

# Comportement statique et dynamique d'une suspension de haut-parleur à joint de ferrofluide

Marcos Pinho

*Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine - UMR 6613*

**Philippe HERZOG**  
**Georges BOSSIS**  
**Gaël GUYADER**  
**Nicolas DAUCHEZ**  
**Jean-Michel GENEVAUX**  
**Bruno BROUARD**

Directeur de Recherches, LMA, Marseille  
Directeur de Recherches, LPMC, Nice  
Docteur, Technocentre Renault, Guyancourt  
Professeur, SUPMECA, Paris  
Professeur, LAUM, Le Mans  
Maître de Conférences, LAUM, Le Mans

Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Co-directeur  
Co-directeur  
Co-directeur

*Le Mans, 25 janvier 2011*

## Objectif de la thèse

Étude expérimentale des effets vibratoires  
d'une suspension à joint de ferrofluide  
sur le fonctionnement dynamique du haut-parleur

## Contextualisation de la thèse

**Projet MAGIC**  
(*Magnetic Ironless Concept*)



Mesure de la suspension  
à joint de ferrofluide

Doctorat (2008-2011)

**M. Pinho**

## Contextualisation de la thèse

**Projet MAGIC**  
*(Magnetic Ironless Concept)*



**Calcul du champ  
magnétique**

Doctorat (2007-2009)

**R. Ravaud**



**Mesure de la suspension  
à joint de ferrofluide**

Doctorat (2008-2011)

**M. Pinho**

## Contextualisation de la thèse

**Projet MAGIC**  
(*Magnetic Ironless Concept*)



**Calcul du champ  
magnétique**

Doctorat (2007-2009)

**R. Ravaud**



**Mesure de la suspension  
à joint de ferrofluide**

Doctorat (2008-2011)

**M. Pinho**



**Mesure des non-linéarités  
du haut-parleur**

Post-Doctorat (2010-2011)

**A. Novák**

## Contextualisation de la thèse

**Projet MAGIC**  
(*Magnetic Ironless Concept*)



**Calcul du champ  
magnétique**

Doctorat (2007-2009)

**R. Ravaud**



**Mesure de la suspension  
à joint de ferrofluide**

Doctorat (2008-2011)

**M. Pinho**



**Mesure des non-linéarités  
du haut-parleur**

Post-Doctorat (2010-2011)

**A. Novák**

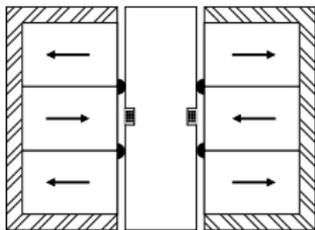


**Optimisation du haut-parleur à joints de ferrofluide**

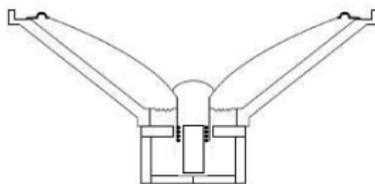


# Caractéristiques générales des hauts-parleurs

Haut-parleur à joints de ferrofluide

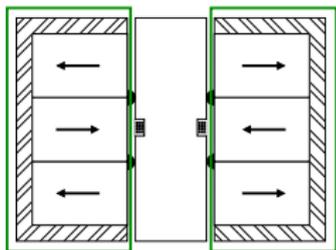


Haut-parleur classique



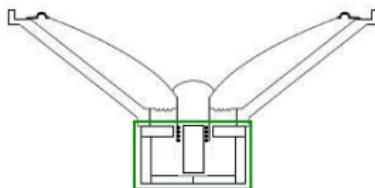
# Caractéristiques générales des hauts-parleurs

## Haut-parleur à joints de ferrofluide



- Moteur tout aimant

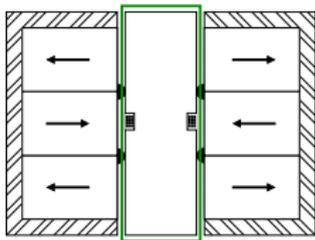
## Haut-parleur classique



- Structure avec du fer

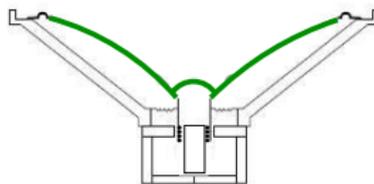
# Caractéristiques générales des hauts-parleurs

## Haut-parleur à joints de ferrofluide



- Moteur tout aimant
- Équipage mobile

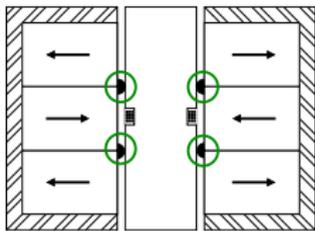
## Haut-parleur classique



- Structure avec du fer
- Équipage mobile

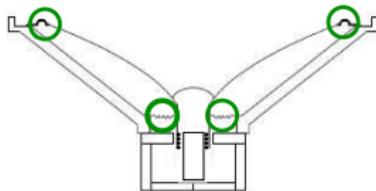
# Caractéristiques générales des hauts-parleurs

## Haut-parleur à joints de ferrofluide



- Moteur tout aimant
- Équipage mobile
- Suspensions à joints de ferrofluide

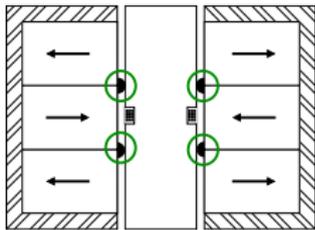
## Haut-parleur classique



- Structure avec du **fer**
- Équipage mobile
- Suspensions mécaniques

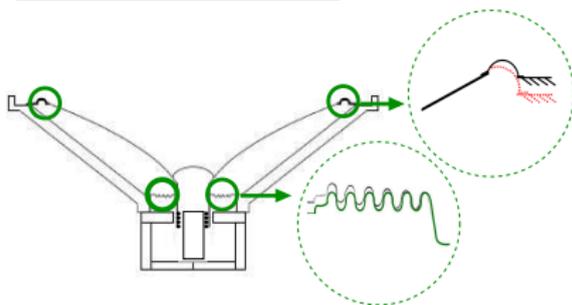
# Caractéristiques générales des hauts-parleurs

## Haut-parleur à joints de ferrofluide



- Moteur tout aimant
- Équipage mobile
- Suspensions à joints de ferrofluide

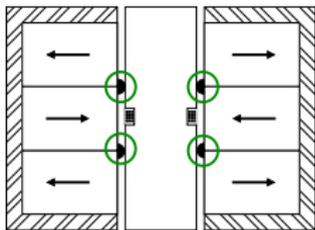
## Haut-parleur classique



- Structure avec du **fer**  
(courants de Foucault et hystérésis)
- Équipage mobile  
(déformation modale)
- Suspensions mécaniques  
(hystérésis)
- (Non-linéarités)

# Caractéristiques générales des hauts-parleurs

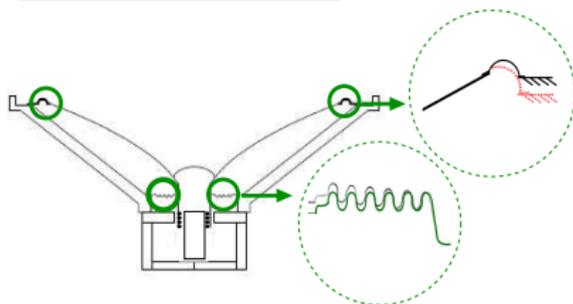
## Haut-parleur à joints de ferrofluide



- Moteur tout aimant
- Équipage mobile
- Suspensions à joints de ferrofluide

Comportement plus linéaire

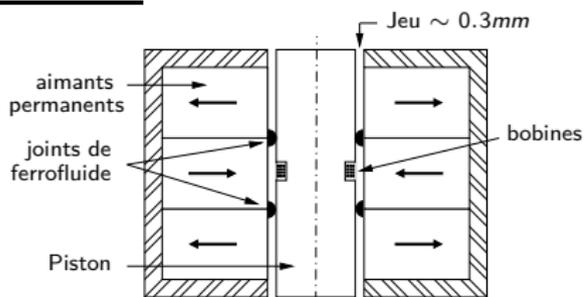
## Haut-parleur classique



- Structure avec du **fer**  
(courants de Foucault et hystérésis)
- Équipage mobile  
(déformation modale)
- Suspensions mécaniques  
(hystérésis)
- (Non-linéarités)

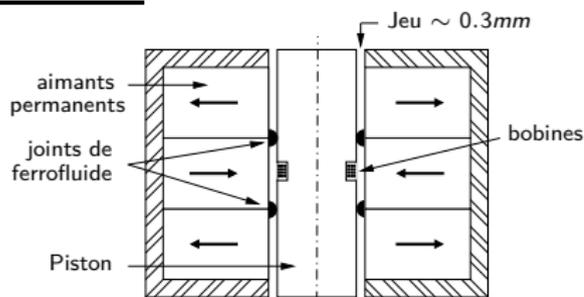
# Haut-parleur à suspension à joints de ferrofluide

## Haut-parleur

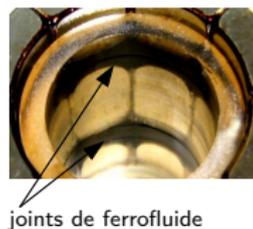
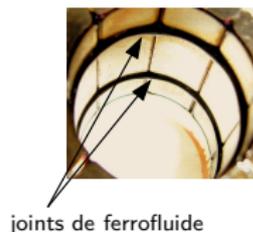


# Haut-parleur à suspension à joints de ferrofluide

## Haut-parleur

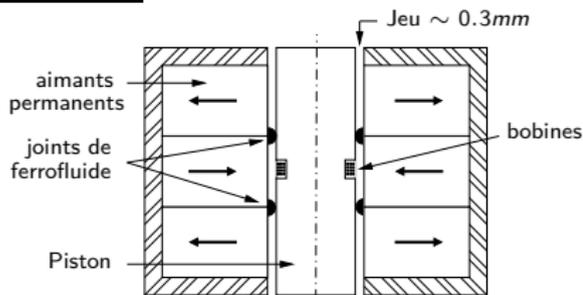


## Positionnement des joints

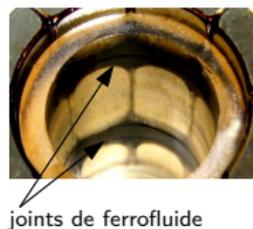
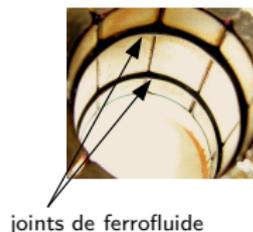


