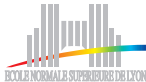


Fluctuations dans les systèmes hors d'équilibre

Sylvain Joubaud

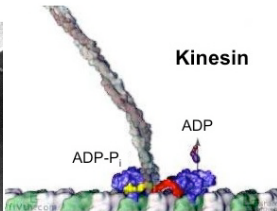
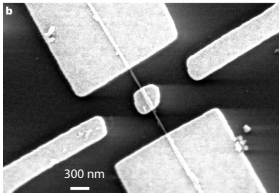
ENS Lyon, Laboratoire de Physique
soutenance de thèse

23 Juin 2008



Introduction

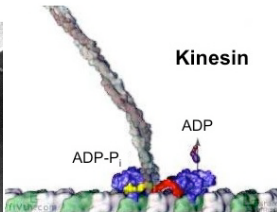
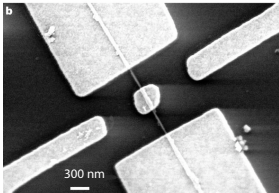
- Applications dans différents domaines :



- nanosciences

Introduction

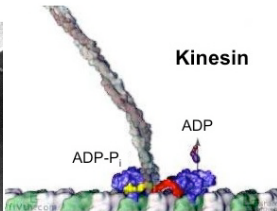
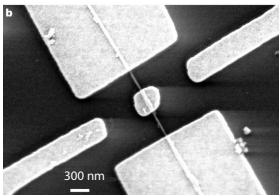
- Applications dans différents domaines :



- nanosciences , biologie, médecine

Introduction

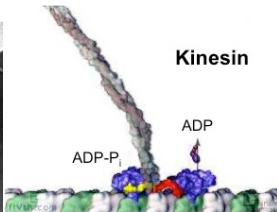
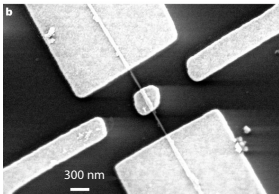
- Applications dans différents domaines :



- nanosciences , biologie, médecine , turbulence, ...

Introduction

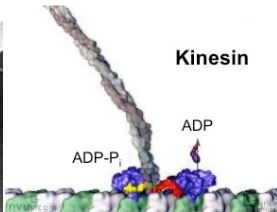
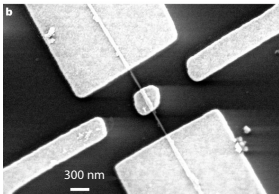
- Applications dans différents domaines :



- nanosciences , biologie, médecine , turbulence, ...
- Amplitude des fluctuations voisine de la moyenne

Introduction

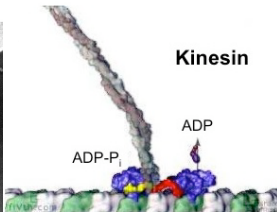
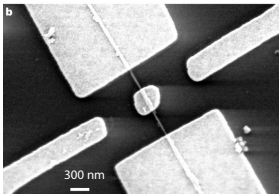
- Applications dans différents domaines :



- nanosciences , biologie, médecine , turbulence, ...
- Amplitude des fluctuations voisine de la moyenne
- Étude expérimentale en physique statistique hors-équilibre

Introduction

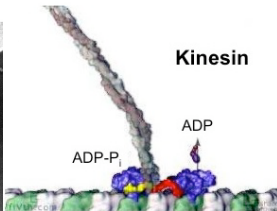
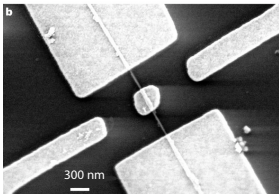
- Applications dans différents domaines :



- nanosciences , biologie, médecine , turbulence, ...
- Amplitude des fluctuations voisine de la moyenne
- Étude expérimentale en physique statistique hors-équilibre
- Informations apportées par les fluctuations sur la structure du système et son comportement hors-équilibre

Introduction

- Applications dans différents domaines :



- nanosciences , biologie, médecine , turbulence, ...
- Amplitude des fluctuations voisine de la moyenne
- Étude expérimentale en physique statistique hors-équilibre
- Informations apportées par les fluctuations sur la structure du système et son comportement hors-équilibre
- Systèmes de complexité croissante

Systèmes expérimentaux

Fluctuations
dans les
systèmes
hors
d'équilibre

Sylvain
Joubaud

Transition de
phase

Transition de phase
du second ordre

Transition de
Fréedericksz

Système
expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure

Validation de la
mesure

Effet de taille
finie

Mesure

Modélisation

Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

Principe

Résultats

expérimentaux

Conclusions
et
perspectives

Étude expérimentale de systèmes de complexité croissante

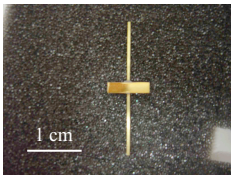
1 Résistance électrique

- 1 degré de liberté

2 Pendule de torsion ← oscillateur harmonique

- 2 degrés de liberté

Pendule de torsion



- Système à 2 degrés de liberté
- Dérivations analytiques
- Étude des fluctuations thermiques hors équilibre
 - Travail fourni
 - Chaleur dissipée
 - Entropie

Joubaud *et al*, CRAS, 2007;
Joubaud *et al*, J Stat Mech, 2007;
Joubaud *et al*, EPL, 2008

Systèmes expérimentaux

Étude expérimentale de systèmes de complexité croissante

1 Résistance électrique

- 1 degré de liberté

2 Pendule de torsion ↔ oscillateur harmonique

- 2 degrés de liberté

3 Systèmes plus complexes : cristaux liquides lors d'une transition de phase

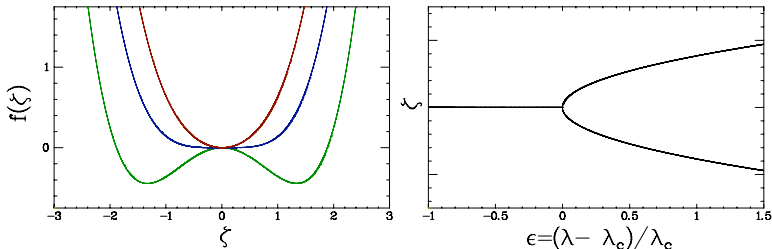
- 1 Transition de phase
 - Transition de phase du second ordre
 - Un exemple : transition de Fréedericksz
- 2 Système expérimental
 - Système de mesure
 - Validation du montage
- 3 Effets de taille finie
 - Distribution de probabilité
 - Modélisation
 - Interprétation
- 4 Vieillessement
 - Principe de la mesure
 - Validation à l'équilibre
 - Résultats préliminaires

Transition de phase

- Transition de phase : changement de la structure interne et des propriétés d'un système sous l'effet d'un paramètre extérieur λ

phase ordonnée \leftrightarrow phase désordonnée

- Transition du second ordre : "continue"
- Phénomène critique (point critique $\lambda = \lambda_c$)
- Caractérisation par un paramètre d'ordre ζ



Transition de phase

Transition de phase

Transition de phase du second ordre

Transition de
Fréedericksz

Système expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure

Validation de la
mesure

Effet de taille fine

Mesure

Modélisation

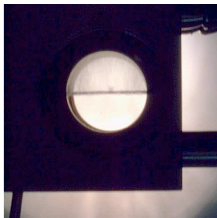
Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

