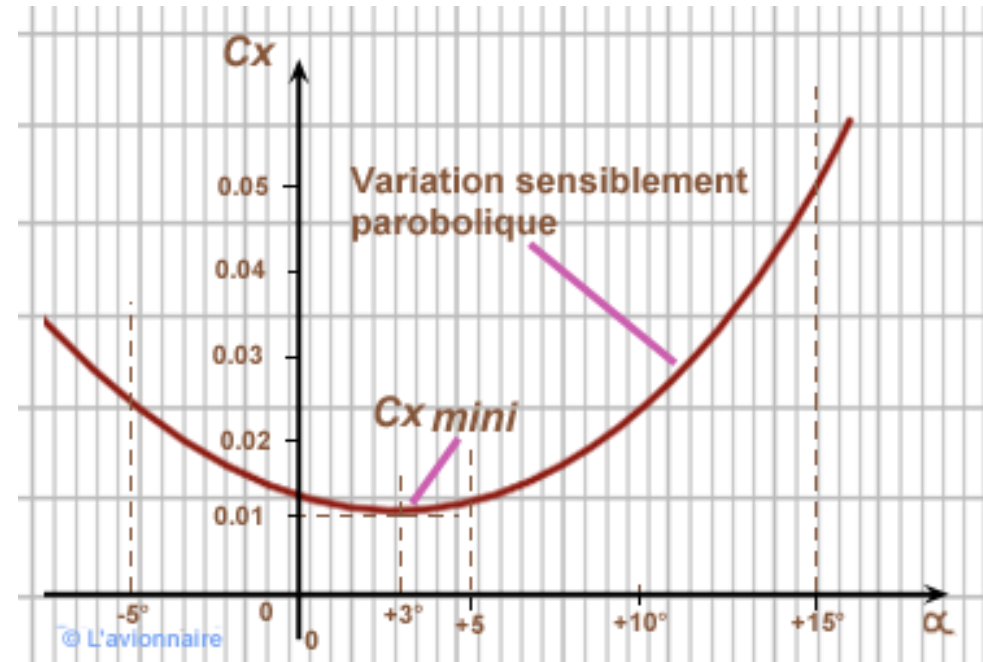
La polaire d'une aile est une courbe tracée point par point qui fait correspondre les **coefficients de traînée et de portance** déterminés expérimentalement pour **différents angles d'incidence**. Elle permet de déterminer les caractéristiques d'un profil, d'une aile, d'un aéronef.

# Effets et Coefficients Aérodynamiques

## *Polaires aérodynamiques – $C_X(\alpha)$ & $C_Z(\alpha)$*



Le **décrochage** se traduit par une valeur maximale à partir de laquelle la **dérivée de la courbe devient négative**.

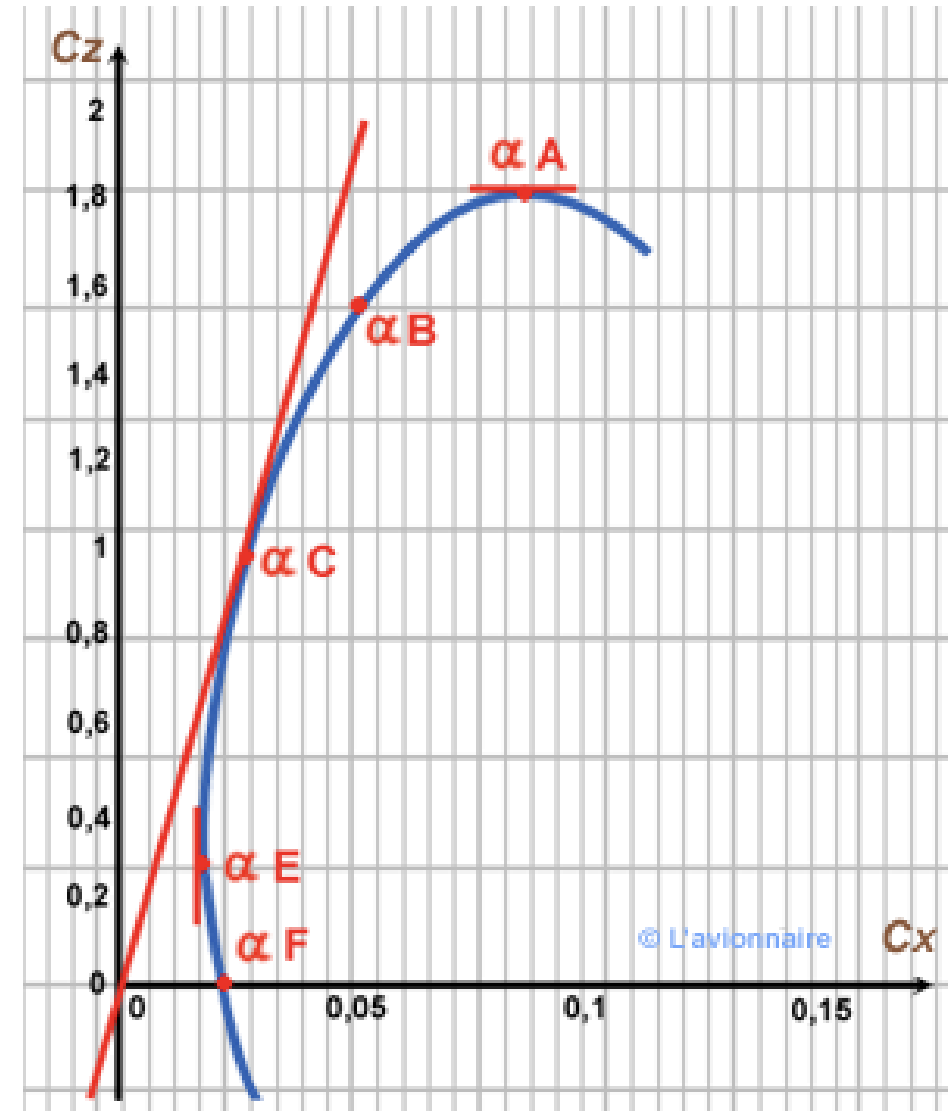


Le coefficient de traînée n'est **jamais nul**. L'aile offre **toujours** une résistance à l'air.

# Effets et Coefficients Aérodynamiques

## *Polaires aérodynamiques – Polaire d'Eiffel*

- $\alpha A$  : Vitesse de décrochage ( $C_Z$  maximal)
- $\alpha C$  : Meilleure autonomie (Finesse maximale)
- $\alpha E$  : Point de traînée minimale ( $C_X$  minimal)
- $\alpha F$  : Point de portance nulle ( $C_Z$  nul)



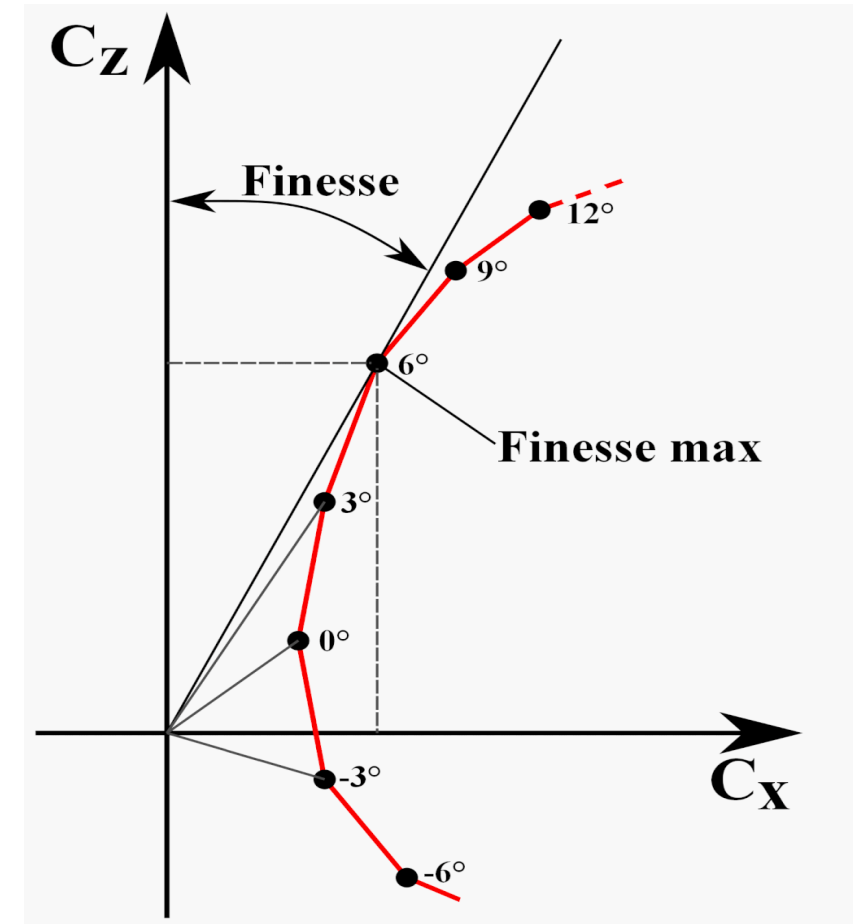


# Effets et Coefficients Aérodynamiques

## *Finesse aérodynamique*

On définit la **finesse** comme le rapport du lift sur le drag pour représenter l'efficacité d'une aile  
La finesse d'ailerons en **sports mécaniques** s'approche de 3. En **aéronautique** elle dépasse 10 à 15.

$$F_A = \frac{F_Z}{F_X} = \frac{C_L}{C_D} = \frac{C_L A}{C_D A}$$



# Effets et Coefficients Aérodynamiques

## *Formule des effets aérodynamiques de pression*

Formule de la traînée :

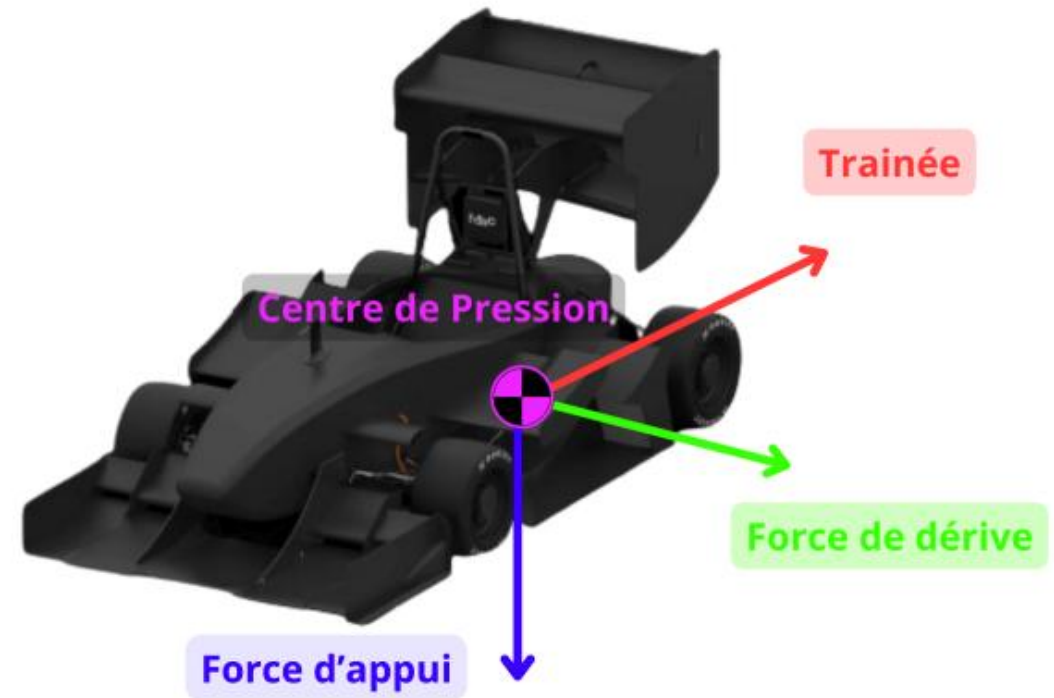
$$F_x = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Formule de la portance :

$$F_z = \frac{1}{2} C_L \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Formule de dérive :

$$F_y = \frac{1}{2} C_S \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$



# Effets et Coefficients Aérodynamiques

## *Les différents types de traînée*

### **1. Traînée de base (ou traînée 2D)**

Due à la différence de pression entre l'intrados et l'extrados dont la résultante comporte une composante parallèle à l'écoulement

### **2. Traînée de frottement (ou traînée visqueuse)**

Due aux variations de vitesse qui tendent à être atténuées par la viscosité du fluide, selon un phénomène analogue à un frottement solide et se traduisant par un échauffement du fluide.