# Haut-parleur à suspension à joints de ferrofluide

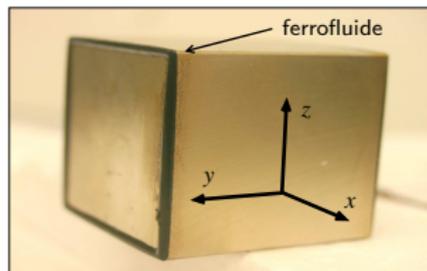
## Haut-parleur



## Positionnement des joints

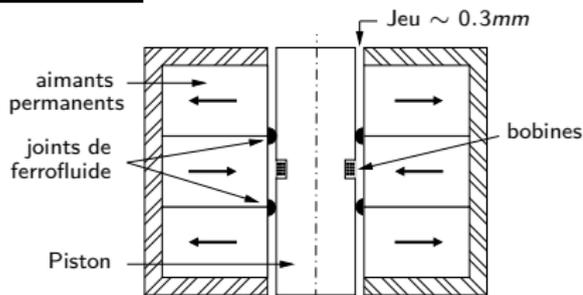


## Positionnement vers le $|\nabla \vec{H}|$

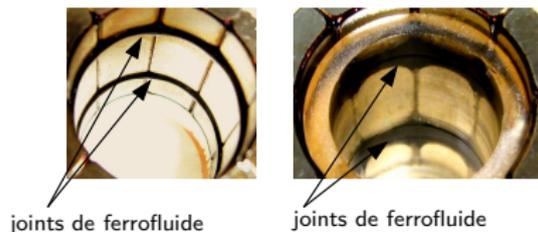


# Haut-parleur à suspension à joints de ferrofluide

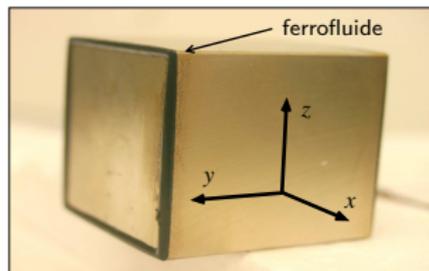
## Haut-parleur



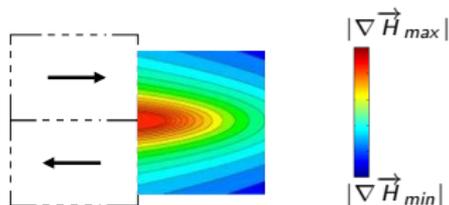
## Positionnement des joints



## Positionnement vers le $|\nabla \vec{H}|$



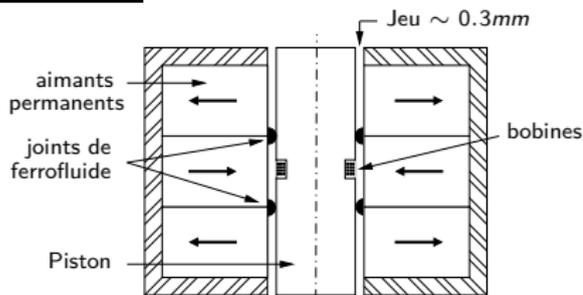
## $|\nabla \vec{H}|$ dans le haut-parleur



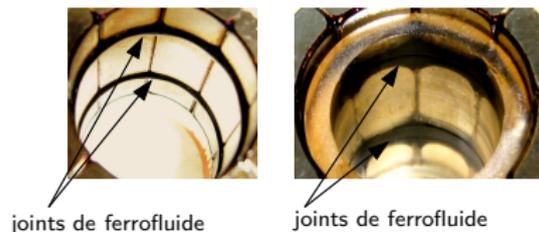
Thèse R. Ravaud 2009

# Haut-parleur à suspension à joints de ferrofluide

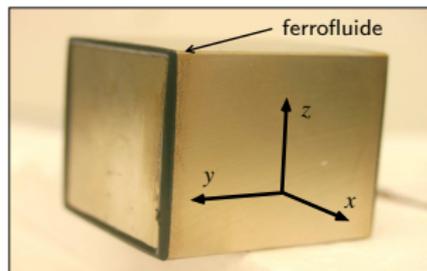
## Haut-parleur



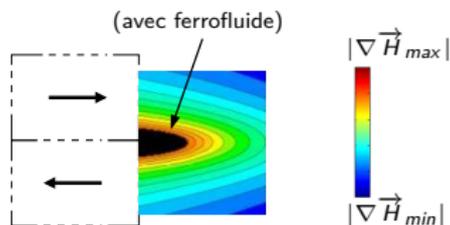
## Positionnement des joints



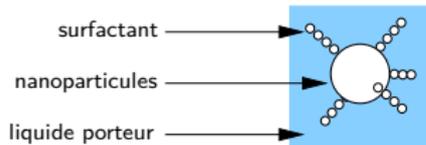
## Positionnement vers le $|\nabla \vec{H}|$



## $|\nabla \vec{H}|$ dans le haut-parleur

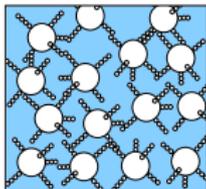


# Caractéristiques générales des ferrofluides

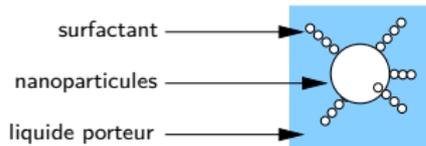


## Ferrofluides commerciaux

- saturation magnétique  $J$
- viscosité  $\eta_0$

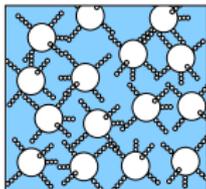


# Caractéristiques générales des ferrofluides



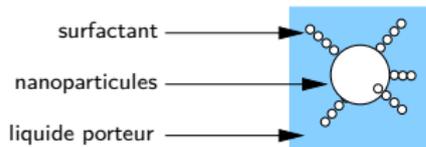
## Ferrofluides commerciaux

- saturation magnétique  $J$
- viscosité  $\eta_0$



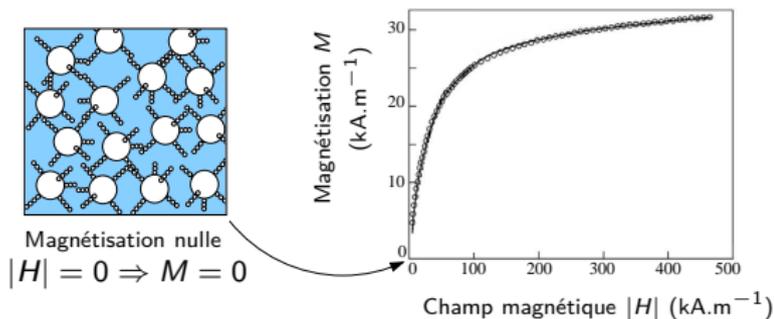
Magnétisation nulle  
 $|H| = 0 \Rightarrow M = 0$

# Caractéristiques générales des ferrofluides



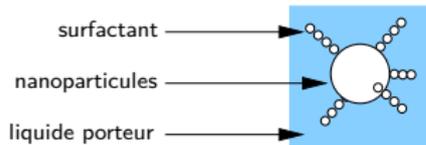
## Ferrofluides commerciaux

- saturation magnétique  $J$
- viscosité  $\eta_0$



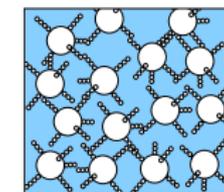
S. Odenbach, 2002  
"Magnetoviscous effects in ferrofluids"

# Caractéristiques générales des ferrofluides

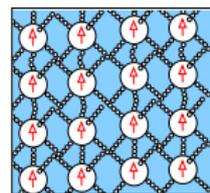
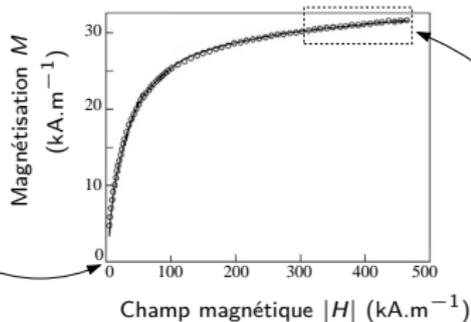


## Ferrofluides commerciaux

- saturation magnétique  $J$
- viscosité  $\eta_0$

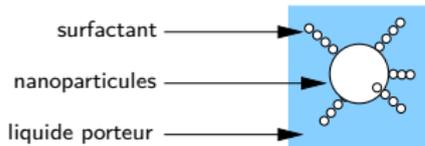


Magnétisation nulle  
 $|H| = 0 \Rightarrow M = 0$



Magnétisation maximum  
 $|H| \rightarrow \infty \Rightarrow M = J$

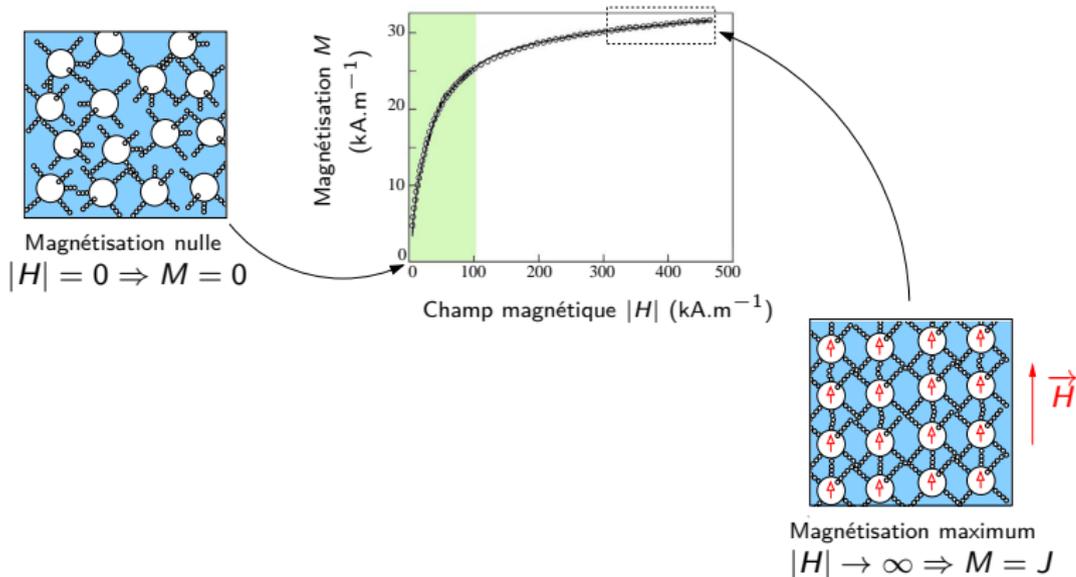
# Caractéristiques générales des ferrofluides



