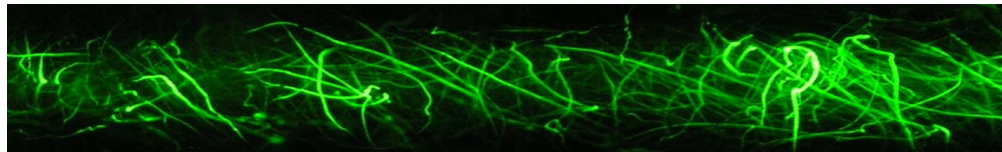


# Mesure de l'**accélération** de particules par vélocimétrie laser Doppler

R. Volk, G. Verhille, N. Mordant, J.-F. Pinton

Laboratoire de physique, École Normale Supérieure de Lyon  
E-mail : [romain.volk@ens-lyon.fr](mailto:romain.volk@ens-lyon.fr)



Simulations numériques :

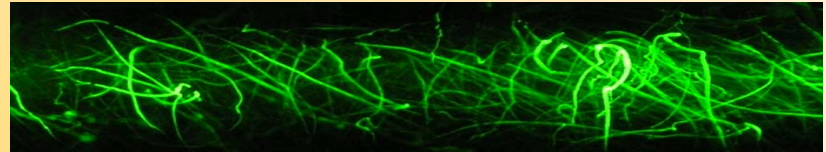
E. Calzavarini, D. Lhose, F. Toschi

# Pourquoi mesurer l'accélération des particules ?

Mesure de la force exercée par la turbulence sur une particule en mouvement

- Effet de densité
- Effet de taille  $a \geq \eta$

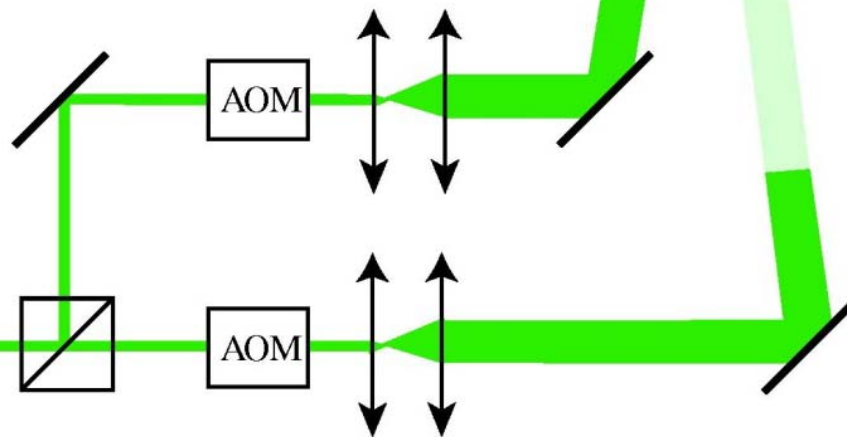
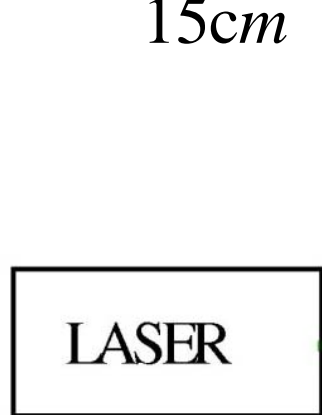
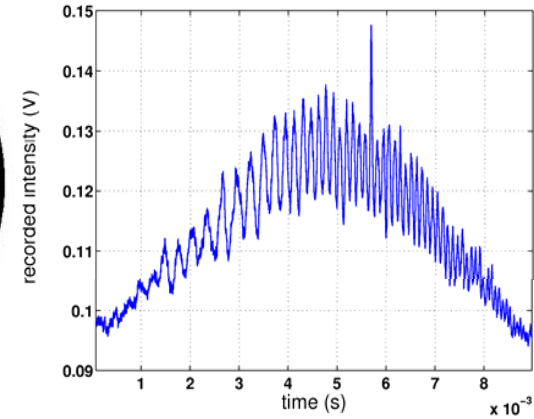
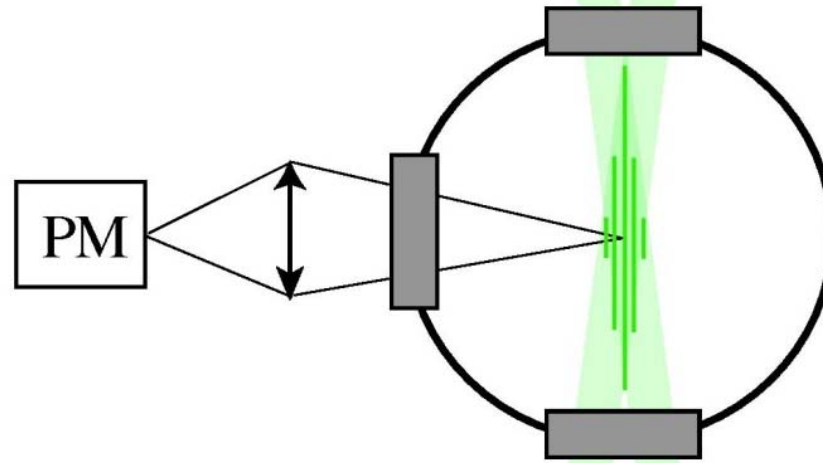
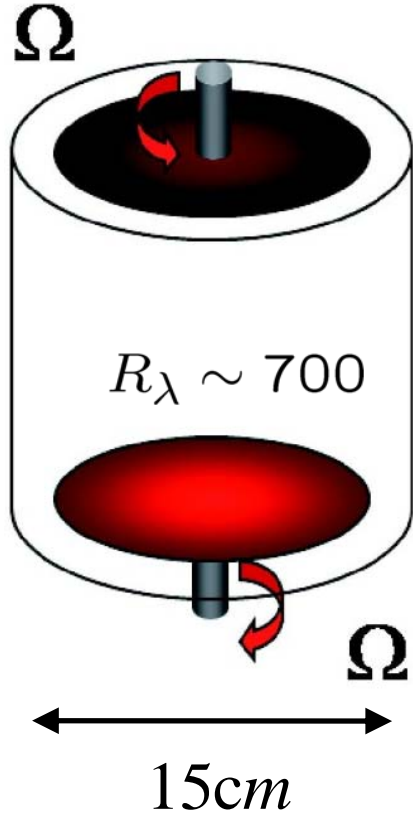
$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}$$



