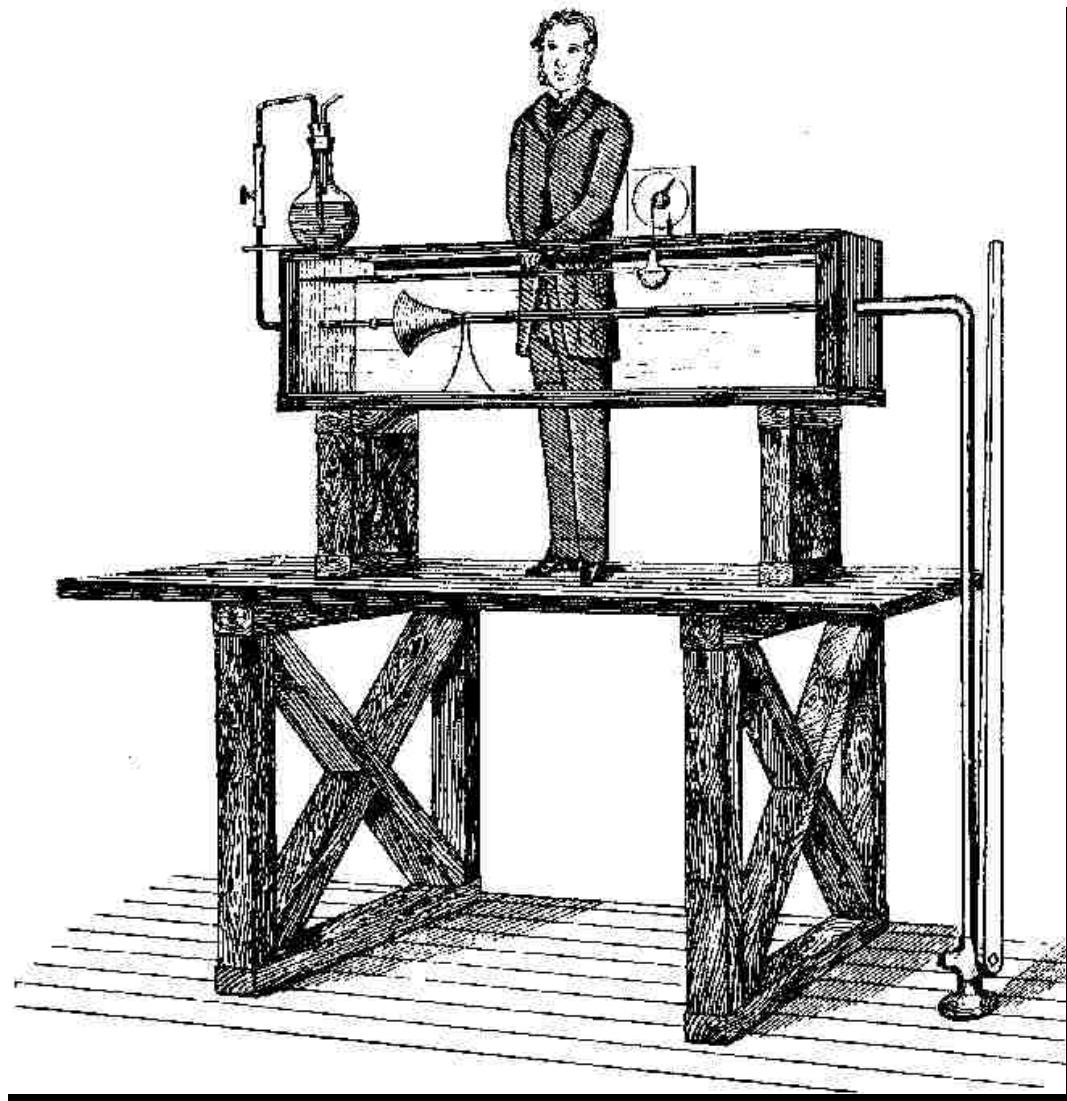
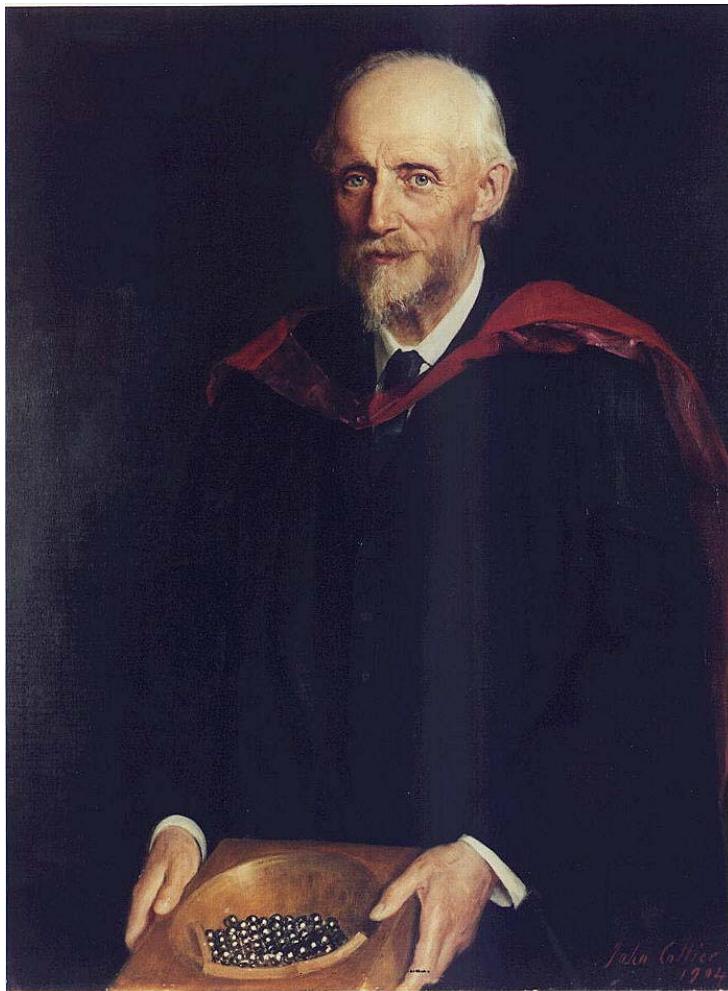


Chapitre 1

Introduction générale

Osborne Reynolds

1842-1912



Introduction - Généralités

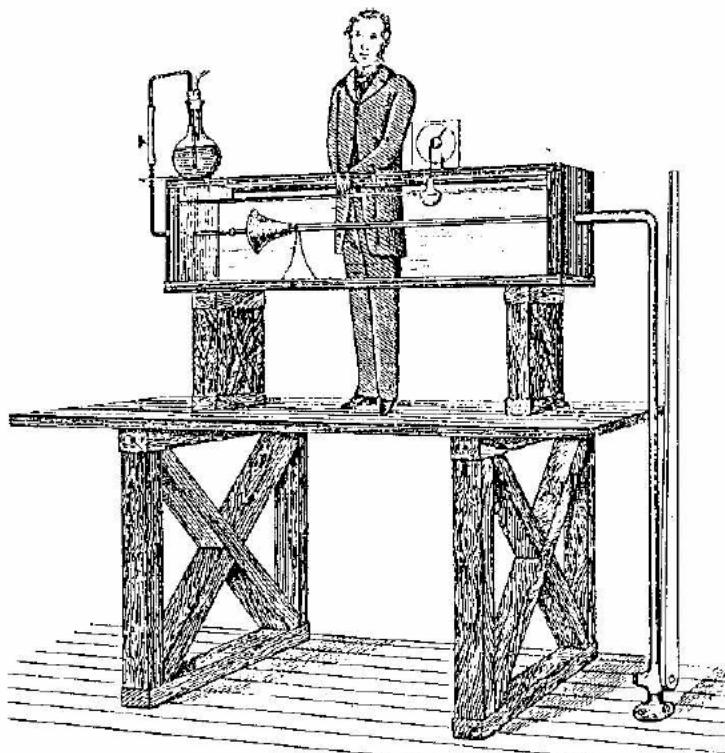
Expérience de Reynolds : injection d'un colorant dans un écoulement de type canal. Le canal a une largeur caractéristique égale à L , le fluide est injecté avec une vitesse débitante U . Sa viscosité est ν .

Trois états pour l'écoulement :
laminaire, transitionel, turbulent

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{L^2/\nu}{L/U} = T_{vis}/T_{in}$$

Introduction - Généralités

Expérience de Reynolds (1883) : régime laminaire / régime turbulent



The general results were as follows:—

- (1) When the velocities were sufficiently low, the streak of colour extended in a beautiful straight line through the tube, Fig. 3.

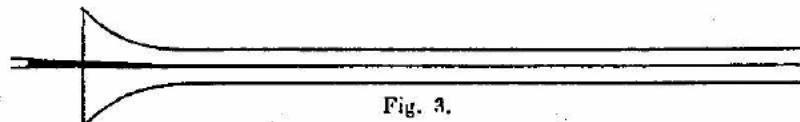


Fig. 3.

- (2) If the water in the tank had not quite settled to rest, at sufficiently low velocities, the streak would shift about the tube, but there was no appearance of sinuosity.

- (3) As the velocity was increased by small stages, at some point in the tube, always at a considerable distance from the trumpet or intake, the

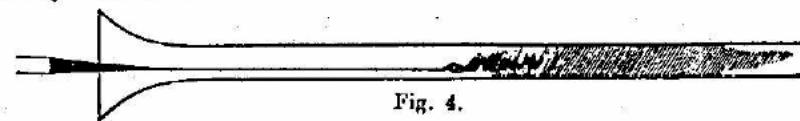


Fig. 4.

colour band would all at once mix up with the surrounding water, and fill the rest of the tube with a mass of coloured water, as in Fig. 4.

Any increase in the velocity caused the point of break down to approach the trumpet, but with no velocities that were tried did it reach this.

On viewing the tube by the light of an electric spark, the mass of colour resolved itself into a mass of more or less distinct curls, showing eddies, as in Fig. 5.

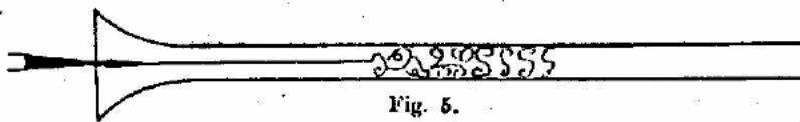


Fig. 5.