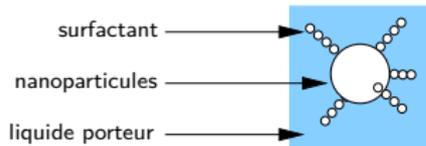
## Ferrofluides commerciaux

- saturation magnétique  $J$
- viscosité  $\eta_0$

plupart des applications



# Caractéristiques générales des ferrofluides

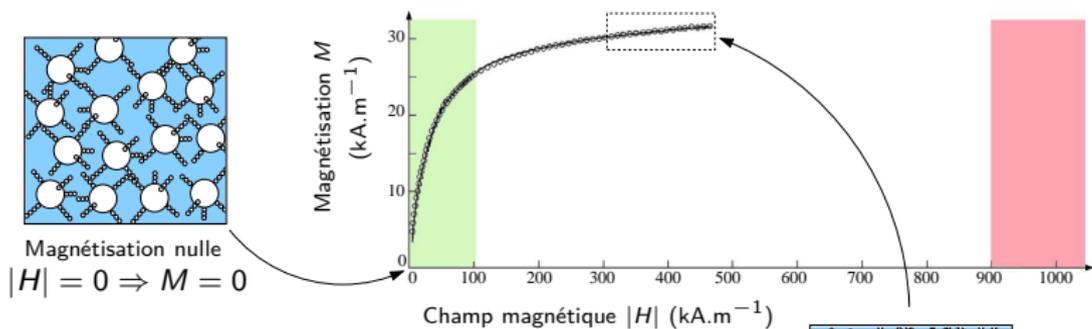


## Ferrofluides commerciaux

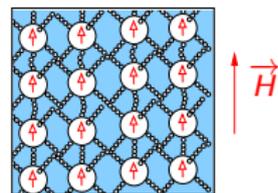
- saturation magnétique  $J$
- viscosité  $\eta_0$

plupart des applications

haut-parleur à joints de ferrofluide

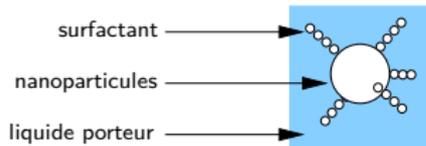


Magnétisation nulle  
 $|H| = 0 \Rightarrow M = 0$



Magnétisation maximum  
 $|H| \rightarrow \infty \Rightarrow M = J$

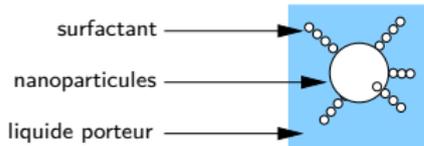
# Caractéristiques générales des ferrofluides



## Ferrofluides commerciaux

- saturation magnétique  $J$
- viscosité  $\eta_0$

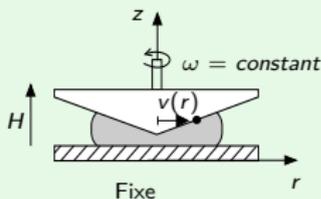
# Caractéristiques générales des ferrofluides



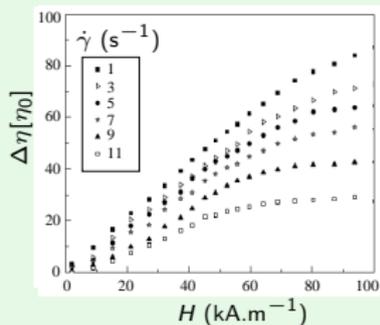
## Ferrofluides commerciaux

- saturation magnétique  $J$
- viscosité  $\eta_0$

## Dépendance de la viscosité



$$\dot{\gamma} = \frac{v(r)}{z(r)} = \text{constant}$$



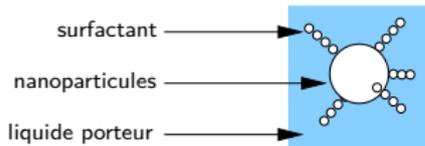
### Conditions d'analyse :

- 1 champ magnétique  $|H|$  faible
- 2 taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  constant

S. Odenbach, 2002

"Magnetoviscous effects in ferrofluids"

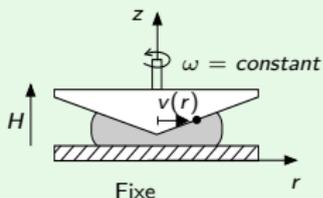
# Caractéristiques générales des ferrofluides



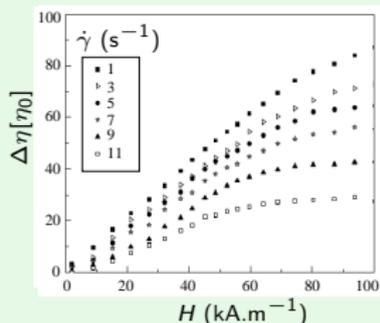
## Ferrofluides commerciaux

- saturation magnétique  $J$
- viscosité  $\eta_0$

## Dépendance de la viscosité



$$\dot{\gamma} = \frac{v(r)}{z(r)} = \text{constant}$$



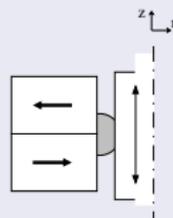
### Conditions d'analyse :

- 1 champ magnétique  $|H|$  faible
- 2 taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  constant

S. Odenbach, 2002  
"Magnetoviscous effects in ferrofluids"

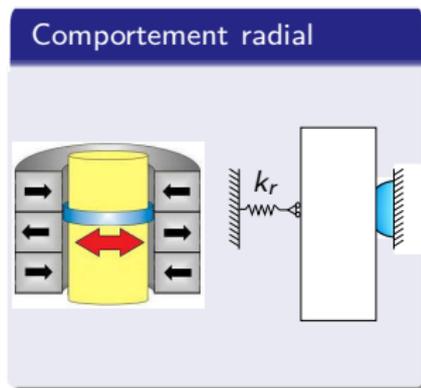
## Haut-parleur

### Conditions d'analyse :

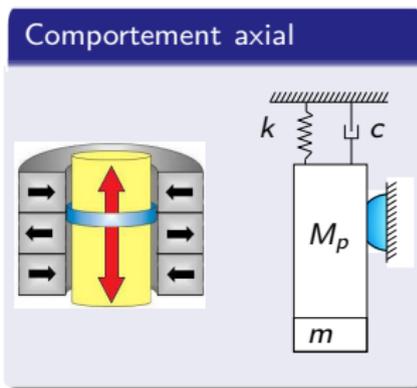
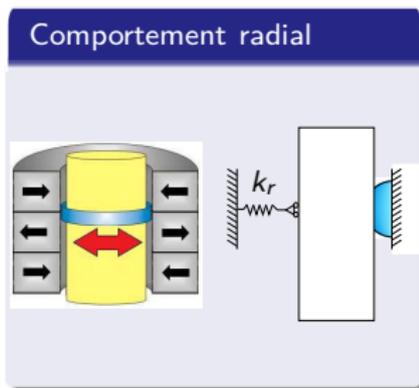


- 1 champ magnétique  $|H|$  élevé
- 2 taux de cisaillement oscillatoire :  $\dot{\gamma} = \dot{\Gamma} \cos(\omega t)$

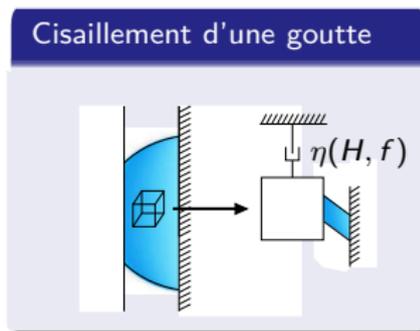
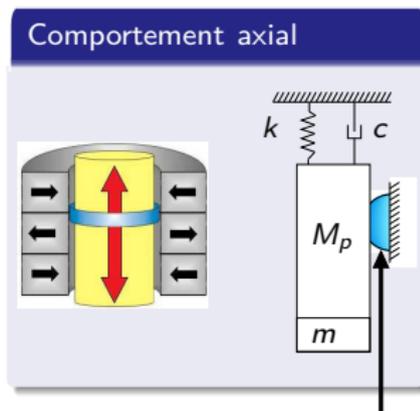
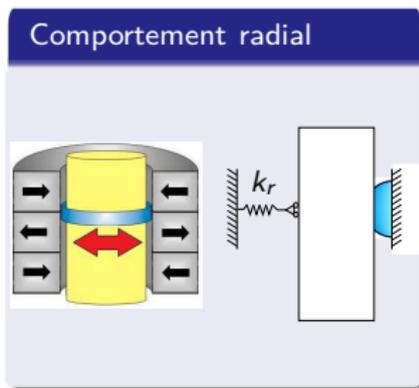
# Démarche scientifique



# Démarche scientifique

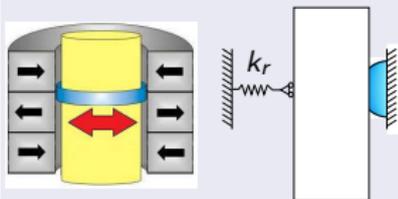


# Démarche scientifique

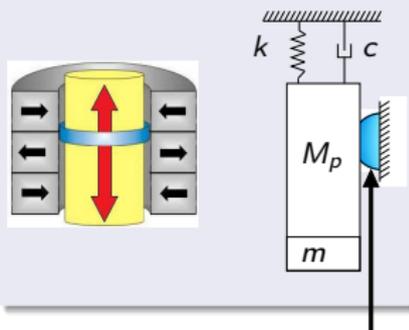


# Plan

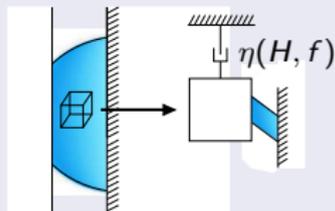
## 1. Comportement radial



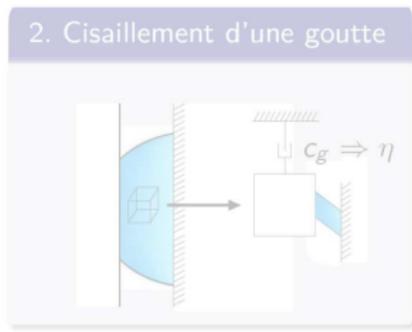
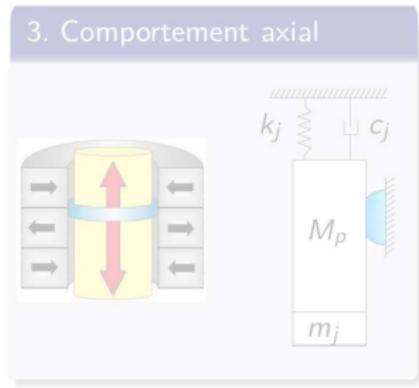
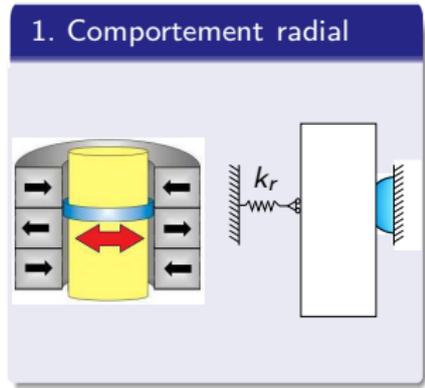
## 3. Comportement axial



