



# Turbulence d'ondes à la surface d'un fluide

**Eric Falcon**

(MSC, Université Paris 7)

Collaborations:

- C. Laroche (MSC, Univ. Paris)
- S. Fauve (LPS, ENS)
- S. Aumaître (CEA Saclay)
- C. Falcón (Ph-D MSC/LPS)
- U. Bortolozzo (Post-doc)

# Turbulence d'ondes

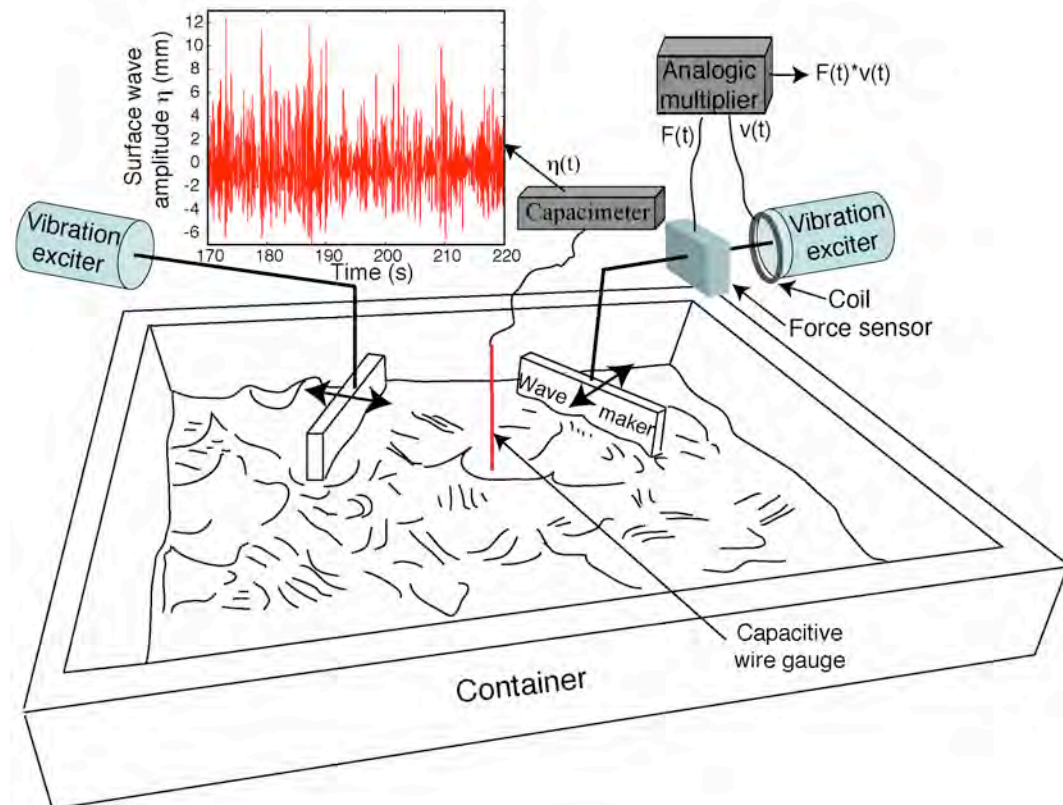
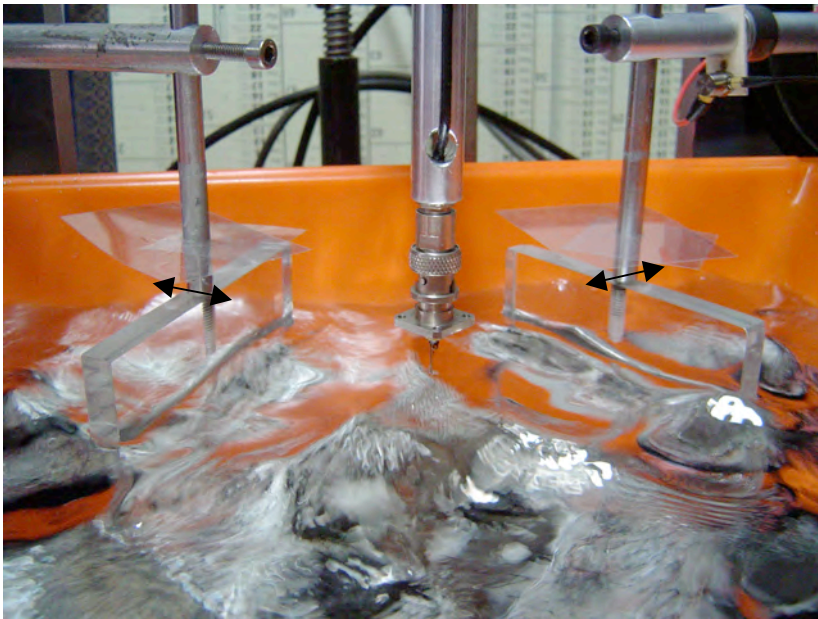
- Etude des propriétés dynamiques et statistiques d'un **ensemble d'ondes** en interaction **non linéaire**
- **Domaine vaste à différentes échelles** : hydrodynamique, astrophysique, optique, mat cond...
- **Très peu étudiée exp. en labo** / turbulence hydro 2D et 3D !