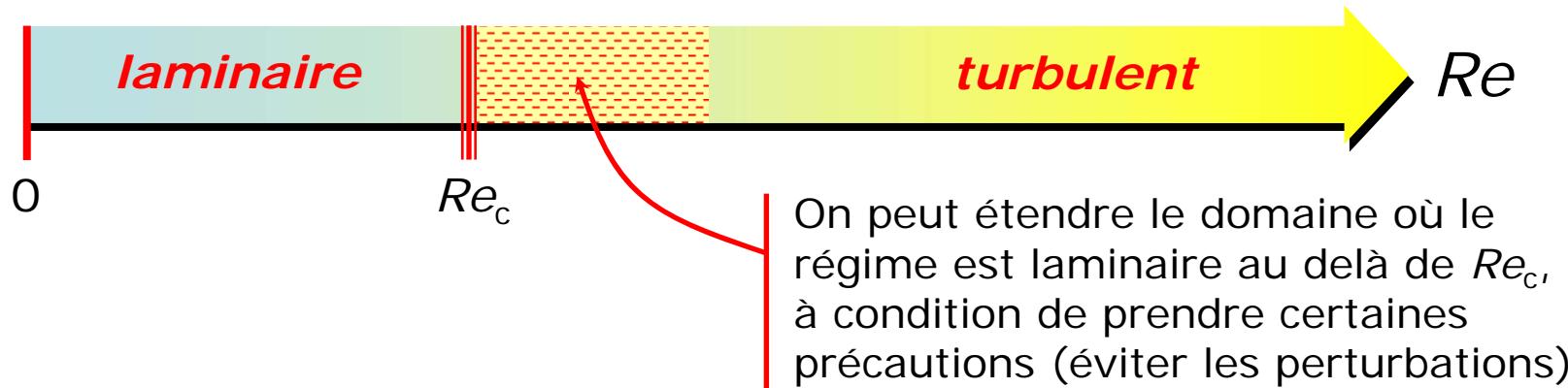
Introduction - Généralités

La turbulence apparaît lorsque la source d'énergie qui met le fluide en mouvement est suffisamment intense devant les effets visqueux que le fluide oppose pour se déplacer.

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{L^2/\nu}{L/U} = T_{vis}/T_{in}$$

Introduction - Généralités

- ▷ Le nombre de Reynolds est donc une grandeur sans dimension.
- ▷ La transition d'un régime laminaire à un régime turbulent s'observe pour $Re \approx 2000 = Re_c$ (**nombre de Reynolds critique**)



- ▷ En tout état de cause, on sait que l'écoulement est laminaire si son nombre de Reynolds est inférieur à 2000 (quelles que soient les perturbations subies par le système).

Introduction - Généralités

Paramètre de contrôle : nombre de Reynolds

$$Re_D = \frac{\text{temps diffusion}}{\text{temps convection}} \sim Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{L^2/\nu}{L/U} = T_{vis}/T_{in}$$

Rq. transition laminaire - turbulent pour $Re_D = \frac{\rho U_d D}{\mu} = \frac{U_d D}{\nu} \sim 2300$

On doit à Boussinesq (1880) et à Reynolds (1883) cette définition d'un régime turbulent par opposition à un régime laminaire.



O. Reynolds
(1842-1912)



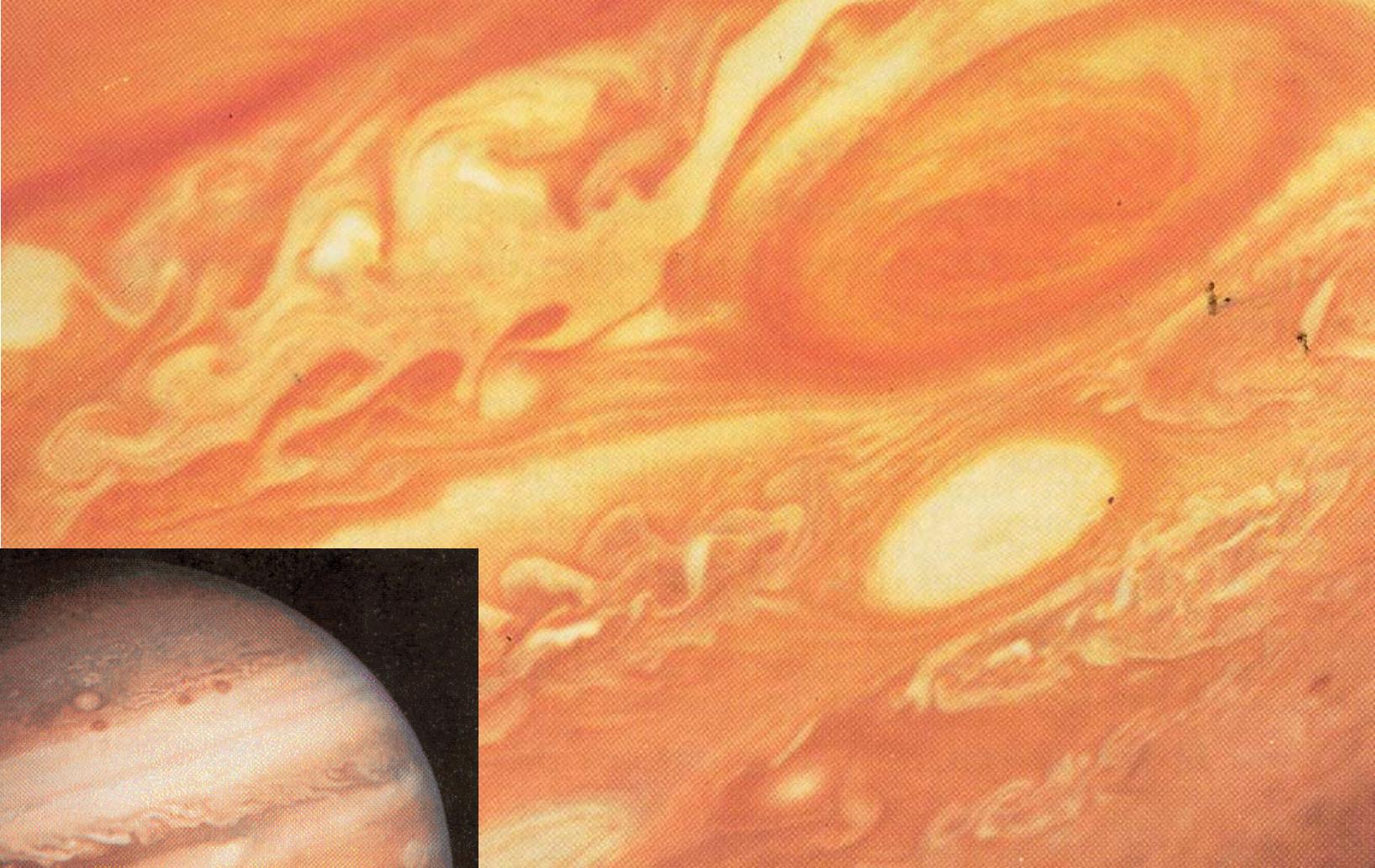
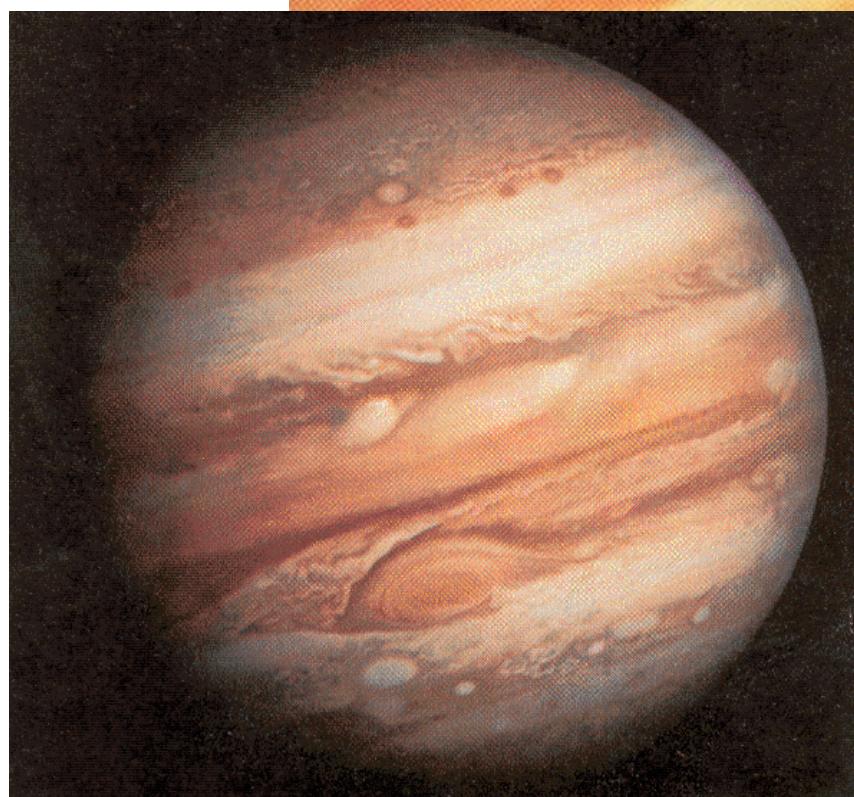
J. Boussinesq
(1842-1929)