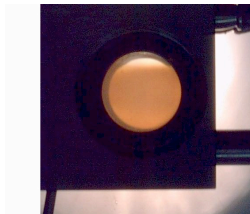
Principe

Résultats
expérimentaux

Conclusions et perspectives



$T < T_c$



$T = T_c$

Transition de phase

Transition de phase

Transition de phase du second ordre

Transition de
Fréedericksz

Système expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure

Validation de la
mesure

Effet de taille finie

Mesure

Modélisation

Nombre de degrés
de liberté effectifs

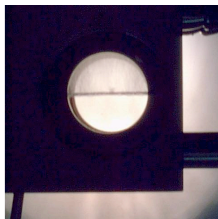
Vieillessement

Principe

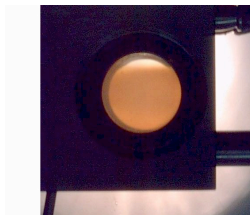
Résultats

expérimentaux

Conclusions et perspectives



$T < T_c$

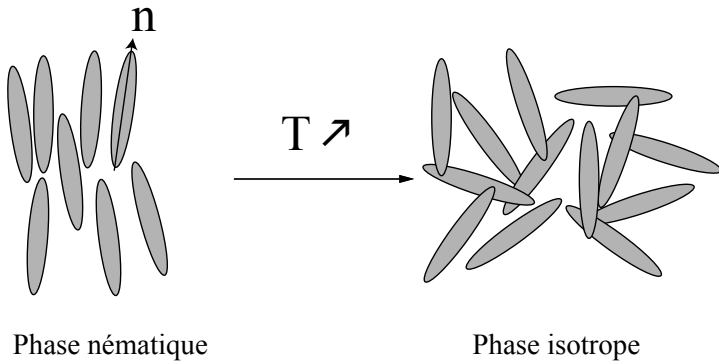


$T = T_c$

- Phénomène critique
 - structure grande échelle (divergence de la longueur de corrélation) → taille finie
 - relaxation lente (divergence du temps de relaxation) → vieillissement

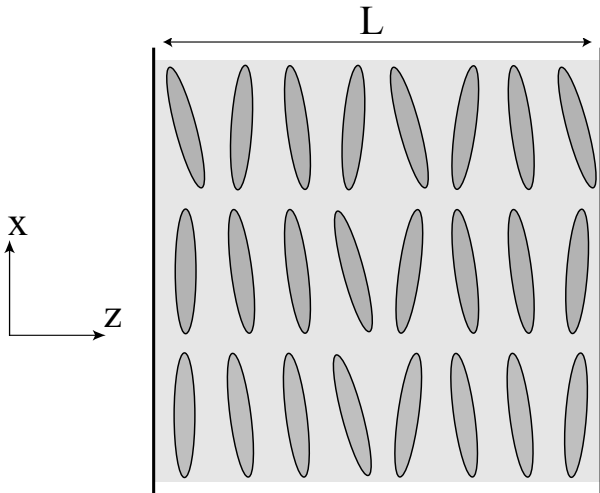
Cristaux liquides

- Cristal liquide : ensemble de molécules allongées
- phase nématique : orientation particulière définie par \vec{n} (énergie élastique)



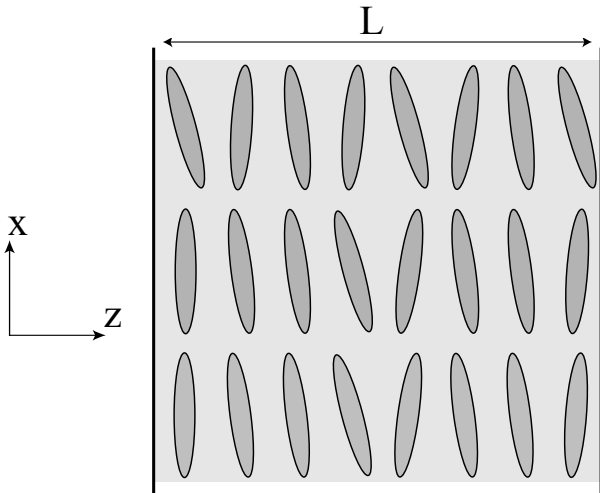
Cellule

- Cristal Liquide confiné dans une cellule d'épaisseur L



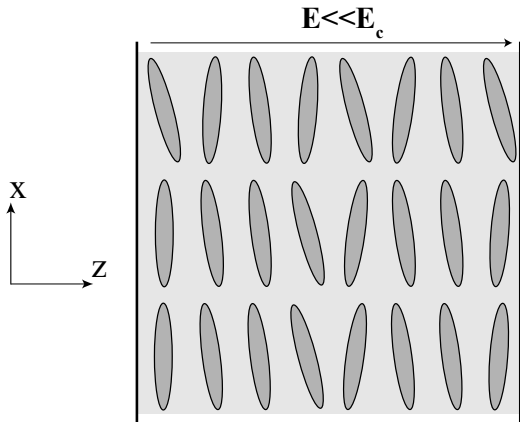
Cellule

- Cristal Liquide confiné dans une cellule d'épaisseur L
- ancrage planaire, obtenu par traitement de surface des parois : $\vec{n} \parallel \vec{u}_x$



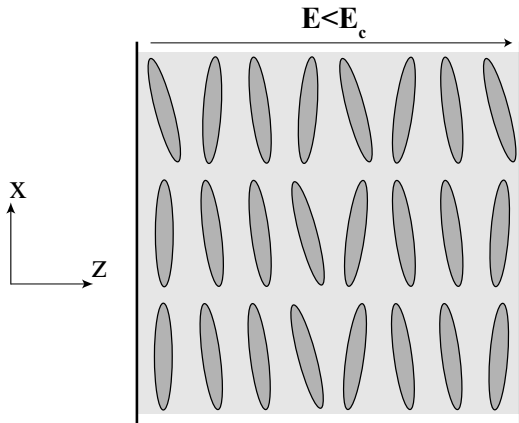
Transition de Fréedericksz

- Application d'un champ $\vec{E} = V/L\vec{u}_z$ (\perp ancrage)
- Compétition entre :
 - énergie libre élastique : $\vec{n} \parallel \vec{u}_x$
 - énergie libre électrique : $\vec{n} \parallel \vec{E}$



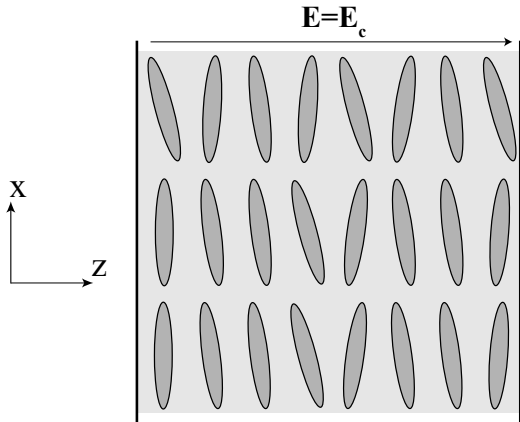
Transition de Fréedericksz

- Application d'un champ $\vec{E} = V/L\vec{u}_z$ (\perp ancrage)
- Compétition entre :
 - énergie libre élastique : $\vec{n} \parallel \vec{u}_x$
 - énergie libre électrique : $\vec{n} \parallel \vec{E}$



Transition de Fréedericksz

- Application d'un champ $\vec{E} = V/L\vec{u}_z$ (\perp ancrage)
- Compétition entre :
 - énergie libre élastique : $\vec{n} \parallel \vec{u}_x$
 - énergie libre électrique : $\vec{n} \parallel \vec{E}$



Transition de Fréedericksz

- Application d'un champ $\vec{E} = V/L\vec{u}_z$ (\perp ancrage)
- Compétition entre :
 - énergie libre élastique : $\vec{n} \parallel \vec{u}_x$
 - énergie libre électrique : $\vec{n} \parallel \vec{E}$
- Instabilité : tension critique V_c