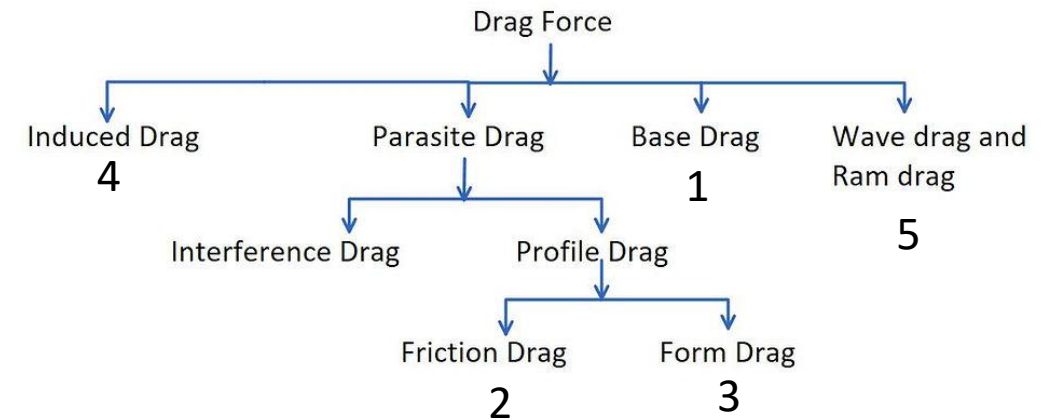
### **3. Traînée de forme (ou traînée de pression)**

Due à un décollement résultant en un tourbillon aval en nette dépression qui crée une forte traînée (dite de culot).

### **4. Traînée induite par la portance**

Créée par la portance via des tourbillons en bout d'aile. Ceux-ci sont liés à l'égalisation des pressions venant de l'intrados et de l'extrados.

### **5. Traînée d'onde de choc**



# Effets et Coefficients Aérodynamiques

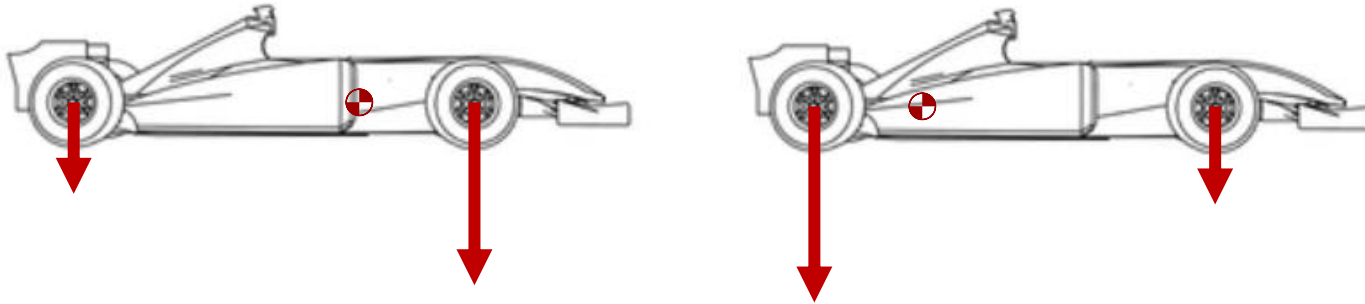
## *Balance aérodynamique et centre de pression*

Le *centre de pression* d'un profil est le point de sa corde autour duquel le moment résultant des efforts *aérodynamiques* appliqués au *profil* est nul<sup>1</sup>. En ce point s'applique la résultante de la *portance* et des forces de trainée.

# Effets et Coefficients Aérodynamiques

## *Balance aérodynamique et centre de pression*

Les concepts de balance aérodynamique et de centre de pression d'un véhicule sont intrinsèquement liés. Le calcul de la balance aérodynamique permet de **déterminer la position du centre de pression**.



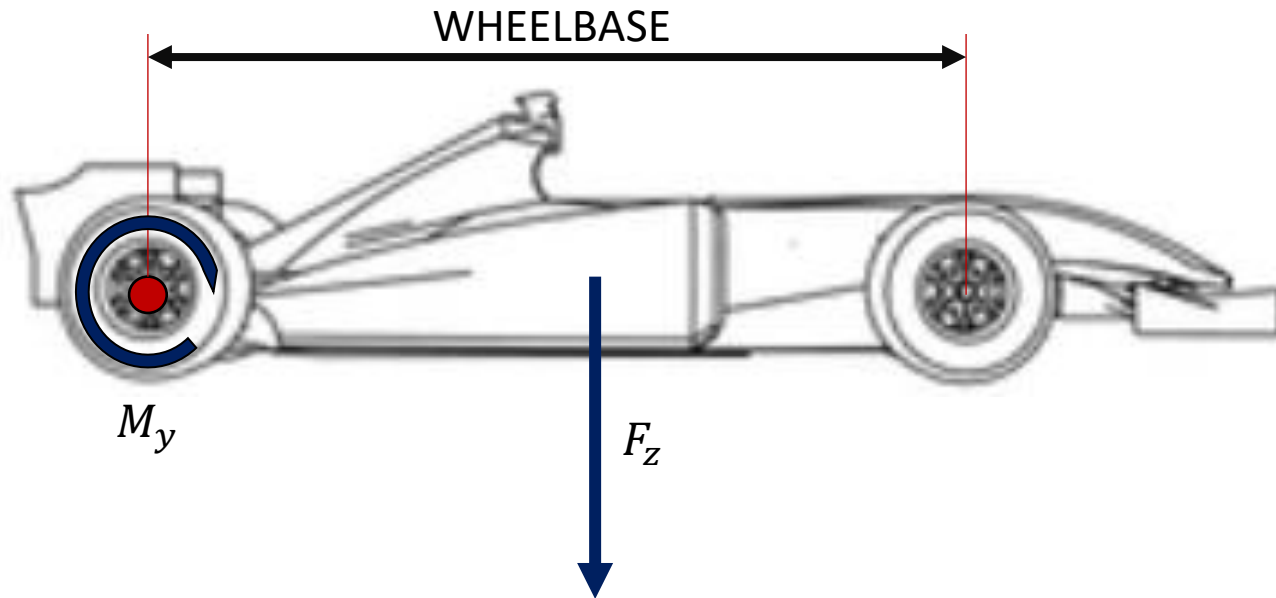
$$AB\%X = \frac{F_{\text{FRONT}}}{F_{\text{FRONT}} + F_{\text{REAR}}}$$

De manière analogue, il est possible de calculer le coefficient AB%Y pour les cas non-symétriques, comme en virage. Cela permet d'obtenir précisément les coordonnées en X et en Y du centre de pression.

# Effets et Coefficients Aérodynamiques

## *Calcul de la balance aérodynamique*

En CFD, il n'est pas possible de séparer la résultante aérodynamique entre les trains avant et arrière. On doit soit utiliser un **moment** pour calculer la balance aérodynamique, soit recourir à une approche énergétique (intégration de la courbe de portance) pour calculer la position en X du centre de pression.



$$AB\%X = -\frac{M_y}{\frac{WHEELBASE}{F_z}} = \frac{F_{Avant}}{F_z}$$

# Chapitre 4

## Simulation en CFD

Aerodynamics dpt.

2025

FORMULE  
ETS

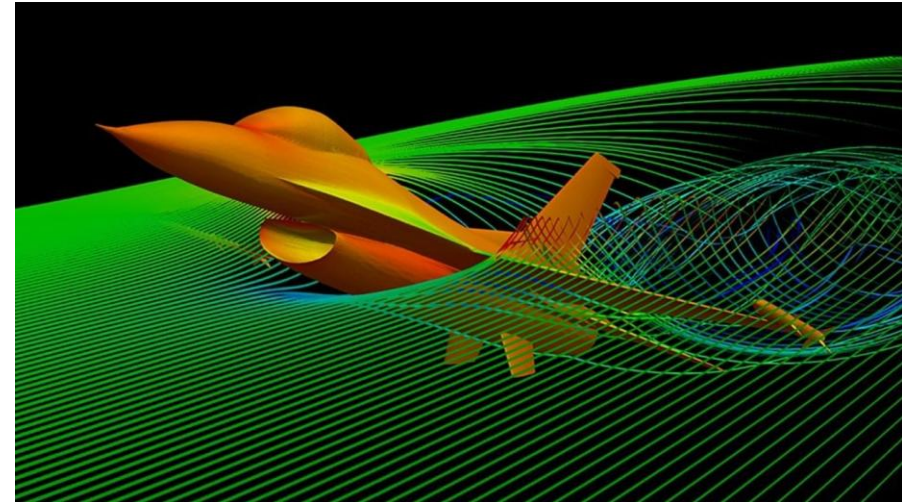
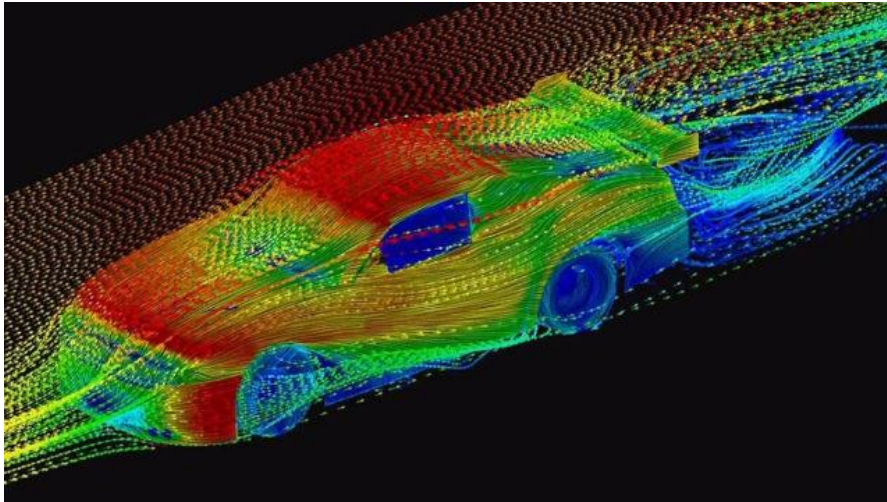




# Mécanique des Fluides Numérique

## *Définitions*

La **mécanique des fluides numérique (MFN)**, plus souvent désignée par le terme anglais **computational fluid dynamics (CFD)**, consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont en général le résultat d'un compromis en termes de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisation disponibles, les équations résolues peuvent être les [équations d'Euler](#), les [équations de Navier-Stokes](#), etc.





