

Transition à la turbulence dans l'écoulement de von Kármán symétrique

**Florent Ravelet^{1,2}, Arnaud Chiffaudel¹
& François Daviaud¹**

1 - Groupe Instabilités et Turbulence
Service de Physique de l'Etat Condensé
Direction des Sciences de la Matière
CEA Saclay - CNRS URA 2464

2 – IMFT, Toulouse
CNRS UMR 5502

Ecoulement entre disques tournants (Approche expérimentale)

- von Kármán (1921) : **écoulement visqueux** au dessus d'**un disque** infini

→ Recherche de solutions exactes auto-similaires de Navier-Stokes

- Ecoulement **visqueux** entre **deux disques**

Controverse sur le cas contrarotatif pour

$$Re \rightarrow \infty$$

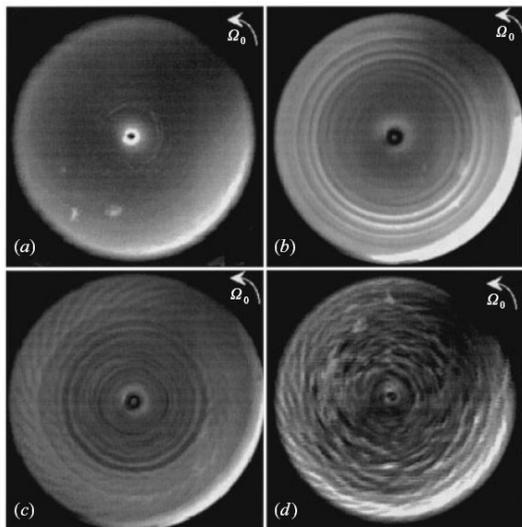
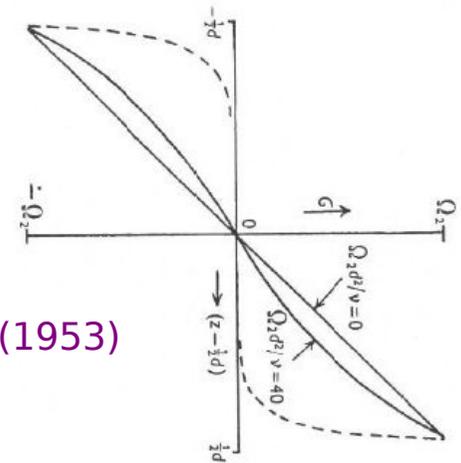
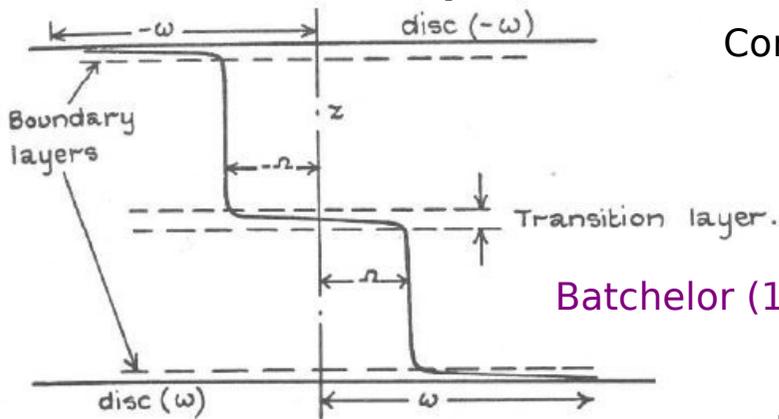
Batchelor (1951)

Stewartson (1953)

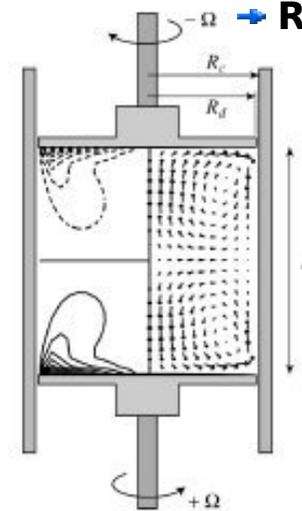
- Etudes des **instabilités** pour les écoulements visqueux entre disques

→ Géométrie **confinée**

→ **Rapport d'aspect unitaire**



Gauthier, Gondret & Rabaud,
J. Fluid Mech., 1999

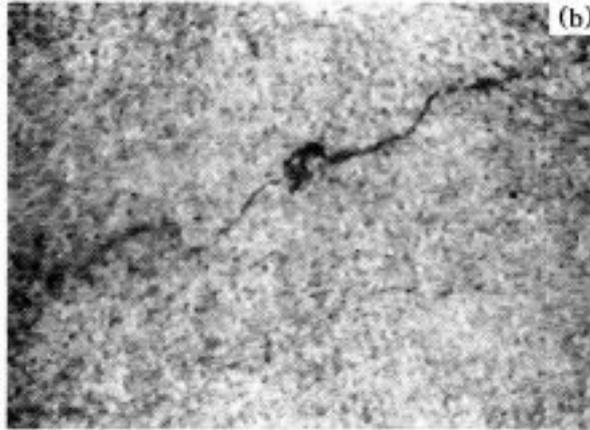


Observation d'un cycle
hétérocline à bas Re

Nore, Moisy & Quartier,
Phys. Fluids, 2005

Écoulements turbulents inertiels en rapport d'aspect unitaire (French Washing-Machine)

- **Filaments** intenses de **vorticité**

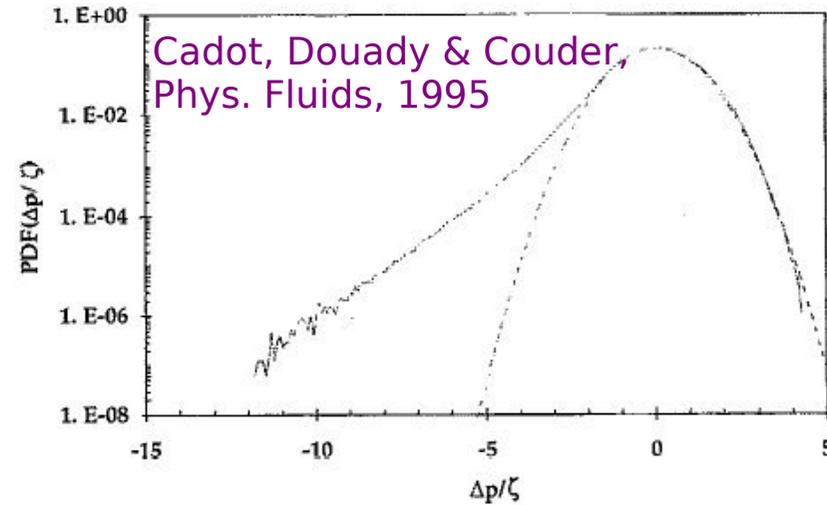


Douady, Couder & Brachet,
Phys. Rev. Lett., 1991

- **Asymétrie** des **fluctuations** de pression

Fauve, Laroche & Castaing,
J. Phys. II, 1993

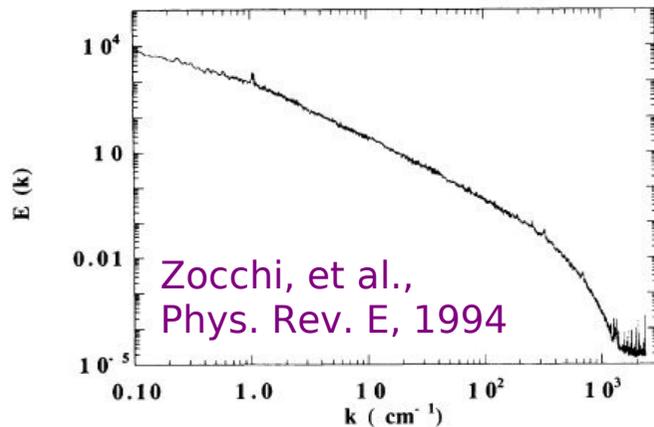
- Fluctuations de **puissance**



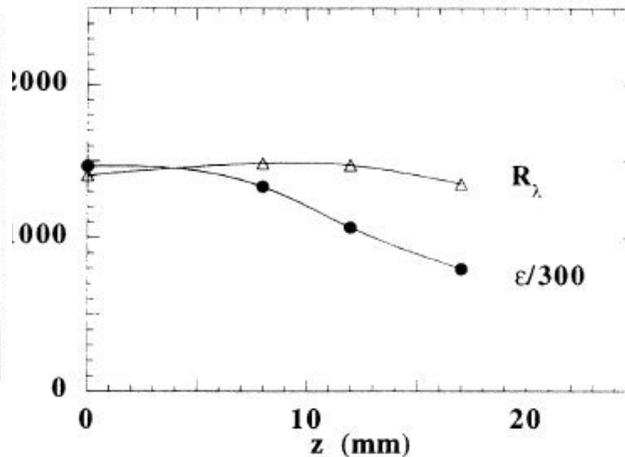
Cadot, Douady & Couder,
Phys. Fluids, 1995