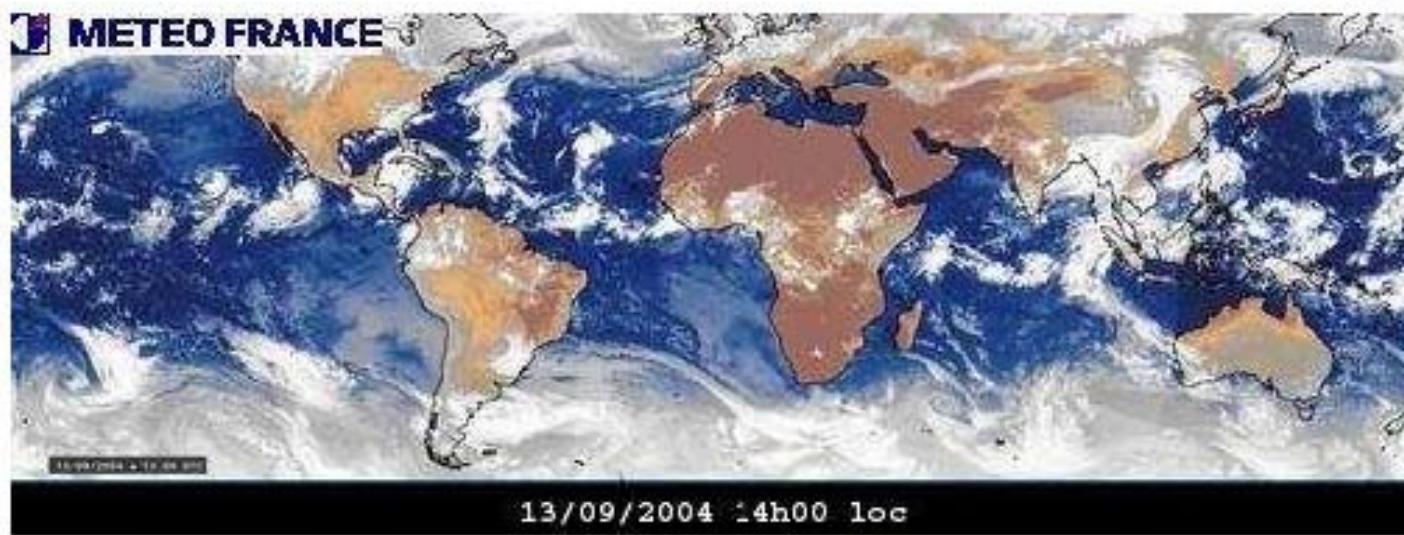
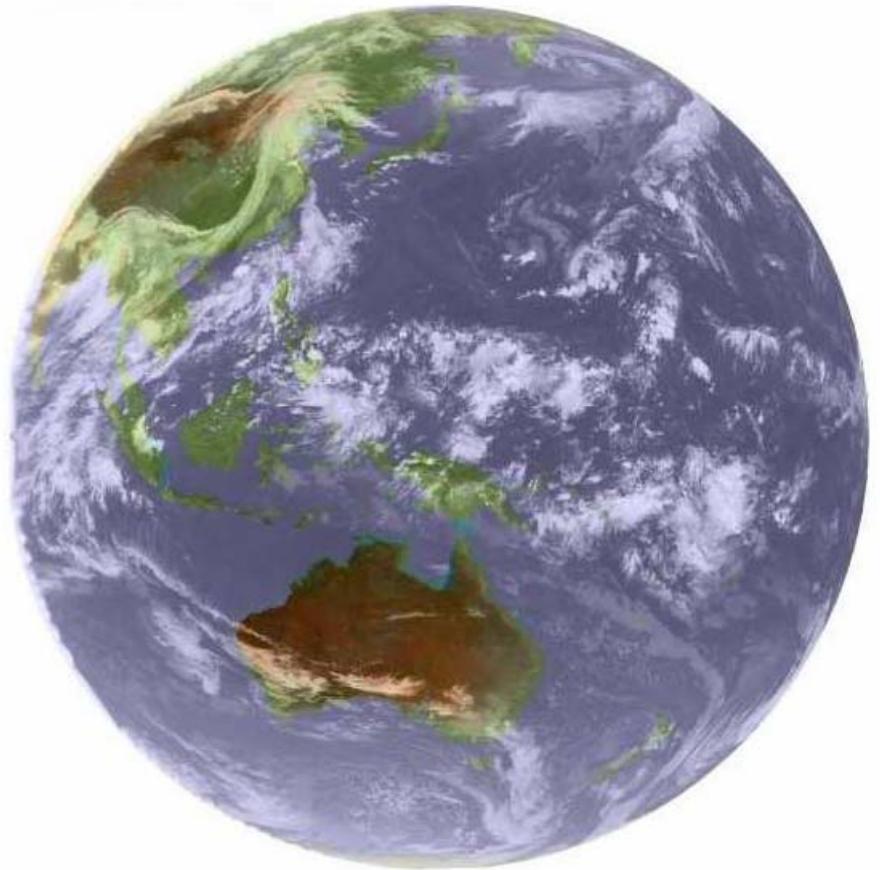


Turbulence
is every-
where.

Van Gogh : La nuit étoilée







Cyclone Ivan menaçant Cuba et la Floride, progressant à une vitesse de 14 km/h avec des vents à 260 km/h et des rafales à plus de 315 km/h (13 sept. 2004)



Eruption volcanique (Tavurvur, Papouasie-Nouvelle-Guinée, 8 août 1996)





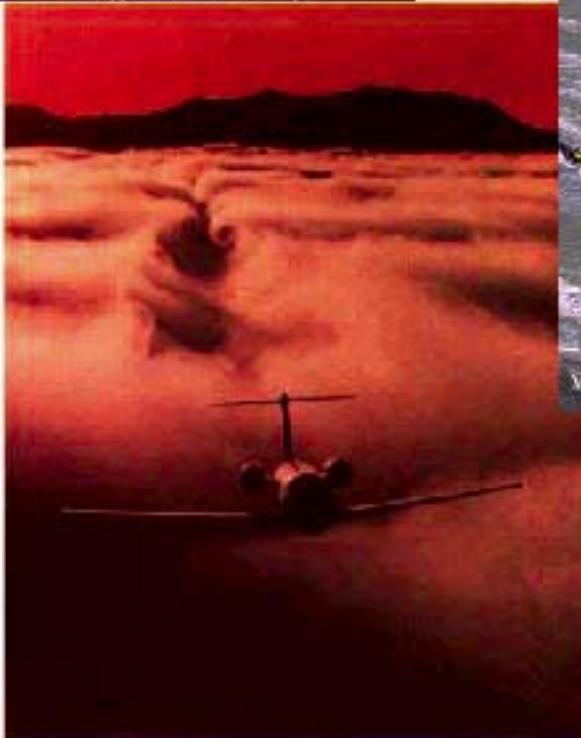
Aéronautique



Wake Vortex Study at Wallops Island
NASA Langley Research Center

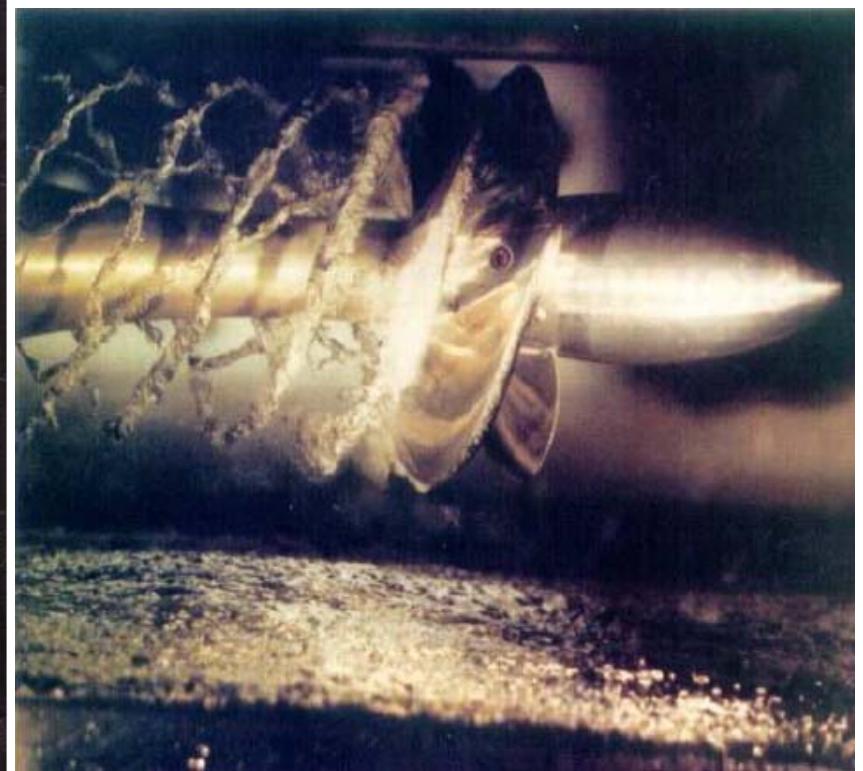
5/4/1990

Image # EL-1996-00130

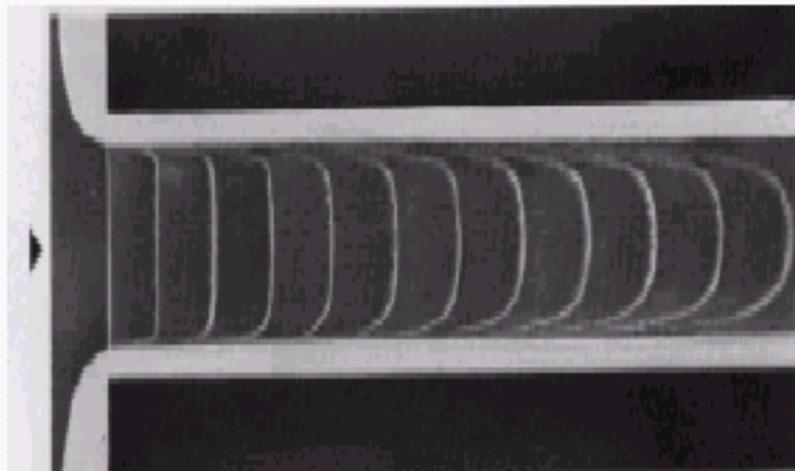


Wakes delight us
... and waste energy.