Mesure de  $v(t)$  le long des trajectoires

Adaptation de la vélocimétrie Laser Doppler

# Vélocimétrie Laser Doppler Etendue



$$u_{rms} \sim 1 \text{ m/s}$$

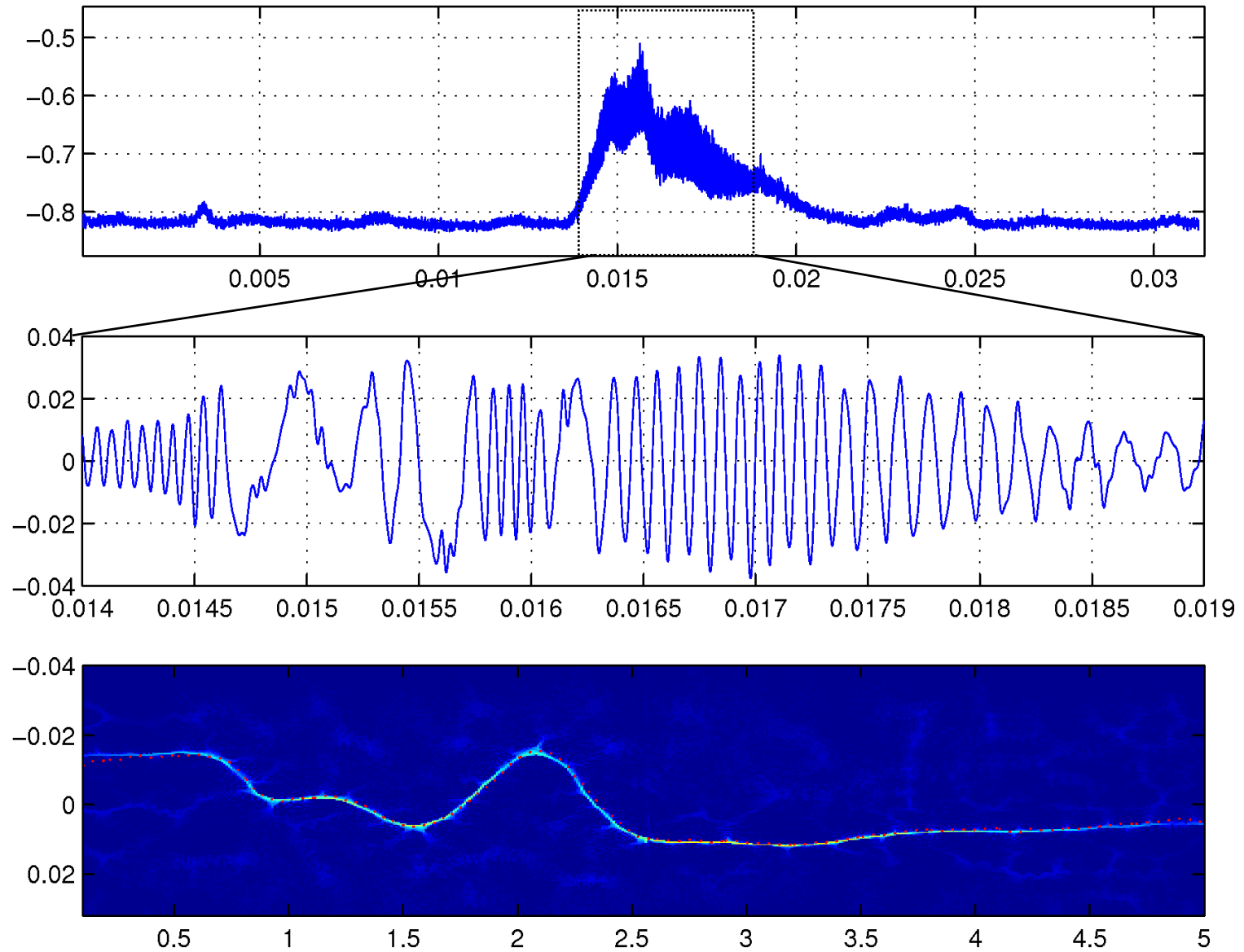
$$\eta \sim 15 \mu\text{m}$$

$$\tau_\eta \sim 0.2 \text{ ms}$$

$$d \approx 0,5\text{cm}$$

$$L \approx 5\text{cm}$$

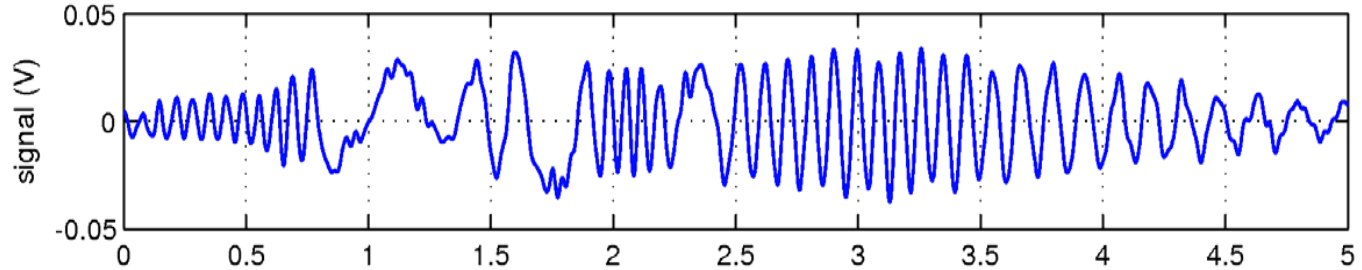
# Signaux expérimentaux



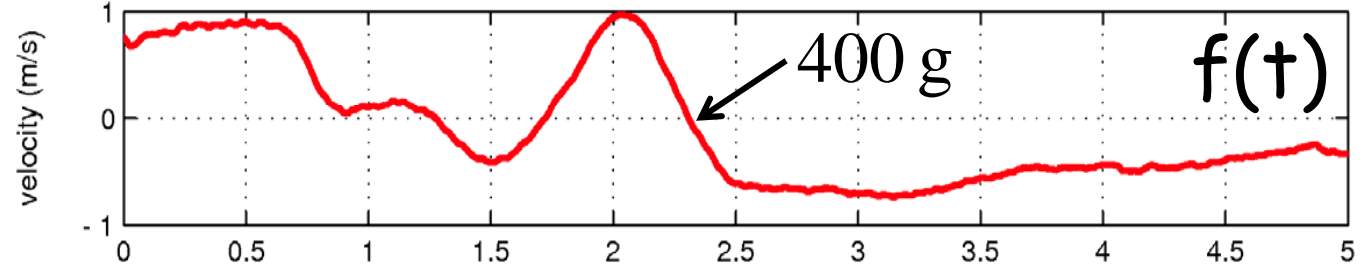
# Démodulation rapide (MVA)