Labbé, Pinton
& Fauve,
J. Phys. II, 1996

- Etudes des spectres et de l'**intermittence** des **petites échelles, inhomogénéité**



Zocchi, et al.,
Phys. Rev. E, 1994



- Entrainement **visqueux** vs. **inertiel**

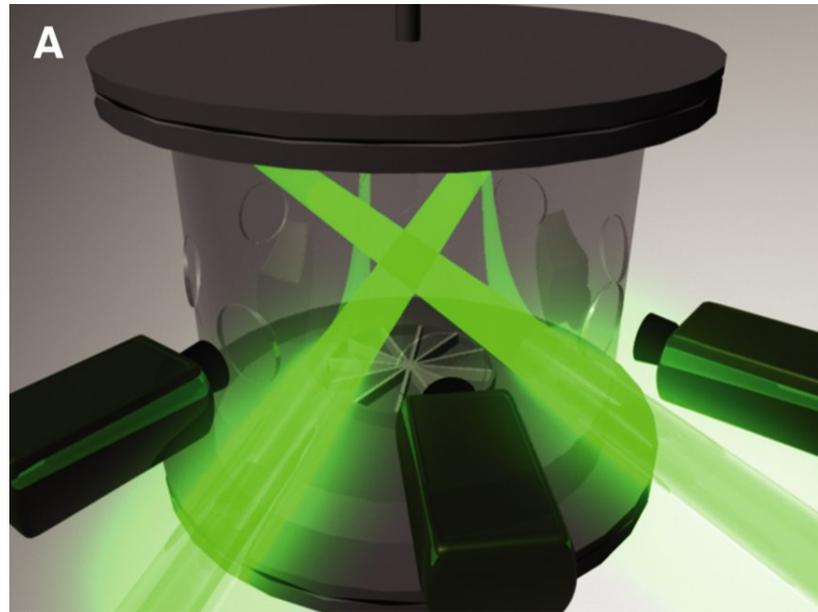
Cadot et al.,
Phys. Rev. E, 1997

- Dynamique des **grandes échelles**

Marié & Daviaud,
Phys. Fluids, 2004

Ravelet, Chiffaudel & Daviaud,
J. Fluid Mech., 2008

Turbulence Lagrangienne



- **Métrologie**
- PDF d'**accélération**: forte intermittence

La Porta et al.,
Nature, 2001

Mordant, Metz, Michel & Pinton,
Phys. Rev. Lett., 2001

- **Anisotropie** des petites échelles
Ouellette, Xu, Bourgoïn & Bodenschatz,
New J. Phys., 2006

MHD turbulente

Collaboration von Kármán Sodium

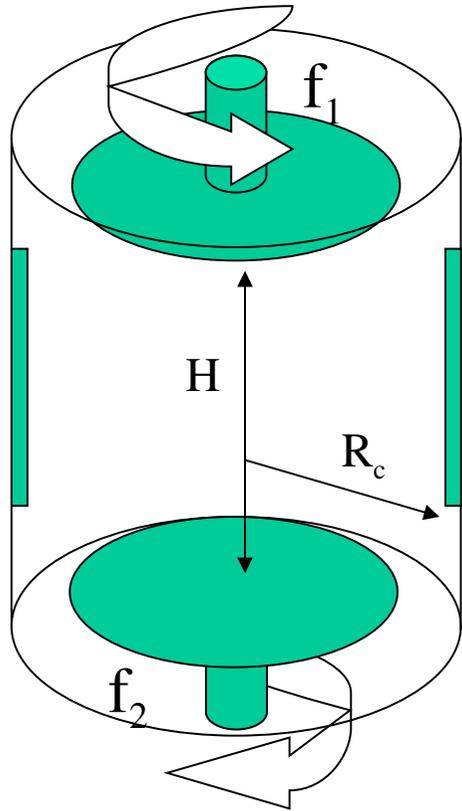


- **Induction**, effets lineaires et non-lineaires
Bourgoïn et al., Phys. FLuids., 2002 Pétrélis et al., Phys. Rev. Lett., 2003
- **Transport turbulent** du champ
Volk et al., Phys. Rev. Lett., 2006
- Effet **dynamo**
Monchaux et al., Phys. Rev. Lett., 2007

Transition à la turbulence dans l'écoulement de contrarotation forcé inertiellement

- Rôle des différentes échelles.
- Caractère fermé de l'écoulement.
- Points de vues spatiaux et temporels.
- Paramètre d'ordre ? Mesures locales et globales.
- Spécificités de l'entraînement inertiel (au moyen de pales).

Caractéristiques de l'expérience



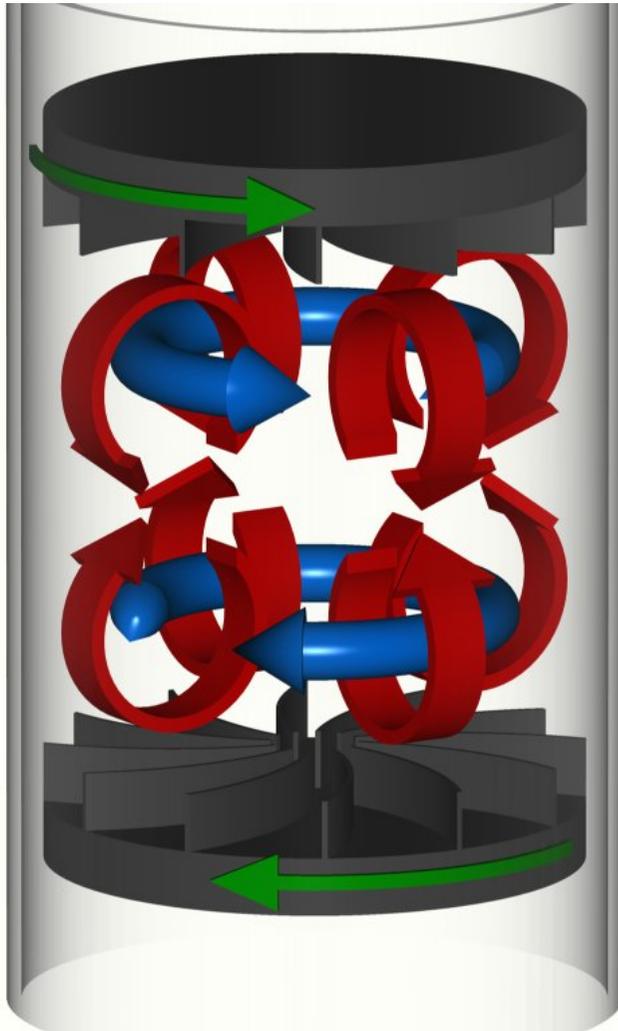
- rayon de la cuve : $R_c = 100$ mm
- distance entre disques : $H = 180$ mm (rapport d'aspect $\frac{H}{R_c} = 1.8$)
- deux moteurs brushless indépendants de 2 kW, réglés en vitesse/couple
- fréquence de rotation 2 – 20 Hz
- Fluides utilisés : eau, mélanges eau/glycérol et sodium

$$Re = 10^2 \quad \Rightarrow \quad Re = 10^6$$

entraînement **inertiel** avec turbines munies de **pales**



Phénoménologie de l'écoulement contrarotatif



Symétries du dispositif :

- Axisymétrie.
- Invariance par rotation de π autour de tout axe radial passant par le centre du cylindre : symétrie par retournement R_π