Hydrodynamique

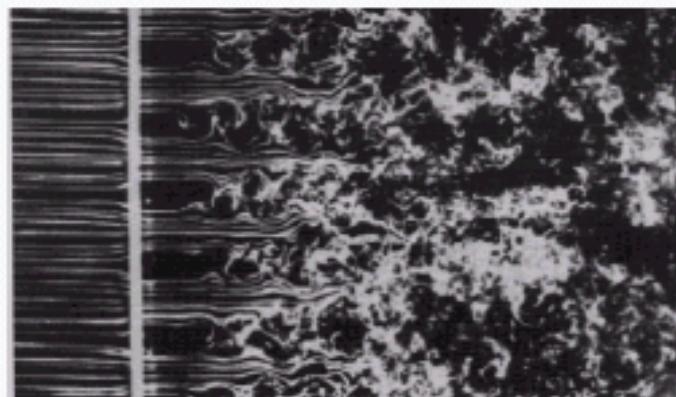


- (After Woods *et al.*, 1988)



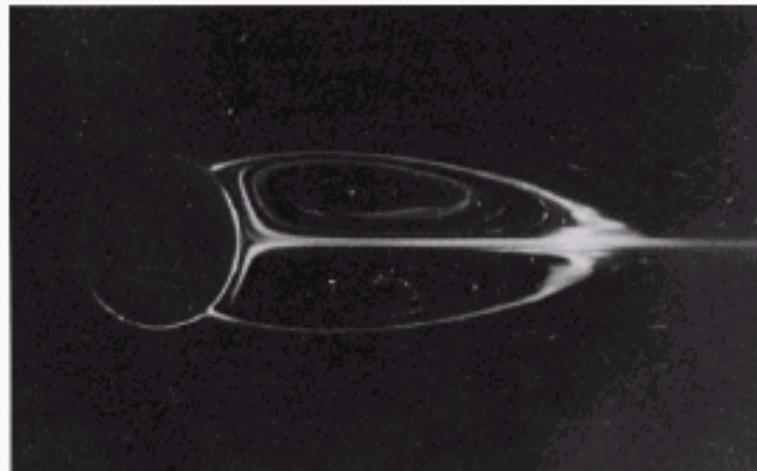
Pipe Flow $Re = 1.6 \times 10^3$

- (After Van Dyke, 1982)



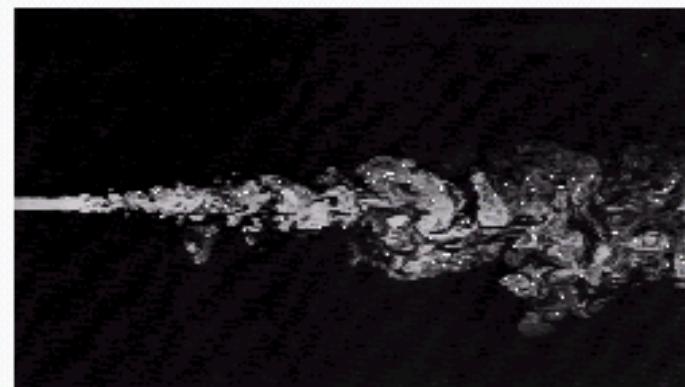
Homogeneous turbulence
behind a grid

- (After Van dyke, 1982)



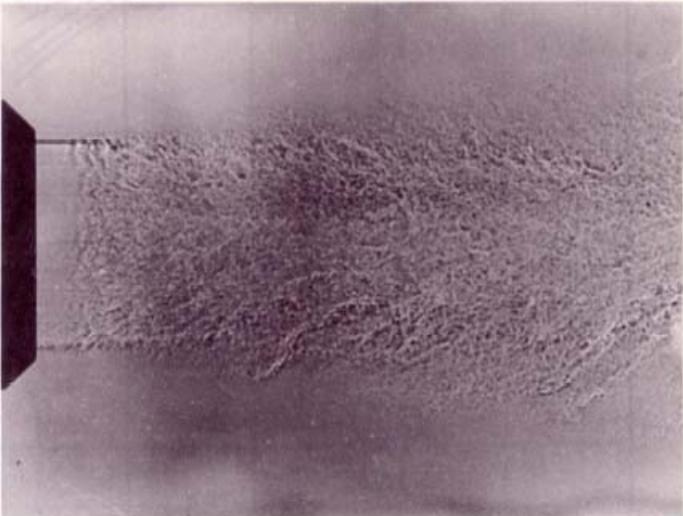
Flow past a circular

- (After Van Dyke, 1982)



Turbulent water jet

Ecoulements libres : jets



Mollo-Christensen (MIT, 1963)

$$\text{Re}_D = 4.6 \times 10^5$$



Ayrault, Balint & Schon (ECL, 1981)

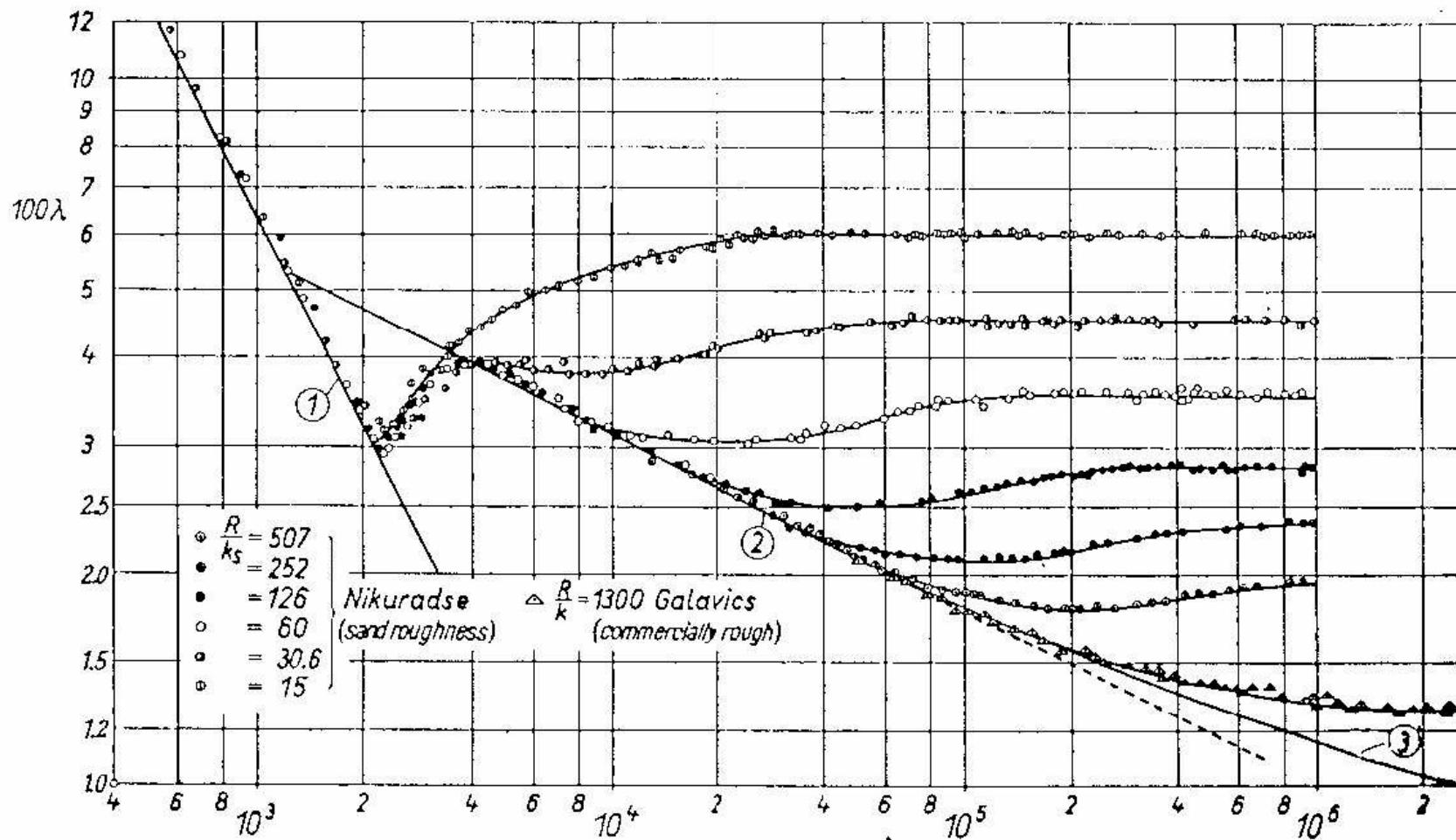
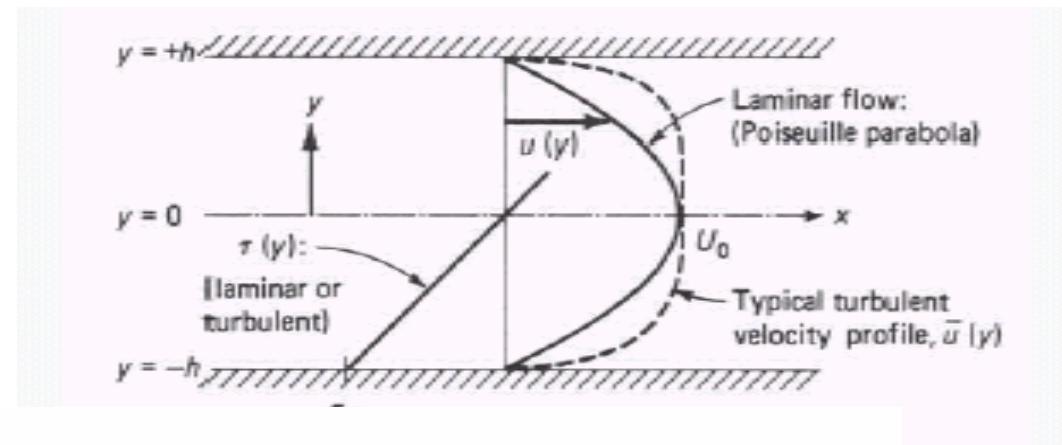
$$\text{Re}_D \simeq 1.1 \times 10^4$$



Kurima, Kasagi & Hirata (1983)

$$\text{Re}_D \simeq 5.6 \times 10^3$$

Ecoulement en conduite



Introduction - Généralités

Caractère principal : imprévisibilité .

Il est possible de prévoir si un écoulement sera turbulent ou non. Par contre, estimer en tout point et à tout instant la vitesse exacte du fluide est impossible.

Deuxième point essentiel : mélange .

La turbulence peut devenir un outil efficace pour le mélange de fluides ou de particules.

Troisième aspect important :

existence de nombreuses **échelles** spatiales et temporelles

Nécessité de **compréhension** , de **prédiction** et éventuellement de **maîtrise** du phénomène.