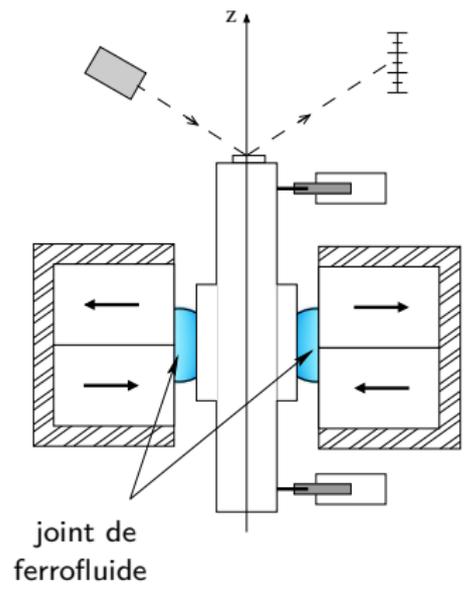
## 2. Cisaillement d'une goutte



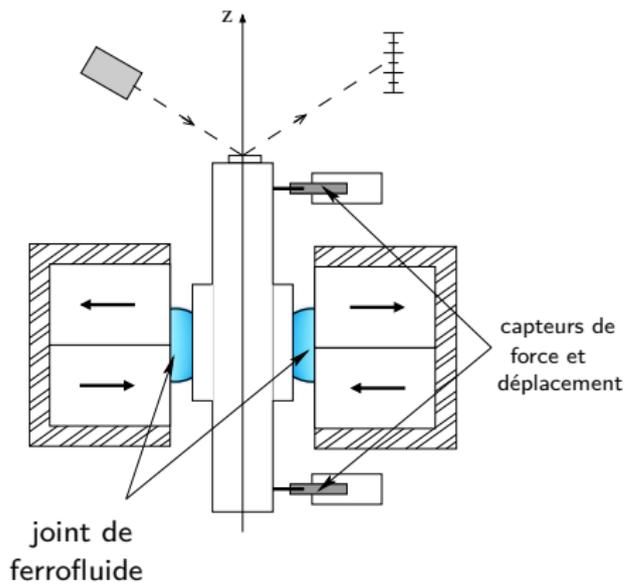
# Plan : partie 1



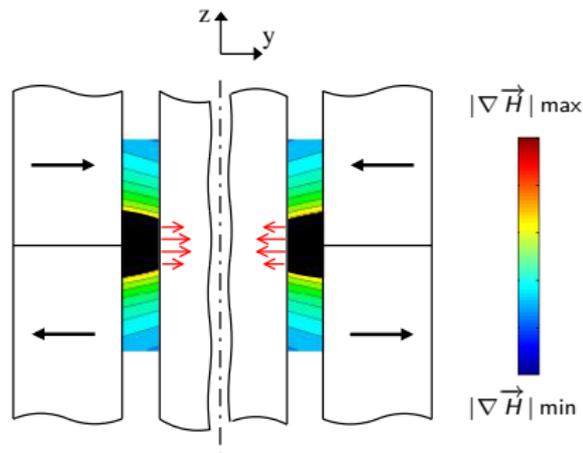
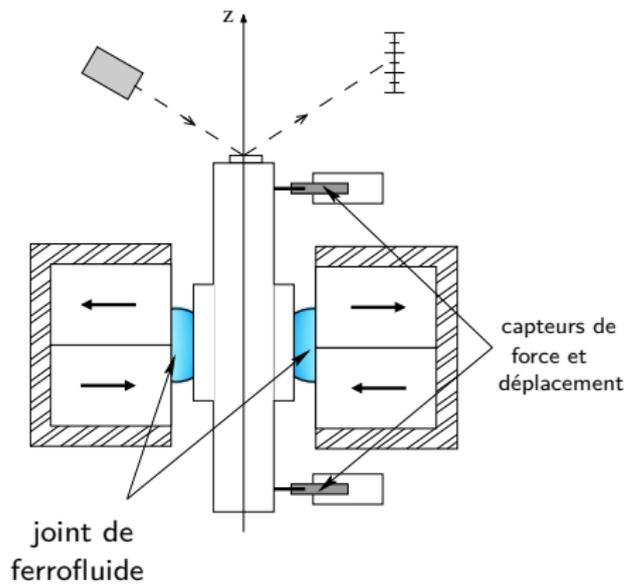
# Banc de Mesure



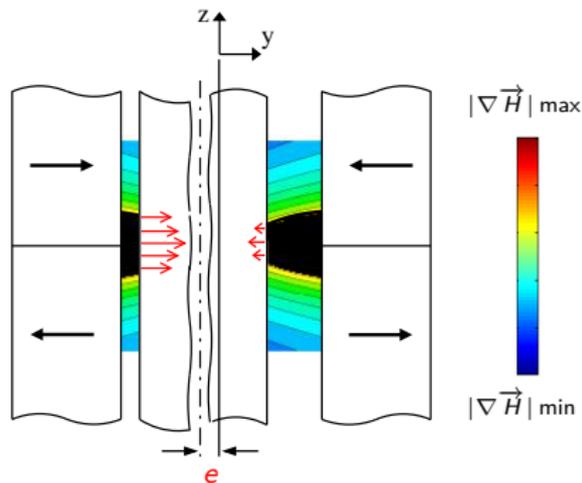
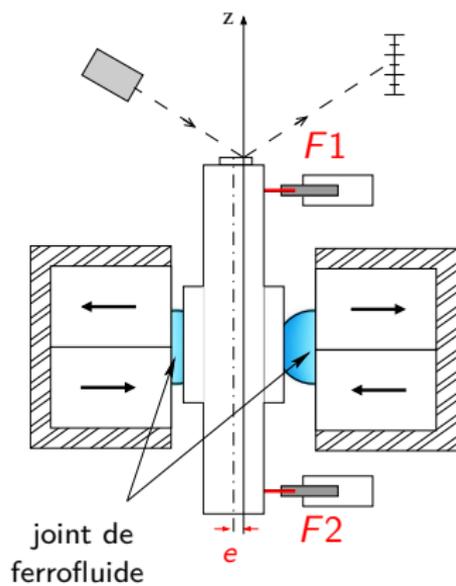
# Banc de Mesure



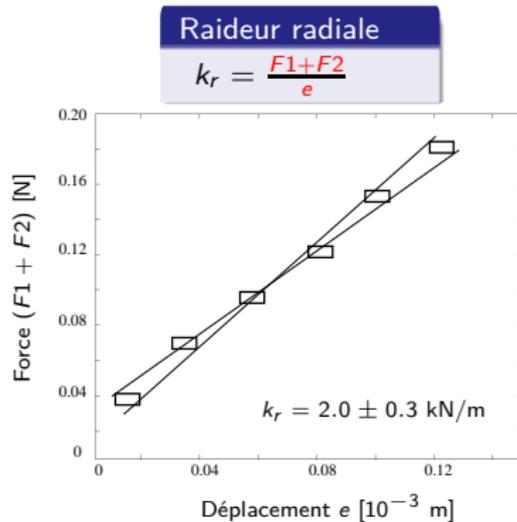
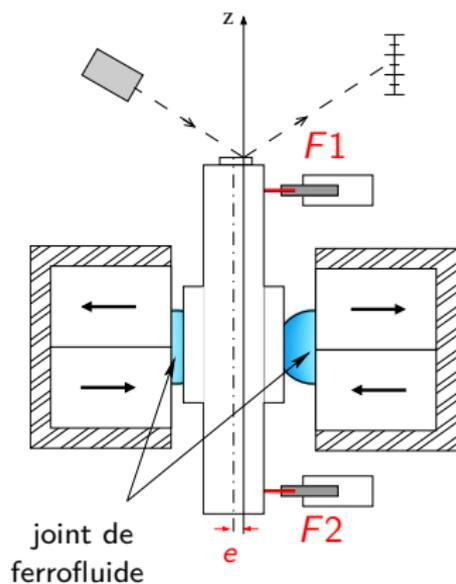
# Banc de Mesure



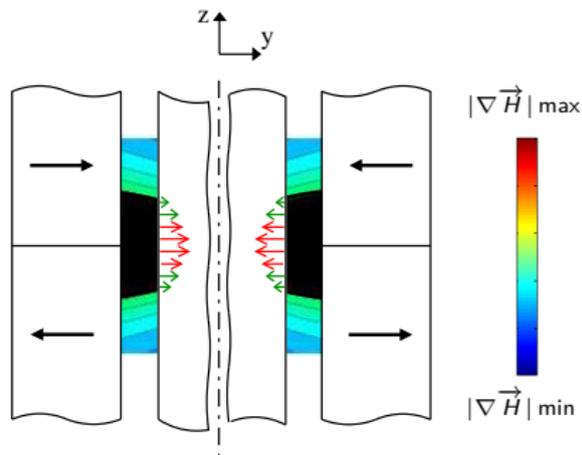
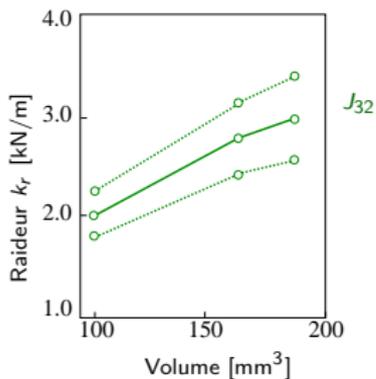
# Détermination de la raideur radiale $k_r$



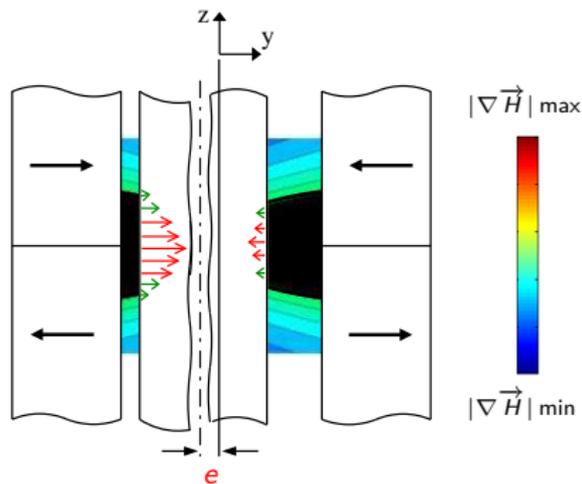
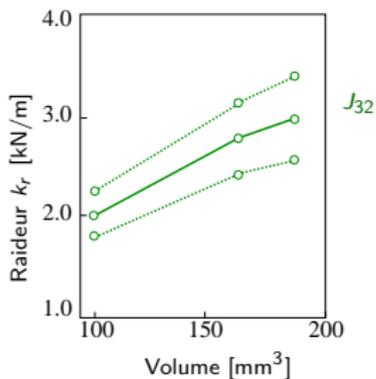
# Détermination du $k_r$



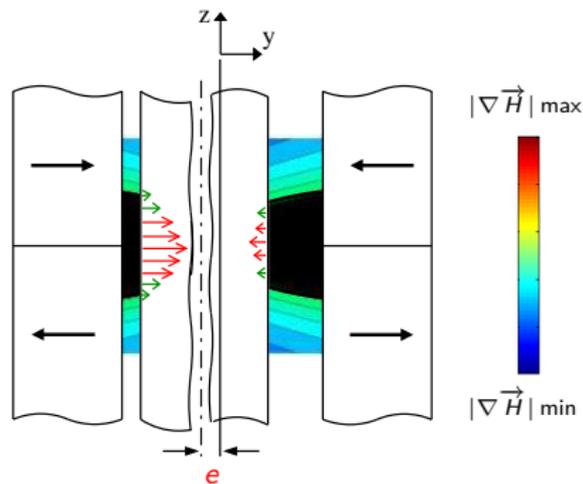
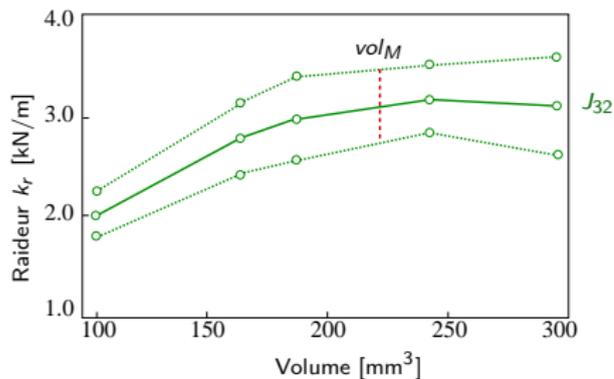
# Dépendance du volume du joint