- Deux cellules en contrarotation séparées par une couche de cisaillement
- Pompage centrifuge, cylindre fermé et écoulement incompressible : Deux cellules toriques de recirculation poloidale

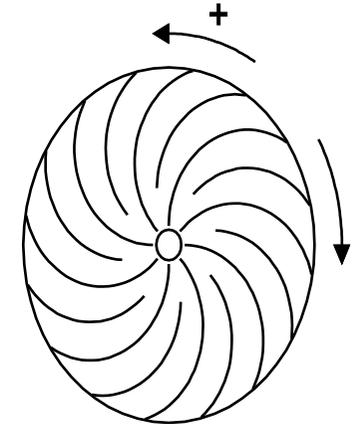
Paramètres de contrôle en contrarotation, grandeurs mesurées

$$\left\{ \begin{array}{l} f \\ R_e = \frac{2 \pi R_c^2 f}{\nu} \end{array} \right.$$

Intensité du forçage

Nombre de Reynolds intégral

Forme des turbines (rayon, courbure des pales)



$$\left\{ \begin{array}{l} V = \frac{\text{Vitesse}}{2 \pi R_c f} \\ K_p = \frac{\text{Couple}}{r R_c^5 (2 \pi f)^2} \end{array} \right.$$

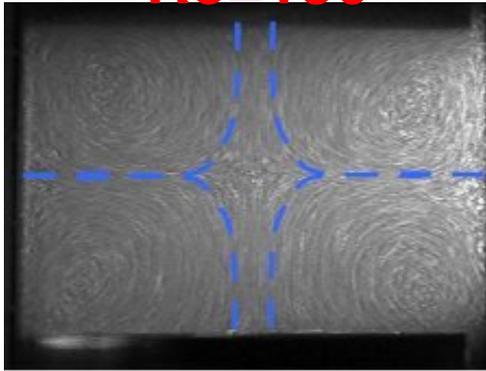
Mesure de **vitesse** par Velocimétrie Laser Doppler

Couple adimensionnel (équivalent à un «Cx») mesuré comme une image du courant fourni aux moteurs.

Etat de base et premières bifurcations.

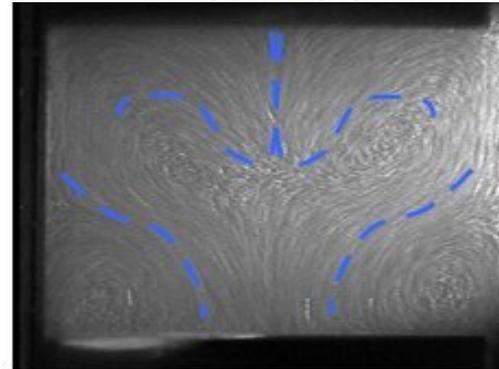
Plan
médian

Re=150



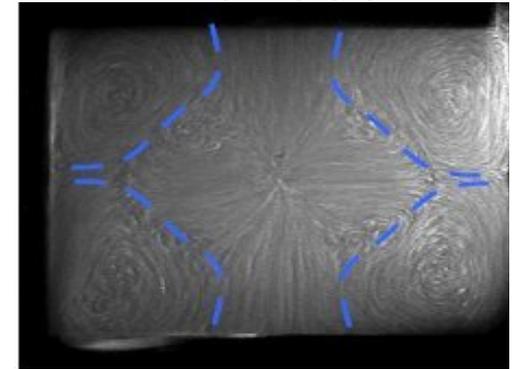
Etat de base
stationnaire
axisymétrique

Re=185



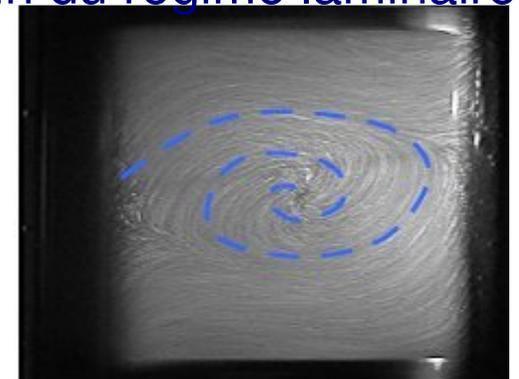
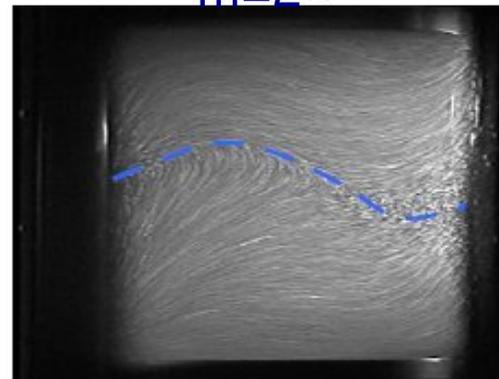
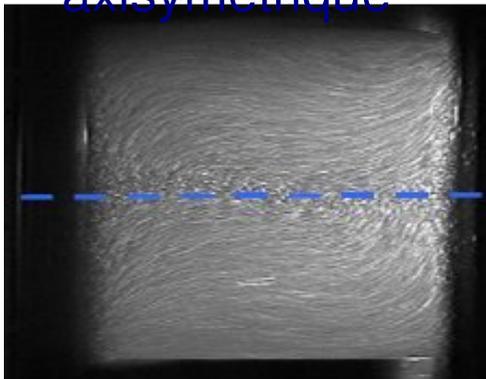
Premier mode
stationnaire
 $m=2$