Transition de phase

Transition de phase
du second ordre

Transition de
Fréedericksz

Système expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure

Validation de la
mesure

Effet de taille finie

Mesure

Modélisation

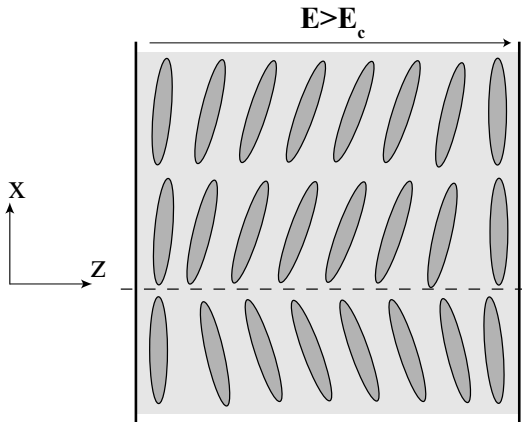
Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

Pincipe

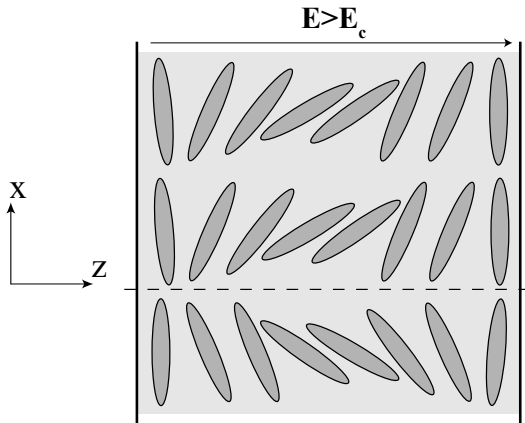
Résultats
expérimentaux

Conclusions et perspectives



Transition de Fréedericksz

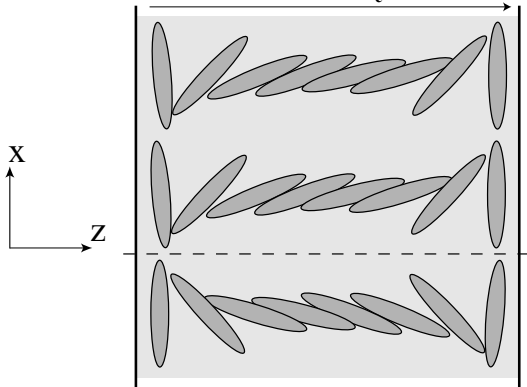
- Application d'un champ $\vec{E} = V/L\vec{u}_z$ (\perp ancrage)
- Compétition entre :
 - énergie libre élastique : $\vec{n} \parallel \vec{u}_x$
 - énergie libre électrique : $\vec{n} \parallel \vec{E}$
- Instabilité : tension critique V_c



Transition de Fréedericksz

- Application d'un champ $\vec{E} = V/L\vec{u}_z$ (\perp ancrage)
- Compétition entre :
 - énergie libre élastique : $\vec{n} \parallel \vec{u}_x$
 - énergie libre électrique : $\vec{n} \parallel \vec{E}$
- Instabilité : tension critique V_c

$E \gg E_c$



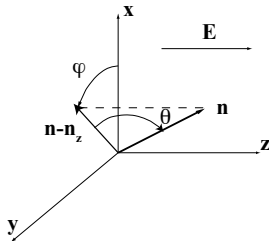
Mise en équation

- Direction définie par \vec{n} (θ et φ)
- $\langle \varphi \rangle = 0$
- premier mode en z pour $\langle \theta \rangle$:

$$\langle \theta(t, z) \rangle = \theta_0(t) \sin(\pi z/L)$$

- Pour $\theta_0 \ll 1$

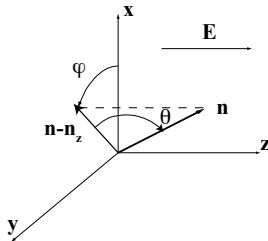
$$\tau_0 \frac{d\theta_0}{dt} = \epsilon \theta_0 - \frac{1}{2} (\kappa + \epsilon + 1) \theta_0^3$$



Mise en équation

- Direction définie par \vec{n} (θ et φ)
- $\langle \varphi \rangle = 0$
- premier mode en z pour $\langle \theta \rangle$:

$$\langle \theta(t, z) \rangle = \theta_0(t) \sin(\pi z/L)$$



- Pour $\theta_0 \ll 1$

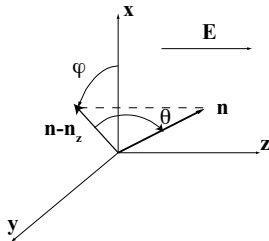
$$\tau_0 \frac{d\theta_0}{dt} = \epsilon \theta_0 - \frac{1}{2} (\kappa + \epsilon + 1) \theta_0^3$$

- $\epsilon = \frac{V^2}{V_c^2} - 1$

Mise en équation

- Direction définie par \vec{n} (θ et φ)
- $\langle \varphi \rangle = 0$
- premier mode en z pour $\langle \theta \rangle$:

$$\langle \theta(t, z) \rangle = \theta_0(t) \sin(\pi z/L)$$

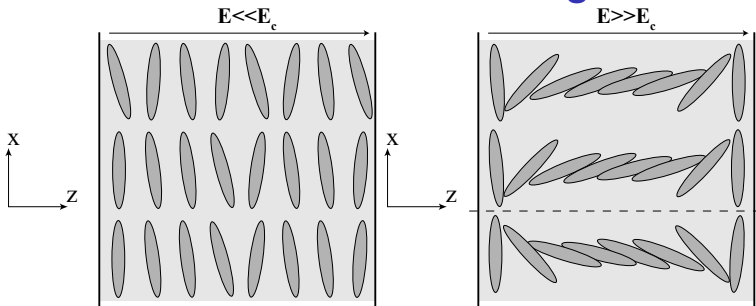


- Pour $\theta_0 \ll 1$

$$\tau_0 \frac{d\theta_0}{dt} = \epsilon \theta_0 - \frac{1}{2} (\kappa + \epsilon + 1) \theta_0^3$$

- $\epsilon = \frac{V^2}{V_c^2} - 1$
- $\tau_0 \propto L^2$
- κ anisotropie élastique