Approche paramétrique :  $s(t) = A(t)e^{j(2\pi f(t))} + \text{bruit}$

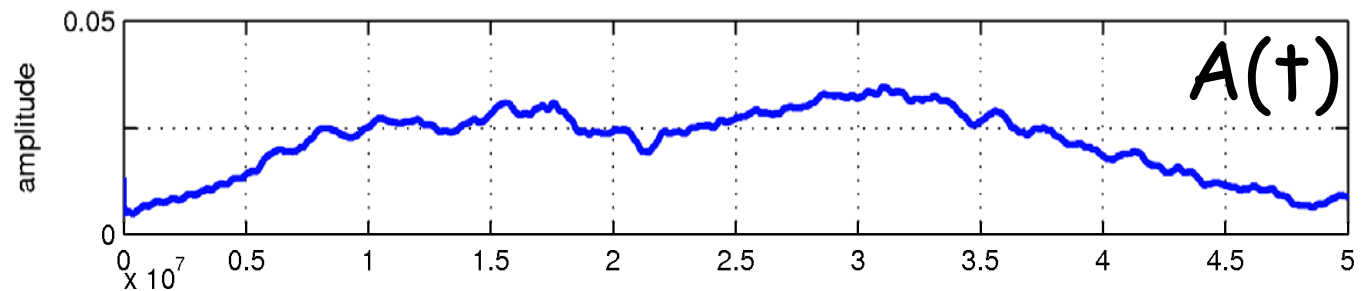
Signal



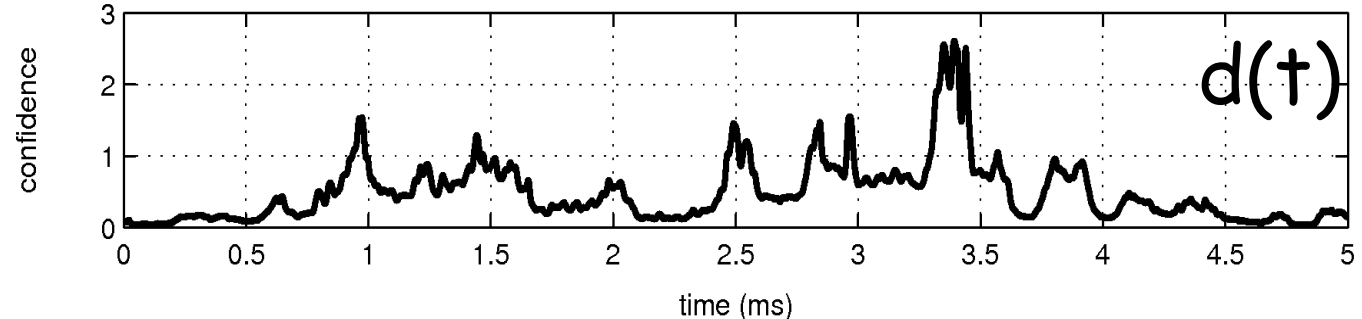
Vitesse



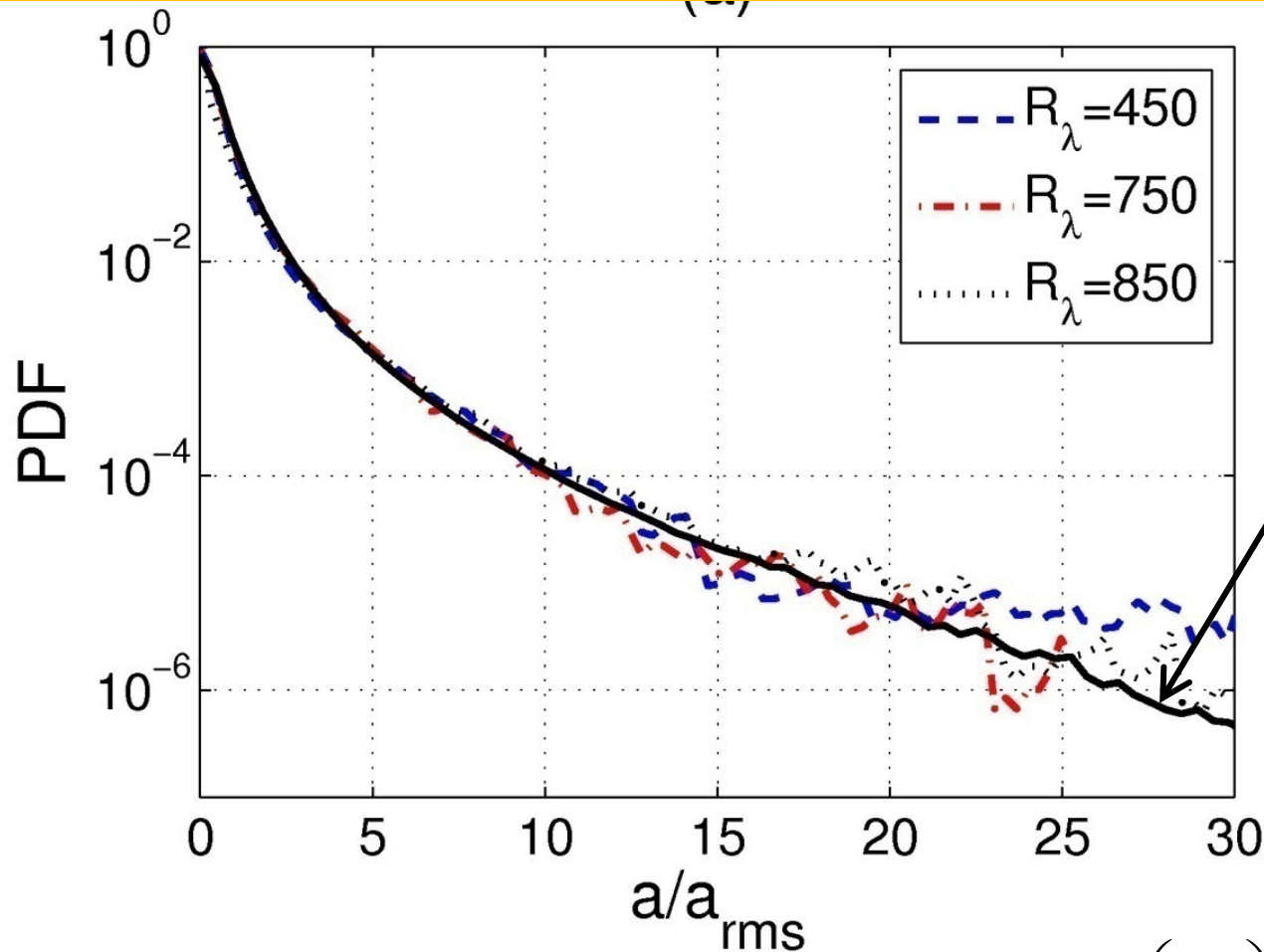
Amplitude



Distance au modèle



# Accélération des traceurs

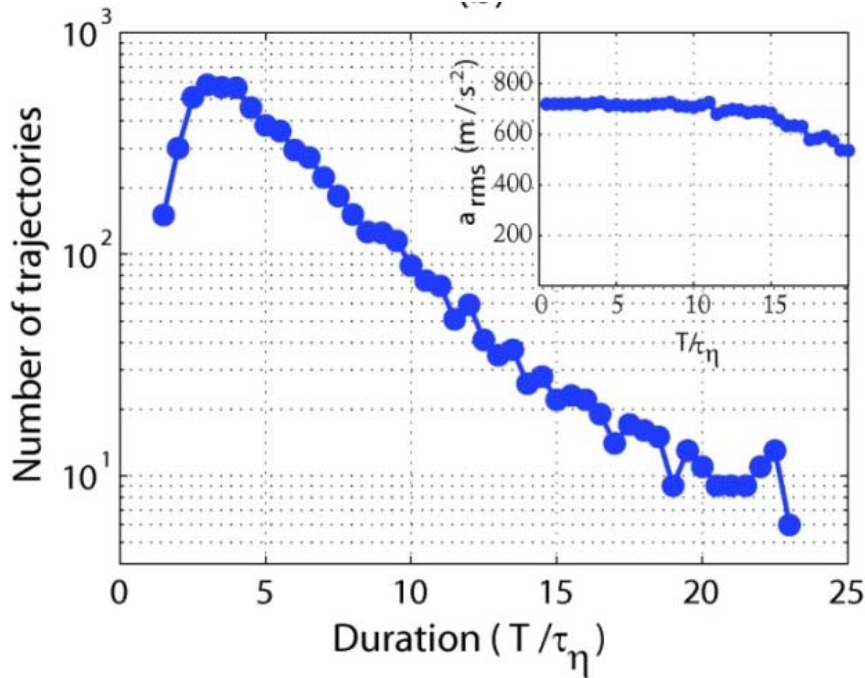


$\Omega$	$u_{rms}$	$a_{rms}$	$\varepsilon$	$R_\lambda$	$a_0$
[Hz]	[m/s]	[m/s <sup>2</sup> ]	[W/kg]	-	-
4.1	0.5	227	4	450	$4 \pm 1.5$
6.4	0.8	352	10	750	$4.2 \pm 1$
8.9	1.1	826	23	850	$6.4 \pm 1$

$$a_{rms}^2 = a_0 \left( \frac{\eta}{\tau_\eta^2} \right)^2 = a_0 \varepsilon^{\frac{3}{2}} \nu^{-\frac{1}{2}}$$