Re=300



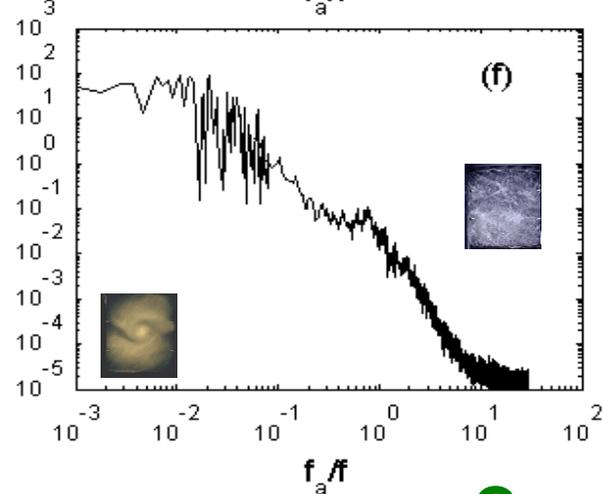
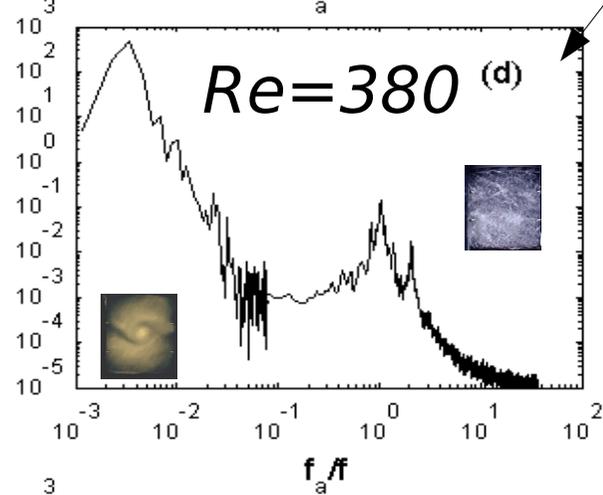
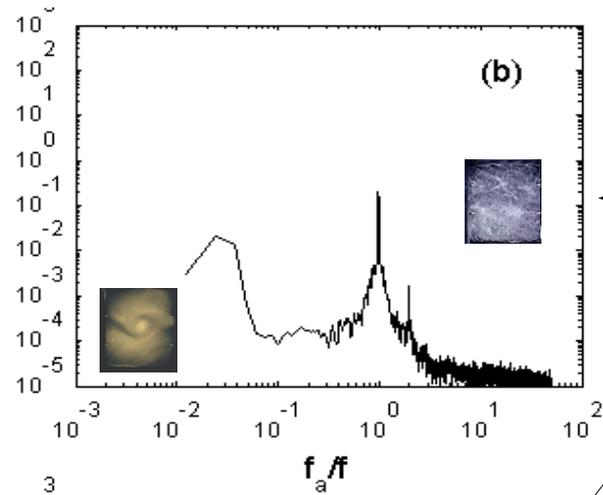
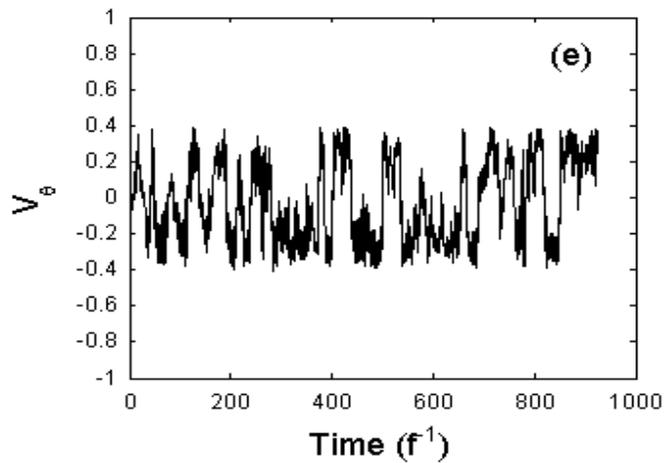
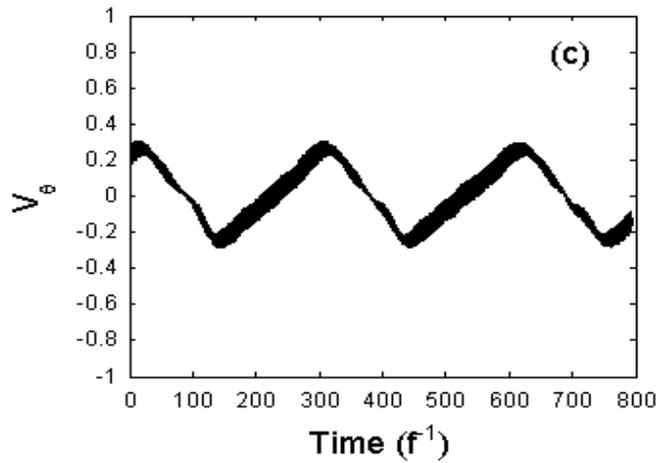
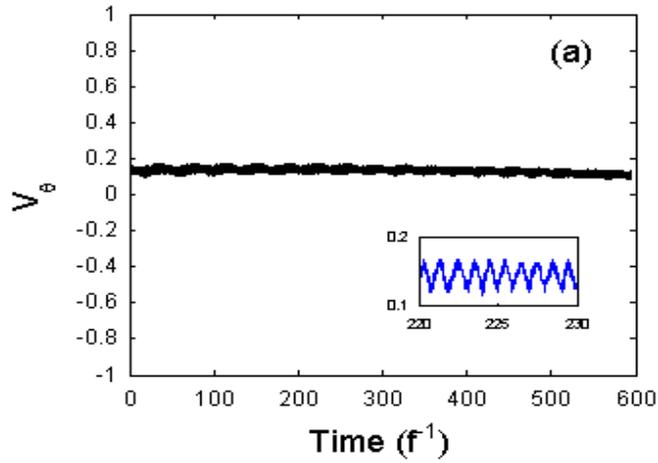
Couche de mélange
enroulée.
Fin du régime laminaire