# Mécanique des Fluides Numérique

## *Définitions*

Le principe de la CFD repose sur une méthode comparable à celle de la **FEA** (Finite Element Analysis – Analyse par Éléments Finis) où l'on **résout des équations à chaque nœud d'un maillage**. Ces équations sont des versions dérivées des équations de **Navier-Stokes** vues au chapitre 1, retravaillées pour être calculées plus simplement et rapidement grâce à certaines hypothèses.

La majorité des logiciels de CFD commerciaux fonctionnent grâce à la méthode des **volumes finis** (Finite Volume Method). Dans cette méthode, on maille l'espace fluide, les solides étant représentés par un vide, une absence de maillage.

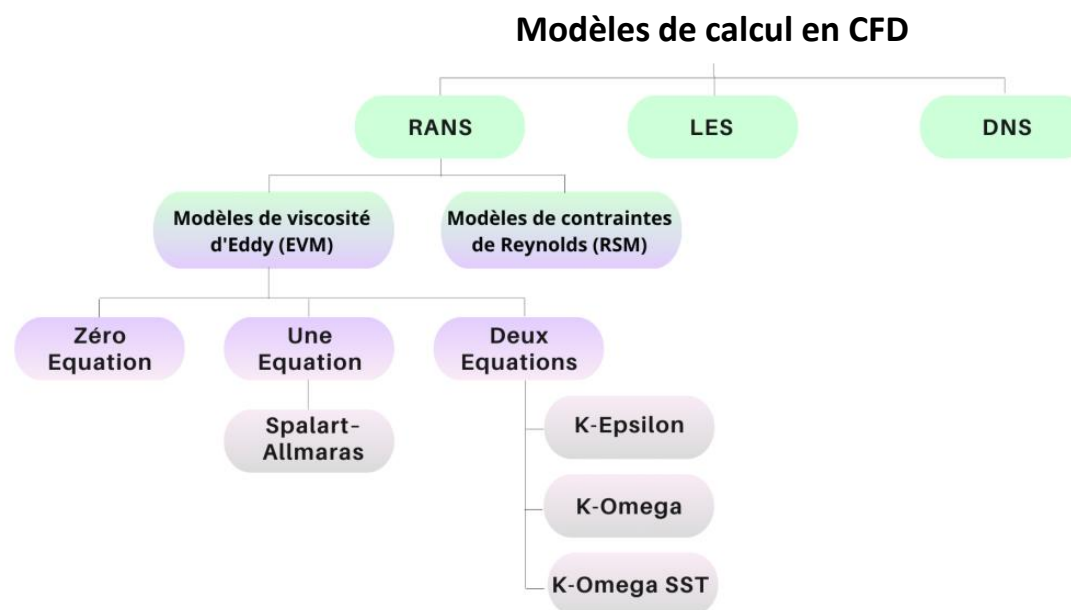
**COMME POUR LA FEA, UN MODÈLE CFD NE REPRÉSENTE JAMAIS PARFAITEMENT LA RÉALITÉ ET NE VAUT RIEN S'IL N'A PAS ÉTÉ RIGOREUSEMENT ET MÉTHODOLOGIQUEMENT VALIDÉ**

# Équations de la MFN

## *Principales équations utilisées*

Il est aisé d'appliquer les équations de Navier-Stokes à des **écoulements laminaires incompressibles**. L'enjeu principale de la mécanique des fluides numérique réside dans la **résolution d'écoulements turbulents** pour lesquels les équations de Navier-Stokes n'ont pas de solution **facilement calculable**.

On utilise donc des modèles de calcul, **porteurs de certaines hypothèses** qui permettent d'arriver plus simplement à une solution pour un écoulement donné. L'approche **RANS** vise à moyenner les quantités de Reynolds par rapport au temps grâce à la **décomposition de Reynolds**. L'approche **LES** filtre les échelles de calcul. L'approche **DNS** résout toutes les échelles du calcul.



# Équations de la MFN

## *RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes*

Le modèle le plus utilisé en CFD est le modèle RANS, simplifiant les équations de Navier-Stokes telles que :

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right]$$

\*convention d'Einstein

Où  $\overline{\rho u'_i u'_j}$  est analogue à une contrainte supplémentaire issue de l'agitation turbulente. Ce terme est appelé contrainte (ou tenseur) de Reynolds. **Il ne s'applique qu'en régime turbulent.**

En régime laminaire, il existe **4 équations** (conservation de la masse, conservation du mouvement pour  $i = 1, 2, 3$ ) pour **4 inconnues** ( $p ; u_{i=1,2,3}$ ) : le problème est **fermé**, **les équations ont une solution.**

# Équations de la MFN

## *RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes*

En régime turbulent, il existe **4 équations** (conservation de la masse, conservation du mouvement pour  $i = 1, 2, 3$ ) pour **10 inconnues** ( $p$  ;  $u_{i=1,2,3}$  ; contraintes de cisaillement de Reynolds) : le problème est **ouvert** et **les équations n'ont pas de solution en l'état**.

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix}$$

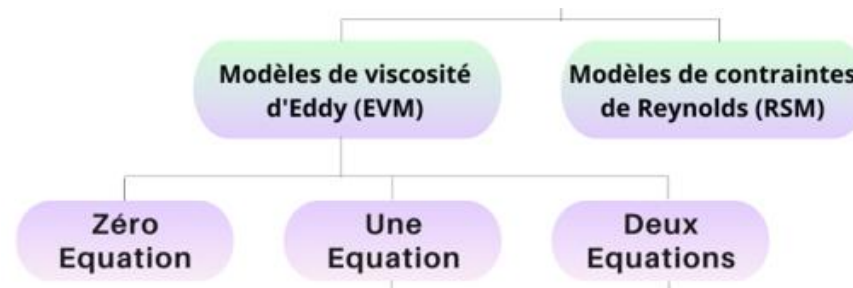
Il faut donc ajouter **6 équations** pour pouvoir fermer et résoudre les équations moyennées de Reynolds. C'est le **problème de fermeture** mis en lumière par Wilcox (1998) et Pope (2000)

# Équations de la MFN

## *RANS – Fermeture des équations*

Deux solutions permettent d'aboutir à la fermeture des équations RANS :

- **L'utilisation d'hypothèses empiriques ou semi-empiriques** (théorisées par Boussinesq)
- **L'approximation de Boussinesq**, tel que  $\overline{\rho u'_i v'_i} = -\mu_t \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho \overline{k} \delta_{ij}$  où  $k$  représente l'énergie cinétique turbulente et  $\mu_t$  la viscosité dynamique turbulente (ou Eddy Viscosity en anglais). Des modèles sont ensuite construits avec une ou plusieurs équations permettant de lier **énergie cinétique** et **viscosité turbulente**. Ces modèles sont plus communément appelés « **modèles de turbulence** »



# Équations de la MFN

## *Équation de fermeture Spalart Allmaras*

Le modèle **Spalart-Allmaras** est un modèle à **1 équation**.

C'est un modèle simple, **rapide à calculer**, mais aux limites très claires et **inadapté aux cas de forts cisaillements**. Il est privilégié pour les cas d'écoulement **non-décollés**.

Dans ce modèle la viscosité turbulente est donnée par la formulation  $\mu_t = \rho f_{v1} \tilde{\nu}$

La variable de la turbulence  $\tilde{\nu}$  est obtenue par la résolution de l'équation de transport :

$$\frac{\partial(\rho\tilde{\nu})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\tilde{\nu}u_j)}{\partial x_j} = P_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left( \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - D_\nu$$

# Équations de la MFN

## *Équations de fermeture $k - \epsilon$*

Le modèle  $k - \epsilon$  est un modèle à **2 équations**.

C'est un modèle relativement simple et robuste. Il est l'un des modèles les plus utilisés dans le monde industriel et permet de **modéliser** les effets dus à la couche limite. Il est inadapté pour calculer les effets de la couche limite ou pour calculer des effets dus à une absence de gradient de pression.

Dans ce modèle la viscosité turbulente est donnée par la formulation  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{\bar{k}^2}{\bar{\epsilon}}$

Les variables de l'énergie cinétique  $\bar{k}$  et le taux de dissipation  $\bar{\epsilon}$  sont obtenues par :

$$\frac{\partial(\rho\bar{k})}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho\bar{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho\bar{\epsilon} \quad \Bigg| \quad \frac{\partial(\rho\bar{\epsilon})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{\epsilon})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x_j} \right] + \frac{\bar{\epsilon}}{k} (C_{1e} P_k - C_{2e} \rho \bar{\epsilon})$$

# Équations de la MFN

## *Équations de fermeture $k - \omega$*

Le modèle  $k - \omega$  est un modèle à **2 équations**.

C'est un modèle extrêmement robuste mais **coûteux en termes de ressources de calcul**. Il est l'un des modèles les plus utilisés dans la recherche et permet de **calculer** les effets dus à la couche limite. Il est souvent mixé avec le modèle  $k - \epsilon$  afin de limiter le temps de calcul. C'est le modèle  $k - \omega$  **SST**.

Dans ce modèle la viscosité turbulente est donnée par la formulation  $\mu_t = \alpha \frac{\rho k}{\omega}$  avec  $\omega = \frac{\epsilon}{k}$

Les variables de l'énergie cinétique  $\bar{k}$  et le taux de dissipation  $\bar{\epsilon}$  sont obtenues par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad \Bigg| \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega$$



# Équations de la MFN

## *Modèles non-RANS*

Il existe d'autres modèles de calcul qui reprennent les équations de Navier-Stokes pour les résoudre sur un maillage. Ces modèles sont **beaucoup plus gourmands** en termes de puissance de calcul et ont donc des plages d'utilisation **très limitées**. On distingue par exemple :

- Le modèle **LES (Large Eddy Simulation)** où l'on applique un **filtre spatial** pour identifier les structures plus grosses avant de résoudre en utilisant des **techniques statistiques**. On calcule donc les valeurs instantanées des « gros » tourbillons en approximant ceux des échelles plus petites. Le maillage requis est très fin et les applications industrielles se limitent à la combustion et l'aéroacoustique.
- Le modèle **DNS (Direct Numerical Simulation)** où toutes les échelles sont calculées, y compris celles de Kolmogorov, grâce aux équations de Navier-Stokes **sans aucune hypothèse simplificatrice**. Le coût calculatoire de cette méthode n'est pas adapté à l'informatique conventionnelle, la puissance de calcul requise pour un cas industriel **dépassant la somme des puissances de calcul de tous les supercalculateurs actuels**. Ce modèle se limite à la recherche.