Introduction - Généralités

Definition of turbulent flow (Hinze)

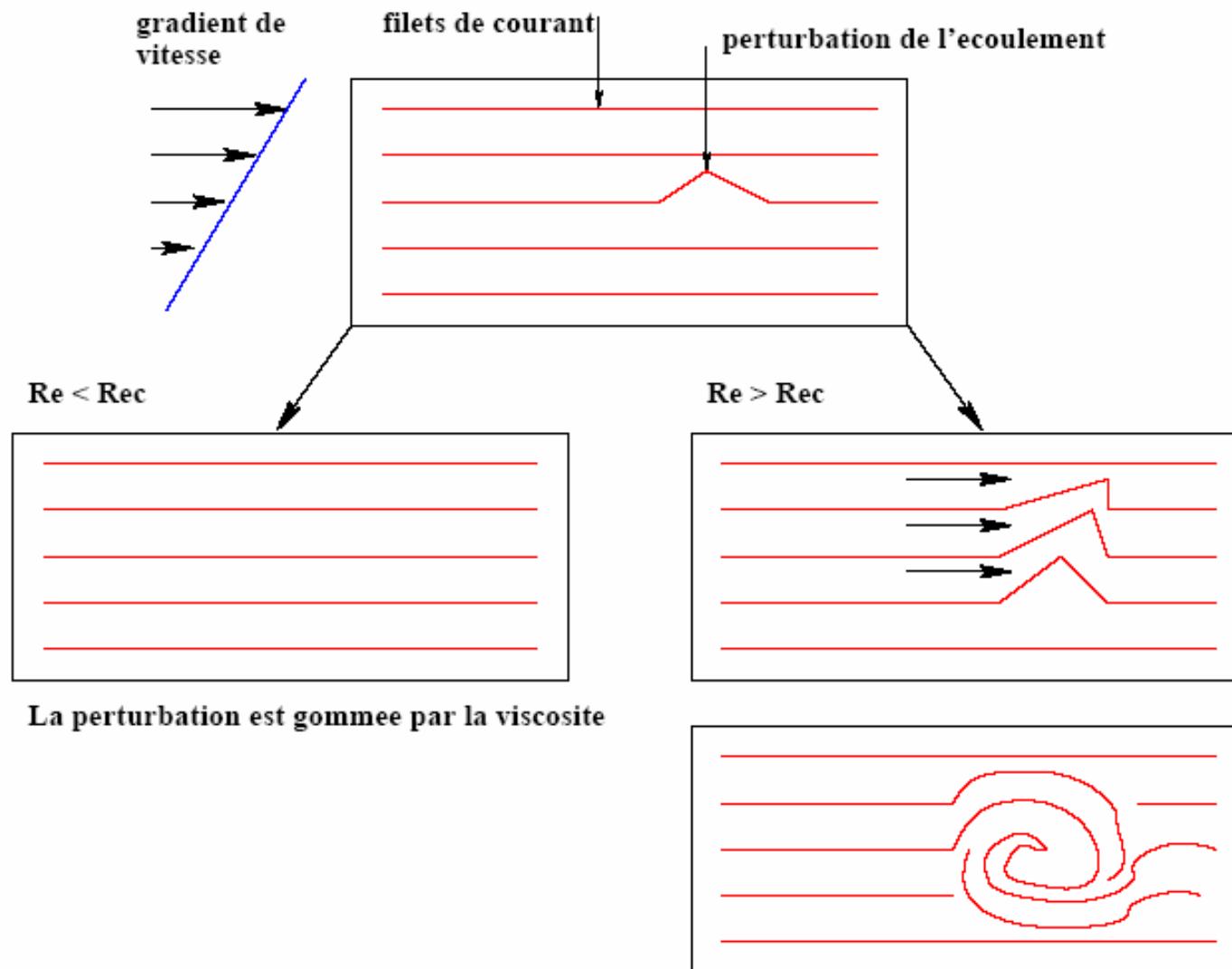
“Turbulent fluid motion is an irregular condition of flow in which the various quantities show a random variation in **time and space**, so that statistically distinct average values can be discerned”

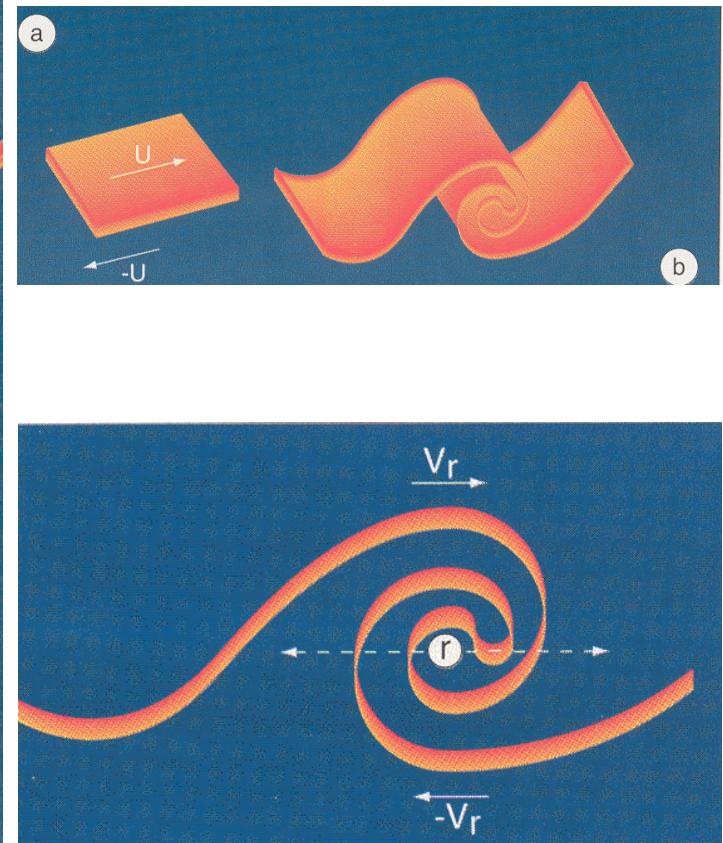
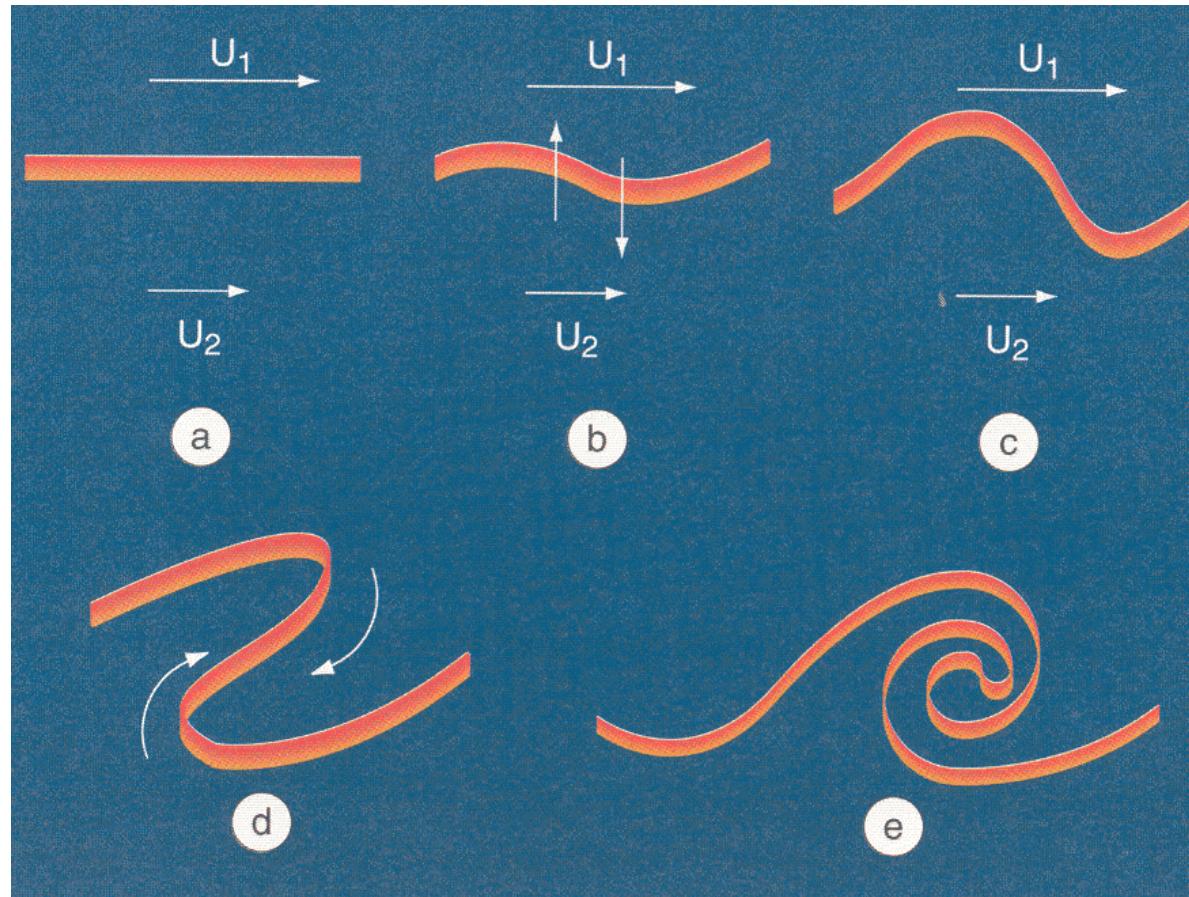
Signification physique du nombre de Reynolds