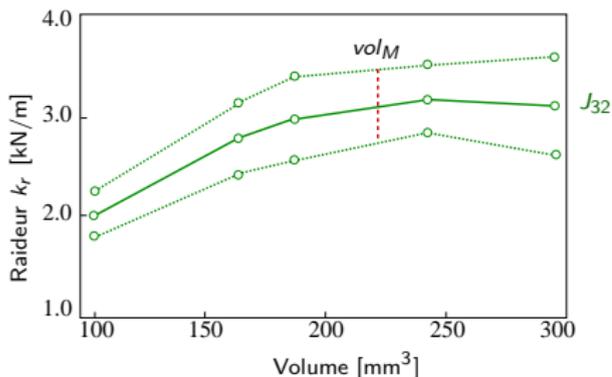
# Dépendance du volume du joint



## Dépendance du volume du joint



# Dépendance du volume du joint

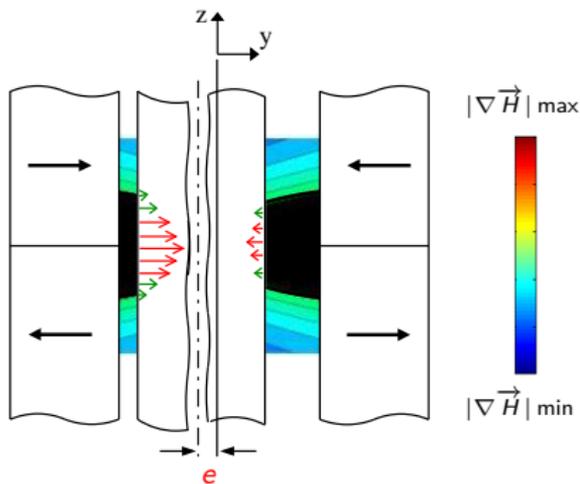


## Valeurs analytiques

Volume = 105 mm<sup>3</sup> : k<sub>r</sub> = 1.8 kN/m

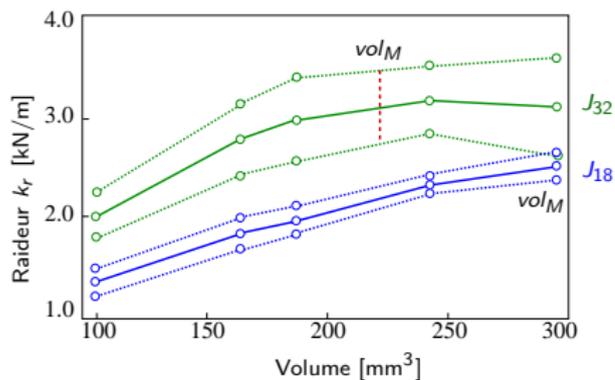
Volume = 188 mm<sup>3</sup> : k<sub>r</sub> = 2.7 kN/m

Thèse R. Ravaut 2009

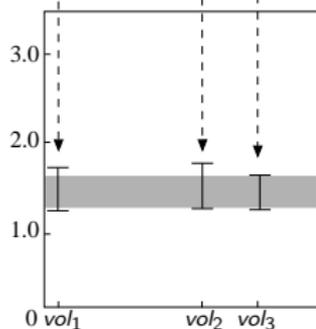
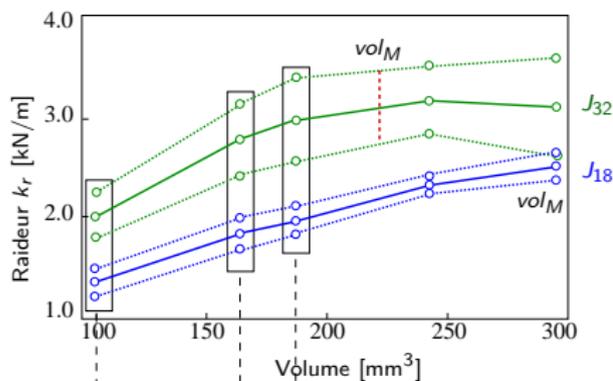


Publiée en IEEE Trans. Mag. 2009

# Dépendance de la saturation magnétique



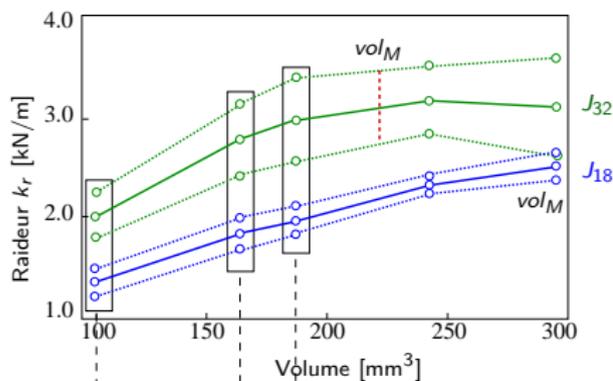
# Dépendance de la saturation magnétique



## Rapport des raideurs

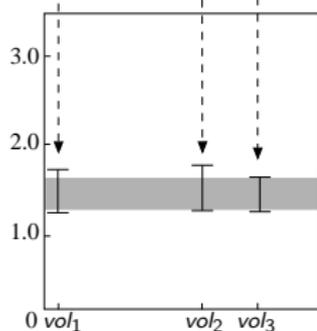
$$\frac{k_{r32}}{k_{r18}} 1.45 \pm 0.20$$

# Dépendance de la saturation magnétique



## Rapport de saturation magnétique

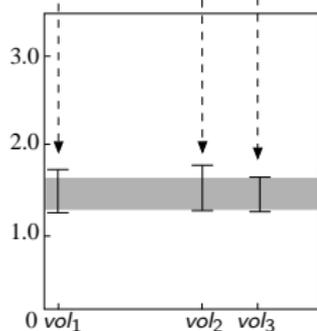
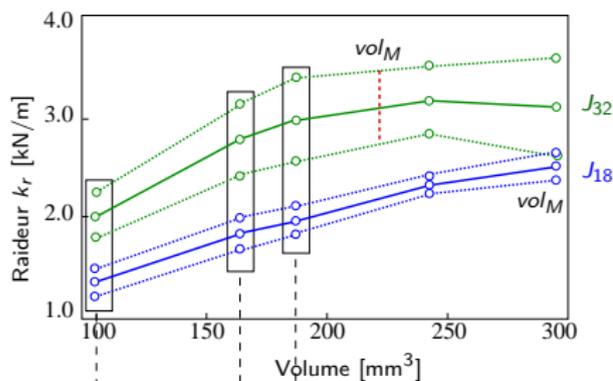
$$\frac{J_{32}}{J_{18}} = 1.80 \pm 0.30$$



## Rapport des raideurs

$$\frac{k_{r32}}{k_{r18}} = 1.45 \pm 0.20$$

# Dépendance de la saturation magnétique



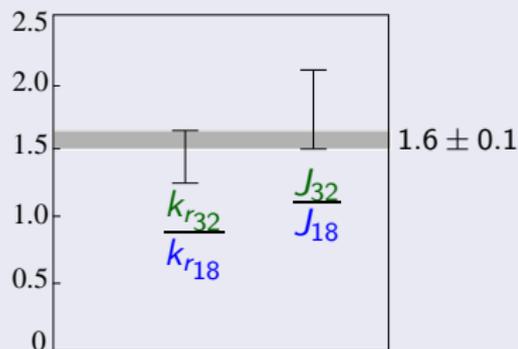
## Rapport des raideurs

$$\frac{k_{r32}}{k_{r18}} = 1.45 \pm 0.20$$

## Rapport de saturation magnétique

$$\frac{J_{32}}{J_{18}} = 1.80 \pm 0.30$$

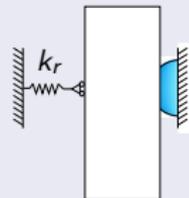
## Raideur du joint en fonction de J



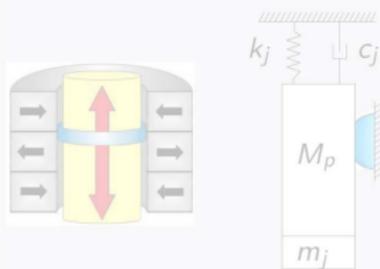
# Conclusion : partie 1

## 1. Comportement radial

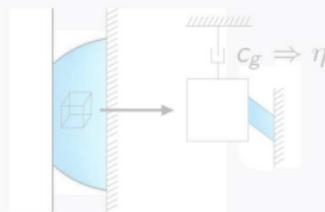
- $k_r(J, vol)$
- Expérience
- ⊗
- Modèle



## 3. Comportement axial



## 2. Cisaillement d'une goutte



# Plan : partie 2

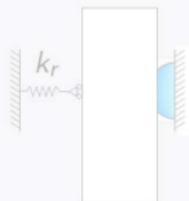
## 1. Comportement radial

•  $J, \eta$

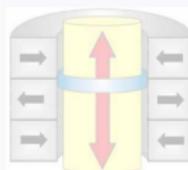
• Expérience

⊗

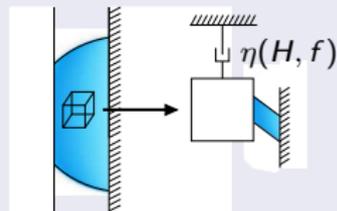
Modèle



## 3. Comportement axial

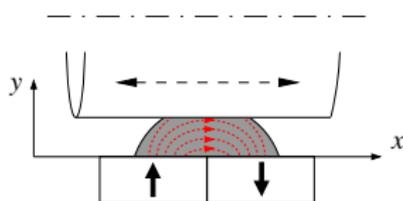


## 2. Cisaillement d'une goutte



# Caractéristiques des analyses expérimentales

Joint de ferrofluide  
à l'intérieur du haut-parleur

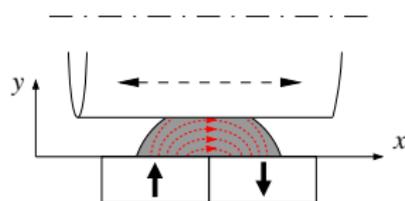


## Caractéristiques

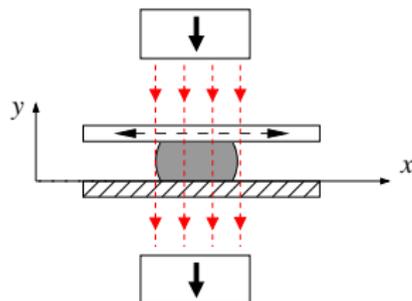
- $H$  élevé et non-homogène
- $\nabla H$  élevé et non-homogène
- cisaillement oscillatoire
- jeu étroit