Paramètre d'ordre global

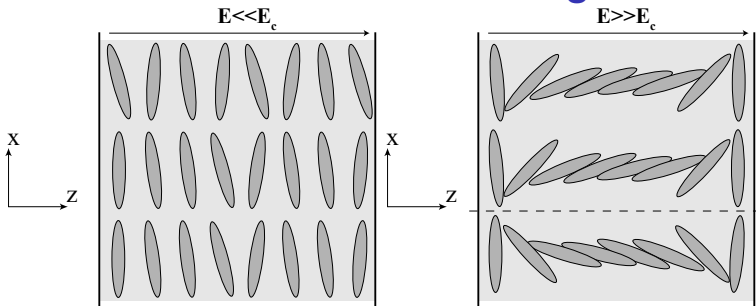


$$\zeta =$$

$$n_x$$

- $+\vec{n}$ et $-\vec{n}$ sont équivalents

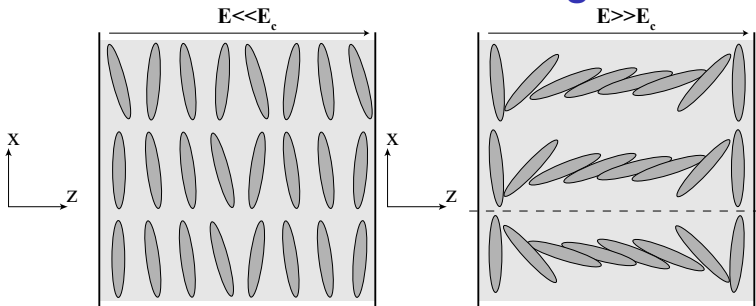
Paramètre d'ordre global



$$\zeta = n_x^2$$

- $+\vec{n}$ et $-\vec{n}$ sont équivalents

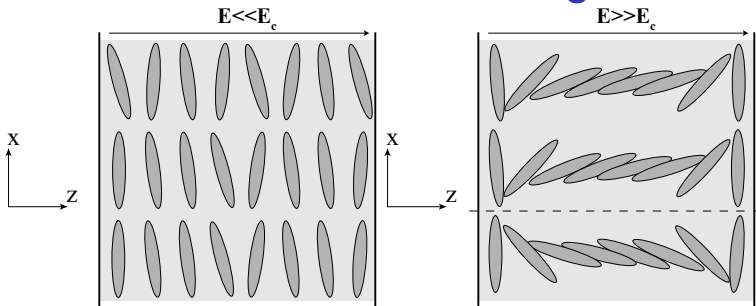
Paramètre d'ordre global



$$\zeta = 1 - n_x^2$$

- $+\vec{n}$ et $-\vec{n}$ sont équivalents

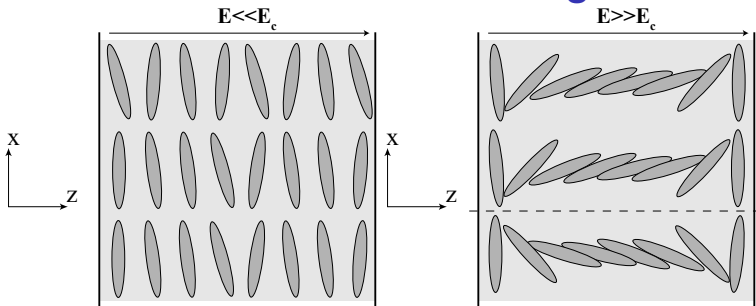
Paramètre d'ordre global



$$\zeta = \frac{2}{L} \int_0^L (1 - n_x^2) dz$$

- $+\vec{n}$ et $-\vec{n}$ sont équivalents

Paramètre d'ordre global



$$\zeta = \left\langle \frac{2}{L} \int_0^L (1 - n_x^2) dz \right\rangle_{xy}$$

- $+\vec{n}$ et $-\vec{n}$ sont équivalents

Fluctuations

Fluctuations
dans les
systèmes
hors
d'équilibre

Sylvain
Joubaud

Transition de
phase

Transition de phase
du second ordre

Transition de
Fréedericksz

Système
expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure

Validation de la
mesure

Effet de taille
finie

Mesure

Modélisation

Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

Principe

Résultats
expérimentaux

Conclusions
et
perspectives

M.S. San Miguel, *Phys. Rev. A*, 32(6), 1985

Les fluctuations sont caractérisées :

- longueur de corrélation $\xi = L/\pi\sqrt{\epsilon}$
- temps de relaxation $\tau_r = \tau_0/\epsilon$
- Résultat de champ moyen

Fluctuations

M.S. San Miguel, *Phys. Rev. A*, 32(6), 1985

Les fluctuations sont caractérisées :

- $\tau_r = \tau_0/\epsilon$ et $\xi = L/\pi\sqrt{\epsilon}$
- exemple S. Zhou and G. Ahlers, *arXiv:nlin/040905* (2005)

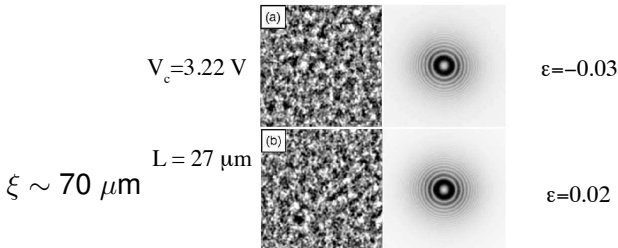
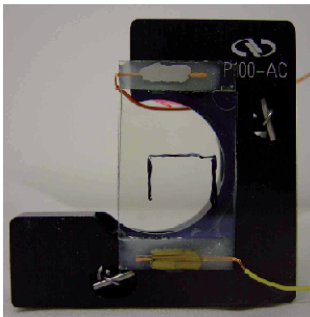


FIG. 1: Left column: shadowgraph snapshots of an area of $1.03 \times 1.03 \text{ mm}^2$. Right column: corresponding structure factors, averaged over 256 images. (a): $V_0 = 3.170$, (b): $V_0 = 3.256$ Volt.

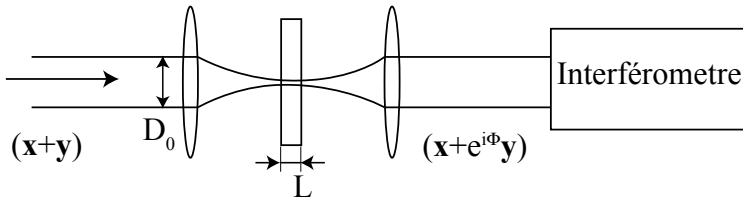
Dispositif expérimental

- Cristaux liquides : écrans LCD
- Cellule d'épaisseurs $L = 6.7 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$; surface 1 cm^2
- cristal liquide 5CB



Dispositif expérimental

- cellule : lame biréfringente d'axe optique parallèle à \vec{n}
- faisceau laser polarisé à 45°
- Mesure du déphasage entre faisceau ordinaire et extraordinaire



Mesure par interférométrie

Transition de phase

Transition de phase
du second ordre
Transition de
Fréedericksz

Système expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure

Validation de la
mesure

Effet de taille finie

Mesure

Modélisation

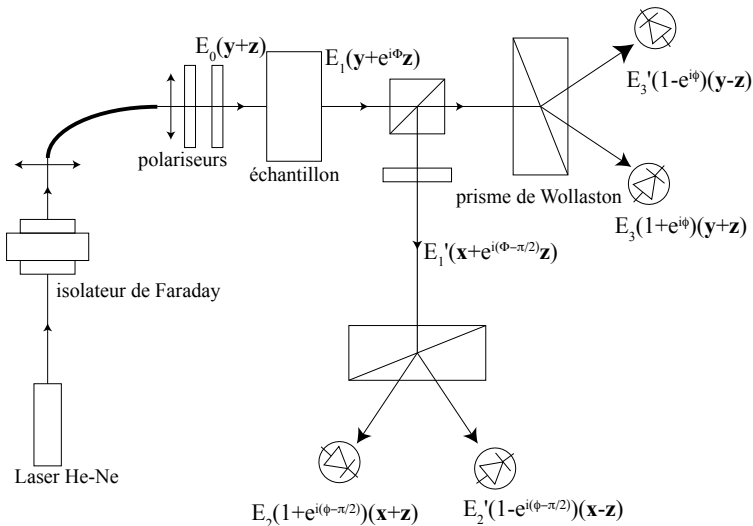
Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

Pincipe

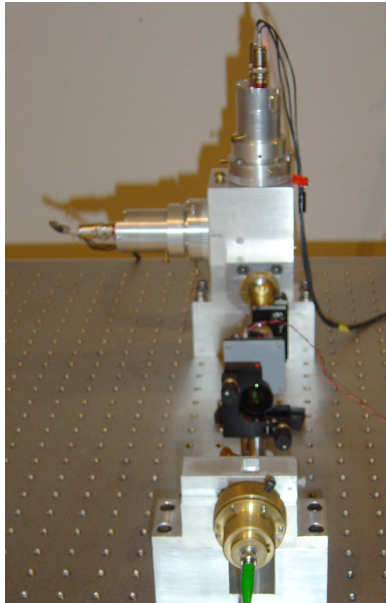
Résultats
expérimentaux

Conclusions et perspectives



sensibilité $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \leftrightarrow 5 \cdot 10^{-7} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$