# Équations de la MFN

## *Discrétisation des équations*

De manière générale, quel que soit le cas d'étude, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles (**EDP**). Elles sont continues dans l'espace et le temps et ne sont donc **pas réalistiquement calculables avec un ordinateur**. Pour être calculées, elles doivent donc être **discrétisées**.

La discrétisation vise à **transformer des équations continues en un système d'équations algébriques**. Pour cela le domaine est découpé en un **nombre fini de cellules** au volume fini (maillage). Chaque cellule porte un nombre fini de valeurs correspondants aux champs calculés. Chaque dérivée est remplacée par **son approximation numérique**.

Il existe trois méthodes principales qui permettent de discrétiser un système :

- La méthode des Différences Finies (**Finite Differences Method**)
- La méthode des Volumes Finis (**Finite Volumes Method**) (la principale en CFD)
- La méthode des Éléments Finis (**Finite Elements Method**) (plutôt utilisée en mécanique du solide)

# Équations de la MFN

## *Discrétisation des équations*

Par exemple, pour la conservation d'une quantité matérialisée par le scalaire  $\phi$

L'équation générale pour la conservation de ce scalaire serait donc :  $\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi$

En intégrant sur une cellule de volume  $V$  :  $\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho\phi dV + \oint_S (\rho\vec{u}\phi) \cdot \vec{n} dS = \oint_S (\Gamma_\phi \nabla \phi) \cdot \vec{n} dS + \int_V S_\phi dV$

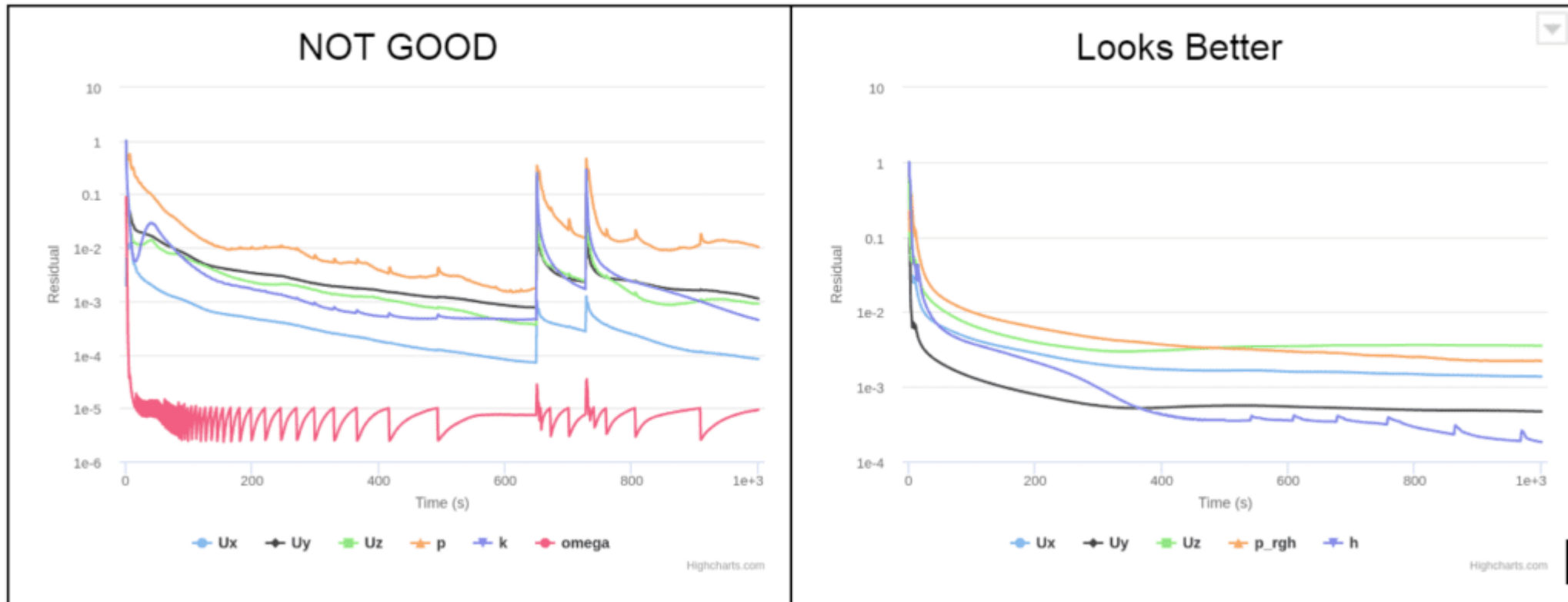
Finalement, en système algébrique :  $a_P \phi_P = \sum_{voisins} a_{nb} \phi_{nb} + b + \text{Residuals}$

Ces équations discrètes impliquent l'existence de **résidus**, **représentant la somme des flux et sources dans une cellule** après la substitution des valeurs actuelles dans l'équation discrète. Au fil des itérations, les résidus diminuent jusqu'à être suffisamment petits pour être considérés négligeables et que les **équations de Navier-Stokes soient satisfaites à  $10^{-X}$  près**.

# Équations de la MFN

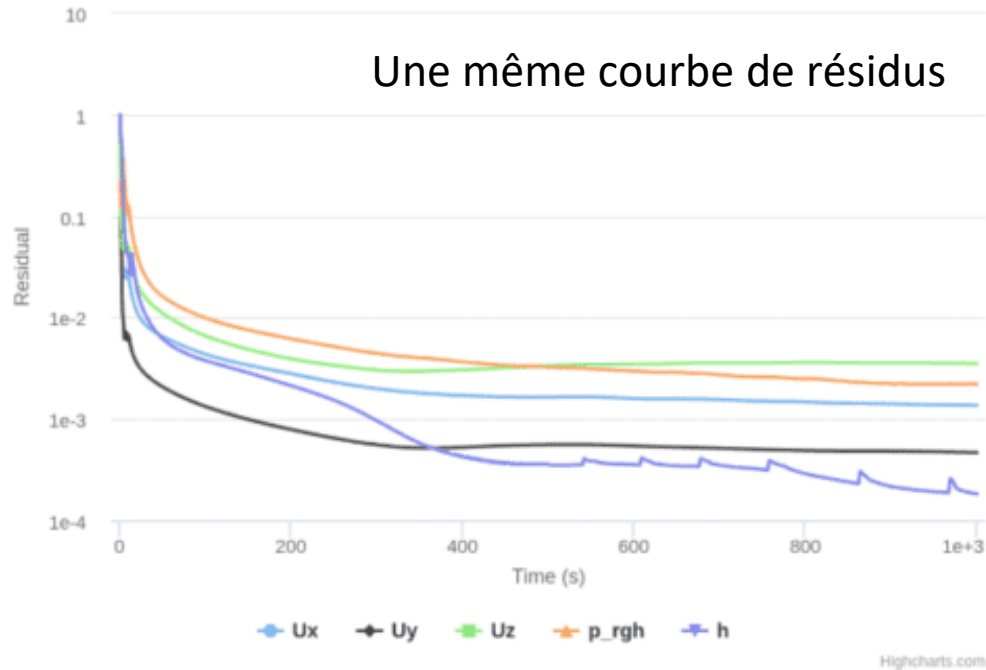
## *Convergence et stabilité des résidus*

Les résidus sont un **bon indicateur de stabilité et de convergence** de la solution, **sans être absolus**.  
De bons résidus ne veulent pas obligatoirement dire que la solution est bonne, ou même pertinente.



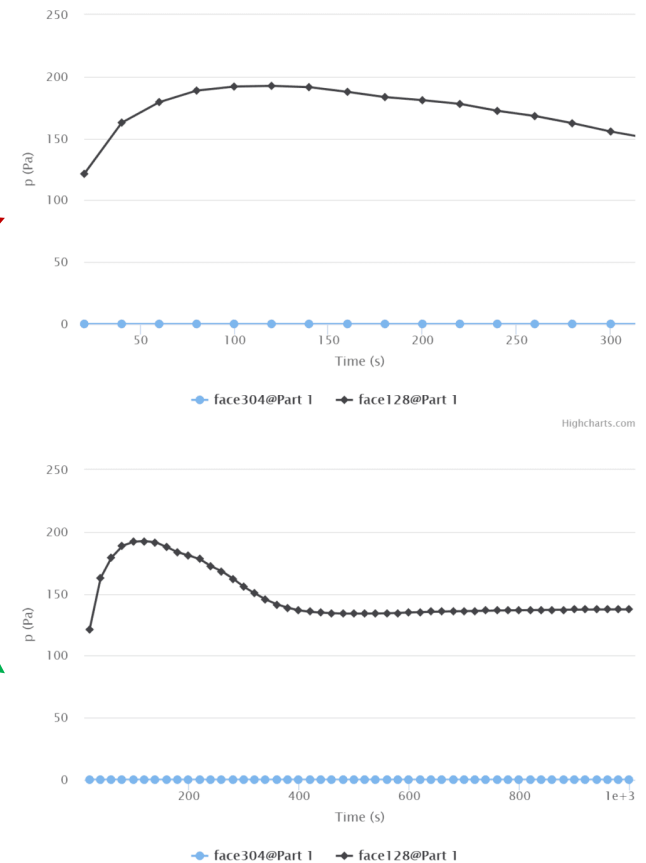
# Équations de la MFN

## Convergence et stabilité des résidus



N'a pas convergé

A convergé

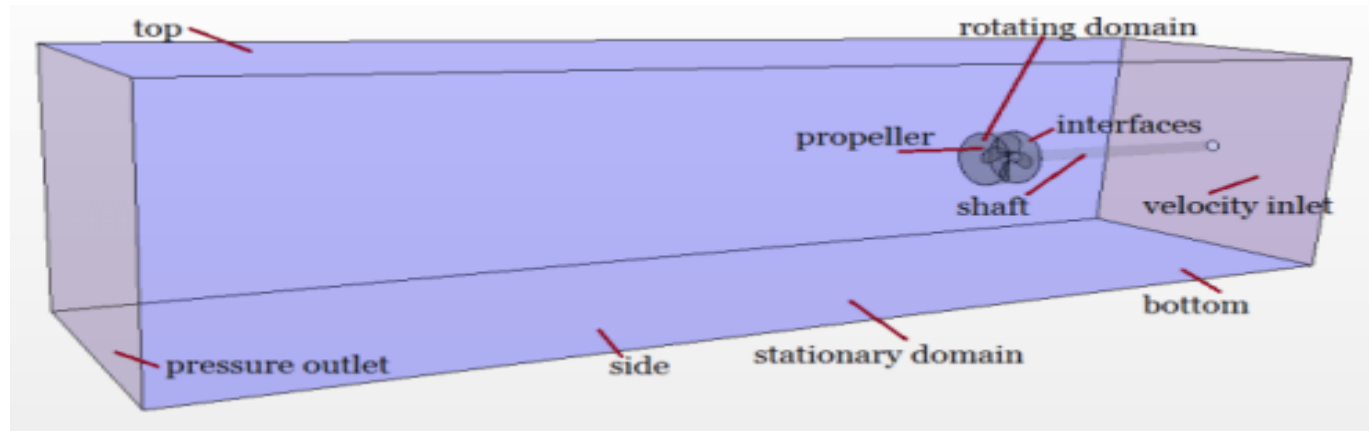


# Domaine de simulation

## *Domaine d'étude*

Le choix du domaine d'étude est primordial lors d'une simulation en élément/volumes finis. Il détermine directement les **hypothèses de calcul** qui vont pouvoir être utilisés tout en affectant **directement la stabilité du calcul**. Les conditions aux limites découlent directement du choix du domaine.