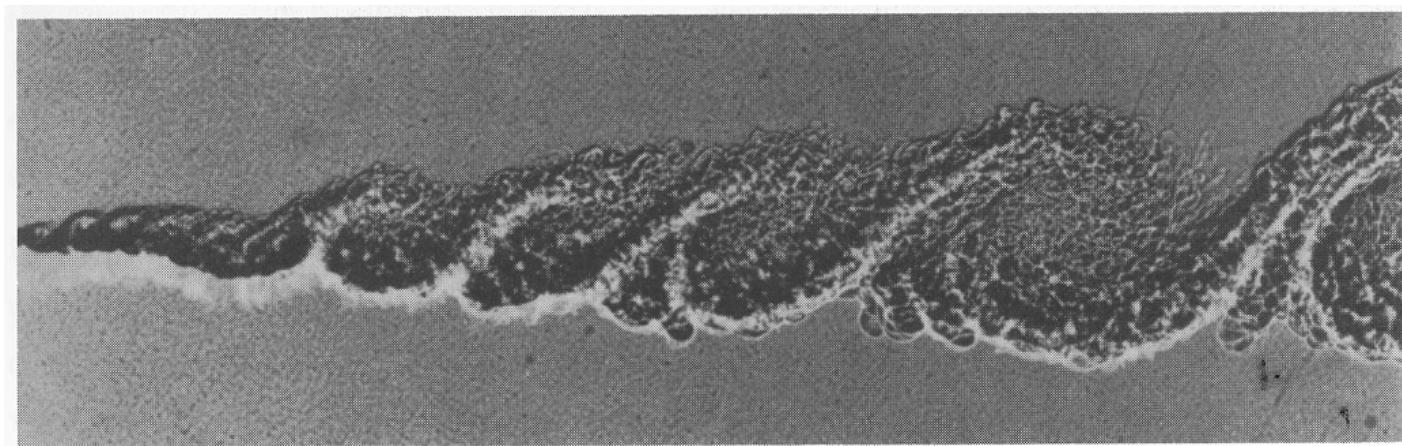
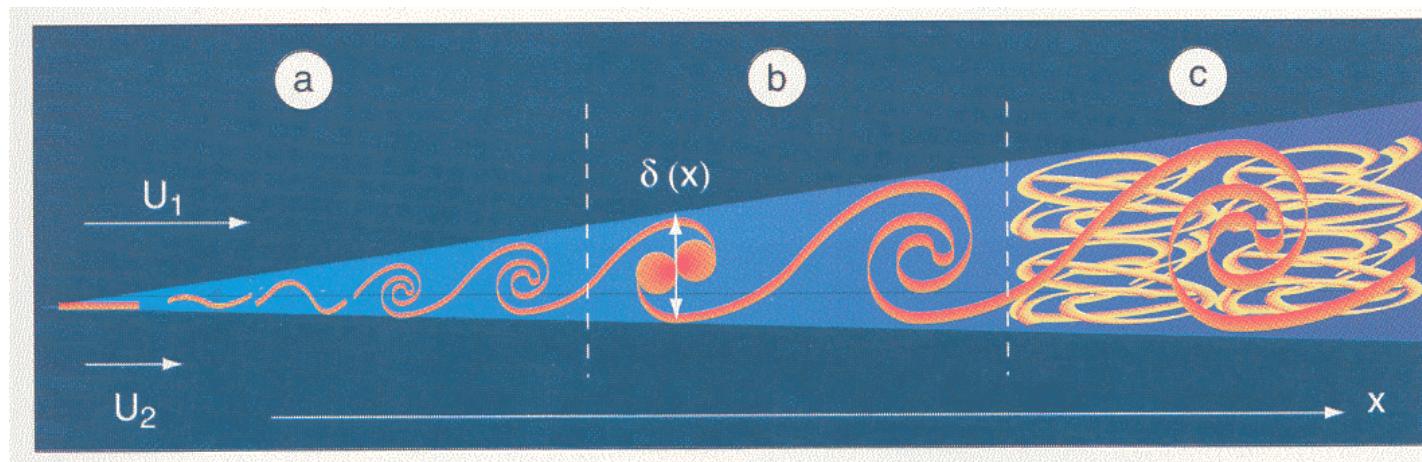
$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{L^2/\nu}{L/U} = T_{vis}/T_{in}$$

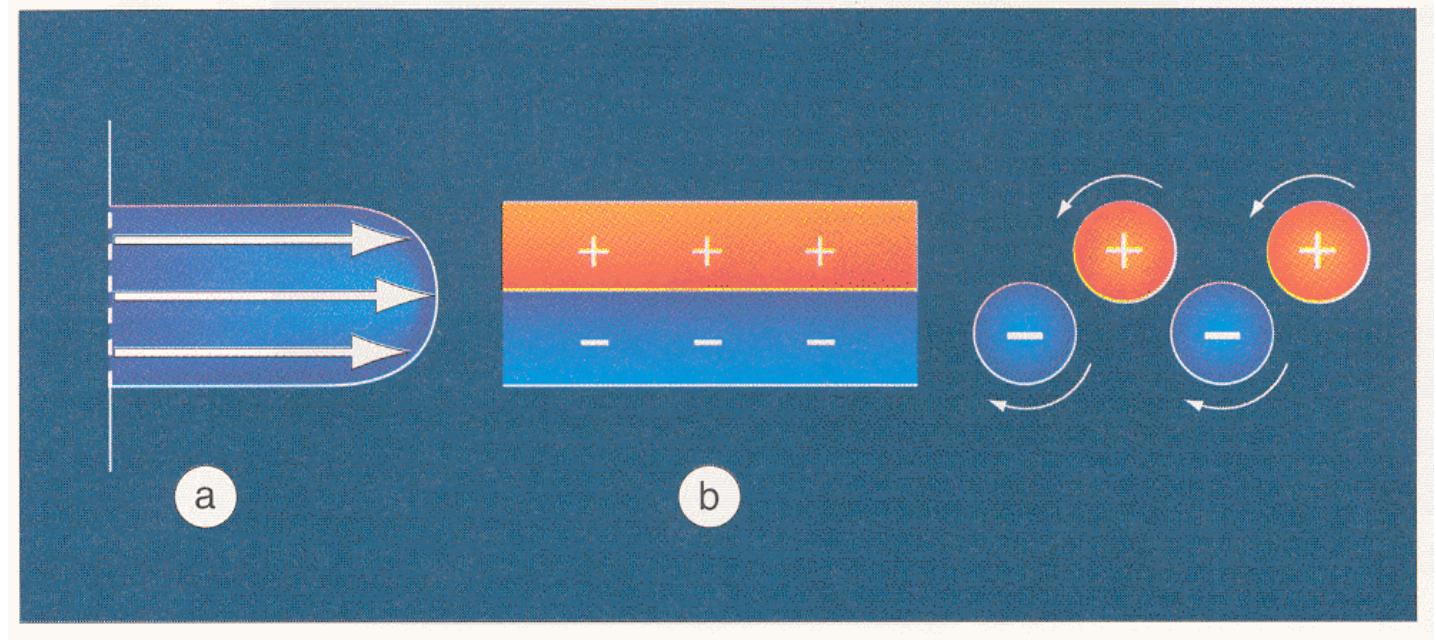
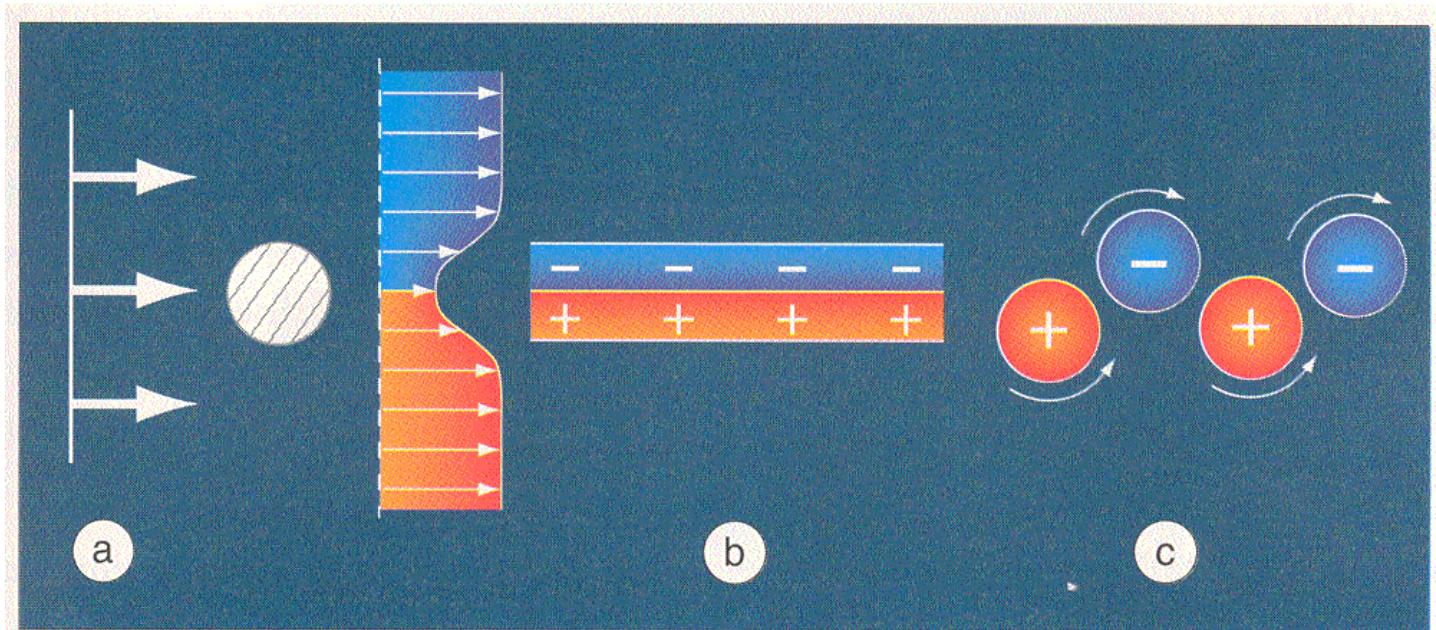
Il s'agit donc du ratio entre deux temps caractéristiques : le temps visqueux qui correspond au temps nécessaire au fluide pour gommer une perturbation quelconque qui apparaît dans l'écoulement et le temps cinétique correspondant au temps mis par une particule fluide pour traverser la longueur caractéristique de la géométrie.