Mesure par interférométrie



Fluctuations
dans les
systèmes
hors
d'équilibre

Sylvain
Joubaud

Transition de
phase

Transition de phase
du second ordre

Transition de
Fréedericksz

Système
expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure

Validation de la
mesure

Effet de taille
finie

Mesure

Modélisation

Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

Pincipe

Résultats
expérimentaux

Conclusions
et
perspectives

Expression du déphasage

- Mesure du déphasage induit par la lame
($\theta = \theta_0 \sin(\pi z/L)$ et $\theta \ll 1$)

Fluctuations
dans les
systèmes
hors
d'équilibre

Sylvain
Joubaud

Transition de
phase

Transition de phase
du second ordre

Transition de
Fréedericksz

Système
expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure

Validation de la
mesure

Effet de taille
finie

Mesure

Modélisation

Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

Principe

Résultats
expérimentaux

Conclusions
et
perspectives

Expression du déphasage

- Mesure du déphasage induit par la lame
($\theta = \theta_0 \sin(\pi z/L)$ et $\theta \ll 1$)

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) L \left(1 - \frac{n_e(n_e + n_o)}{4n_o^2} \zeta \right)$$

$$\zeta = \left\langle \frac{2}{L} \int_0^L (1 - n_x^2) dz \right\rangle_{xy}$$

- L épaisseur de la cellule
- λ longueur d'onde du laser
- n_o et n_e indices optiques

Expression du déphasage

- Mesure du déphasage induit par la lame
($\theta = \theta_0 \sin(\pi z/L)$ et $\theta \ll 1$)

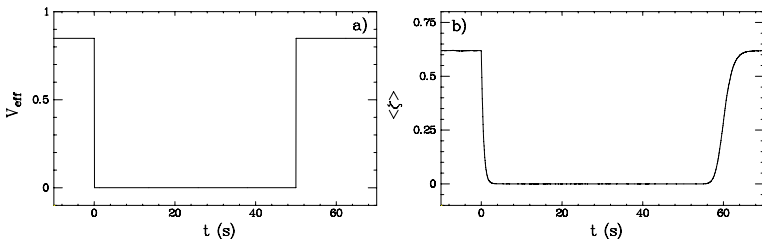
$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) L \left(1 - \frac{n_e(n_e + n_o)}{4n_0^2} \zeta \right)$$

$$\zeta = \left\langle \frac{2}{L} \int_0^L (1 - n_x^2) dz \right\rangle_{xy}$$

- L épaisseur de la cellule
- λ longueur d'onde du laser
- n_o et n_e indices optiques
- Bruit sur la mesure de ζ : $\zeta_{\text{env}} \sim 1 \cdot 10^{-7} \text{ Hz}^{-1/2}$

Valeur moyenne

- Exemple de cycle :

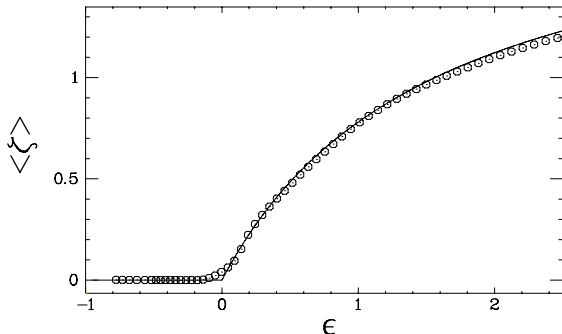


- $\langle \zeta \rangle$ et τ_r en fonction de ϵ

$$\zeta = \left\langle \frac{2}{L} \int_0^L (1 - n_x^2) dz \right\rangle_{xy}$$

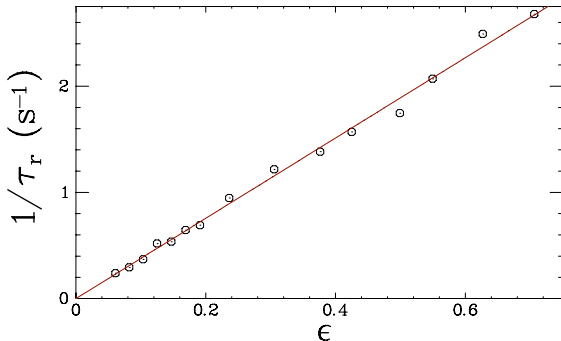
$$\epsilon = \frac{V^2}{V_c^2} - 1$$

Champ moyen



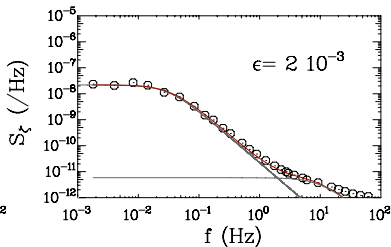
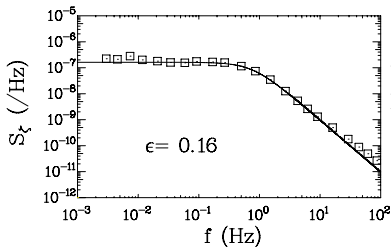
- En accord avec la théorie de champ moyen

Champ moyen



- En accord avec la théorie de champ moyen

Densité spectrale

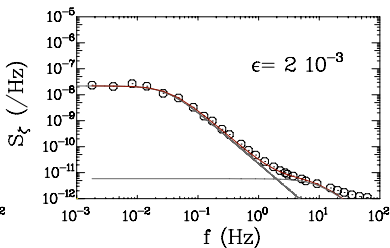
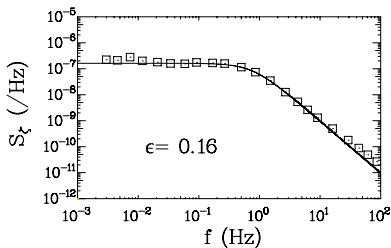


- Spectre Lorentzien :

$$S_{\zeta} = \frac{A}{1 + (f/f_c)^2}$$

P. Galatola, J. Phys. II France (1995)

Densité spectrale



- Spectre Lorentzien :

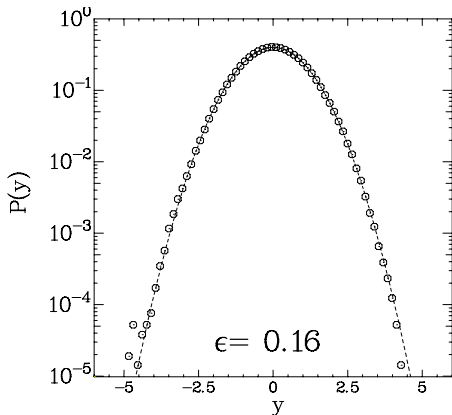
$$S_{\zeta} = \frac{A}{1 + (f/f_c)^2}$$

P. Galatola, J. Phys. II France (1995)

- f_c diminue ($f_c = 2\pi/\tau_r$)
- Excellente résolution jusqu'à de basses fréquences (~ 2 mHz)