# Caractéristiques des analyses expérimentales

Joint de ferrofluide  
à l'intérieur du haut-parleur



Goutte de ferrofluide  
entre deux plans parallèles



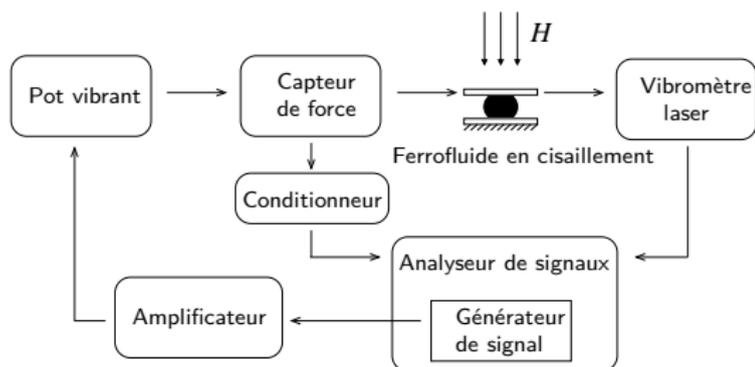
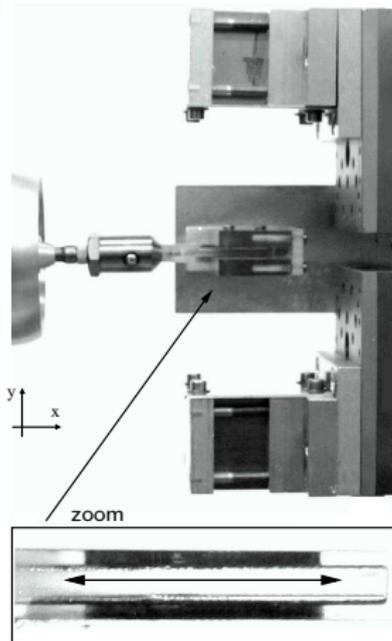
## Caractéristiques

- $H$  élevé et non-homogène
- $\nabla H$  élevé et non-homogène
- cisaillement oscillatoire
- jeu étroit

## Caractéristiques

- $H$  élevé et homogène
- $\nabla H$  nul
- cisaillement oscillatoire
- jeu étroit

## Banc de mesure



### Configuration de l'expérience

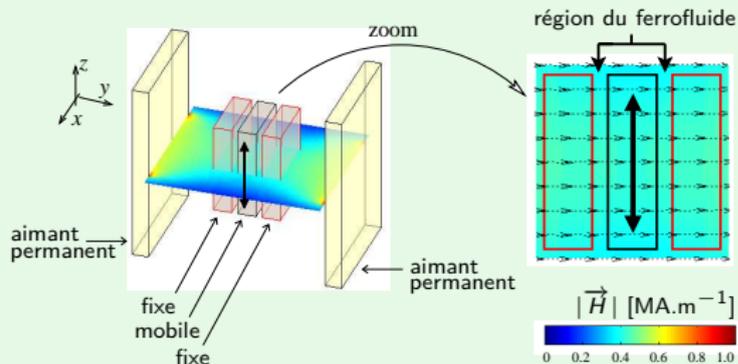
- Sinus glissant pas-à-pas
- Jeu  $b = 0.94 \text{ mm}$
- Amplitude de vitesse constante :  
 $V = 5, 15 \text{ et } 25 \text{ mm.s}^{-1}$
- Taux de cisaillement :  $\dot{\gamma} = \dot{\Gamma} \cos(\omega t)$ , où  $\dot{\Gamma} = \frac{V}{b}$

# Partie magnétique

## Champ magnétique $H$ entre deux aimants cubiques

### Modélisation de $H$

$$\vec{H}(x_p, y_p, z_p) = \frac{J_a}{\mu_0 4\pi} \iint_{S_N} \frac{\vec{MP}}{|\vec{MP}|^3} dS_N - \frac{J_a}{4\pi} \iint_{S_S} \frac{\vec{MP}}{|\vec{MP}|^3} dS_S$$

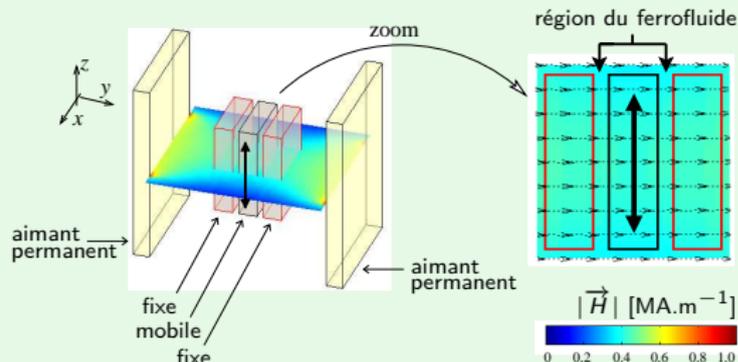


# Partie magnétique

## Champ magnétique $H$ entre deux aimants cubiques

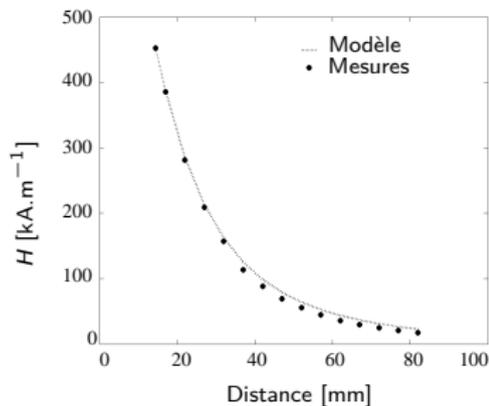
### Modélisation de $H$

$$\vec{H}(x_p, y_p, z_p) = \frac{J_a}{\mu_0 4\pi} \iint_{S_N} \frac{\vec{MP}}{|\vec{MP}|^3} dS_N - \frac{J_a}{4\pi} \iint_{S_S} \frac{\vec{MP}}{|\vec{MP}|^3} dS_S$$



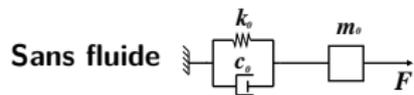
Thèse B.Mérit 2010

### Ajustement du modèle



## Partie mécanique

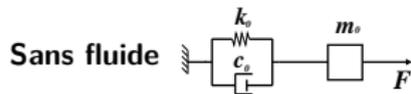
Effets ajoutés par le volume de ferrofluide



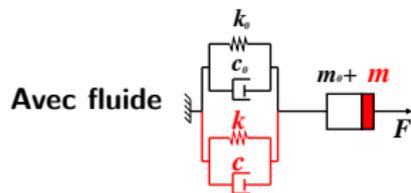
$$Z_0 = \frac{F_0}{v_p} = m_0 j\omega + c_0 + \frac{k_0}{j\omega}$$

## Partie mécanique

## Effets ajoutés par le volume de ferrofluide



$$Z_0 = \frac{F_0}{v_p} = m_0 j\omega + c_0 + \frac{k_0}{j\omega}$$



$$Z = \frac{F}{v_p} = (m_0 + \mathbf{m})j\omega + (c_0 + \mathbf{c}) + \frac{k_0 + \mathbf{k}}{j\omega}$$

## Caractérisation des effets du ferrofluide

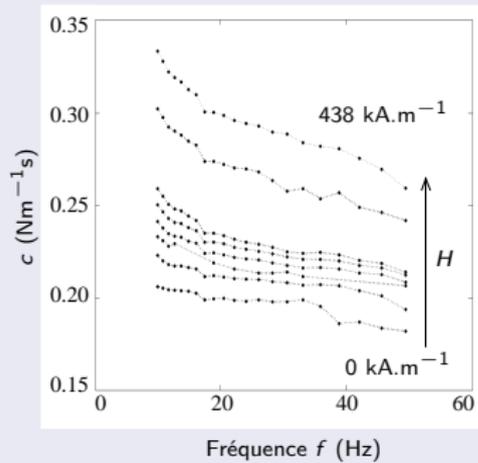
- masse ajoutée \* :  $\mathbf{m} = \frac{M_f}{3}$
- raideur ajoutée :  $\mathbf{k}$
- amortissement :  $\mathbf{c} \Rightarrow \eta$

\* R. Blevins, 2001, "Formulas for natural frequency and mode shape"

## Résultats expérimentaux

### Amortissement

( $\eta_{10} = 1.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\dot{\Gamma} = 25 \text{ s}^{-1}$ )

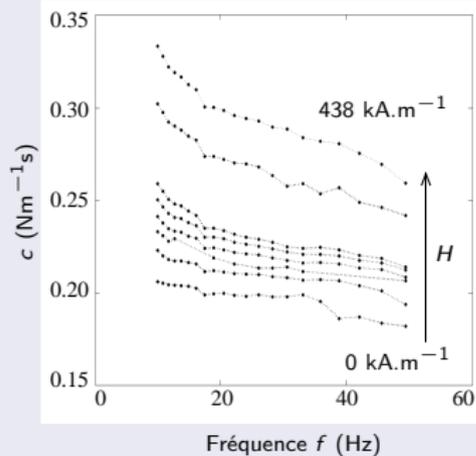


- $c$  diminue avec  $f$
- $c$  augmente avec  $H$

## Résultats expérimentaux

### Amortissement

( $\eta_0 = 1.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\dot{\Gamma} = 25 \text{ s}^{-1}$ )

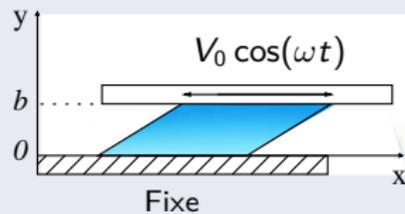


- $c$  diminue avec  $f$
- $c$  augmente avec  $H$



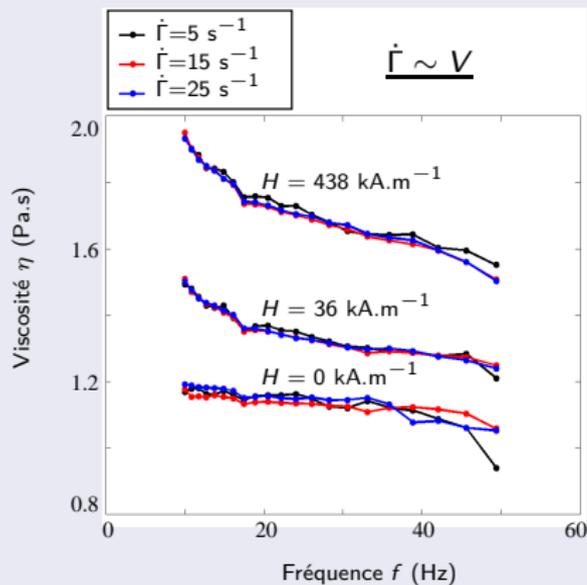
### Viscosité

$$\eta = \frac{cV_0}{A \frac{\partial v_x}{\partial y} \Big|_{y=b}}$$



# Résultats expérimentaux

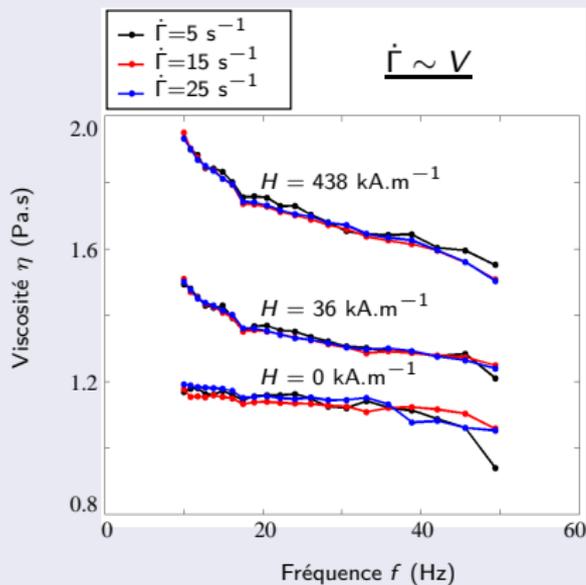
## Ferrofluide en cisaillement oscillatoire