Bonne comparaison avec les données de Cornell

# Estimation de la variance $a_{\text{rms}}^2$



$$(v_x^i(t))_{i \in [1, N]} \quad N \approx 10^4$$

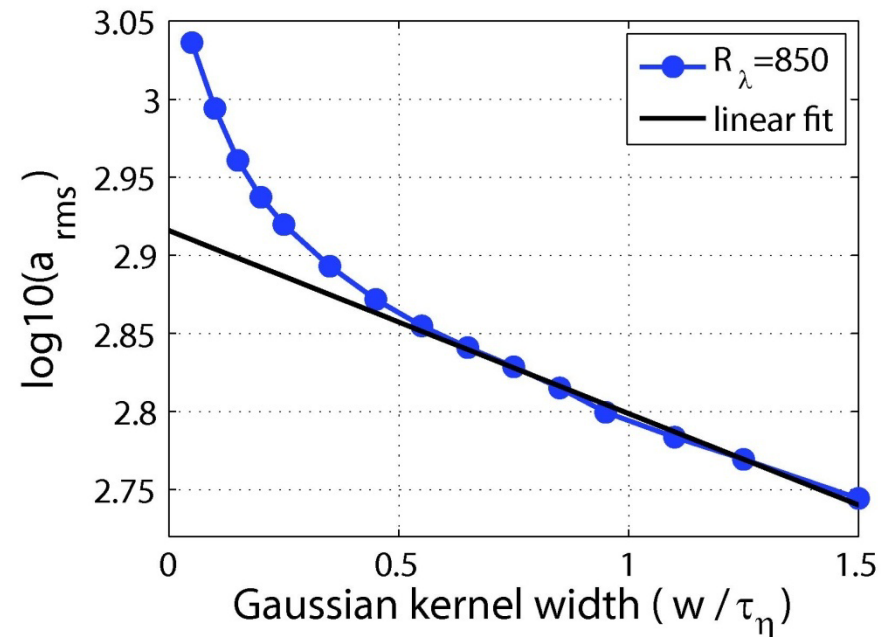
$$\langle T \rangle \approx 5\tau_\eta = 1 \text{ ms}$$

Accélération peu biaisée

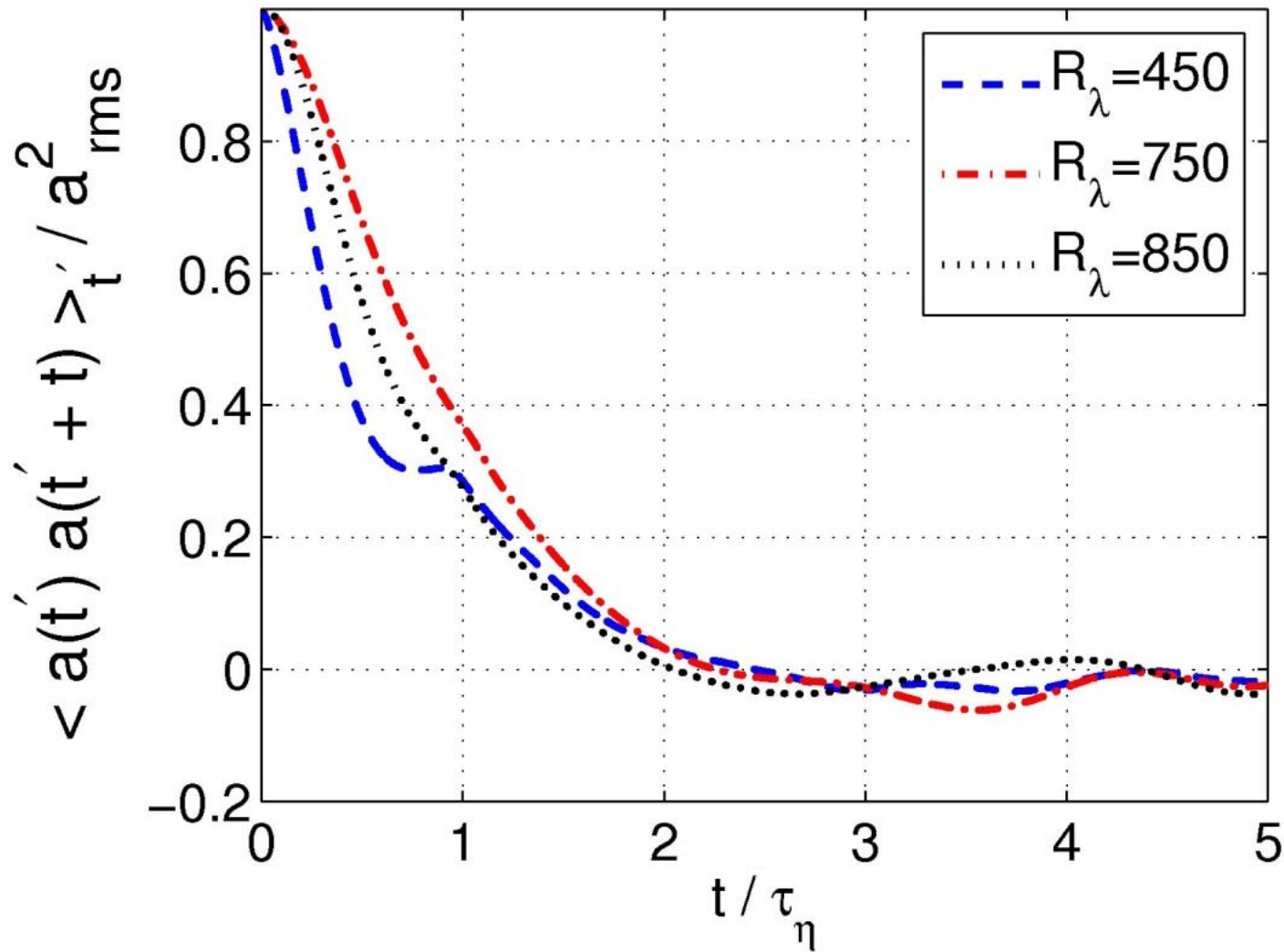
$$V_{\text{mes}}(t) = V(t) + \text{bruit}$$