## Buts : Turbulence d'ondes à la surface d'un fluide

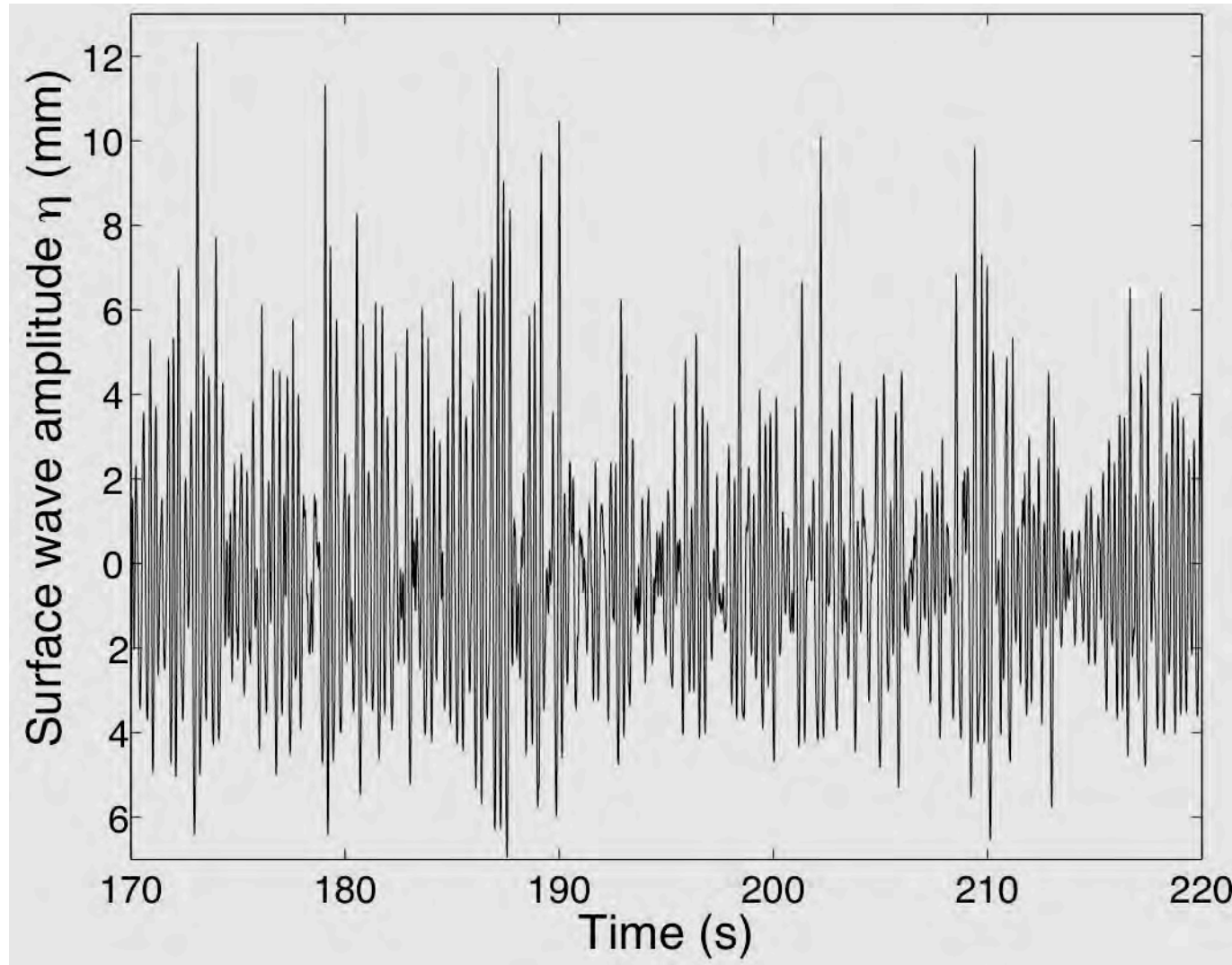
- Caractériser **le transfert d'énergie injectée à gde échelle cascade vers les petites structures**, via les **interactions entre ondes**, dissipant ainsi l'énergie à la fin de la cascade.
  - ⇒ Mesure du **spectre** et de la **distribution des fluctuations de l'amplitude des vagues**
- Connaître les **propriétés statistiques des fluctuations du flux d'énergie** nécessaire à amener un système dissipatif hors de l'équilibre
  - ⇒ Mesure des **fluctuations de puissance injectée** au fluide
- Turbulence d'ondes capillaires en micro-gravité?

# Dispositif expérimental

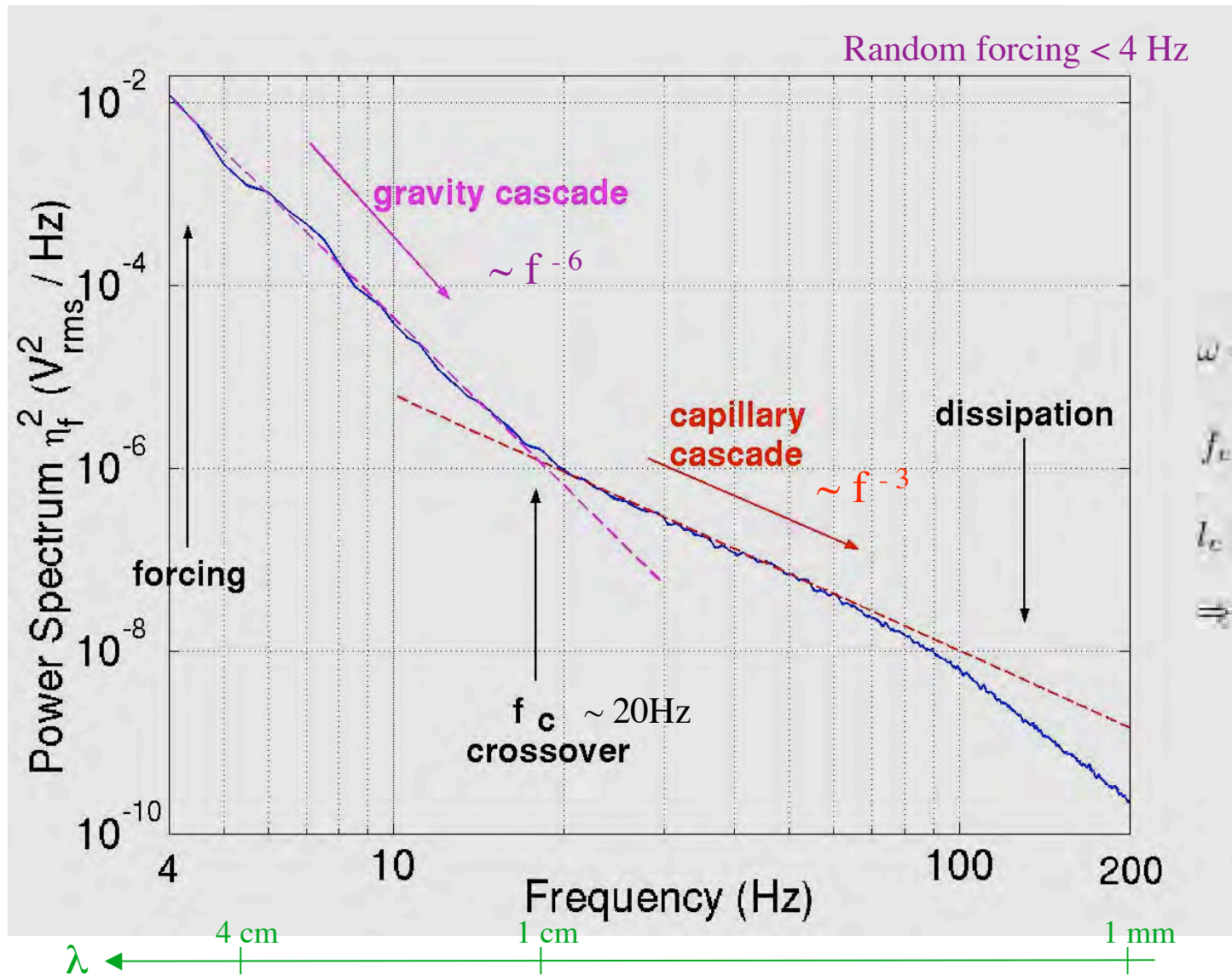
- Bassin rectangulaire: 20 x 20 cm
- Fluide : Mercure ou Eau, profondeur  $\sim 2$  cm
- Forçage **aléatoire à grandes échelles** par batteurs :  $\lambda > 5$  cm ( $f < 6$  Hz)
  - ≠ forçage Faraday: Wright et al. PRL (1996) ; Henry et al. EPL (2000); Brazhinikov et al. JETP (2002)
  - ≠ expérience *in situ* à la surface de l'océan (vents, courants marin) : océanographes
- Mesure de la hauteur des vagues avec un capteur **capacitif** (fil  $\phi = 0.1$  mm)