Distributions

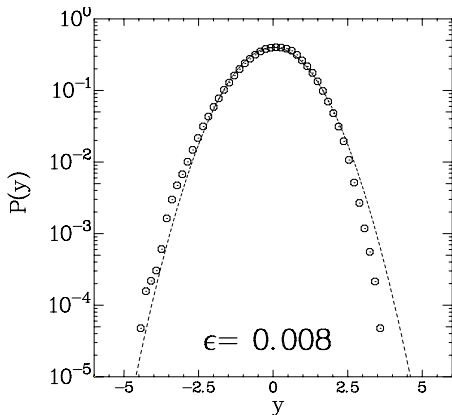
$$y = \frac{\zeta - \langle \zeta \rangle}{\sigma_\zeta}$$



$$(D/\xi) \sim 25$$

Distributions

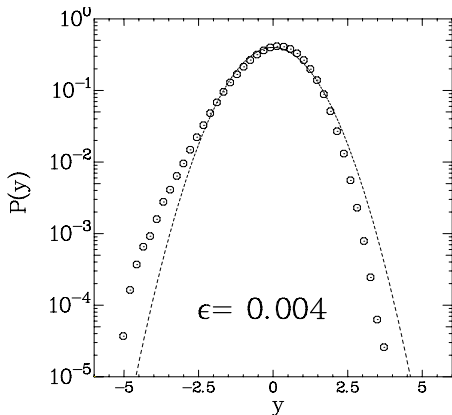
$$y = \frac{\zeta - \langle \zeta \rangle}{\sigma_\zeta}$$



$$(D/\xi) \sim 6.5$$

Distributions

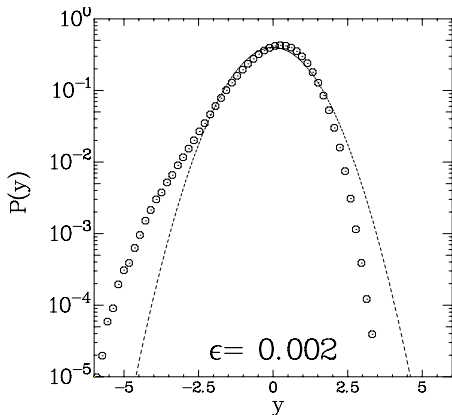
$$y = \frac{\zeta - \langle \zeta \rangle}{\sigma_\zeta}$$



$$(D/\xi) \sim 3.8$$

Distributions

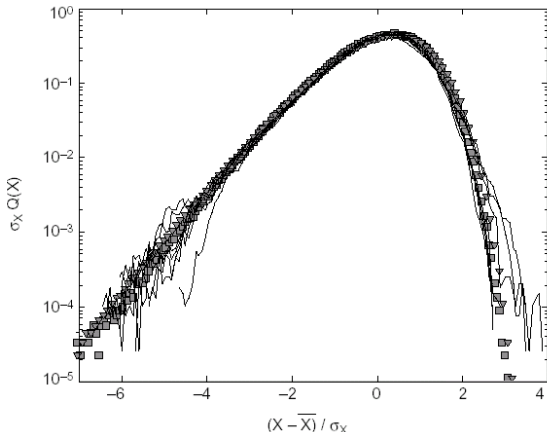
$$y = \frac{\zeta - \langle \zeta \rangle}{\sigma_\zeta}$$



$$(D/\xi) \sim 2.5$$

Remarque

- Structures à grandes échelles : taille finie ($\xi \sim D$)
- Caractère "quasi-universel" des distributions



Gumbel Généralisée

$$y = \frac{\zeta - \langle \zeta \rangle}{\sigma_\zeta}$$

- Modélisation par une Gumbel Généralisée :

$$P_a(\zeta) = \frac{a^a b_a}{\Gamma(a)} \exp\{-a [b_a(\zeta - s_a) - \exp(-b_a(\zeta - s_a))]\}$$

Gumbel Généralisée

$$y = \frac{\zeta - \langle \zeta \rangle}{\sigma_\zeta}$$

- Modélisation par une Gumbel Généralisée :

$$P_a(\zeta) = \frac{a^a b_a}{\Gamma(a)} \exp\{-a [b_a(\zeta - s_a) - \exp(-b_a(\zeta - s_a))]\}$$

- Distribution obtenue théoriquement pour la magnétisation dans le modèle XY

Gumbel Généralisée

$$y = \frac{\zeta - \langle \zeta \rangle}{\sigma_\zeta}$$

- Modélisation par une Gumbel Généralisée :

$$P_a(\zeta) = \frac{a^a b_a}{\Gamma(a)} \exp\{-a [b_a(\zeta - s_a) - \exp(-b_a(\zeta - s_a))]\}$$

- Distribution obtenue théoriquement pour la magnétisation dans le modèle XY
- a paramètre libre (asymétrie) :

$$\gamma = \langle y^3 \rangle \sim 1/\sqrt{a}$$

Transition de phase

Transition de phase
du second ordre
Transition de
Fréedericksz

Système expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure
Validation de la
mesure

Effet de taille finie

Mesure

Modélisation

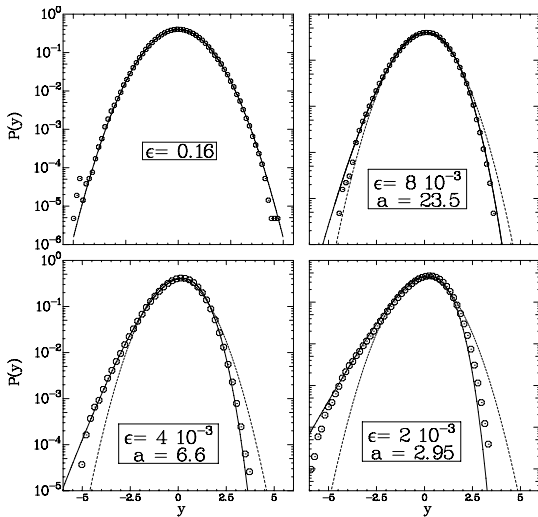
Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillesement

Pincipe
Résultats
expérimentaux

Conclusions et perspectives

Modélisation



Longueur de corrélation

San Miguel, Phys. Rev. A, 32, 3811 (1985)

- Longueur de corrélation est liée à ϵ :

$$\xi = L/\pi\sqrt{\epsilon}$$

- Nombre de degrés de liberté effectifs :

Longueur de corrélation

San Miguel, Phys. Rev. A, 32, 3811 (1985)

- Longueur de corrélation est liée à ϵ :

$$\xi = L/\pi\sqrt{\epsilon}$$

- Nombre de degrés de liberté effectifs :

$$N_{\text{eff}} = \frac{\text{taille aire mesure}}{\xi^2}$$

Longueur de corrélation

San Miguel, Phys. Rev. A, 32, 3811 (1985)

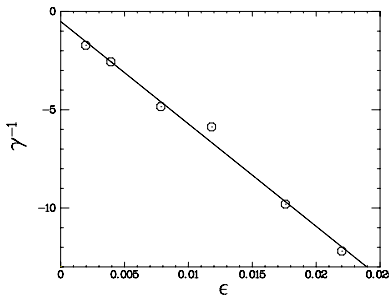
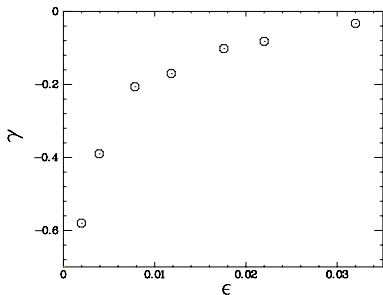
- Longueur de corrélation est liée à ϵ :

$$\xi = L/\pi\sqrt{\epsilon}$$

- Nombre de degrés de liberté effectifs :

$$N_{\text{eff}} = \left(\frac{D}{\xi}\right)^2 \sim \epsilon$$

Nombre de degré de liberté



- γ (donc a) en terme de $N_{\text{eff}} = D/\xi$:

$$\gamma^{-1} = p + q\epsilon = p + \tilde{q}N_{\text{eff}}^2$$

- dépendance identique à celle obtenue dans le cadre du modèle XY

Influence de la fréquence de filtrage

Transition de phase

Transition de phase
du second ordre
Transition de
Fréedericksz

Système expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure
Validation de la
mesure

Effet de taille finie

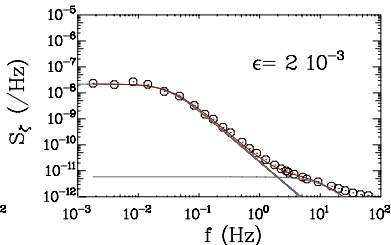
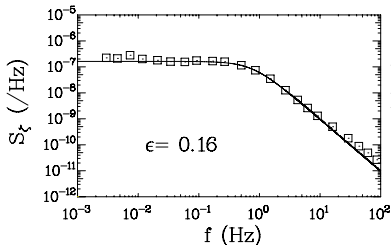
Mesure
Modélisation
Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