-Filtrage :  $\exp\left(-\frac{t^2}{w^2}\right)$

-Extrapolation pour  $w=0$



# Dynamique de l'accélération

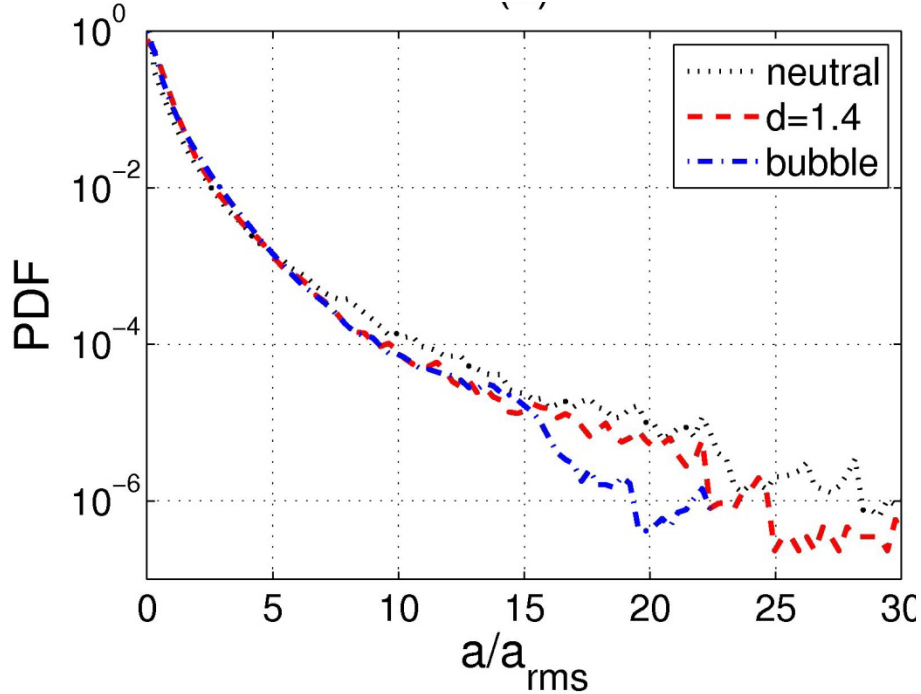


Passage à zéro pour  $2.2 \tau_\eta$  (Yeung&Pope, Mordant *et al.*, ...)

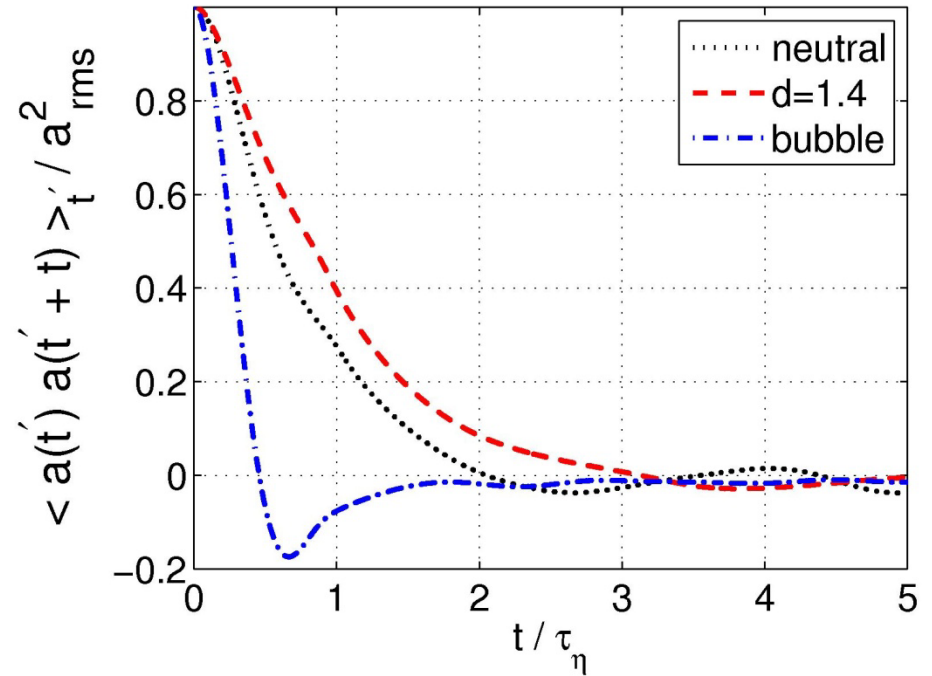


# Particules inertielles (d=1, d=1.4, bulles)

## Accélération



## Corrélations



Particules	$v_{rms}$ (m/s)	$a_{rms}$ (m/s <sup>2</sup> )
Traceurs	1.1	825
Lourdes	1.2	680
Bulles	1	1600

# Comparaison aux simulations numériques

(E. Calzavarini, F. Toschi, D. Lhose)

Particules de taille  $a \leq \eta$  en mouvement dans une DNS à  $R_\lambda = 180$

$$\frac{dV_p}{dt} = \beta \frac{Du}{Dt} + \frac{1}{\tau} (u - V_p)$$

$$\beta = \frac{3\rho_f}{2\rho_p + \rho_f}$$

Effet de masse ajoutée

Adapté de Maxey & Riley avec

$$\tau_a = \frac{a^2}{3\beta\nu} \quad \left( S_t = \frac{\tau_a}{\tau_\eta} \right)$$