# Evolution temporelle de la hauteur des vagues



# Spectre de puissance des vagues



$$\omega = \sqrt{\left[ gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3 \right]}$$

$$f_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2l_c}} \simeq 17 \text{ Hz}$$

$$l_c \equiv \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} = 1.7 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \lambda_c \simeq 1 \text{ cm}$$

Spectres en loi de puissance « à la Kolmogorov »



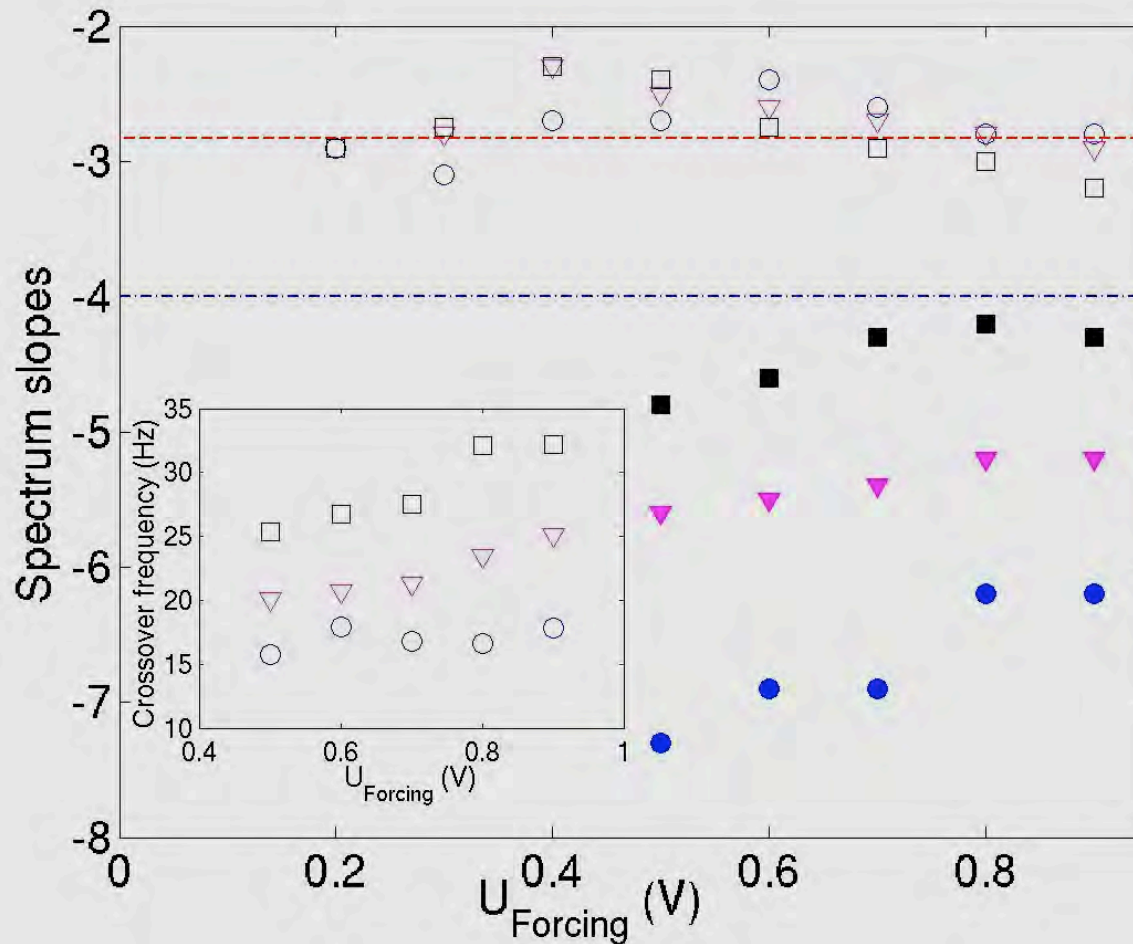
# Pentes des spectres vs. forçage

Fréq. forçage  
aléatoire

(o) 0 - 4 Hz

(∇) 0 - 5 Hz

(□) 0 - 6 Hz



Théories:

$f_{cap}^{-17/6}$   
Zakharov et  
Filonenko 1967

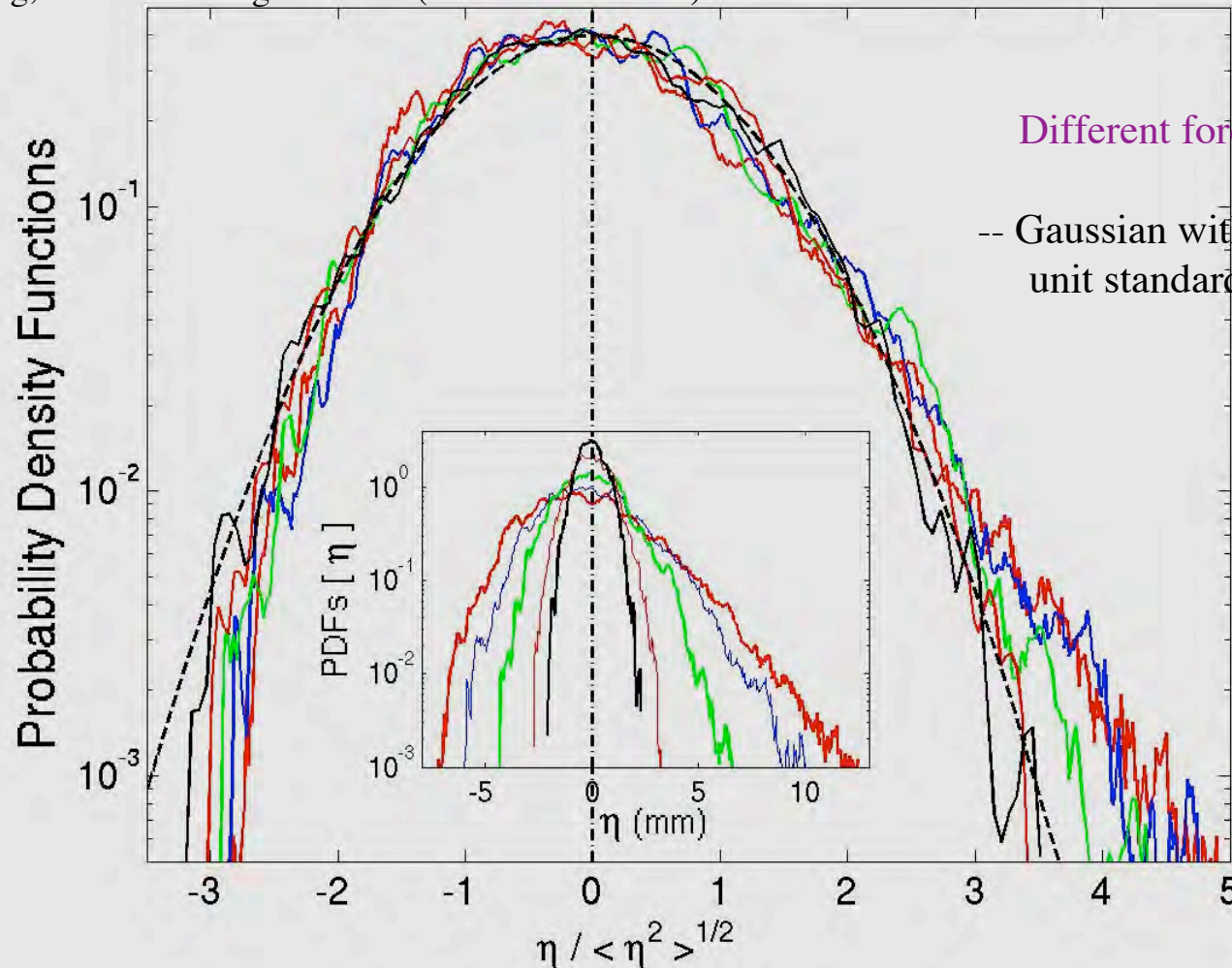
$f_{grav}^{-4}$   
-Zakharov 1967  
-Kuznetsov 2004

Ouverts Régime capillaire : **Bon accord** avec la théorie de la turbulence d'ondes Zakharov et al. 1967

Pleins Régime de gravité : **Dépend des paramètres de forçage** Denissenko et al. 2007

# Probability density function of the wave amplitude

Hg, random forcing 0 - 4 Hz (similar with water)



Different forcing amplitudes

-- Gaussian with zero mean and unit standard deviation.

$\langle \eta \rangle \approx 0$   
 $0 \leq S \leq 0.7$

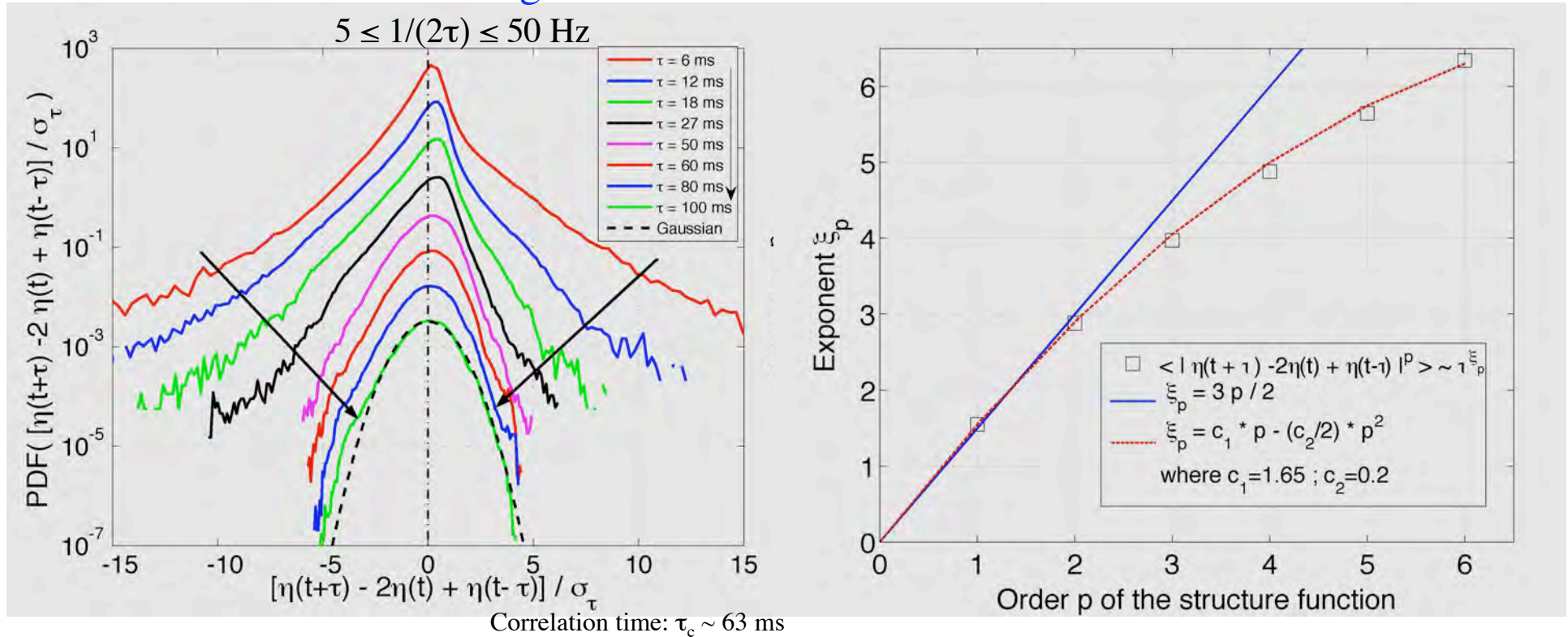
- PDFs are asymmetric
- Non-Gaussian at high enough forcing