Il est généralement préconisé de faire un domaine **beaucoup plus grand que l'objet étudié**, de telle sorte qu'aux frontières du domaine les paramètres du fluide soient **revenus à leurs états initiaux**.



# Domaine de simulation

## *Conditions Limites*

Les conditions limites d'un domaine fluide peuvent traduire une **réalité physique** (un mur étanche, une pression donnée) ou une **approximation mathématique** (une symétrie, une paroi sans friction)

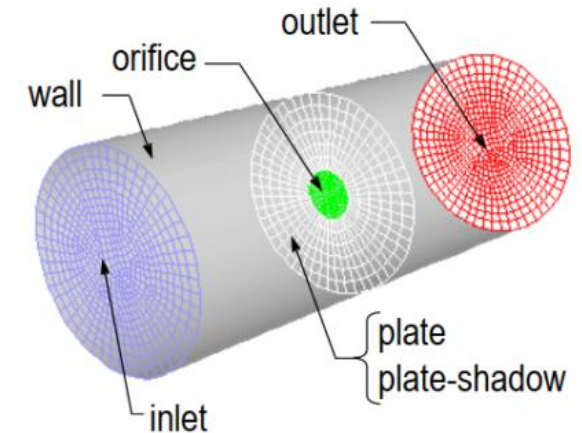
Un bon jeu de conditions limite est une clé vers la stabilité du calcul et vers la **corrélation à la réalité**.

- **External Boundaries**

- Any flow
  - Pressure Inlet
  - Pressure Outlet
- Incompressible flow
  - Velocity Inlet
  - Outflow (not recommended)
- Compressible flow
  - Mass Flow Inlet (can also use for incompressible)
  - Pressure Far Field
- Other
  - Wall
  - Symmetry
  - Axis
  - Periodic
- Special flow boundaries
  - Inlet / Outlet Vent
  - Intake / Exhaust Fan

- **Internal Boundaries**

- Fan
- Interior
- Porous Jump
- Radiator
- Wall



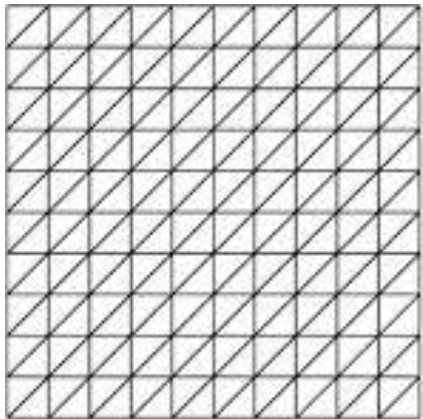


# Maillage d'une simulation

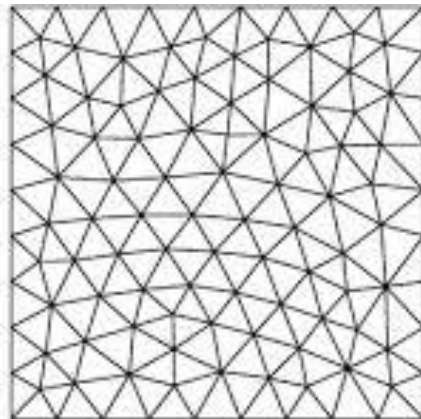
## *Définitions et types de maillages*

Un maillage est un ensemble de cellules formées par des points sur lesquels on va résoudre les équations du modèle de simulation.

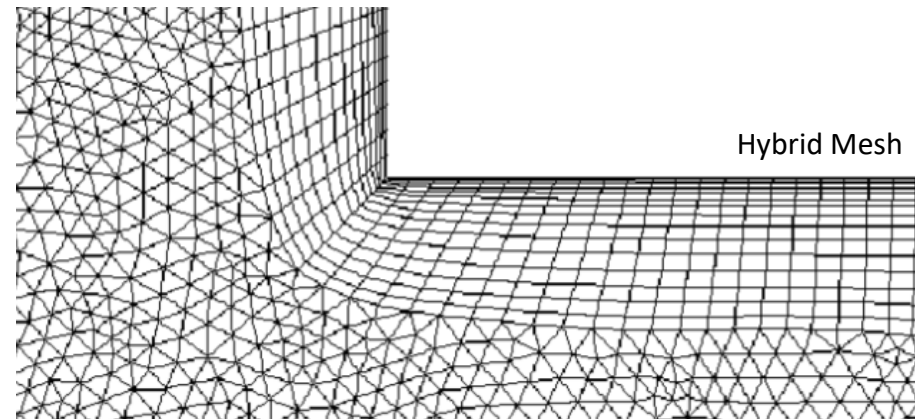
Un maillage peut être **structuré** ou **non-structuré**. Un maillage structuré dépend de peu de paramètres et conserve une forme régulière, le rendant à la fois peu volumineux à stocker et plus stable à calculer. Il n'est cependant pas toujours possible d'utiliser un maillage structuré pour des formes complexes. On privilégiera un **maillage hybride** avec une majorité de mailles structurées si possible.



(a) Structured mesh



(b) Unstructured mesh



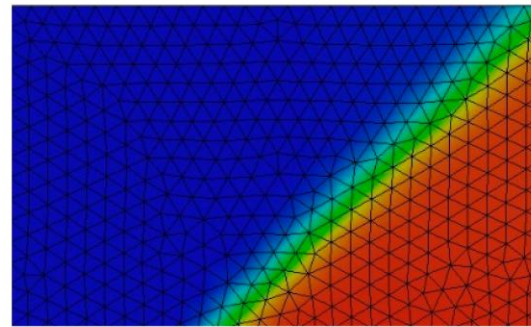
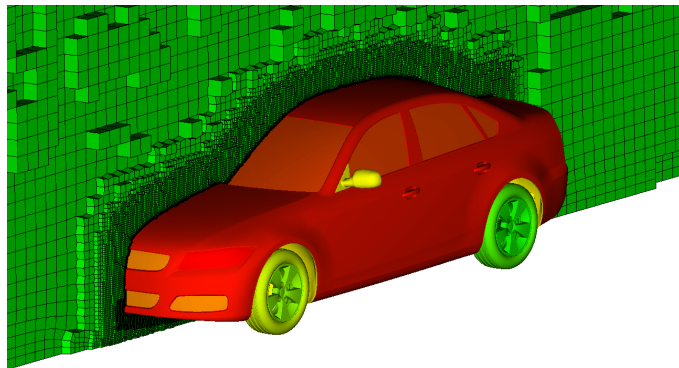
Hybrid Mesh

# Maillage d'une simulation

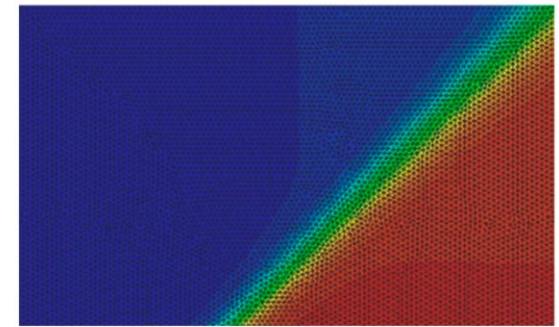
## *Importance du raffinement*

Le maillage est une **représentation de la géométrie**, mais également un **vecteur de transfert d'information**. Un maillage trop gros (a), non content de déformer la géométrie étudiée, verra des **pertes d'information** se produire. Un maillage fin (b) rendra mieux compte des phénomènes étudiés mais mettra plus de temps CPU à être calculé.

Il est important de **raffiner le maillage** dans les régions où l'on s'attend à de **fortes variations de données**, comme au contact d'une surface, des zones de fort cisaillement ou des sillages.



(a)



(b)

# Maillage d'une simulation

## *Importance du raffinement – $y^+$*

Que l'on cherche à **capturer** les effets internes de la couche limite ou simplement **modéliser** son influence, il est nécessaire de s'intéresser à certaines grandeurs qui permettent de dimensionner le maillage au niveau **des parois au contact du fluide**.

L'une de ces grandeurs est le  $y^+$ . Elle permet de savoir où se situe le maillage par rapport à la surface au contact du fluide et la couche limite que cette surface génère.

Un  $y^+ < 5$  implique que la première épaisseur du maillage se situe dans la **sous-couche linéaire**.

Un  $y^+ > 30$  traduit une première épaisseur à la **sous-couche logarithmique**.