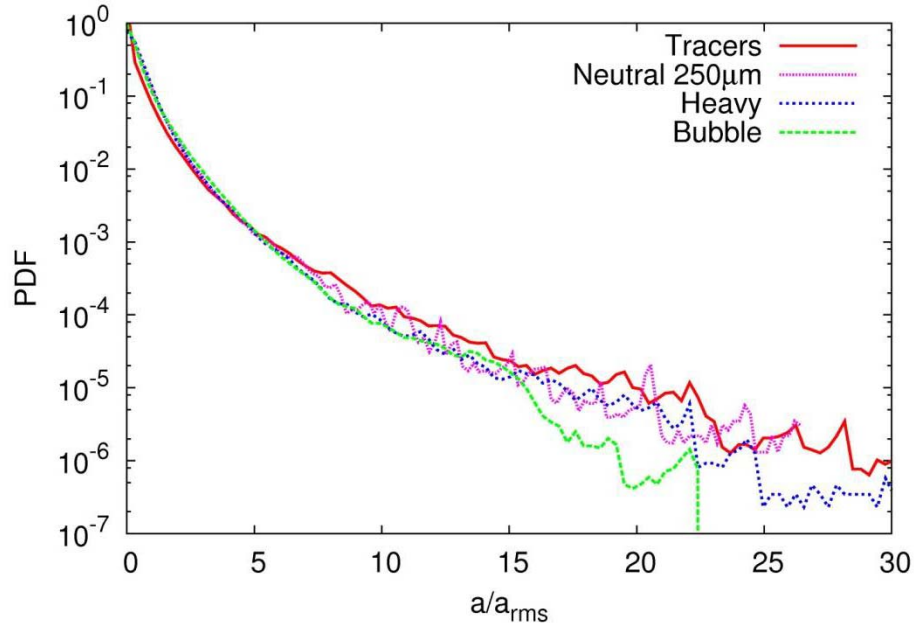
Trainée de Stokes

$$\frac{Du}{Dt} \approx \frac{du}{dt}$$

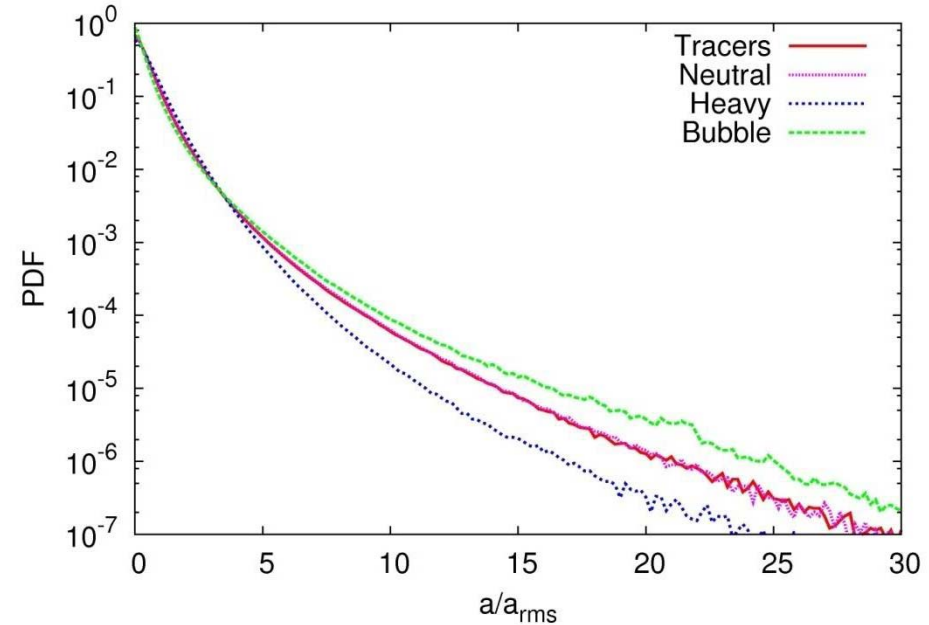
Comparaison avec des valeurs proches pour  $(\beta, S_t)$