Effect of the non linearities  
of the waves

# Intermittency in Wave Turbulence

PDF of local slope increments  
over a time lag  $\tau$

$$S_p^{(2)}(\tau) \equiv \left\langle \left| \eta(t+\tau) - 2\eta(t) + \eta(t-\tau) \right|^p \right\rangle$$



Shape deformation of PDF

with the time lag  $\tau < \tau_c$

$$S_p(\tau) \sim \tau^{\xi_p}$$

with  $\xi_p$  a **nonlinear function of p**

For power spectra  $E_\eta(\omega) \sim \omega^{-x}$  with  $x \geq 3$ , the statistics of 2nd order increments of  $\eta$  is relevant

**INTERMITTENCY** ↗ Coherent structures ?  
↘ Fluctuations of energy flux ?



# Wave Turbulence in Zero Gravity ?

When  $g \Rightarrow 0$  : - the capillary length  $l_c \propto \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \rightarrow \infty$   
- the crossover frequency  $f_c \propto \sqrt{\frac{g}{l_c}} \propto g^{3/4} \rightarrow 0$

$\Rightarrow$  capillary wave turbulence **even for  $\lambda > \text{cm}$**

## QUESTION :

Can we observe and characterize the **capillary wave turbulence regime**

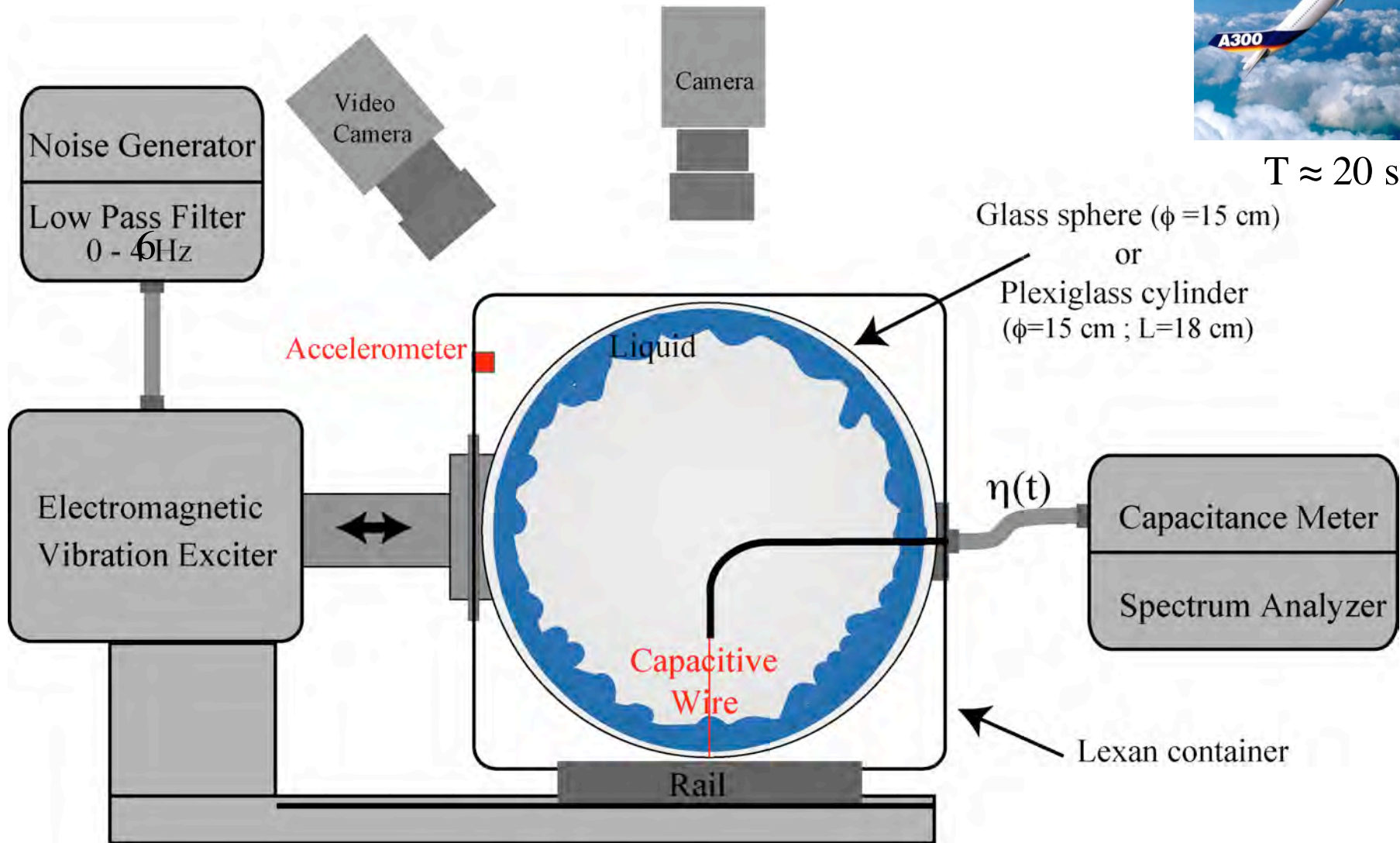
over **a broad frequency range**

usually masked on Earth by the regime of gravity waves?