Plan
tangent
au
cylindre



Construction des basses fréquences

v_θ en $\{r = 0.9; z = 0\}$

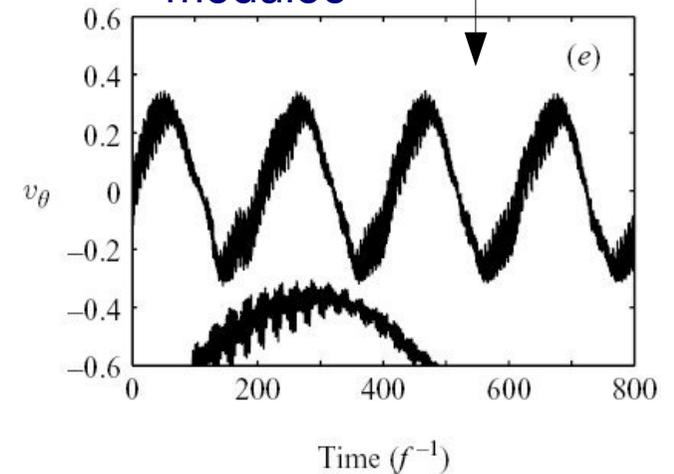


$Re = 330$
périodique

Brisure de parité
Onde propagative

$Re = 390$

Quasi-périodique
Onde propagative
modulée

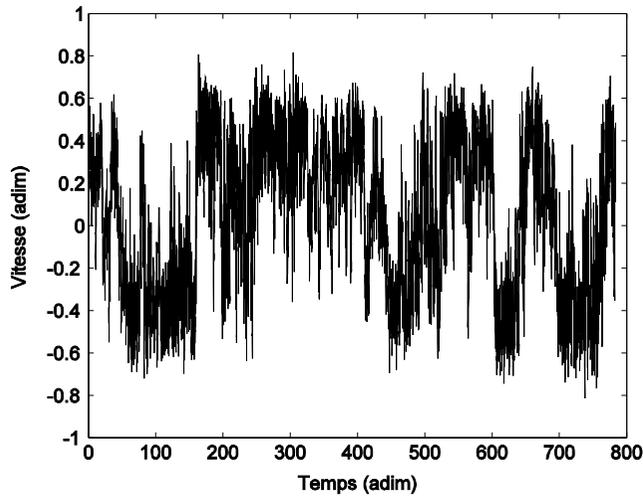


$Re = 450$
Chaotique

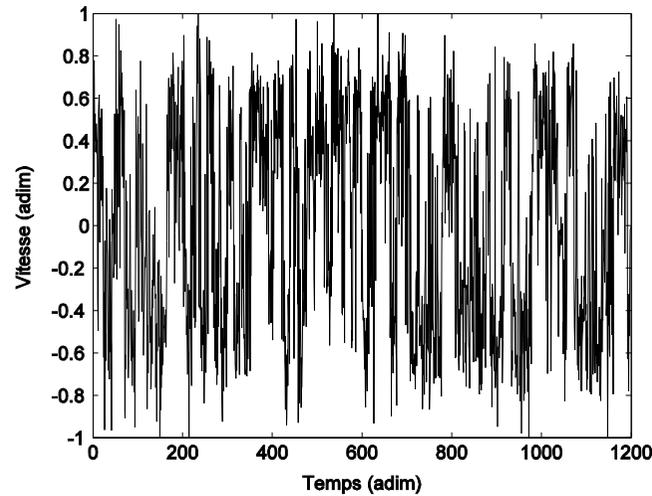
Construction partie basse en f^{-1}

Du chaos à la turbulence : construction des hautes fréquences

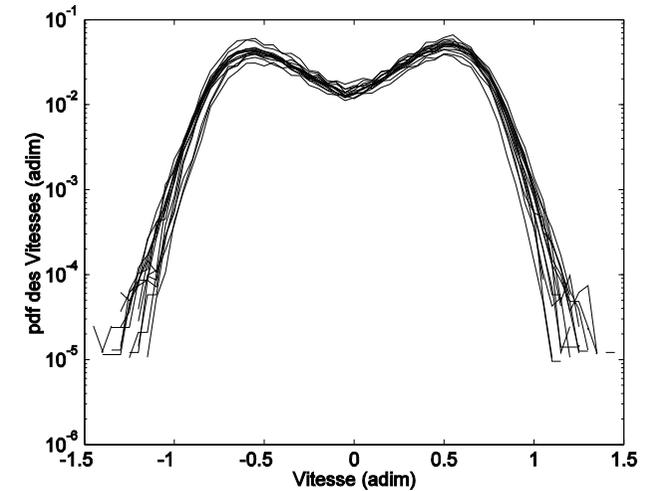
v_θ en $\{r = 0.9; z = 0\}$



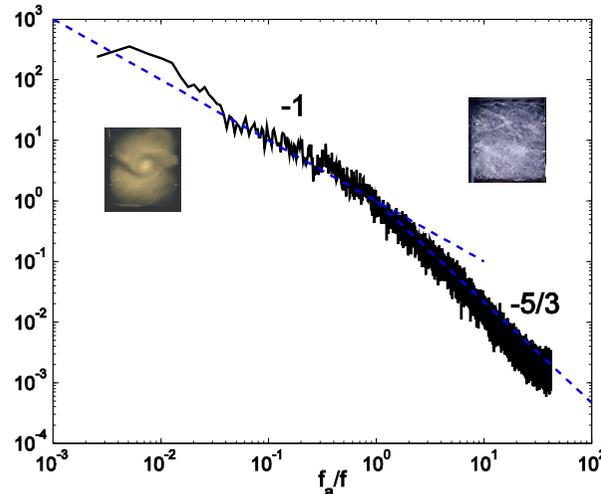
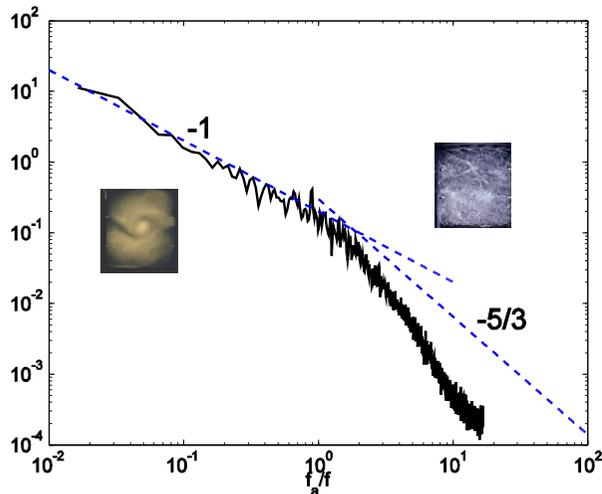
$Re = 1000$



$Re = 4000$

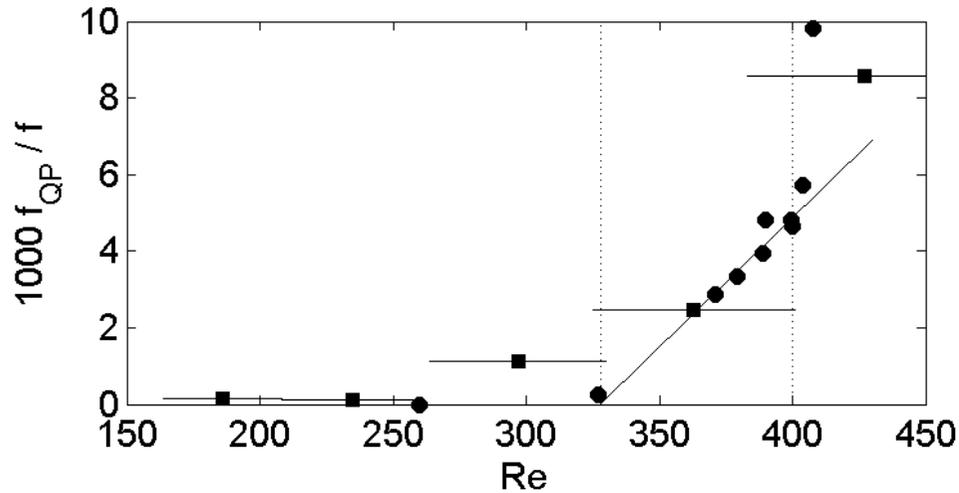


$2000 \leq Re \leq 6500$

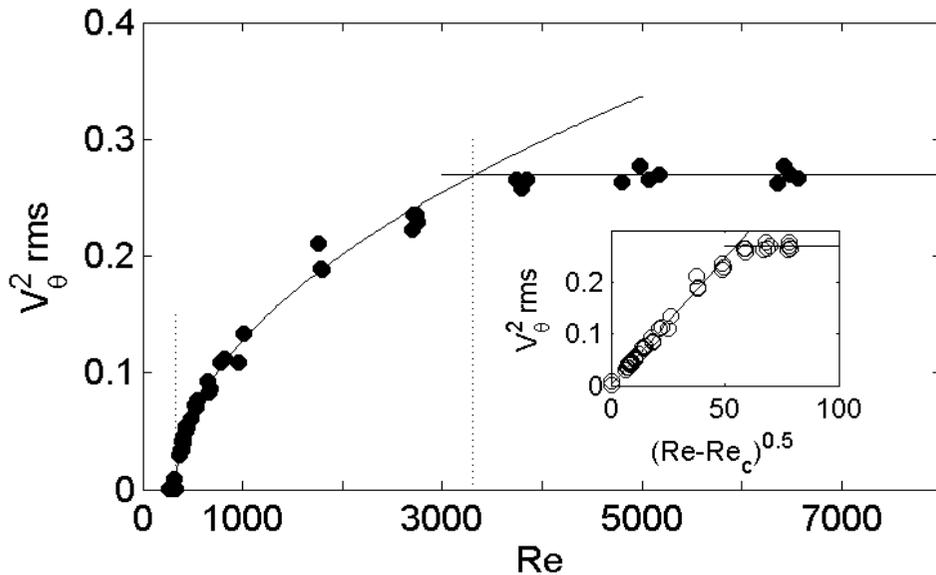


Distribution bi-
modale : signature
de la **couche de
mélange turbulente**

Caractérisation quantitative de la transition à la turbulence



Bifurcation à fréquence nulle pour la très basse fréquence de l'onde propagative



L'énergie cinétique des fluctuations de la couche de mélange comme un paramètre d'ordre pour la transition à la turbulence