$$y^+ = \frac{y_p u_\tau}{\nu}$$

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau}$$

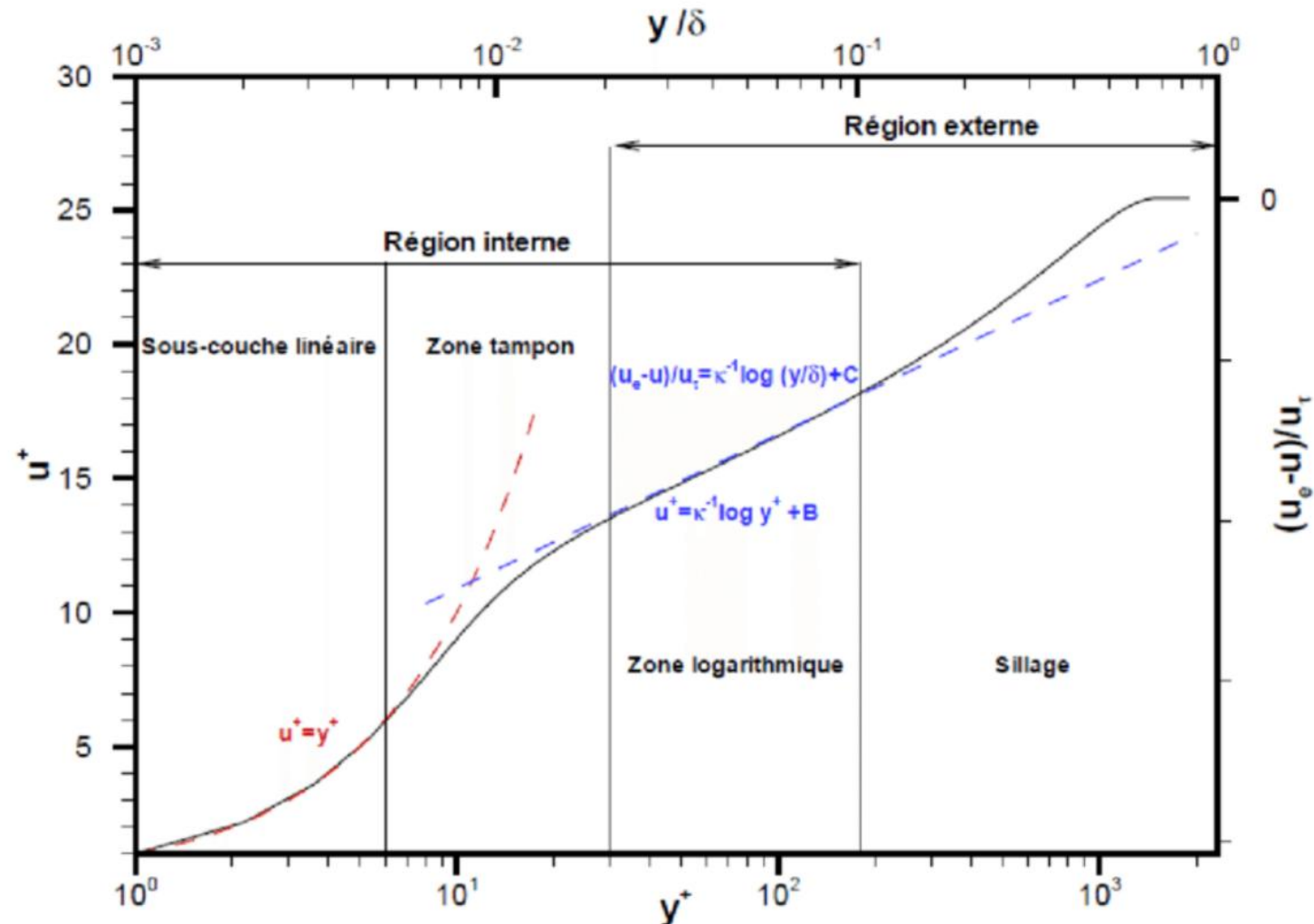
# Maillage d'une simulation

## *Importance du raffinement – $y^+$*

$y^+ < 5$  : Le maillage permet le **calcul** de la couche limite.

$y^+ > 30$  : Le maillage permet une **modélisation cohérente** de la couche limite.

$5 < y^+ < 30$  : La zone tampon entre les lois linéaires et logarithmiques empêche un calcul précis des quantités en jeu. **Cette zone est à éviter autant que possible.**

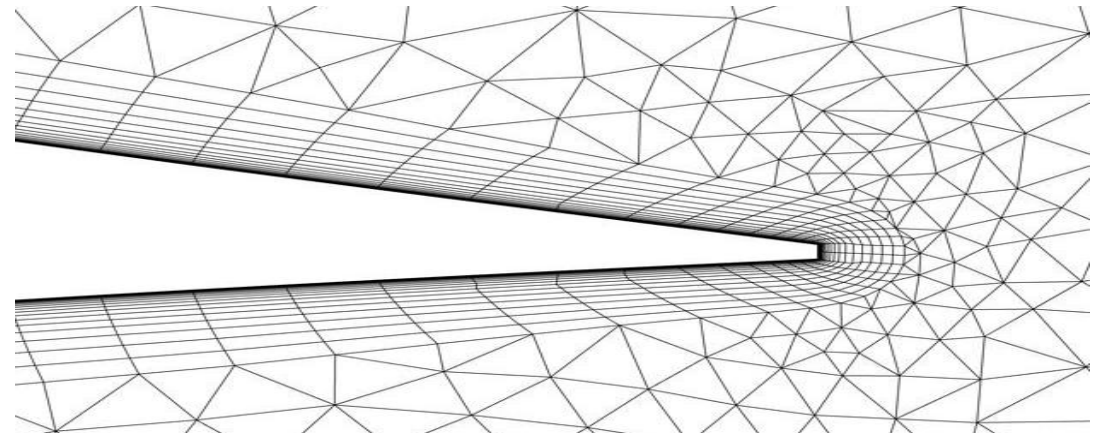


# Maillage d'une simulation

## *Importance du raffinement – PRISM Layers*

Dans la plupart des logiciels permettant le maillage d'un domaine, le meilleur moyen de contrôler la qualité du maillage aux frontières du domaine fluide est d'utiliser un « **PRISM Layer Mesher** ».

Il permet de générer des couches de maillage aux abords d'une frontière du domaine et prend en compte des paramètres comme la **hauteur totale de la couche limite**, le **nombre de couches**, le **coefficient géométrique de progression** ou la **hauteur de la première couche du maillage**. Le maillage résultant est un maillage hybride.

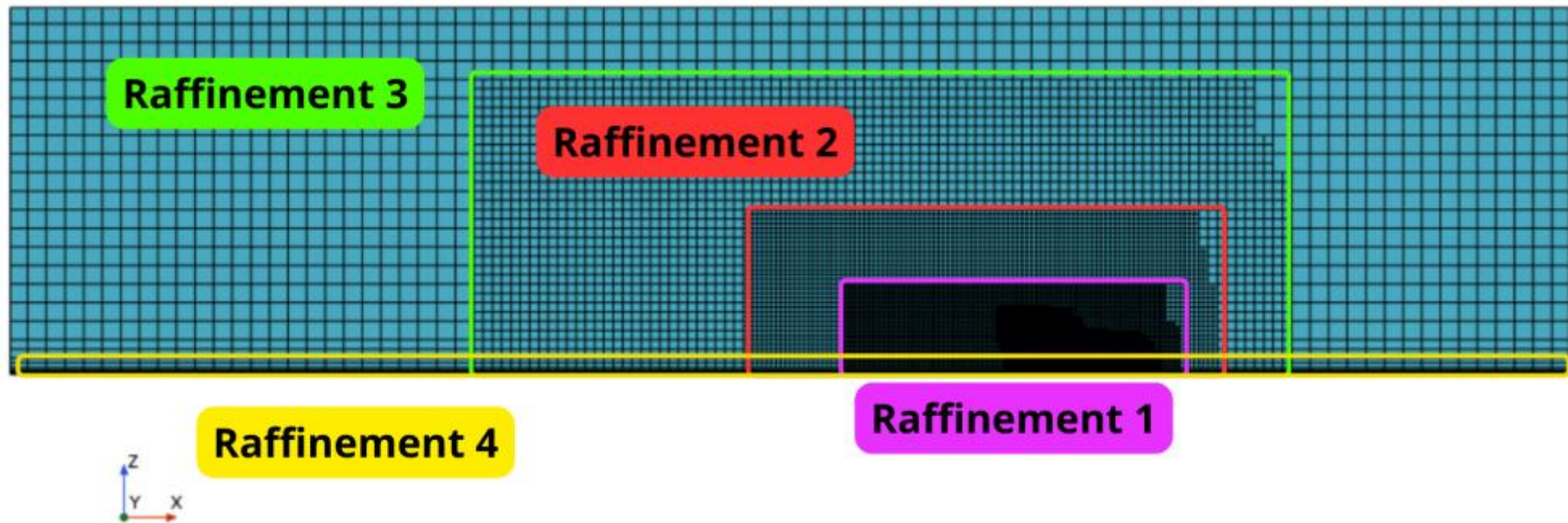




# Maillage d'une simulation

## *Importance du raffinement – Sillage*

Le sillage (wake) est une autre zone qui mérite un raffinement particulier afin d'estimer au mieux l'influence de l'objet étudié sur le fluide et les tourbillons qu'il y provoque. Un sillage mal raffiné faussera les résultats, notamment ceux des forces aérodynamiques



# Modèles et Options de Simulation

## *Steady State vs Transient*

Directement lié à l'hypothèse de régime permanent ou non, cette option permet de déterminer si la simulation va **dépendre du temps** (transient state) ou si elle est **indépendante du temps** (steady state).

**Un calcul en régime permanent ne représente donc pas une évolution temporelle du fluide.**

En transient state, on simule le problème par **intervalles de temps**, un intervalle que l'on définit grâce au **nombre de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)**. Plusieurs itérations de calcul permettent d'aboutir à une solution convergente pour chaque intervalle de temps.

En steady state, on simule le problème par itérations pour un moment exact donné. Le but est de faire **converger les résidus vers une solution stable**.



# Modèles et Options de Simulation

## *Algorithmes implicites et explicites*

En CFD, les algorithmes **explicites** et **implicites** sont deux façons de faire évoluer la solution dans le temps (transient state) ou vers la convergence (steady state).

La méthode **explicite** détermine les propriétés d'un nœud grâce aux propriétés du pas de temps ou de **l'itération précédente uniquement**. C'est une méthode simple à coder, peu coûteuse mais qui nécessite une précision temporelle accrue ce qui peut résulter en une convergence plus lente.

$$X_n = X_{n-1} + \Delta t \cdot f(X_{n-1})$$

La méthode **implicite** détermine les propriétés d'un nœud grâce aux propriétés du pas de temps ou de **l'itération précédente** et grâce à ses **propres propriétés**. C'est une méthode plus complexe à mettre en œuvre et lourde à calculer, mais présente une stabilité et une robustesse accrue.

$$X_n = X_{n-1} + \Delta t \cdot f(X_n)$$

# Modèles et Options de Simulation

## *Solveurs Couplés et Séparés*

Les algorithmes de résolution des équations peuvent traiter les équations de deux manières différentes. Les équations sont soit traitées séparément par itérations (**segreated**) ou comme un système unique résolu en une seule passe (**coupled**)

La résolution séparée présente l'avantage d'être **moins coûteuse par itération** pour des cas où les **couplages sont moins importants** (incompressibilité, faibles vitesses...) au prix d'une **convergence plus lente** pour les cas plus complexes.

La résolution couplée est globalement **plus coûteuse** puisqu'elle résout des systèmes plus conséquents et complexes à chaque itération. Les couplages sont cependant **plus précis et robustes** ce qui améliore la qualité et la convergence des résultats.

# Modèles et Options de Simulation

## *Nombre et condition CFL*

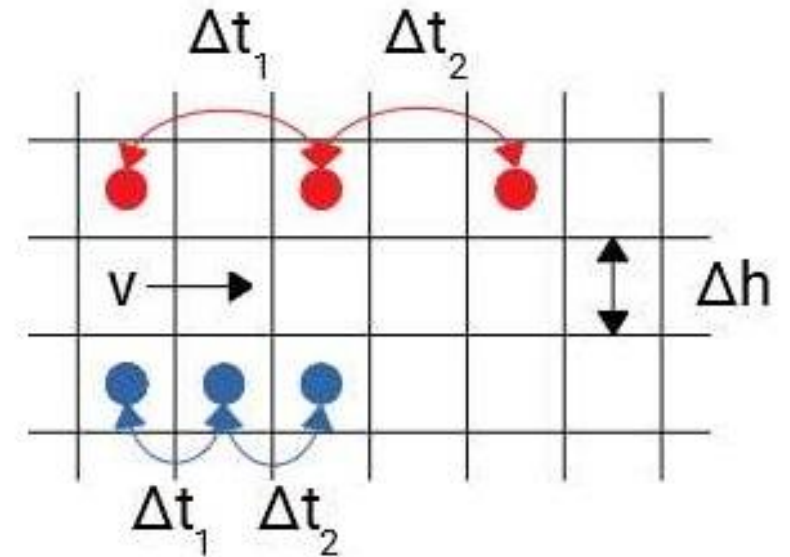
En **régime transitoire**, le **nombre CFL** est utilisé pour définir les intervalles de temps pour lesquels on calcule la solution. Celui-ci impose d'avoir un pas de temps suffisamment petit pour **limiter la perte d'informations d'une cellule à l'autre**.