- $\eta$  diminue avec  $f$
- $\eta$  augmente avec  $H$
- $\eta$  est indépendant de  $\dot{\gamma} = \dot{\Gamma} \cos(\omega t)$

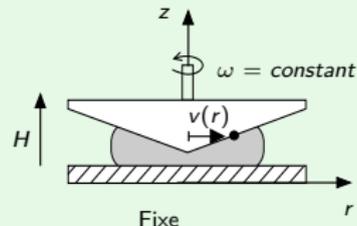
# Résultats expérimentaux

## Ferrofluide en cisaillement oscillatoire



- $\eta$  diminue avec  $f$
- $\eta$  augmente avec  $H$
- $\eta$  est indépendant de  $\dot{\gamma} = \dot{\Gamma} \cos(\omega t)$

## Viscosimètre sous H : cisaillement stationnaire

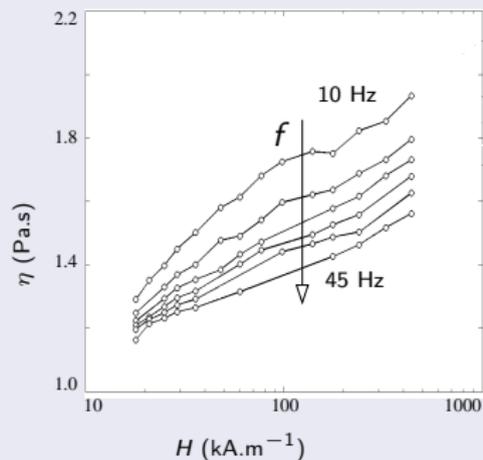


- $f = 0 \text{ Hz}$
- $\eta$  augmente avec  $H$
- $\eta$  diminue avec  $\dot{\gamma} = \frac{v(r)}{z(r)}$

## Résultats expérimentaux

APGW10 ( $J = 32 \text{ kA.m}^{-1}$ ,  $\eta_0 = 1.0 \text{ Pa.s}$ )

### Comportement du ferrofluide en cisaillement oscillatoire

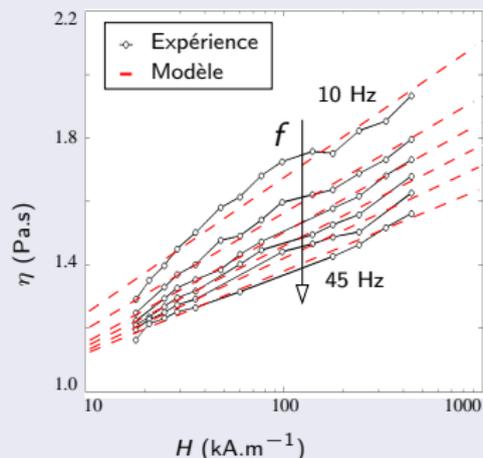


- température de la salle égale à  $21.0 \pm 0.5 \text{ °C}$  pendant les essais
- répétabilité des mesures contrôlée par de mesures en boucle

# Résultats expérimentaux

APGW10 ( $J = 32 \text{ kA.m}^{-1}$ ,  $\eta_0 = 1.0 \text{ Pa.s}$ )

## Comportement du ferrofluide en cisaillement oscillatoire



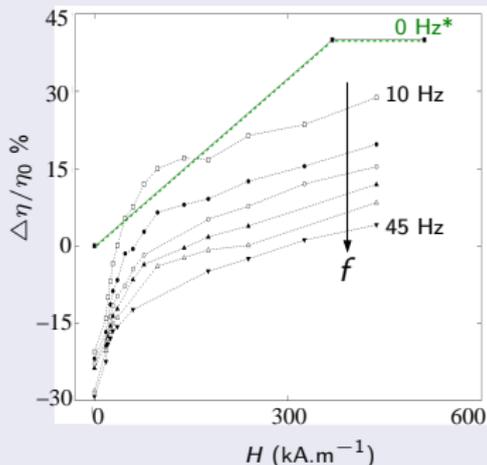
- température de la salle égale à  $21.0 \pm 0.5 \text{ °C}$  pendant les essais
- répétabilité des mesures contrôlée par de mesures en boucle

# Résultats expérimentaux

Effet magnétovisqueux des ferrofluides en cisaillement oscillatoire

Variation relative : 
$$\frac{\Delta\eta}{\eta_0} = \frac{\eta(H,f) - \eta(0,0)}{\eta(0,0)}$$

Ferrofluide en cisaillement oscillatoire et  $H$  stationnaire



\* mesure réalisée par O. Volkova - LPMC UMR 6622

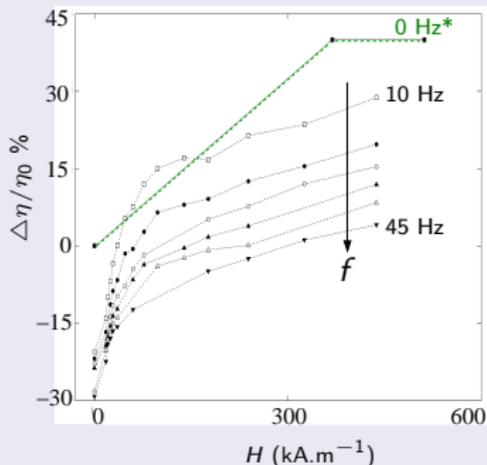
J. Magnetism and Magnetic Materials (sous révision)

# Résultats expérimentaux

Effet magnétovisqueux des ferrofluides en cisaillement oscillatoire

Variation relative : 
$$\frac{\Delta\eta}{\eta_0} = \frac{\eta(H,f) - \eta(0,0)}{\eta(0,0)}$$

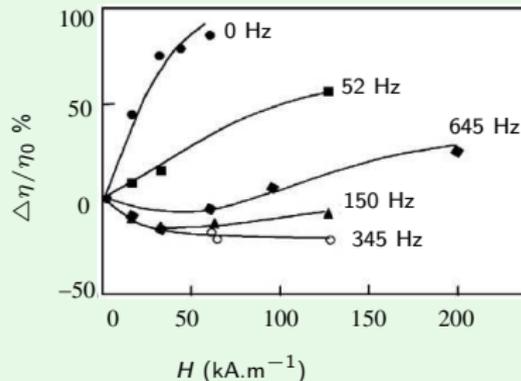
Ferrofluide en cisaillement oscillatoire et  $H$  stationnaire



\* mesure réalisée par O. Volkova - LPMC UMR 6622

J. Magnetism and Magnetic Materials (sous révision)

Ferrofluide en cisaillement stationnaire et  $H$  oscillatoire



Bacri et al, *Physical Review Letters* 1995

# Conclusion : partie 2

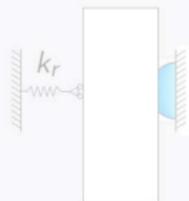
## 1. Comportement radial

- $J, \eta$

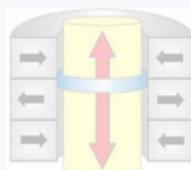
- Expérience

⊗

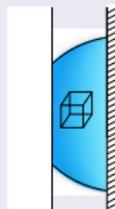
Modèle



## 3. Comportement axial



## 2. Cisaillement d'une goutte



- $\eta(H, f, \dot{\Gamma})$

- Expérience

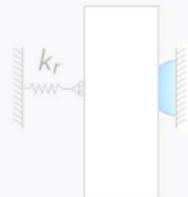
↓

Modèle

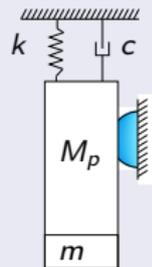
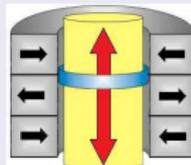
# Plan : partie 3

## 1. Comportement radial

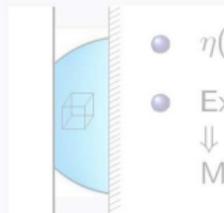
- $J, \eta$
- Expérience
- ⊗
- **Modèle**



## 3. Comportement axial



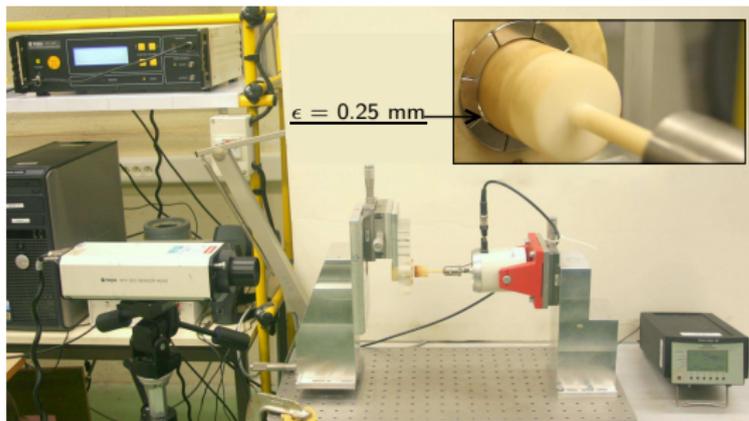
## 2. Cisaillement d'une goutte



- $\eta(H, f)$
- Expérience
- ↓
- Modèle

# Banc de Mesure

## Joint de ferrofluide en oscillation sous champ magnétique non-uniforme



### Configuration de l'expérience

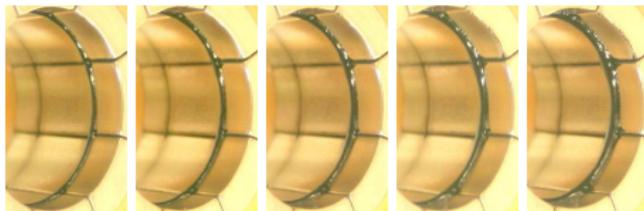
- Sinus glissant pas-à-pas :  
de 10 Hz à 200 Hz
- Jeu :  $\epsilon = 0.25$  mm
- Amplitude de vitesse constante :  
 $V = 3.5$  mm.s<sup>-1</sup>
- Amplitude de déplacement maximum :  
 $D = 0.06$  mm ( $f = 10$  Hz)
- Taux de cisaillement maximum :  
 $\dot{\Gamma} = \frac{V}{b} \simeq 14$  s<sup>-1</sup>
- Taux de déformation maximum :  
 $D/\epsilon = 0.23$

$$Z(H, f) = (m_0 + m)j\omega + (c_0(f) + c(H, f)) + \frac{k_0(f) + k(H, f)}{j\omega}$$