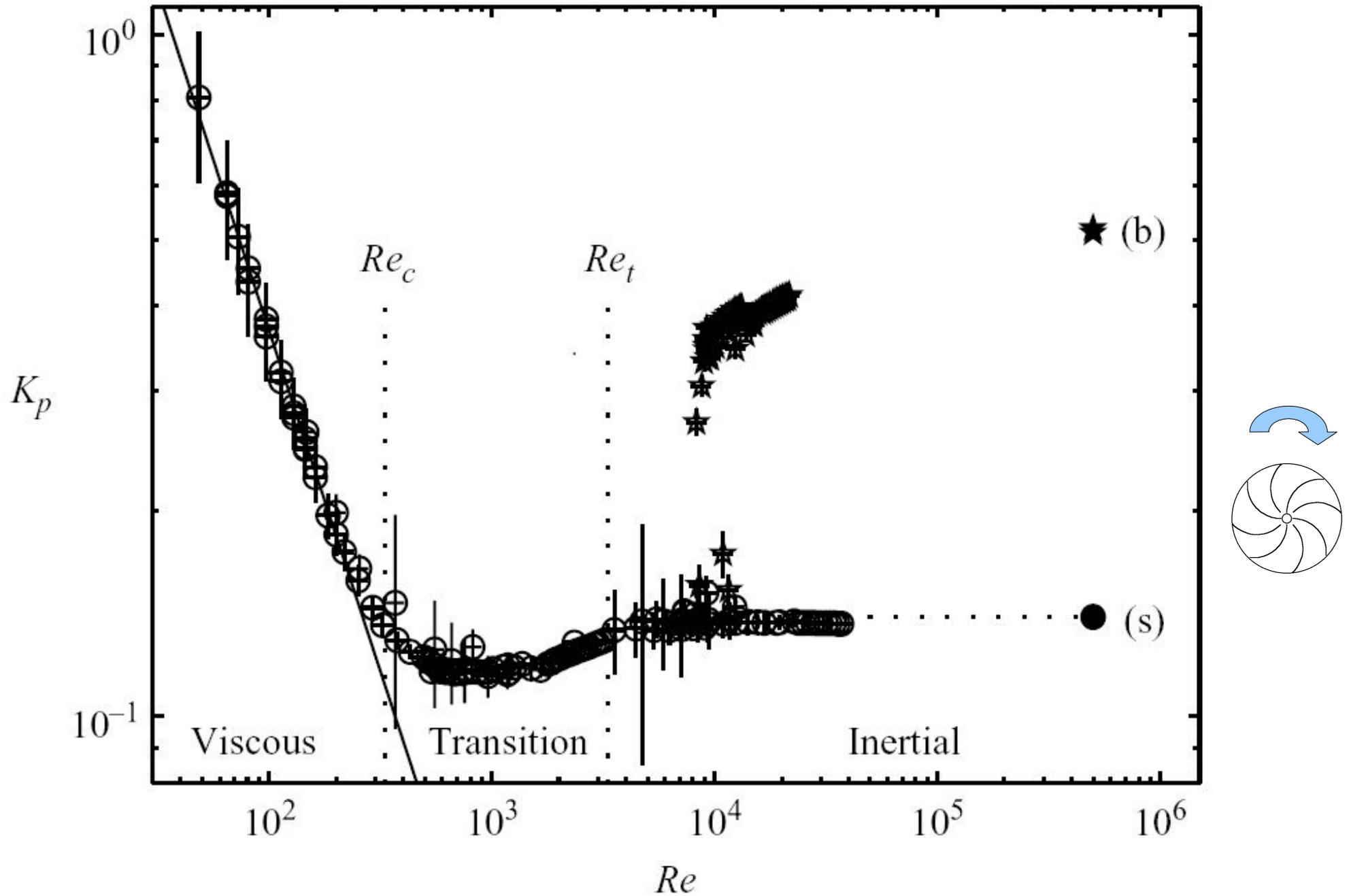
$Re_c = 330$

$Re_t \approx 3000$

Saturation du fit au delà de $Re_t \approx 3000$:

Turbulence développée

Dépendance du coefficient de puissance avec le forçage et avec Re



Résumé des étapes pour la transition.

$Re < 175 \pm 5$

♦ Laminaire, $m=0$, symétrie R_π .

$408 < Re < 1000$

♦ $m=2$ stationnaire, symétrie R_π discrète.

R_π

♦ $m=2$, onde propagative,
parité brisée, symétrie R_π brisée.

→ Faibles fluctuations,
pic à $f/300$.

$389 < Re < 408$

♦ Ondes propagatives modulées.

→ Pics à $f/200$ et $f/6.2$.

$408 < Re < 1000$

♦ Ecoulements chaotiques.

→ Fluctuations moyennes,
sauts aléatoires, spectre basse
fréquence continuellement peuplé

$1000 < Re < 3300$

♦ Transition à la turbulence.

→ Fortes fluctuations,
peuplement spectre haute
fréquence

$Re > 3300$

♦ Ecoulement inertiel turbulent.

→ Saturation de K_p et du niveau
de fluctuations

$Re > 10^4$

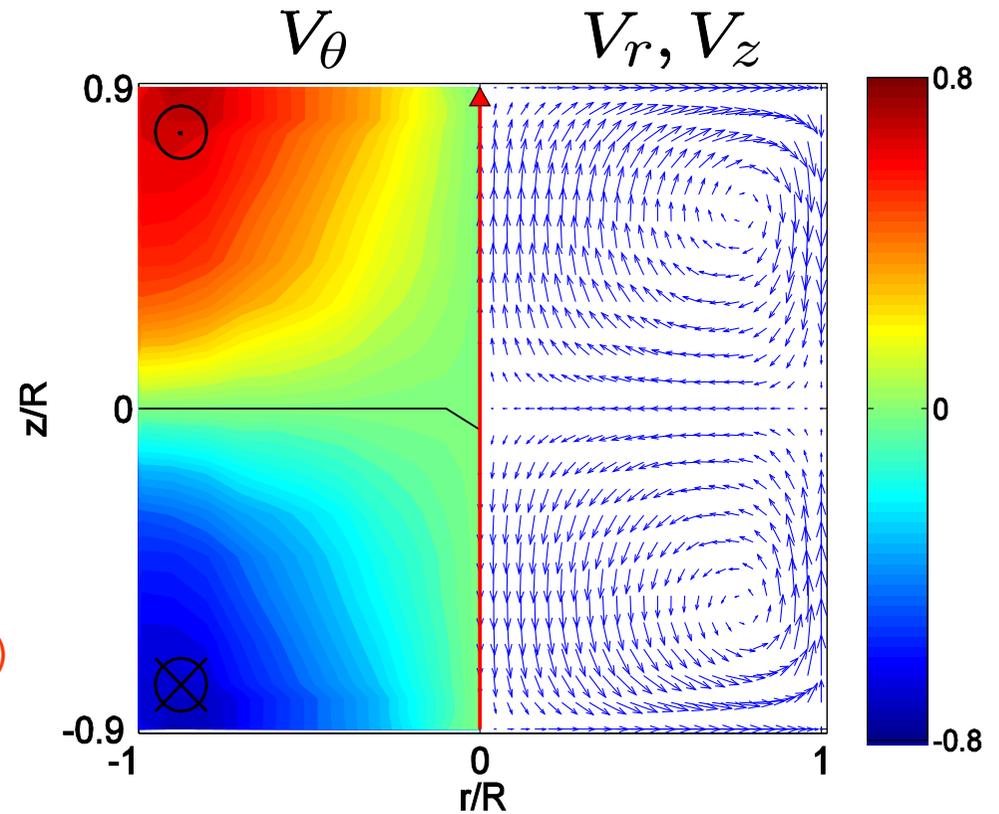
♦ Coexistence d'états multiples.

Les trois échelles principales de l'écoulement turbulent

Écoulement moyen

$$Re \simeq 10^6$$

Temps de moyennage :
60 s (500 f^{-1})