En **régime stationnaire**, le nombre CFL a une fonction similaire pour la **transition d'une itération à la suivante**, sans prendre en considération le temps. Il influe donc sur la **vitesse de convergence**.

**Un CFL trop haut impacte négativement la stabilité et l'exactitude d'une solution.**

$CFL > 1$

$CFL = 1$



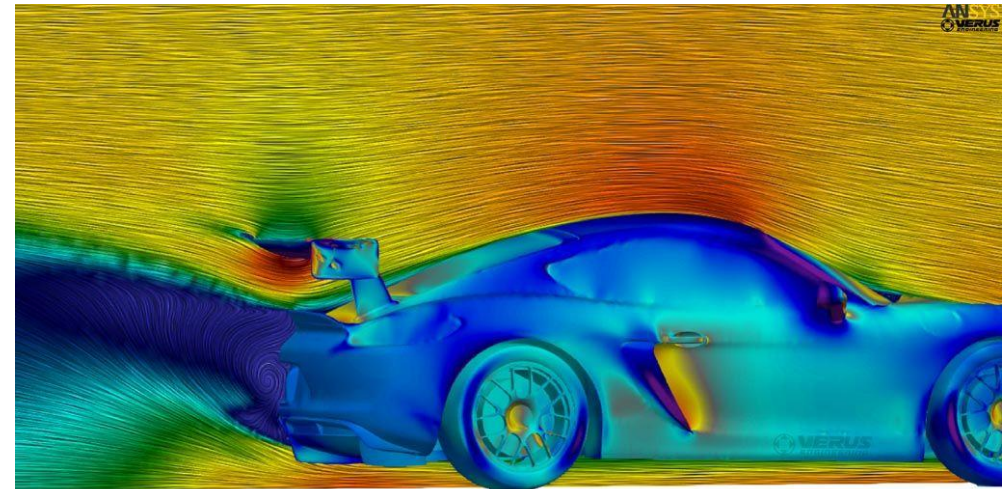
Condition CFL respectée si  $CFL \leq 1$

# Post-processing d'une simulation

## *Principe de base*

Le **post-processing** désigne l'ensemble des opérations réalisées **après** la résolution numérique des équations et l'obtention des champs de variables (pression, vitesse, température, etc.). Son objectif est d'**analyser**, d'**interpréter** et de **présenter** les résultats bruts de la simulation afin d'en tirer des informations utiles, valider le modèle ou comparer aux données expérimentales.

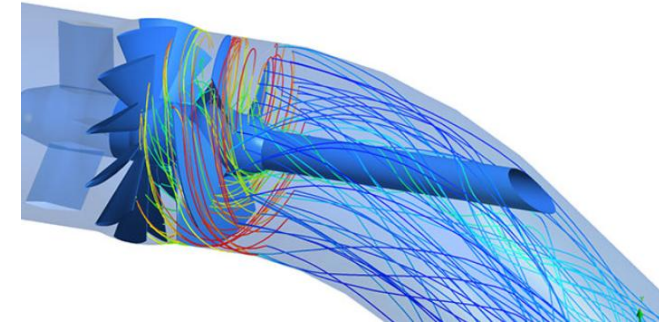
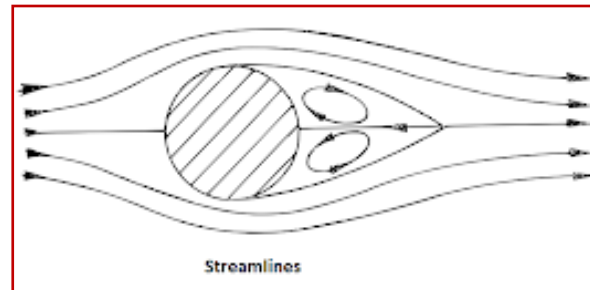
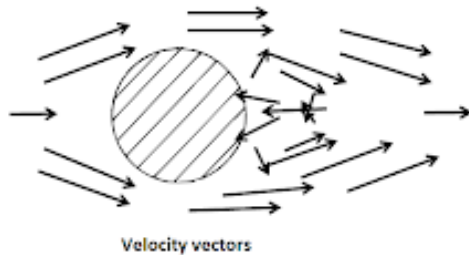
Le post-processing transforme les données de calcul en **informations compréhensibles et exploitables** la création de champs de contours, les **streamlines**, le calcul de grandeurs dérivées et de **coefficients**, la génération de **graphiques** et de **visualisations**.



# Post-processing d'une simulation

## *Streamlines*

Une **streamline** (ligne de courant) est une courbe tracée dans un champ d'écoulement telle que **le vecteur vitesse est tangent en tout point de la courbe**. Elles permettent de suivre le chemin que prendrait une particule fluide **à un instant donné** à travers le domaine.

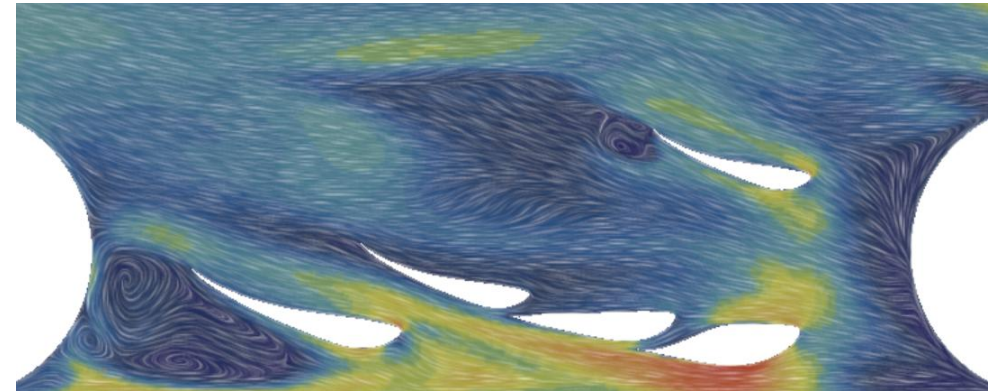
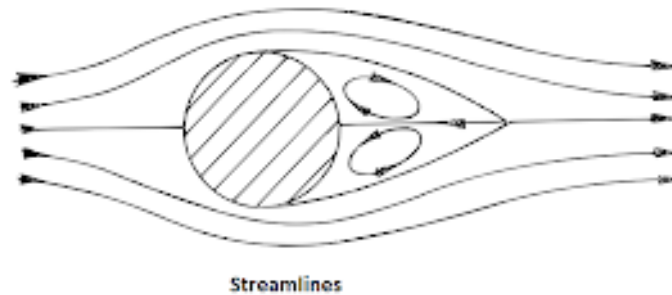
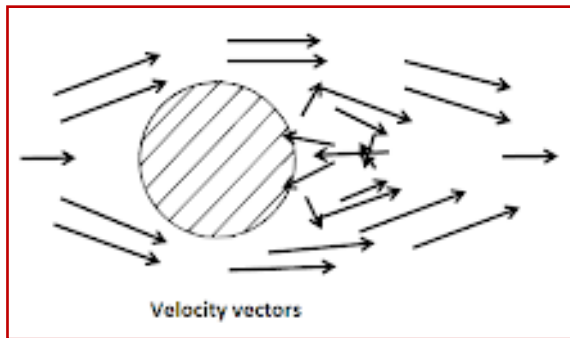


Elles ne représentent pas une trajectoire dans le temps, mais une **photographie instantanée** de la structure de l'écoulement.

# Post-processing d'une simulation

## *Vector arrays (champs de vecteurs)*

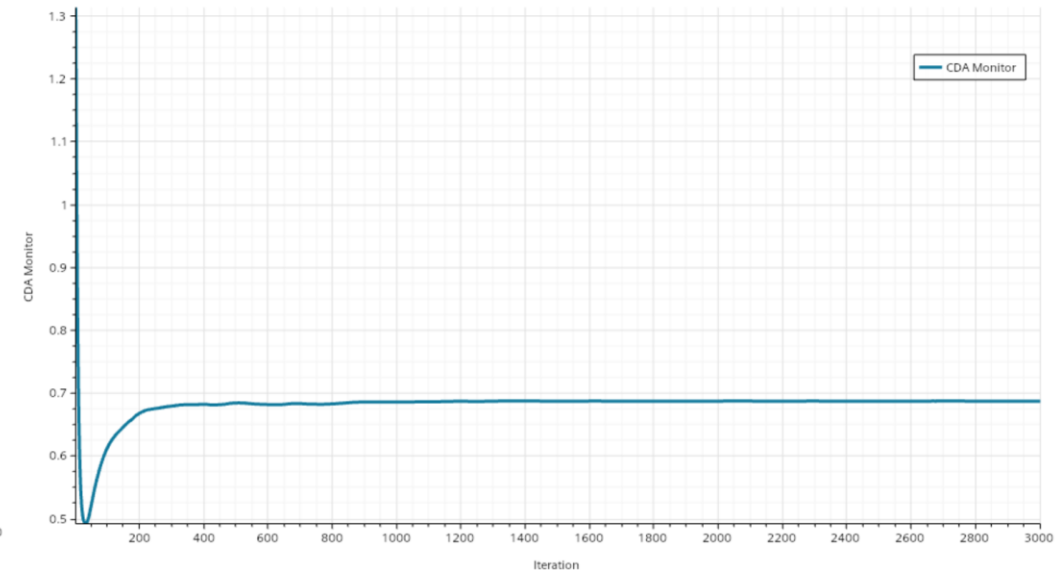
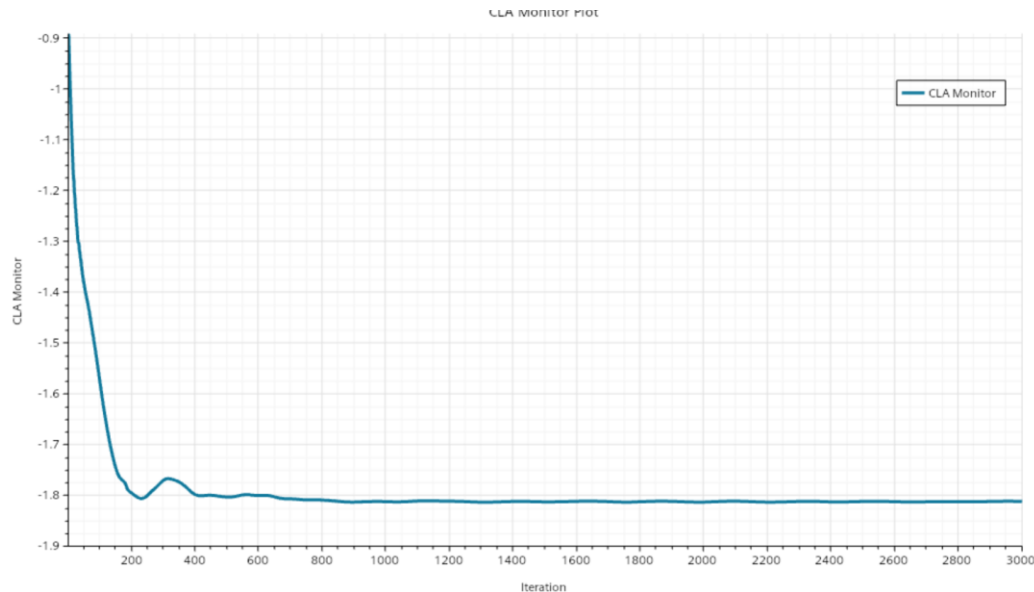
Un champ de vecteur permet de visualiser différents vecteurs à un instant donné (vitesse, vorticité, contrainte pariétale). Les vecteurs de vitesse sont utilisés pour élaborer les lignes de courant.