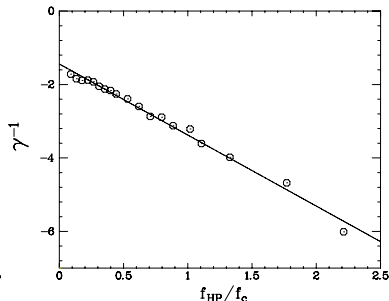
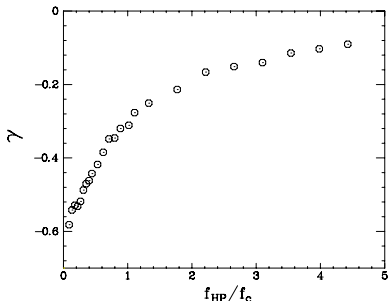
Pincipe
Résultats
expérimentaux

Conclusions et perspectives

- Pourquoi ce comportement ?
- Application d'un filtre passe-haut ($f_{C,HP}$)



Influence de la fréquence de filtrage



- Basses fréquences responsables de la non-Gaussianité
- Basses fréquences équivalentes grandes longueurs d'onde

Effets de taille finie

- Système subissant une transition de phase du second ordre : transition de Fréedericksz dans les cristaux liquides
- Mise en place du dispositif de mesure et validation du montage

Effets de taille finie

- Système subissant une transition de phase du second ordre : transition de Fréedericksz dans les cristaux liquides
- Mise en place du dispositif de mesure et validation du montage
- Fluctuations du système à l'équilibre : influence de la divergence de la longueur de corrélation
- Effets de taille finie sur les distributions : asymétrie des PDFs

Effets de taille finie

- Système subissant une transition de phase du second ordre : transition de Fréedericksz dans les cristaux liquides
- Mise en place du dispositif de mesure et validation du montage
- Fluctuations du système à l'équilibre : influence de la divergence de la longueur de corrélation
- Effets de taille finie sur les distributions : asymétrie des PDFs
- Interprétation : nombre de degrés de liberté effectifs, mode basse-fréquence

Joubaud *et al*, PRL, 2008

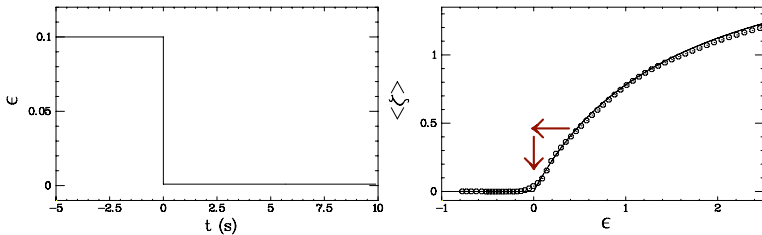
Effets de taille finie

- Système subissant une transition de phase du second ordre : transition de Fréedericksz dans les cristaux liquides
- Mise en place du dispositif de mesure et validation du montage
- Fluctuations du système à l'équilibre : influence de la divergence de la longueur de corrélation
- Effets de taille finie sur les distributions : asymétrie des PDFs
- Interprétation : nombre de degrés de liberté effectifs, mode basse-fréquence
Joubaud et al, PRL, 2008
- Influence de la divergence des temps de corrélations : fluctuations hors d'équilibre

- 1 Transition de phase
 - Transition de phase du second ordre
 - Un exemple : transition de Fréedericksz
- 2 Système expérimental
 - Système de mesure
 - Validation du montage
- 3 Effets de taille finie
 - Distribution de probabilité
 - Modélisation
 - Interprétation
- 4 Vieillessement
 - Principe de la mesure
 - Validation à l'équilibre
 - Résultats préliminaires

Principe de la mesure

- À la date $t = 0$, trempe de $\epsilon = \epsilon_0$ vers $\epsilon \approx 0$



Transition de phase

Transition de phase
du second ordre
Transition de
Fréedericksz

Système expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure
Validation de la
mesure

Effet de taille finie

Mesure
Modélisation
Nombre de degrés
de liberté effectifs

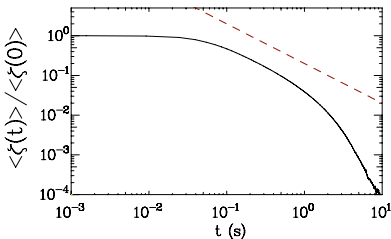
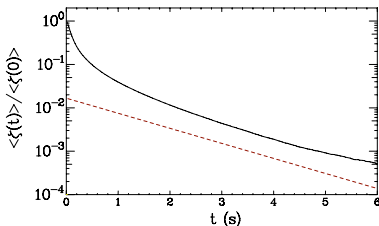
Vieillessement

Principe
Résultats
expérimentaux

Conclusions et perspectives

Principe de la mesure

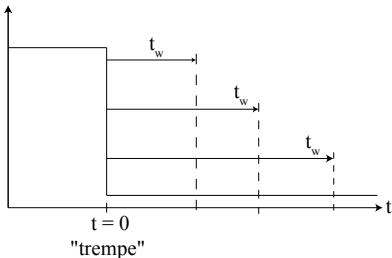
- À la date $t = 0$, trempe de $\epsilon = \epsilon_0$ vers $\epsilon \approx 0$



- Relaxation lente analogue à un phénomène de vieillissement
- Observations sur 3 ordres de grandeur
- Évolution lente et fortement hors équilibre de la structure du système

Rapport Fluctuation-Dissipation

- Relaxation lente analogue à un phénomène de vieillissement
- "Vieillessement" : propriétés physiques du système dépendantes de t_w (âge du système)
- Perte de la stationnarité \rightarrow perte d'invariance par translation dans le temps



Rapport Fluctuation-Dissipation

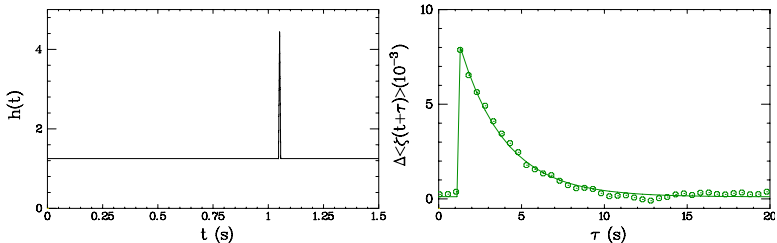
- Relaxation lente analogue à un phénomène de vieillissement
- "Vieillessement" : propriétés physiques du système dépendantes de t_w (âge du système)
- Perte de la stationnarité \rightarrow perte d'invariance par translation dans le temps

- Étude des fonctions à deux temps :
 - Fonctions de corrélation :

$$C(t, t_w) = \langle \delta\zeta(t_w)\delta\zeta(t) \rangle$$

- $\delta\zeta = \zeta - \langle \zeta \rangle$ fluctuations

Rapport Fluctuation-Dissipation



- Fonction de réponse impulsionnelle

$$\chi(t, t_w) = \frac{\Delta \langle \zeta(t) \rangle}{\delta h_0}$$

- $h(t) = h_0 \delta(t - t_w)$ énergie de l'impulsion champ conjugué de ζ :

$$h(t) \propto \delta \epsilon$$

Rapport Fluctuation-Dissipation

- À l'équilibre, relation entre C et χ :

$$\chi(t, t_w) = \frac{1}{k_B T} \frac{\partial C(t, t_w)}{\partial t_w}$$

Rapport Fluctuation-Dissipation

Transition de phase

Transition de phase
du second ordre

Transition de
Fréedericksz

Système expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure

Validation de la
mesure

Effet de taille finie

Mesure

Modélisation

Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

Principe

Résultats
expérimentaux

Conclusions et perspectives

- À l'équilibre, relation entre C et χ :

$$\chi(t, t_w) = \frac{1}{k_B T} \frac{\partial C(t, t_w)}{\partial t_w}$$

- Généralisation hors-équilibre :

$$\chi(t, t_w) = \frac{X(t, t_w)}{k_B T} \frac{\partial C(t, t_w)}{\partial t_w}$$