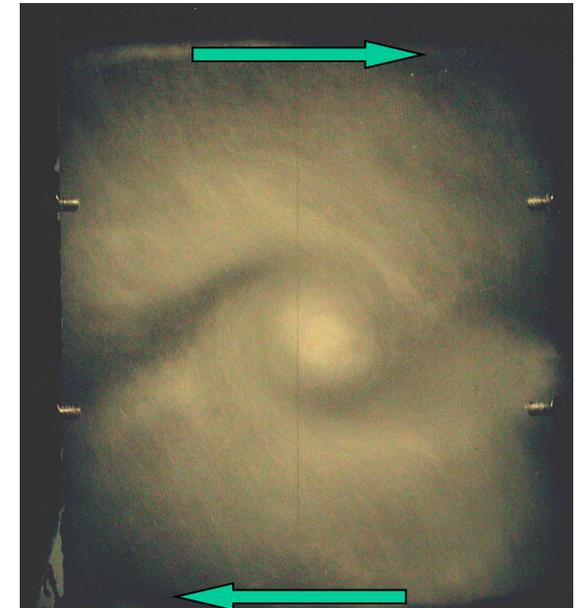


Turbulence a petite échelle

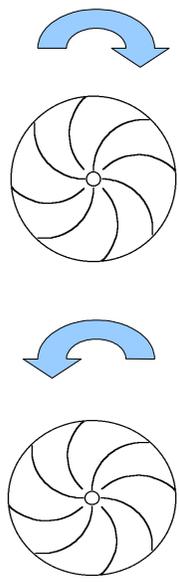
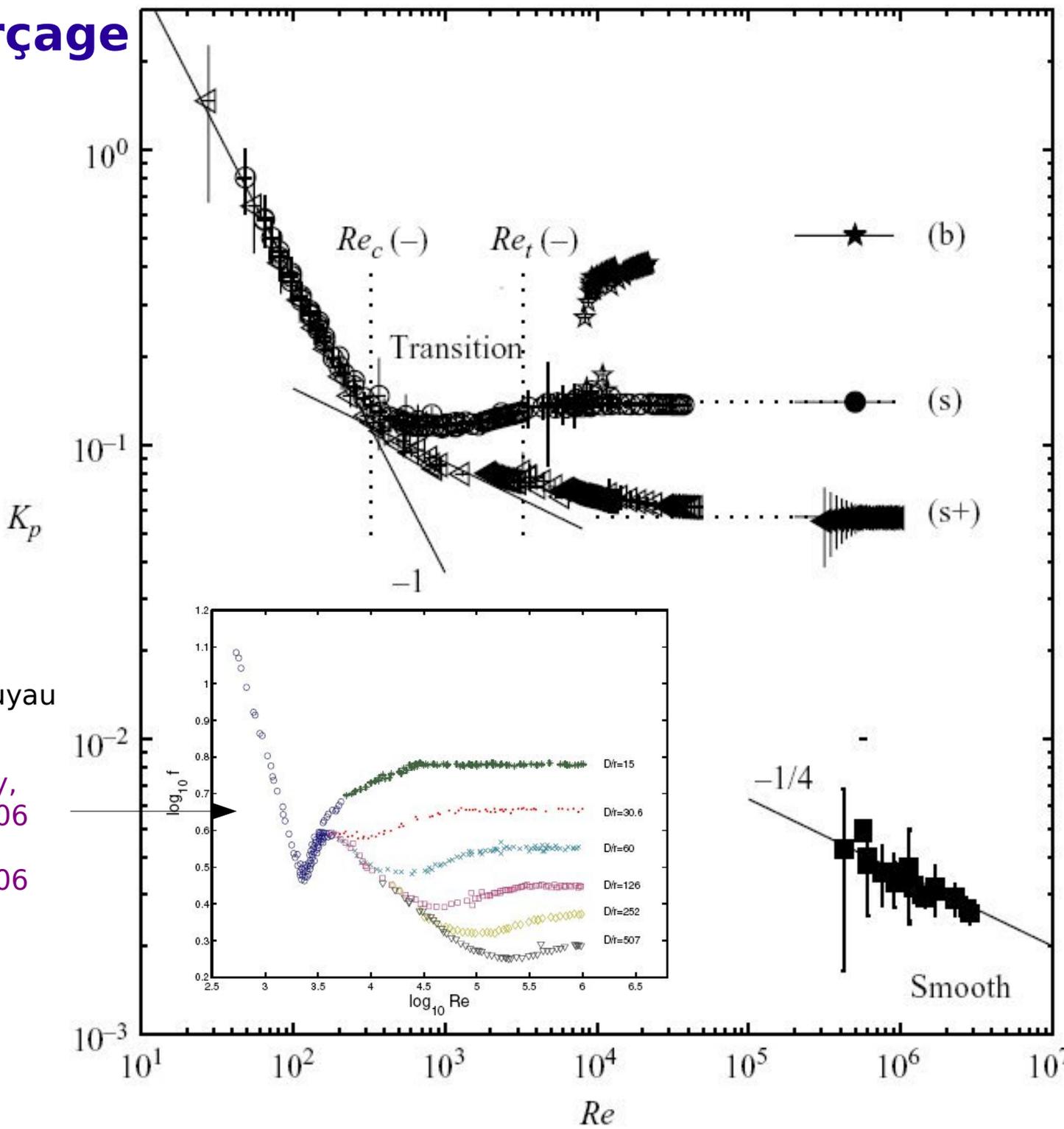
Temps de moyennage :
 $1/500 \text{ s}$ ($1/50 \text{ f}^{-1}$)

Grandes échelles lentement variables

Temps de moyennage :
 $1/20 \text{ s}$ ($1/2 \text{ f}^{-1}$)
 $U' \simeq 0.5 U$



Effets du forçage inertiel



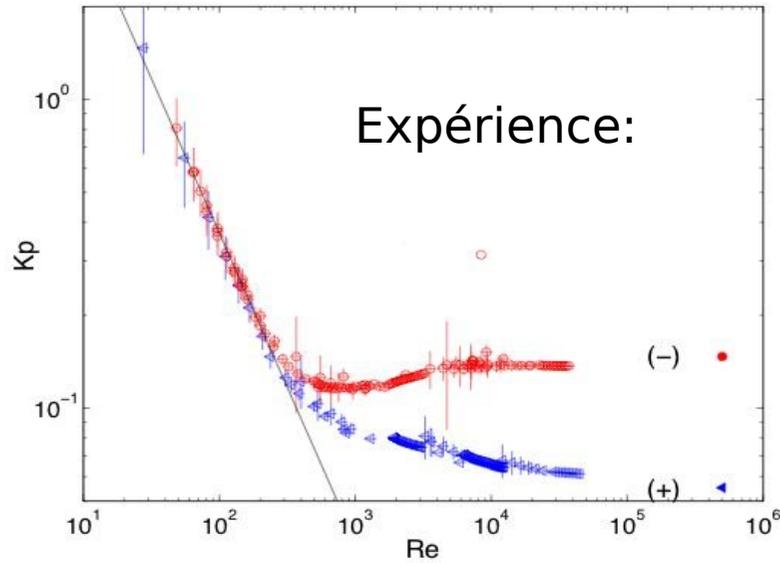
Rugosité dans un tuyau

- Nikuradse, 1932
- Gioa & Chakraborty, Phys. Rev. Lett., 2006
- Goldenfeld, Phys. Rev. Lett., 2006

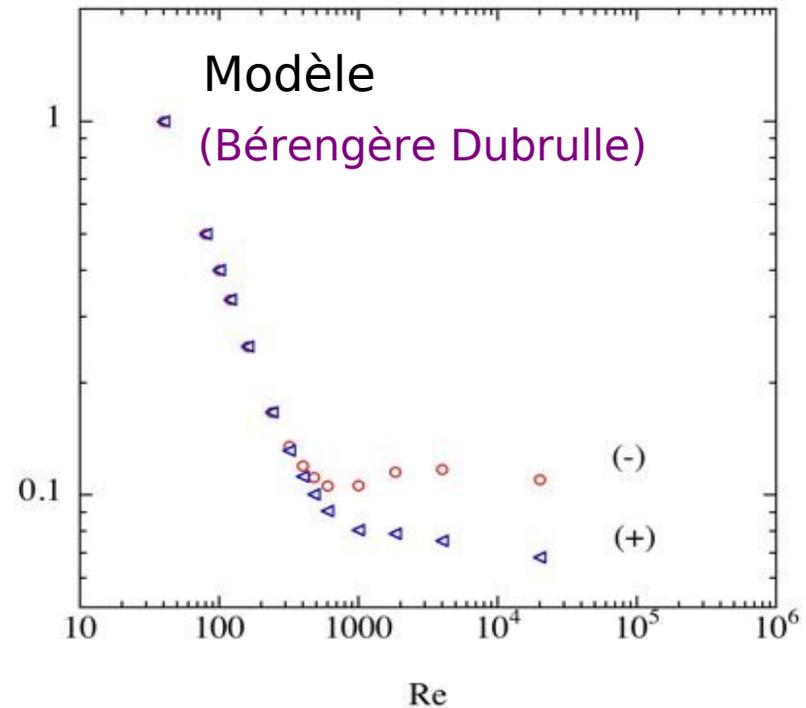
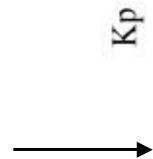
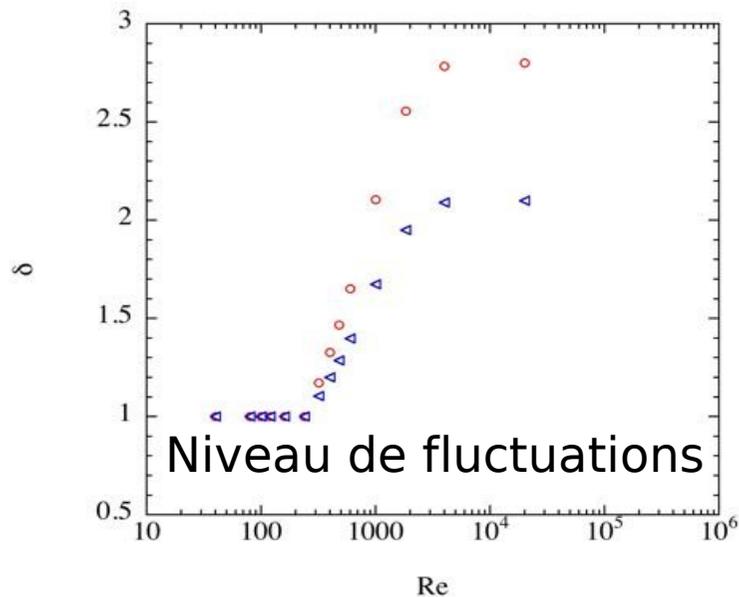
Facteur de puissance et niveau de fluctuations