# Post-processing d'une simulation

## *Coefficients aérodynamiques*

La plupart des logiciels de simulation en CFD permettent le calcul des **forces qui s'exercent sur un objet** (ou une frontière) étudiée. Le calcul de ces forces permet ensuite de déterminer des **coefficients aérodynamiques** comme le coefficient de portance ( $C_L$ ), de trainée ( $C_D$ ), ou latéral ( $C_S$ ).





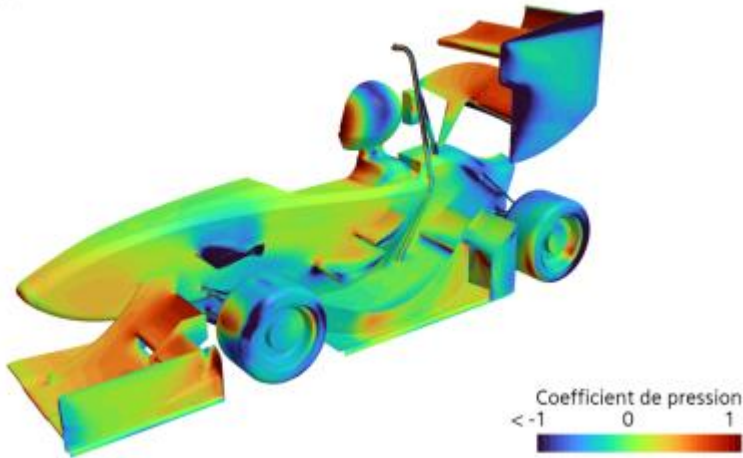
# Post-processing d'une simulation

## *Coefficient de pression*

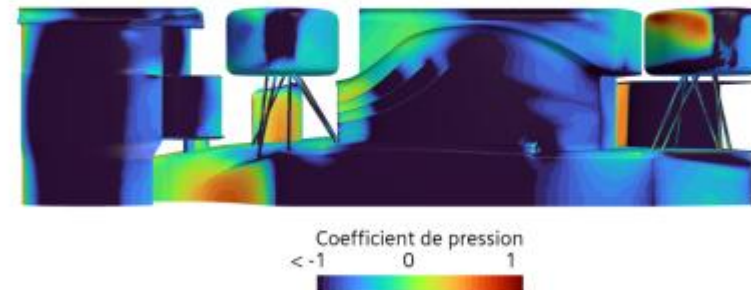
Le **coefficient de pression**  $C_p$  est une mesure sans dimension utilisée pour caractériser la **distribution de la pression** autour d'un objet dans un écoulement.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}$$

STAR-CCM+



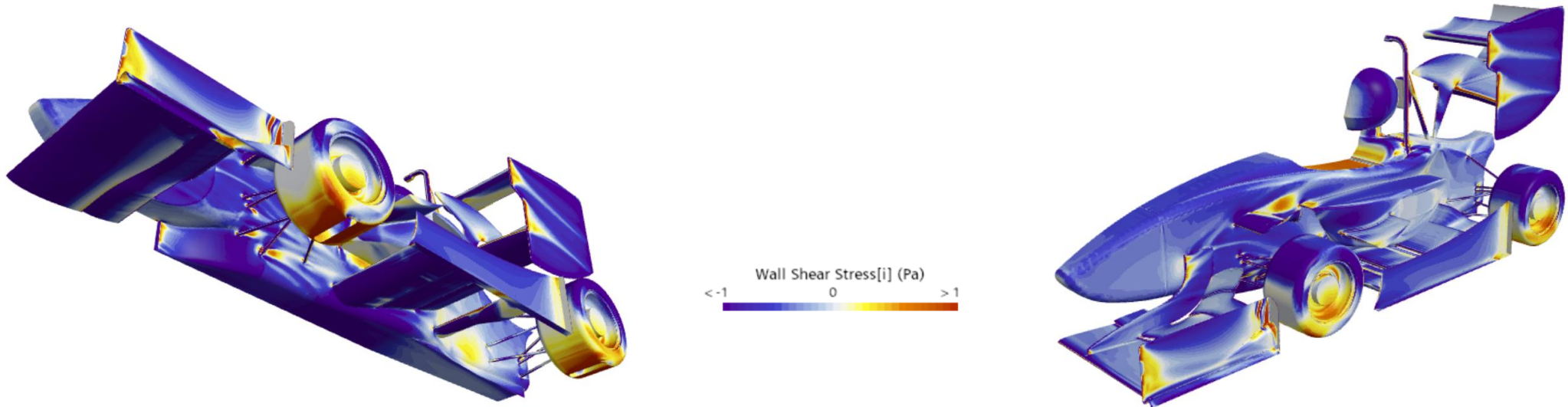
STAR-CCM+



# Post-processing d'une simulation

## *Contrainte pariétale (Wall-Shear Stress)*

Quand un fluide interagit avec une paroi, celui-ci ralentit et crée **une force de frottement** impliquant une **contrainte entre le fluide et la paroi**. Une contrainte pariétale positive indique un flux attaché à la surface. **Une contrainte pariétale nulle indique un point de décollement de la couche limite**. Une contrainte négative indique **une recirculation** du flux au niveau de la paroi. Cette contrainte s'exprime toujours selon un **vecteur de référence**.



# Validation d'un modèle

## *Principe et intérêt*

Un modèle mathématique, qu'il soit appliqué en FEA, en CFD, ou à n'importe quelle autre méthodologie repose sur un **jeu d'hypothèses et d'équations**. C'est la raison pour laquelle **une simulation ne sera jamais parfaitement correspondante et exacte à la réalité**. Cependant, un choix avisé dans les hypothèses permet de **s'approcher suffisamment de la réalité pour être utile**.

Le seul moyen de s'assurer de la pertinence de son modèle est de le **valider** en le comparant à des **méthodes expérimentales**, et en extrayant un pourcentage de fiabilité similaire pour **plusieurs cas d'étude**.



**Claude Rouelle** ✓ • Abonné

President @ OptimumG | Vehicle Dynamics, Engineering C...

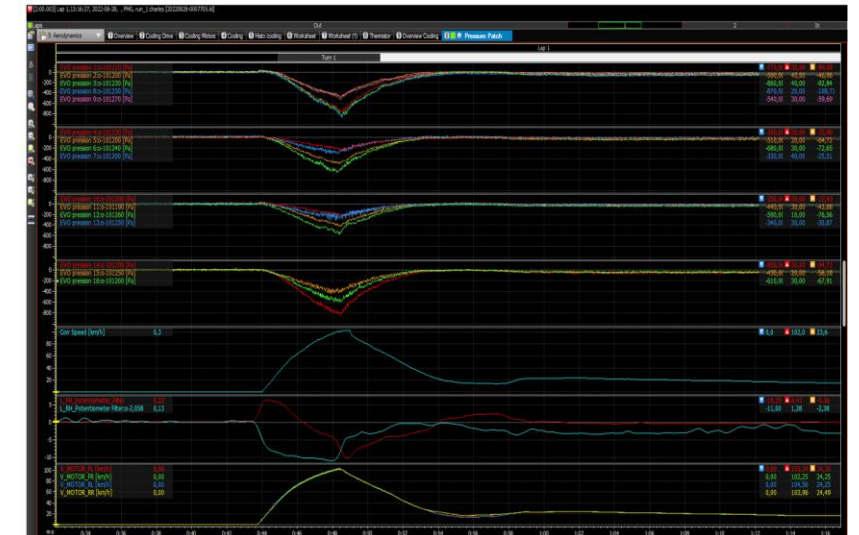
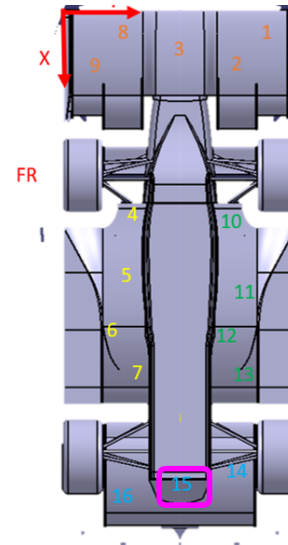
“Aussi, en tant que juge, je pense que toutes les simulations sont fausses. Seulement quelques unes sont utiles. Celles qui sont utiles sont celles dans lesquelles on a confiance... parce qu'elles ont été validées.”

# Validation d'un modèle

## Tests en conditions réelles

Une des possibilités consiste à utiliser des **capteurs** qui permettent de **comparer les données acquises en conditions réelles aux données issues de la simulation**.

Run 10						
Sensor	x	y	Element	Theoretical Pressure (CFD)	Practical Pressure	% of difference
1	225	1155	Front wang	-248.62	-324.00	23%
2	335	1055	Front wang	-190.23	-174.00	9%
3	235	680	Front wang	-280.83	-326.00	14%
4	1120	395	R undertray	-114.06	-158.10	28%
5	1470	400	R undertray	-334.36	-315.45	6%
6	1645	275	R undertray	-397.18	-363.33	9%
7	1890	420	R undertray	-183.71	-199.09	8%
8	220	355	Front wang	-271.88	-461.43	41%
9	340	245	Front wang	-177.91	-263.64	33%
10	1100	995	L undertray	-121.71	-140.48	13%
11	1465	1090	L undertray	-290.51	-303.81	4%
12	1650	983	L undertray	-385.53	-383.81	0%
13	1915	1035	L undertray	-215.52	-199.00	8%
14	2400	1040	Rear wang	-348.76	-328.00	6%
15	2500	670	Rear wang	-297.52	-157.00	90%
16	2620	370	Rear wang	-285.66	-243.00	18%



# Validation d'un modèle

## *Essais en soufflerie (Wind Tunnel)*

Effectuer des essais en soufflerie permet de **mieux contrôler les conditions liées à l'écoulement**, c'est-à-dire **limiter les perturbations** qui pourraient induire des erreurs dans la validation. La validation en soufflerie peut être **visuelle** (fumigation, tufting) ou **quantitative** (balances)



FRH/RRH	20	25	30	35
35	1.214	1.221	1.227	1.234
30	1.203	1.209	1.216	1.223
25	1.191	1.198	1.204	1.211
20	1.180	1.186	1.193	1.200

FRH/RRH	20	25	30	35
35	-0.08%	6.72%	4.38%	-38.68%
30	-4.25%	-4.82%	0.73%	-2.60%
25	0.67%	-13.28%	0.51%	-18.94%
20	-6.30%	-13.74%	-48.68%	-55.40%