Rapport Fluctuation-Dissipation

Transition de phase

Transition de phase
du second ordre

Transition de
Fréedericksz

Système expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure

Validation de la
mesure

Effet de taille finie

Mesure

Modélisation

Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

Principe

Résultats
expérimentaux

Conclusions et perspectives

- À l'équilibre, relation entre C et χ :

$$\chi(t, t_w) = \frac{1}{k_B T} \frac{\partial C(t, t_w)}{\partial t_w}$$

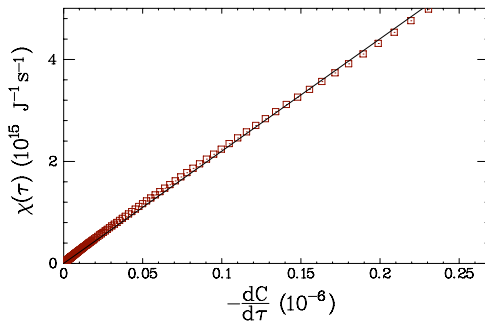
- Généralisation hors-équilibre :

$$\chi(t, t_w) = \frac{X(t, t_w)}{k_B T} \frac{\partial C(t, t_w)}{\partial t_w}$$

- Définition d'une température effective $T_{\text{eff}} = T/X$

Résultat à l'équilibre

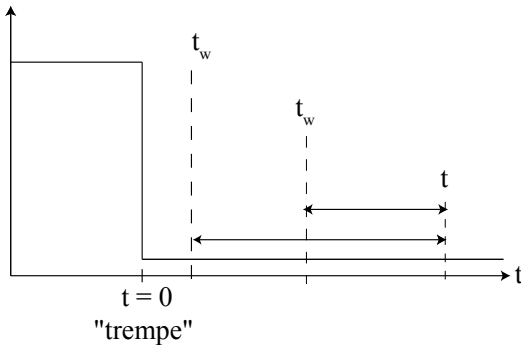
- À ϵ fixé
- Réponse χ en fonction de $\partial_{t_w} C$



- Méthode de calibration du système

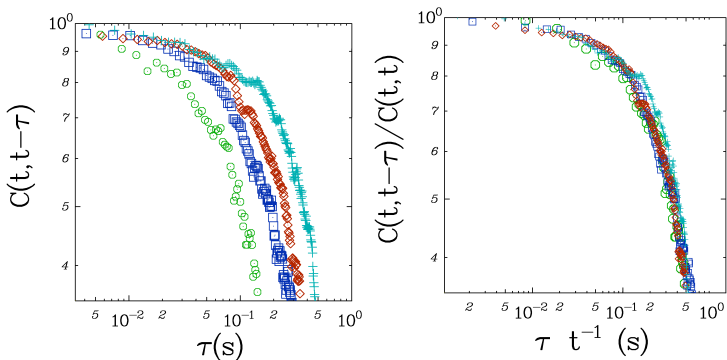
Fonction d'autocorrélations

- Durant le vieillissement



Fonction d'autocorrélations

- Durant le vieillissement



$$t = 0.3 \text{ s } (\circ), 0.5 \text{ s } (\square), 0.7 \text{ s } (\diamond), 0.9 \text{ s } (+)$$

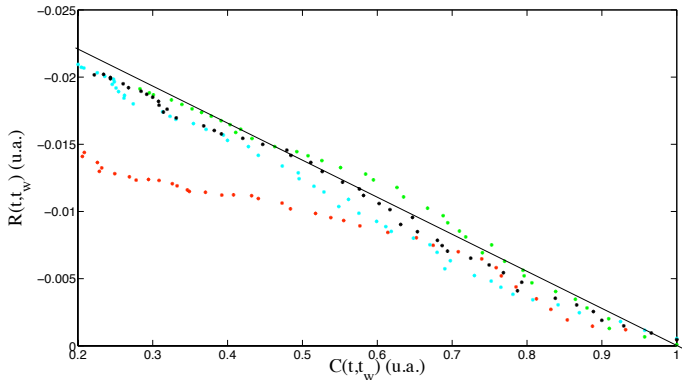
- Loi d'échelle de champ moyen

Rapport Fluctuation-Dissipation

- Réponse intégrée:

$$R(t, t_w) = \int_{t_w}^t \chi(t, t') dt'$$

- Corrélation



Conclusions et perspectives

- Conclusions
 - Analogie entre relaxation au point critique et phénomène de vieillissement
 - Mise en place d'une mesure de la réponse du système
 - Validation à l'équilibre
 - Observation d'une loi d'échelle sur les corrélations
 - Observation d'une violation de FDT

Conclusions et perspectives

Fluctuations
dans les
systèmes
hors
d'équilibre

Sylvain
Joubaud

Transition de
phase

Transition de phase
du second ordre
Transition de
Fréedericksz

Système
expérimental

Réalisation
expérimentale et
mesure
Validation de la
mesure

Effet de taille
finie

Mesure
Modélisation
Nombre de degrés
de liberté effectifs

Vieillessement

Principe
Résultats
expérimentaux

Conclusions
et
perspectives

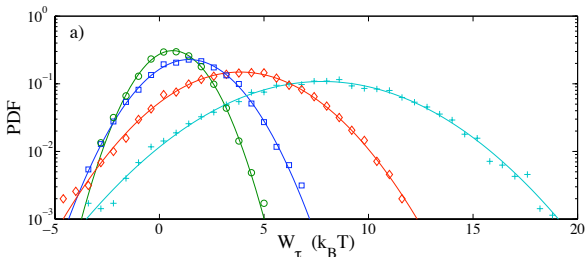
- Conclusions
 - Analogie entre relaxation au point critique et phénomène de vieillissement
 - Mise en place d'une mesure de la réponse du système
 - Validation à l'équilibre
 - Observation d'une loi d'échelle sur les corrélations
 - Observation d'une violation de FDT
- Perspectives
 - Théorème de Fluctuation-Dissipation
 - Liens entre les systèmes expérimentaux ?

Théorème de Fluctuation

- Équilibre
- Définition d'un travail :

$$W_\tau \propto \delta\epsilon(\zeta_\tau - \zeta_0)$$

- Vérification d'un Théorème de Fluctuation Transitoire
- Résultat lors d'un vieillissement ?

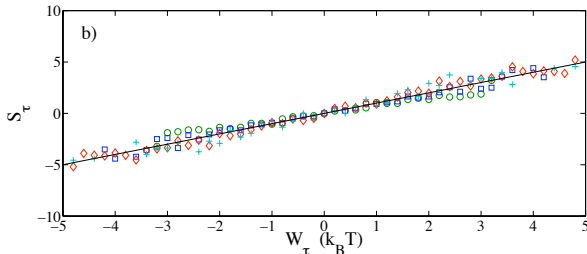


Théorème de Fluctuation

- Équilibre
- Définition d'un travail :

$$W_T \propto \delta\epsilon(\zeta_T - \zeta_0)$$

- Vérification d'un Théorème de Fluctuation Transitoire
- Résultat lors d'un vieillissement ?



Théorème de Fluctuation

- Équilibre
- Définition d'un travail :

$$W_T \propto \delta\epsilon(\zeta_T - \zeta_0)$$

- Vérification d'un Théorème de Fluctuation Transitoire
- Résultat lors d'un vieillissement ?