# Comparaison des PDF

EXP



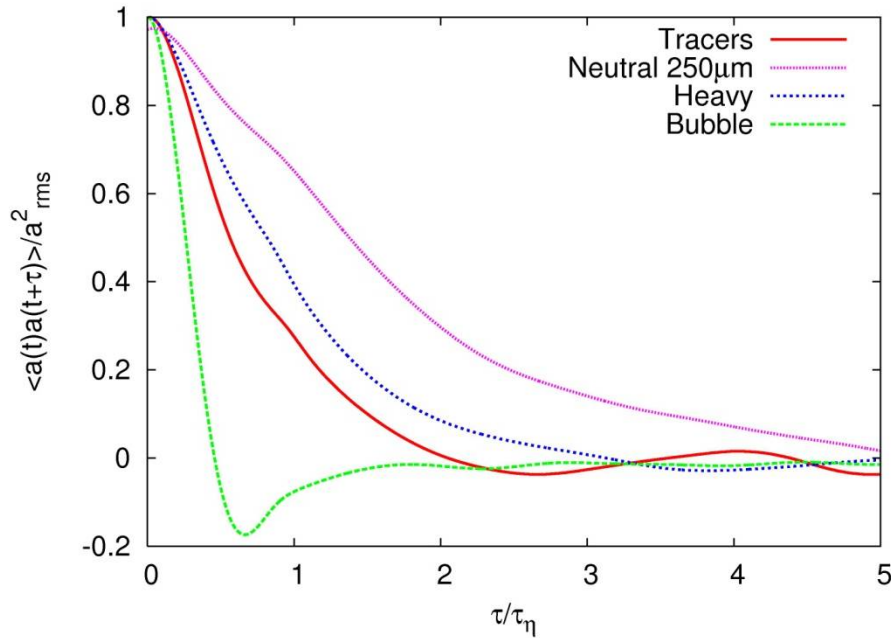
NUM



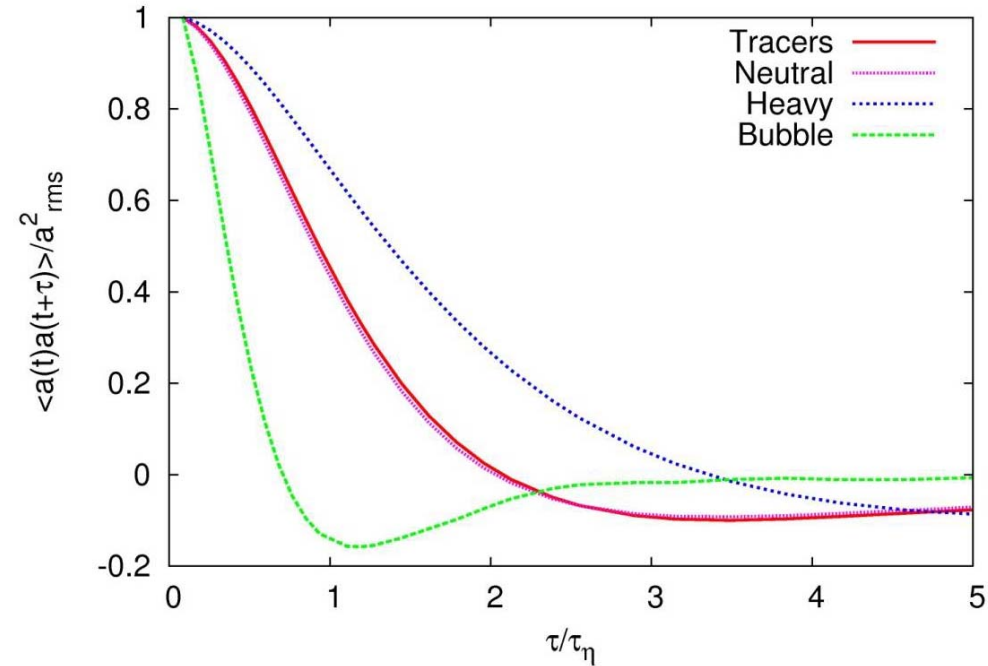
	$\beta$	St	$a_P^2 / a_T^2$ Exp	$a_P^2 / a_T^2$ Num
Bulles	3	$\sim 1.7$	4	9
Lourdes	0.75	$> 0.5$	0.7	0.9
Neutres ( $D \sim 20 \eta$ )	1	$> 4$	0.3	1

# Comparaison des corrélations

EXP

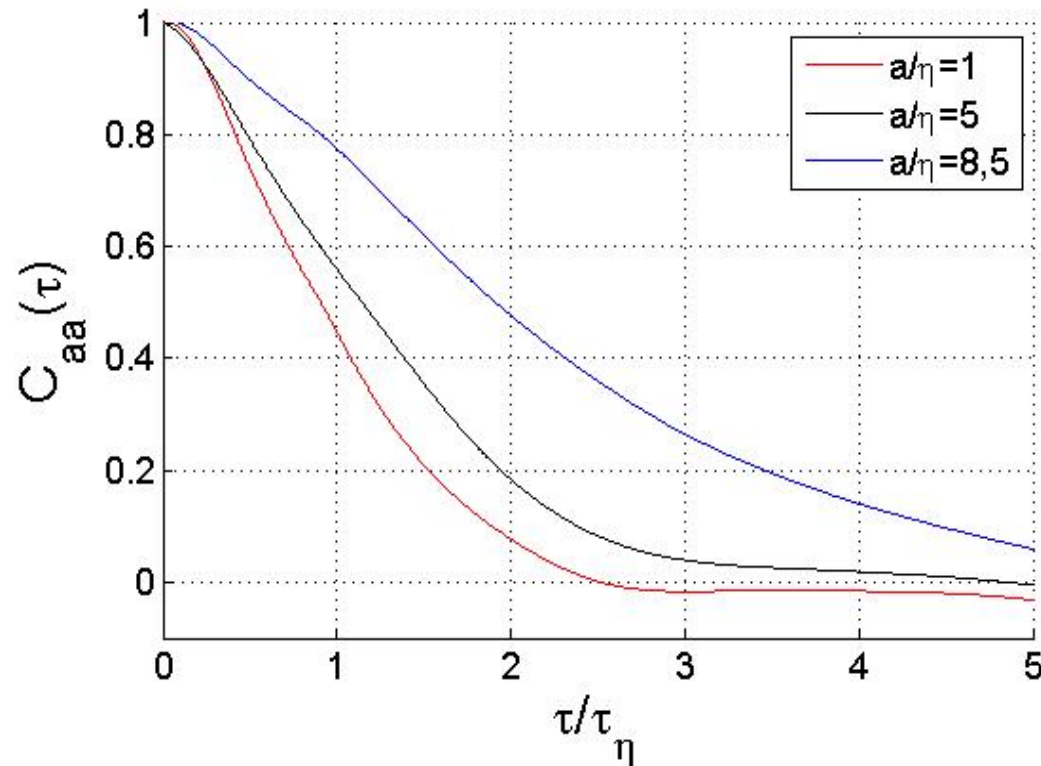


NUM



- Accord qualitatif pour les particules de petite taille (effets de  $Re$ ,  $St$ , taille)
- Désaccord sur les effets de taille

# Effets de la taille des particules



$a/\eta$	$v_{rms}$	$a_{rms}$	$\tau/\tau_\eta$
1	1.1	825	0.9
5	1.0	564	1.1
8.5	1.1	372	1.9

Cohérent avec  
Qureshi et al (PRL 2007)

$$\left( a_{rms}^2 \propto \left( \frac{a}{\eta} \right)^{-\frac{2}{3}} \right)$$

Augmenter le temps de réponse dans le modèle n'est pas prendre en compte les effets de taille ...

$$\tau_a = \frac{a^2}{3\beta v}$$

# Conclusion et perspectives

- La technique marche à très haut nombre de Reynolds
- Augmenter la taille du volume de mesure ( $\delta\tau V$ ,  $T_L$ )
- Effets de taille (temps de corrélation)
- Influence de la géométrie

- Le modèle semble marcher pour les « petites » tailles
- Modélisation des particules matérielles ?

Volk R., Mordant N., Verhille G., Pinton J.-F., *EPL*, **81** (2008)

Volk R., Calzavarini E. *et al. Physica D*, à paraître