# Experimental Setup in Zero Gravity

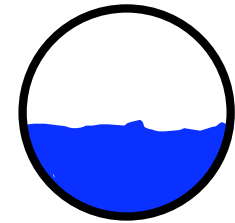
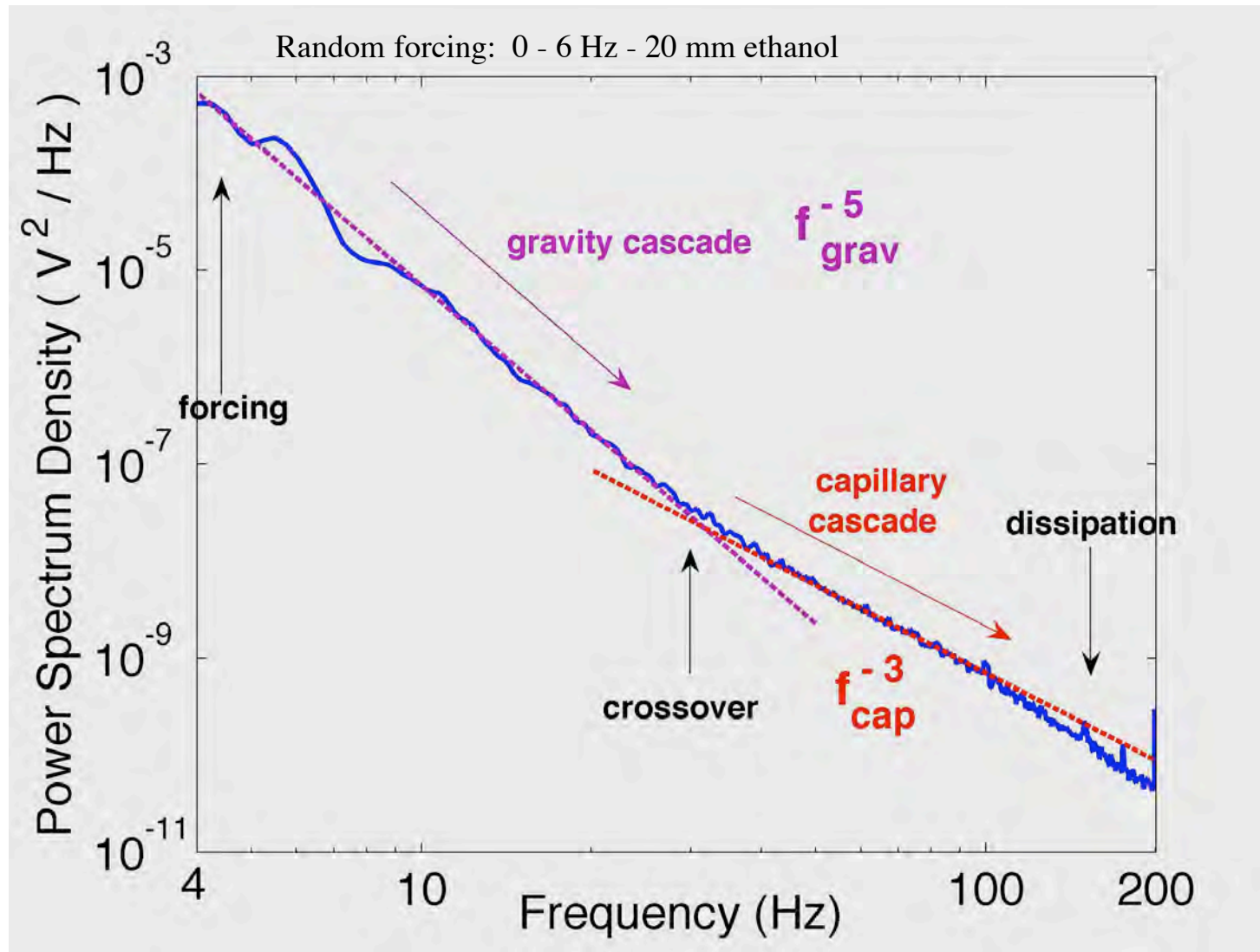


$T \approx 20 \text{ s}$



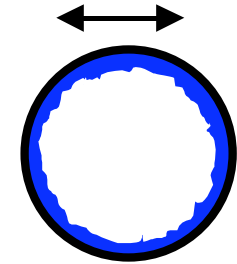
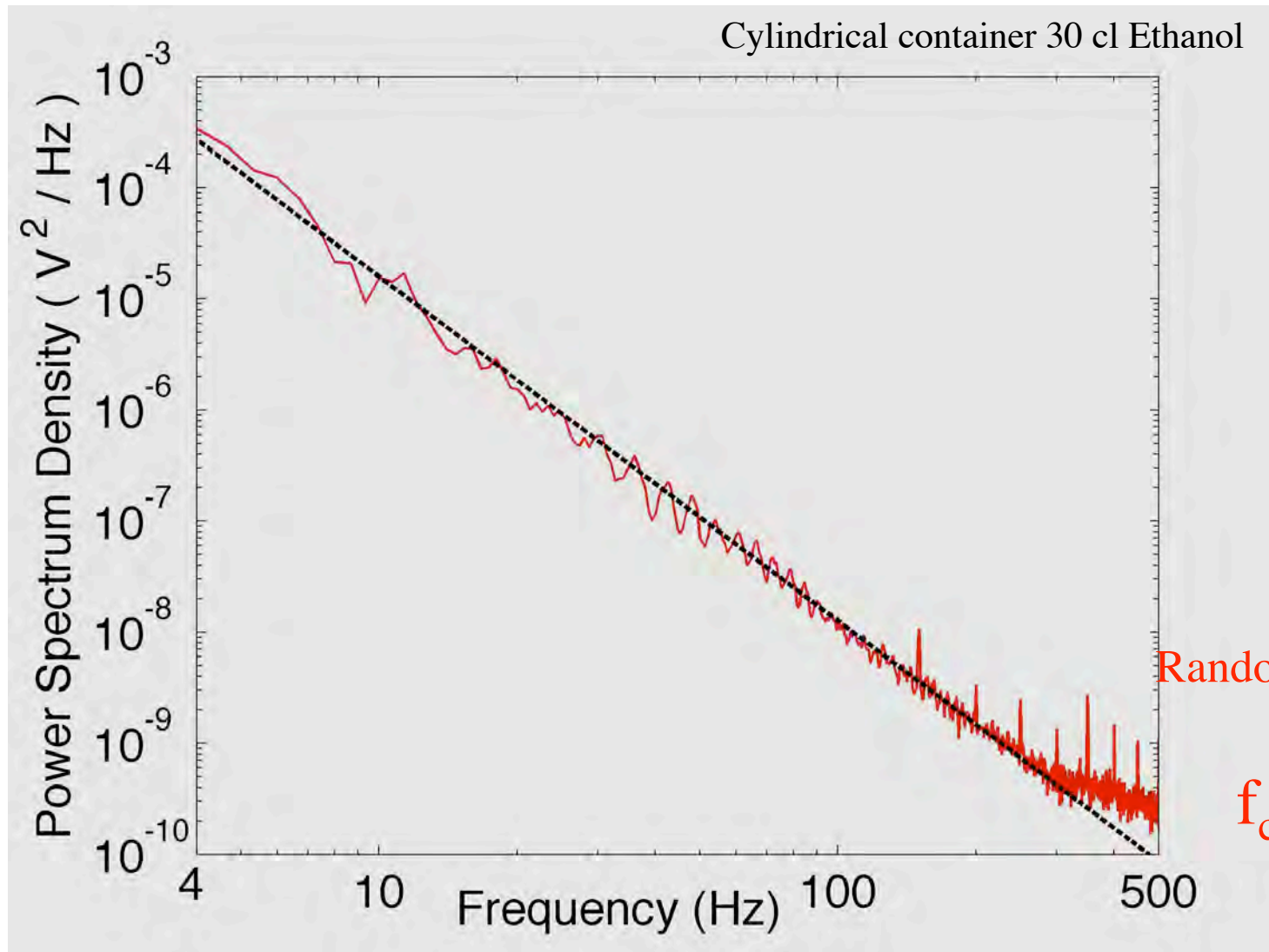
Water or ethanol : 20 cl (sphere) or 30 cl (cylinder)