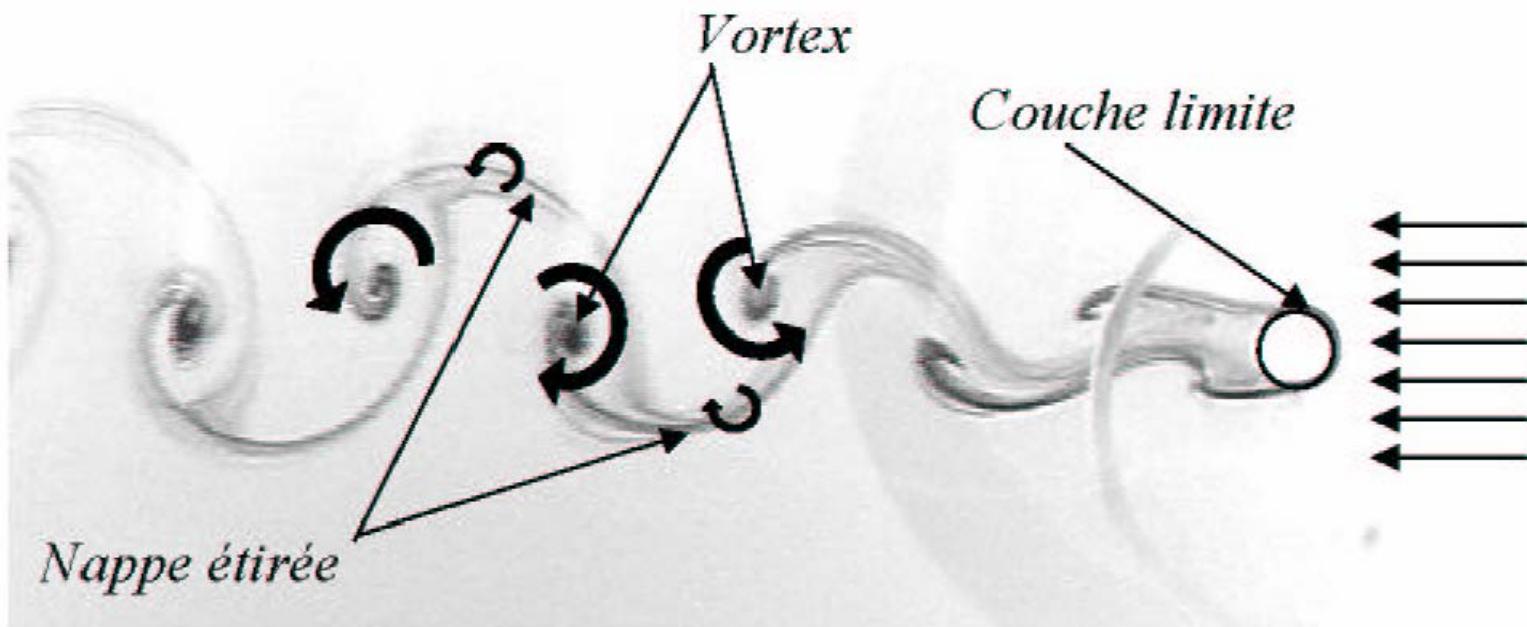
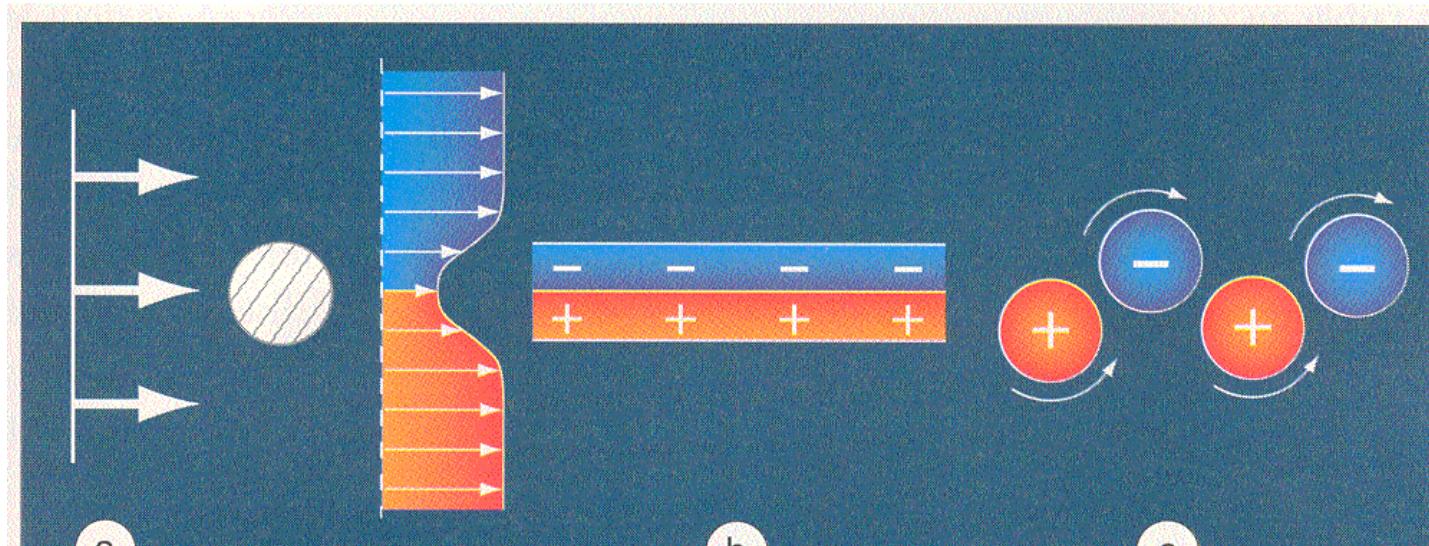
Signification physique du nombre de Reynolds











The range of scales is enormous
... typically 10^5 to 10^{21} .

Large scales: energy containing eddies

Small scales: dissipation

$$Re = \frac{\text{inertia}}{\text{viscous}}$$



The higher Re → the greater the separation of scales

Richardson

Big whirls have little whirls

that feed on their velocity

Little whirls have lesser whirls

and so on to viscosity

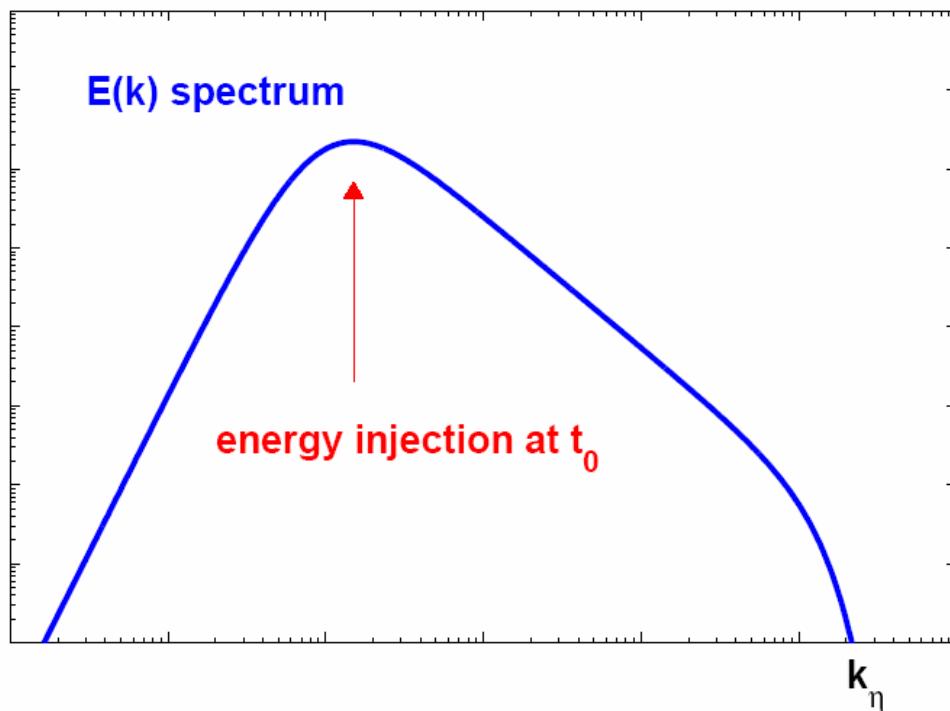
Non-linéarité des équations de Navier-Stokes

Limite pour la taille des plus petites structures dans un écoulement turbulent ?

Les plus petites échelles avant dissipation, ont un rôle très important.

Le transfert vers les grands nombres d'onde est limité par la viscosité moléculaire : les particules fluides ne peuvent conserver leur différence de vitesse

Echelles de Kolmogorov



Plus petites structures : $u_\eta k_\eta \sim 1/l_\eta$

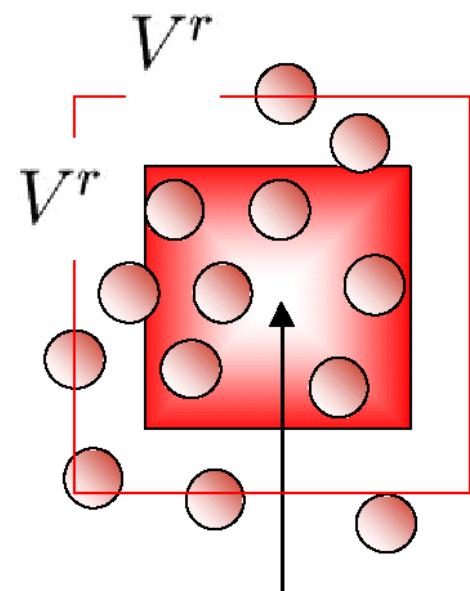
$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \simeq \nu \nabla^2 \mathbf{u}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \sim \frac{u_\eta^2}{l_\eta} \quad \nu \nabla^2 \mathbf{u} \sim \nu \frac{u_\eta}{l_\eta^2}$$