En laminaire: $T \propto \nu \Delta u$
 $K_p \propto \frac{1}{Re}$

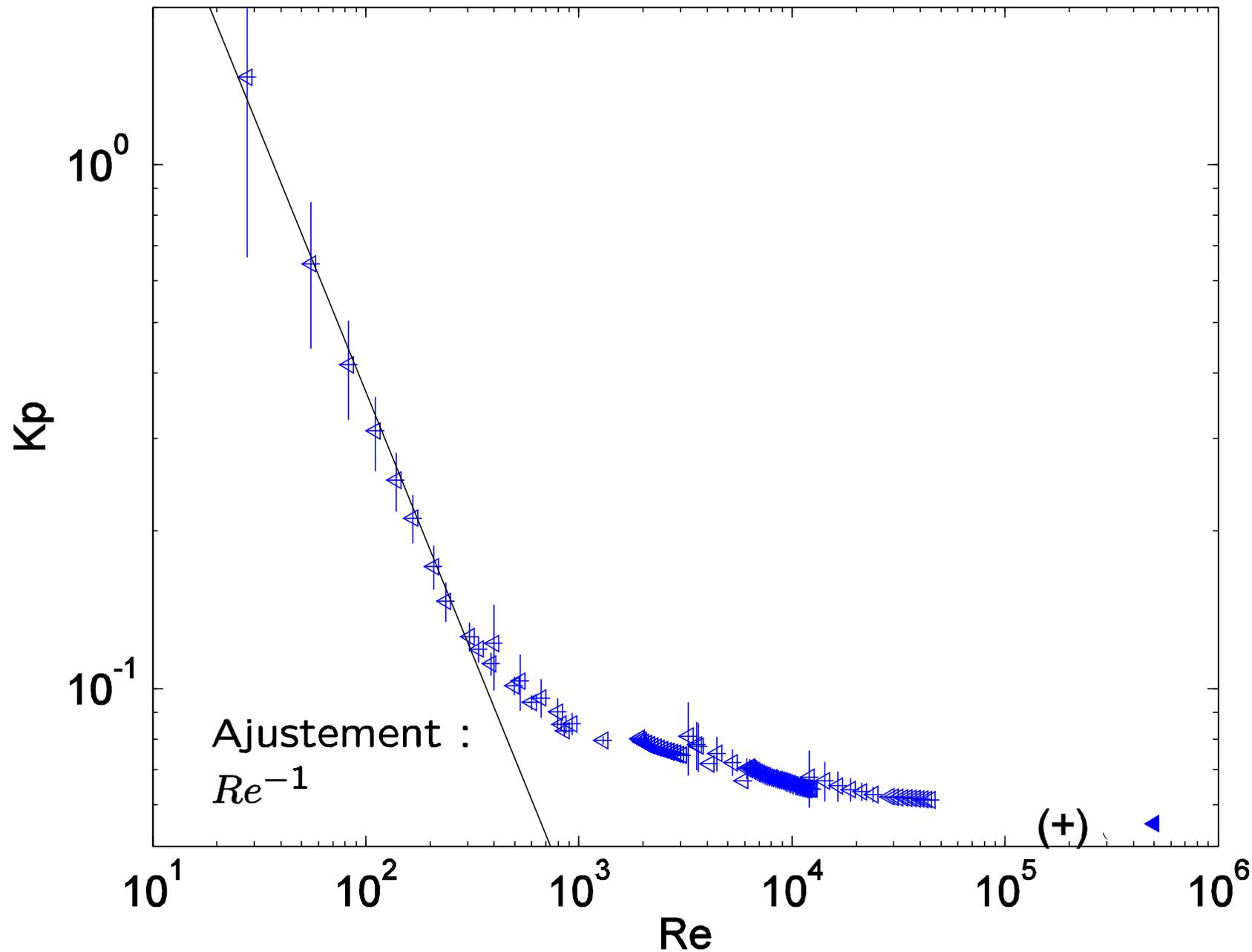
En turbulent: $T \propto \bar{u}^{\prime 2} \propto \nu_t \Delta u \propto R^2 F \Delta u$
 $K_p \propto cte$



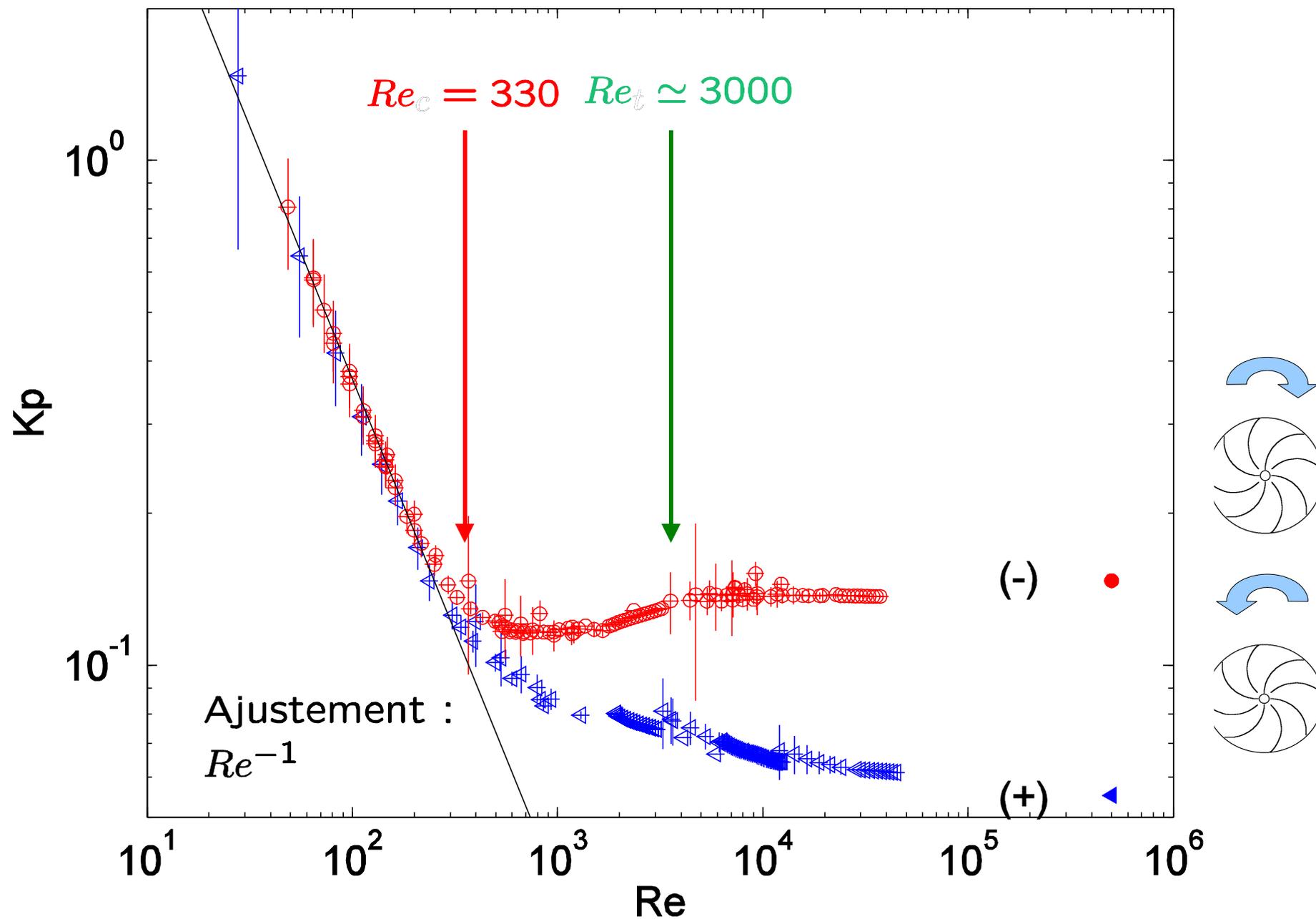
Au total: $T \propto \nu \Delta u + \bar{u}^{\prime 2}$
 $K_p \propto \frac{a}{Re} + b(\delta - 1)$



Dépendance du coefficient de puissance avec le forçage et avec Re



Dépendance du coefficient de puissance avec le forçage et avec Re



Multiplicité des solutions