# Power spectrum of $\eta(t)$ with gravity



When  $g \Rightarrow 0$  ?      Does  $f_c \Rightarrow 0$  ?

# Power spectrum of $\eta(t)$ without gravity



For 0.05g :

$$l_c \approx 2.5 \text{ cm}$$

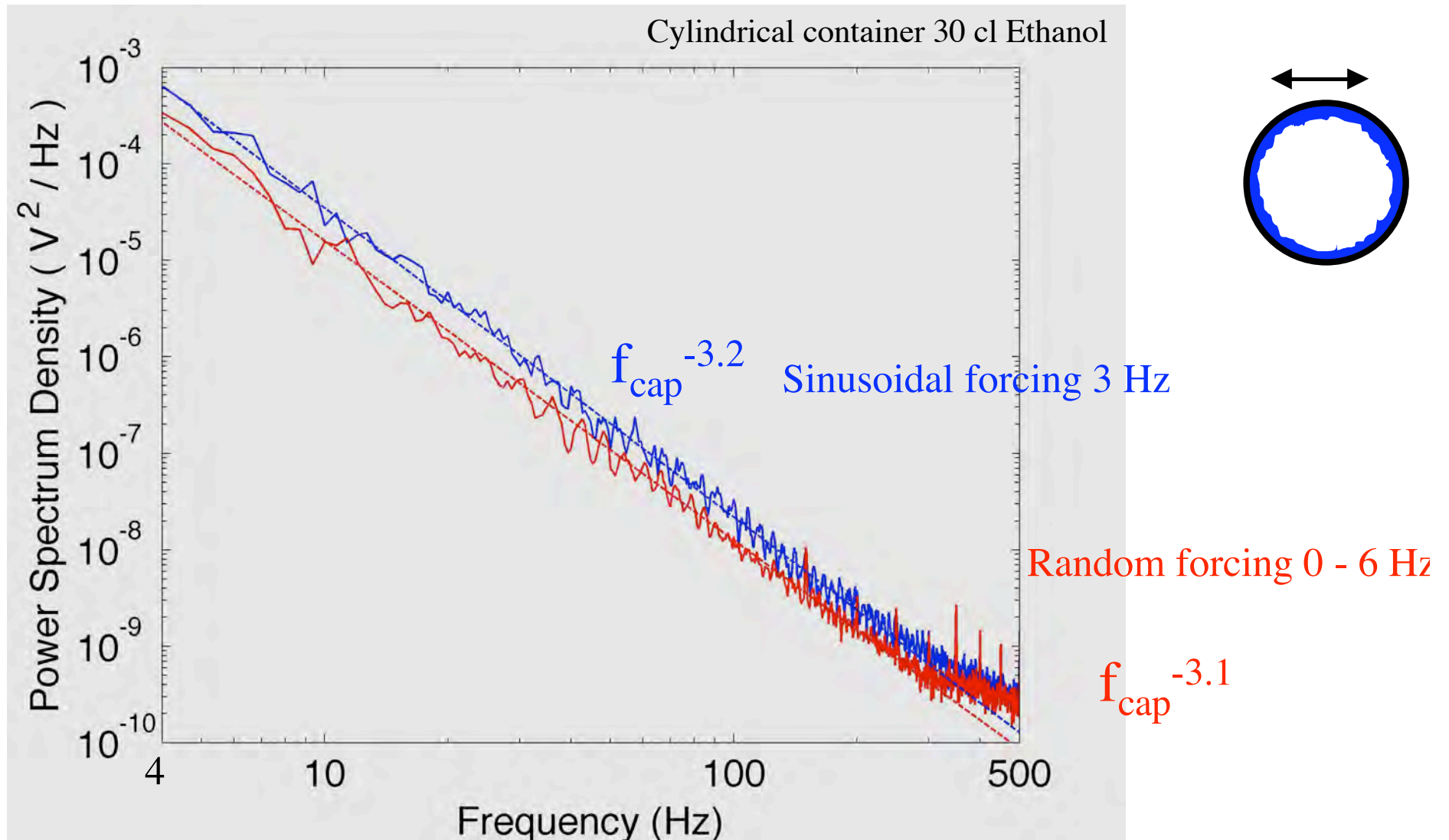
$$\lambda_c \approx 15 \text{ cm}$$

$$f_c \approx 0.5 \text{ Hz}$$

Capillary wave turbulence spectrum over 2 decades in frequency!



# Power spectrum of $\eta(t)$ without gravity



Capillary wave turbulence spectrum over 2 decades in frequency!