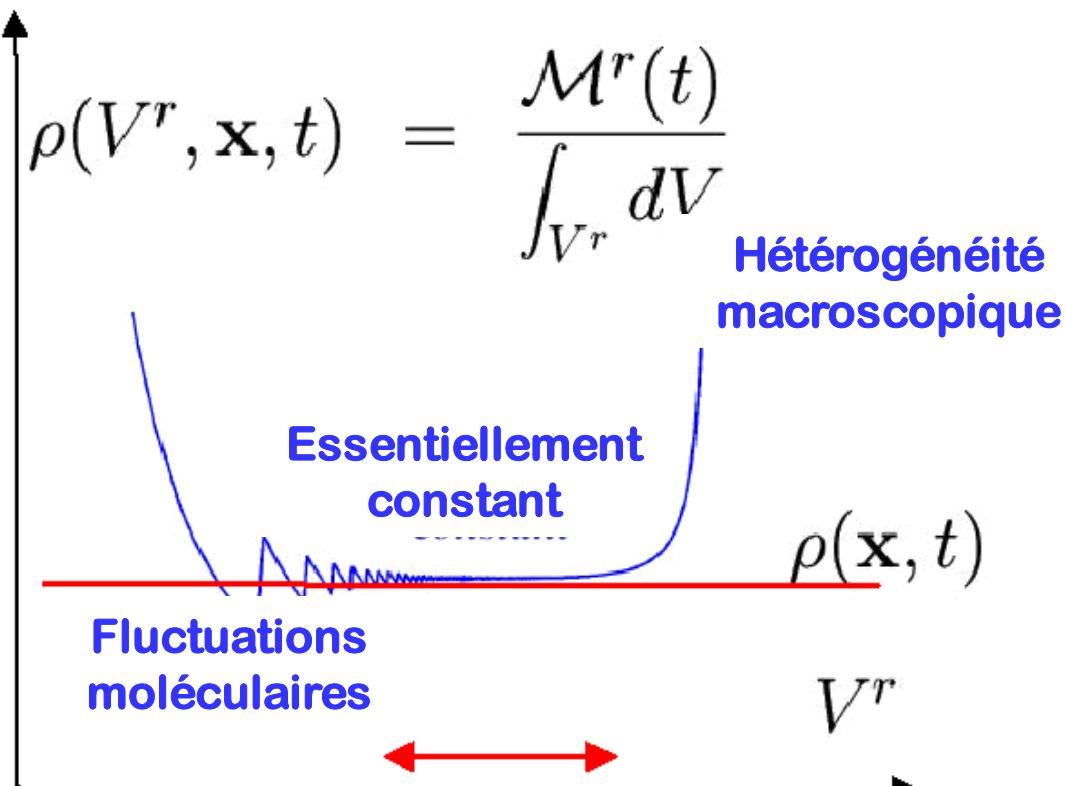
$$Re_\eta = \frac{l_\eta u_\eta}{\nu} \sim 1$$

La turbulence est du ressort de la mécanique des milieux continus

→ Hypothèse du milieu continu



Particule de fluide



La turbulence est du ressort de la mécanique des milieux continus

Limite pour la taille des plus petites structures dans un écoulement turbulent ?

Dans un gaz, c'est le libre parcours moyen qui fixe la limite de l'hypothèse du continu. La **théorie cinétique des gaz** permet de donner, pour l'air, l'approximation suivante du libre parcours moyen :

$$l_m = \frac{v}{c}$$

v est la viscosité cinématique [m^2/s] (voir paragraphe suivant), c la vitesse du son [m/s]

Lorsque la pression est suffisamment basse, la distance moyenne entre molécules devient parfois de même ordre de grandeurs que les dimensions caractéristiques de l'écoulement. Cela se produit par exemple pour les engins spatiaux rentrant ou sortant de l'atmosphère. Dans ces conditions l'hypothèse du continu n'est plus valable.

La turbulence est du ressort de la mécanique des milieux continus

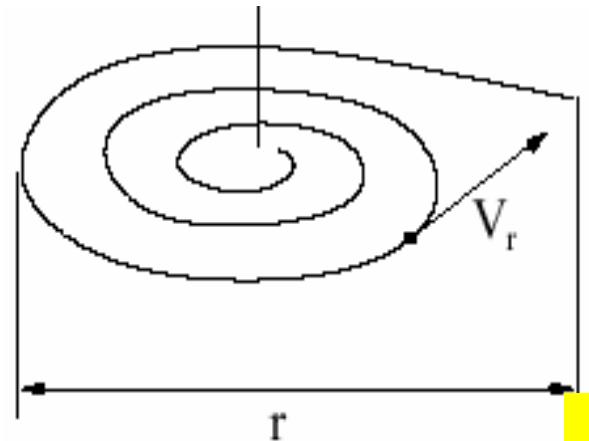
L'hypothèse du continu n'est pas valable aussi pour les écoulements turbulents où les plus petites échelles des fluctuations turbulentes atteignent des échelles comparables au libre parcours moyen.

Considérons à cet effet un tourbillon de taille r dont la vitesse caractéristique est V_r (vitesse circonférentielle). On suppose que le mouvement à l'intérieur du tourbillon est bloqué lorsque les forces de viscosité commencent à l'emporter sur les forces d'inertie. Cela est réalisé lorsque le nombre de Reynolds (sans unités) est de l'ordre de l'unité.

La turbulence est du ressort de la mécanique des milieux continus

Limite pour la taille des plus petites structures dans un écoulement turbulent ?

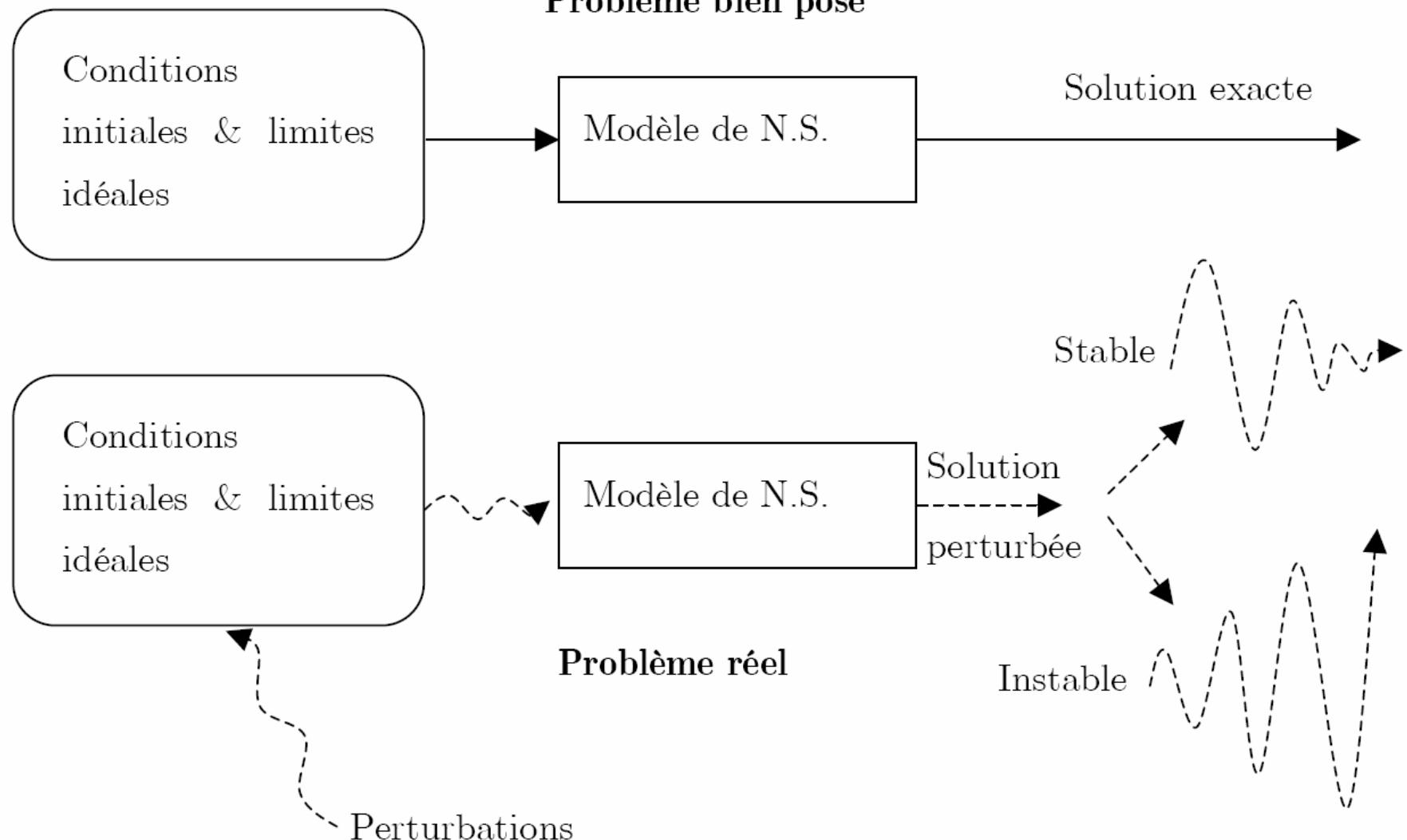
$$R_e = \frac{r V_r}{\nu} \approx 1$$



$$r = \frac{\nu}{V_r}$$

La plus petite échelle de turbulence est donc:

On voit donc que les plus petites échelles de la turbulence sont de même ordre de grandeur que le libre parcours moyens lorsque les fluctuations de vitesse sont de même ordre de grandeur que la célérité du son. Cela peut se produire dans des écoulements supersonique et l'on considère que l'hypothèse du milieu continu reste valable jusqu'à Mach 15



Les équations de la turbulence sont donc connues.

MAIS

- la résolution analytique de ces équations n'est pratiquement jamais réalisable
- les non-linéarités présentes dans les équations sont principalement à l'origine des difficultés pour obtenir une solution analytique
- les rares solutions analytiques disponibles peuvent traduire un état d'équilibre instable, ce qui supprime tout réalisme
- les solutions des problèmes d'intérêt sont presque toujours instationnaires
- de nombreuses méthodes numériques pourraient permettre la résolution des équations dans des cas réalistes si la puissance des ordinateurs était plusieurs milliards (de milliards...) de fois supérieure à celle d'aujourd'hui
 - coûts de calcul encore inaccessibles pour longtemps
- Des solutions correctes sont pourtant envisageables avec un certain nombre de simplifications.

- on dispose d'un modèle mathématique complet et de très bonne qualité
- la validité des équations est très large, en permettant de couvrir la très grande majorité des écoulements géophysiques ou industriels, qu'ils soient turbulents ou non

Les équations de la turbulence sont donc connues.

MAIS

Le cours : Modèles de turbulence

Objectifs du cours

Découvrir et comprendre la physique des écoulements turbulents

Etablir les bases pour une description statistique indispensable à la modélisation

Donner un aperçu de la simulation numérique et des techniques expérimentales pour les écoulements turbulents

Contenu du cours

- introduction aux écoulements turbulents
- les échelles de la turbulence
- description statistique de la turbulence
- écoulements turbulents de référence : turbulence homogène, écoulements cisaillés, écoulements de paroi
- Modèles de turbulence