Spectrum is independent on the large-scale forcing parameter

# Wave patterns on a cylindrical fluid surface in zero-g

Cylindrical cell  
30 cl of ethanol



⇒ stripes



$f = 30 \text{ Hz}$

$a \sim \text{few mm}$

$\Gamma \sim \text{few g}$

# Wave patterns on a cylindrical fluid surface in zero-g

Cylindrical cell  
30 cl of ethanol



⇒ hexagons



$f = 60 \text{ Hz}$   
 $a \sim \text{few mm}$   
 $\Gamma \sim \text{few g}$

# Wave patterns on a spherical fluid surface in zero-g

Spherical cell  
20 cl of water



- Phase space (pattern ; amp. ; freq.)
  - Pattern wavelength vs. driving frequency
- ⇒ Dispersion relation of linear capillary waves in zero gravity

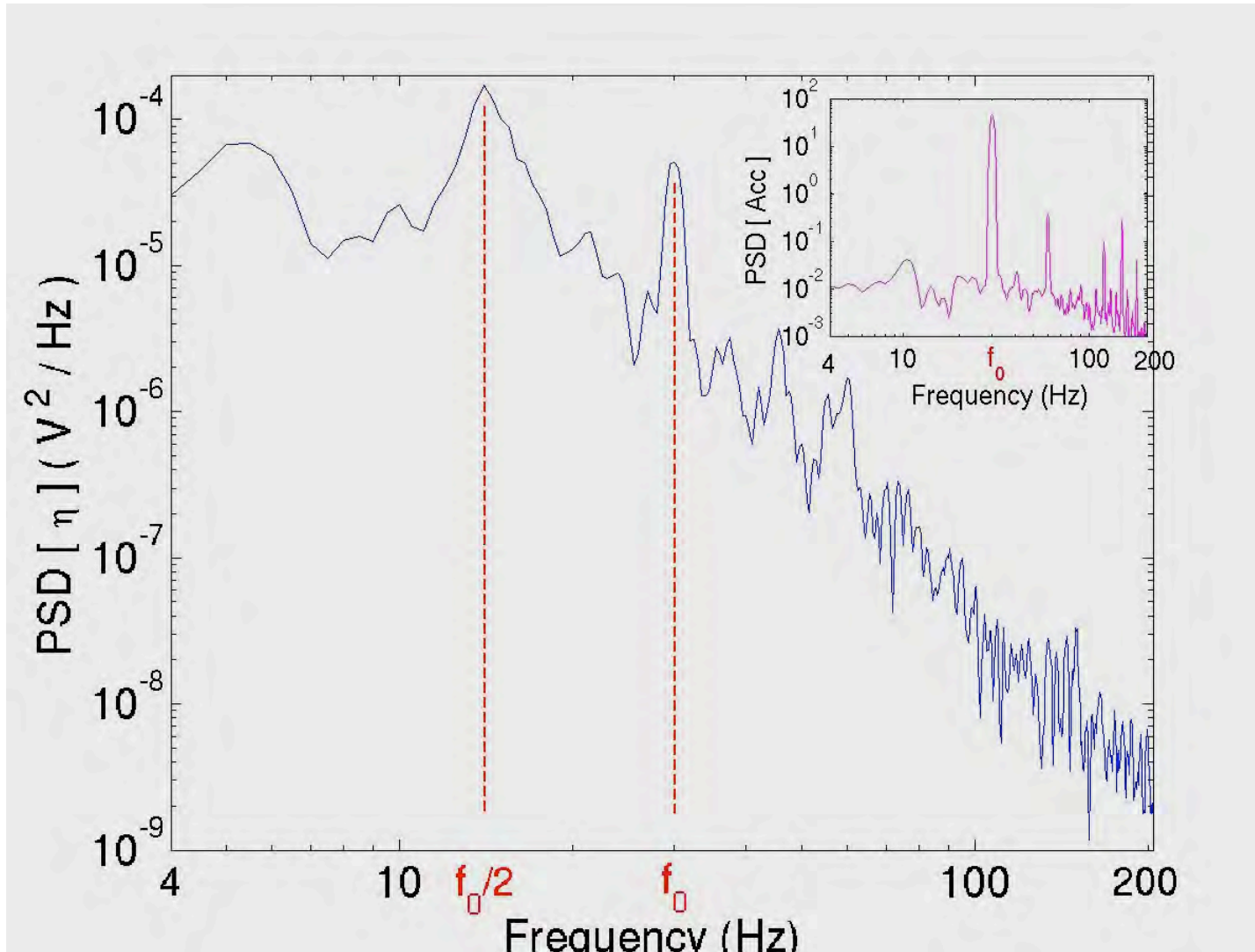


$f = 60 \text{ Hz}$

$a \sim \text{few mm}$



# Subharmonic patterns in zero-g



Response freq.:  $f_0/2$

Excitation freq.:  $f_0$

- Patterns: simple parametric excitation
- More complex dynamics: interplay between sloshing motion and parametric amplification

# Principaux résultats sur la turbulence d'ondes

- Spectre **capillaire** - en **bon accord** avec la théorie de turbulence d'ondes  
- sur une large gamme de fréquences (**en microgravité**)
- Distribution d'amplitude des vagues **non gaussienne**
- **Mesure de la puissance injectée** pilotant la turbulence d'ondes
  - ⇒ Fluctuations importantes du flux d'énergie
  - ⇒ Forme de PDF(I) partagée par différents systèmes dissipatifs forcés hors équilibre et bien décrit par un simple **modèle de Langevin**
- **Intermittence en turbulence d'ondes**
  - ⇒ Motiver des explications  $\neq$  systèmes régis par les éqs. de Navier-Stokes
- Spectres **capillaire** et de **gravité**  $\sim$  flux d'énergie  $\varepsilon$  |  $\Rightarrow$  **Désaccord** avec la théorie
- Spectre de **gravité** dépend du forçage  $\rightarrow \neq$  Théo: flux constant durant la cascade

- C. Falcón, E. Falcon, U. Bortolozzo, S. Fauve, Capillary wave turbulence on a fluid surface in zero gravity , soumis à PRL (2008)
- E. Falcon, S. Aumaître, C. Falcón, C. Laroche, S. Fauve, Fluctuations of energy flux in wave turbulence, PRL **100**, 064503 (2008)
- E. Falcon, S. Fauve, C. Laroche, Observation of intermittency in wave turbulence, PRL **98**,154501 (2007)
- E. Falcon, C. Laroche, S. Fauve, Observation of gravity-capillary wave turbulence, PRL **98**, 094503 (2007)