# Expérience

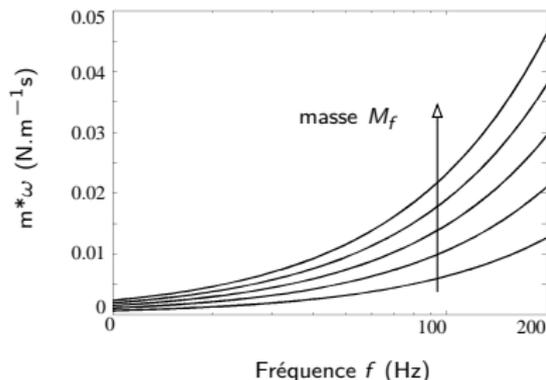
## Conditions évaluées :

- Quatre types de ferrofluide ( $\eta_0$ ,  $J$ )
- Fréquence  $f$  : 10 Hz à 200 Hz
- Cinq volumes de joint :



# Masse ajoutée par un joint de ferrofluide

Masse ajoutée théorique \* :  $m = M_f/3$



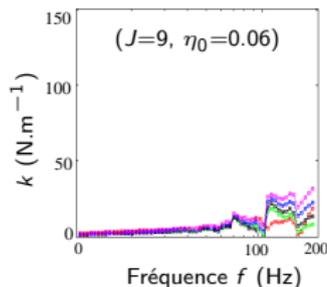
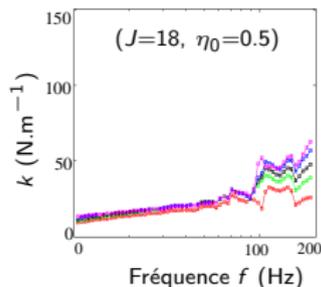
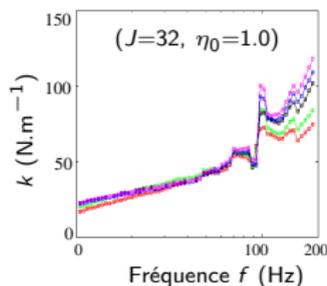
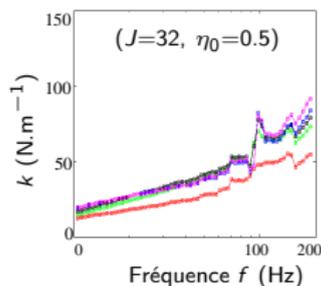
## Suspension à joint de ferrofluide

- Augmente avec  $f$
- Pour le volume plus grand (1,1 g), son effet est de l'ordre de 15% de la masse du piston testé
- Surcharge l'équipage mobile

\* R. Blevins, 2001, "Formulas for natural frequency and mode shape"

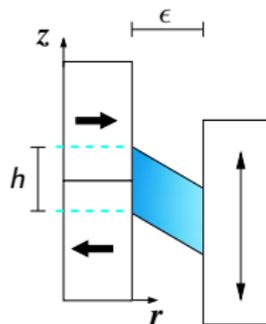
Résultats expérimentaux : raideur axiale  $k$ 

$$k(H, f) = \left[ \left( m_0 \omega - \frac{k_0(f)}{\omega} \right) + m \omega - \Im m(Z(f)) \right] \omega$$



Analyse

- Variation non significative par rapport au volume du joint

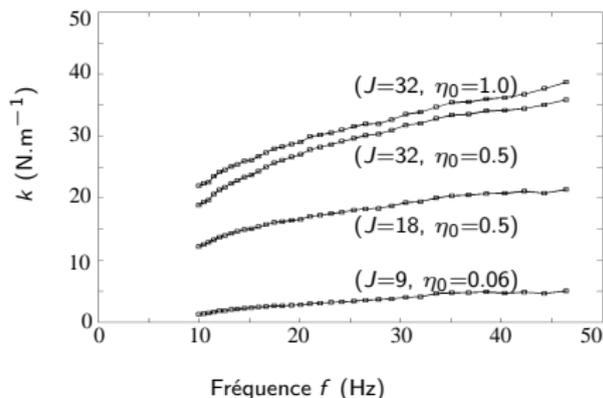


$$\text{vol}_1 < \text{vol}_2 < \text{vol}_3 < \text{vol}_4 < \text{vol}_5$$

Résultats expérimentaux : raideur axiale  $k$ 

$$k(H, f) = \left[ \left( m_0 \omega - \frac{k_0(f)}{\omega} \right) + m \omega - \Im m(Z(f)) \right] \omega$$

## Condition d'iso-volume



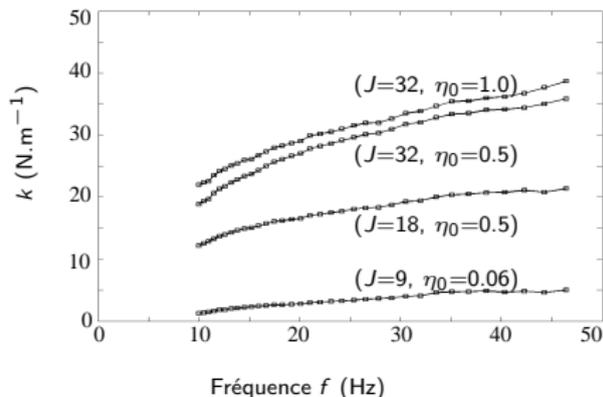
## Analyse

- Variation non significative par rapport au volume du joint
- Augmente avec  $J$

# Résultats expérimentaux : raideur axiale $k$

$$k(H, f) = \left[ \left( m_0 \omega - \frac{k_0(f)}{\omega} \right) + m \omega - \Im m(Z(f)) \right] \omega$$

## Condition d'iso-volume



## Analyse

- Variation non significative par rapport au volume du joint
- Augmente avec  $J$

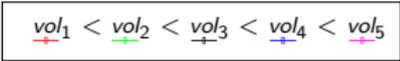
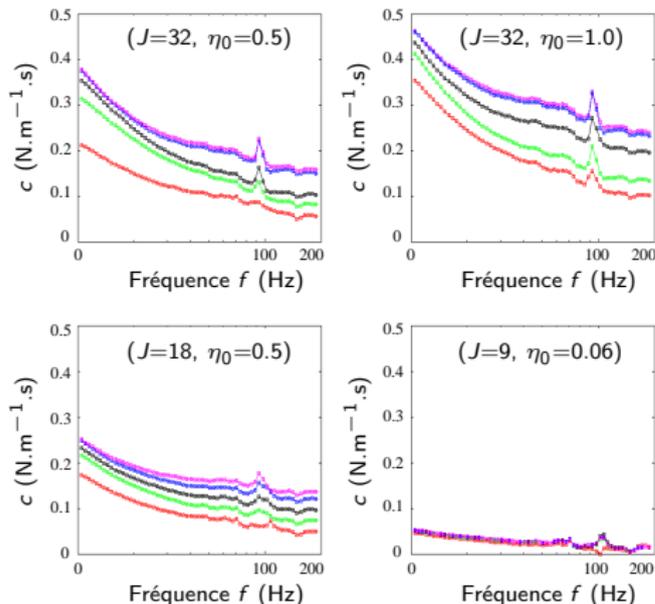
## Raideur classique

Haut-parleur traditionnel monté dans une enceinte de type fermée :

- rayon = 0.1 m
- Vas = 10 L

$$k_{cav} = \frac{\rho}{V_{air}} (cS)^2 = 14\,000 \text{ N.m}^{-1}$$

# Résultats expérimentaux : amortissement axial $c$

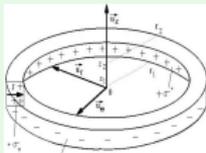


## Suspension à joint de ferrofluide

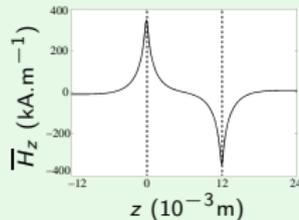
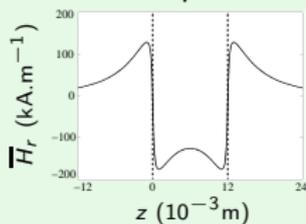
- Diminue avec  $f$
- Augmente avec  $vol$
- Augmente avec  $\eta_0$
- Augmente avec  $J$

# Champ à l'intérieur d'une couronne aimantée

Couronne magnétique  
radialement polarisée ( $r = \epsilon$ )

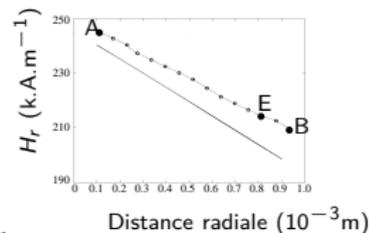
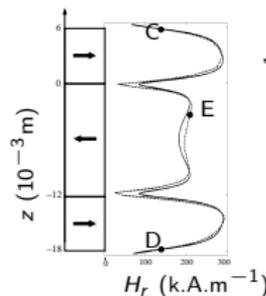
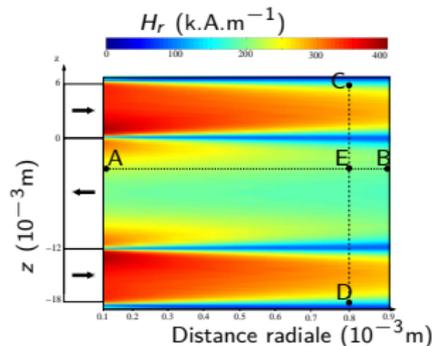


$$|H| = \sqrt{H_r^2 + H_z^2}$$



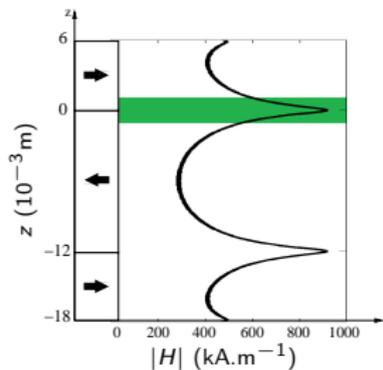
Thèse R. Ravaud 2009

Ajustement de l'aimantation  
(champ magnétique radial  $H_r$ )



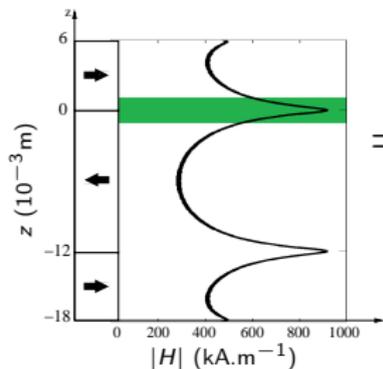
# Modèle magnétovisqueux

$H(\epsilon, z)$  :

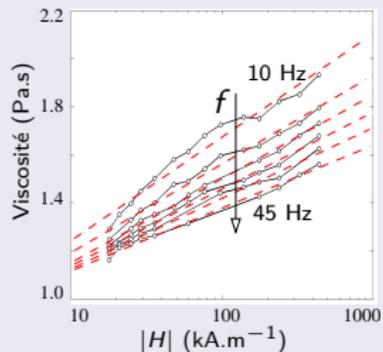


# Modèle magnétovisqueux

$H(\epsilon, z) :$

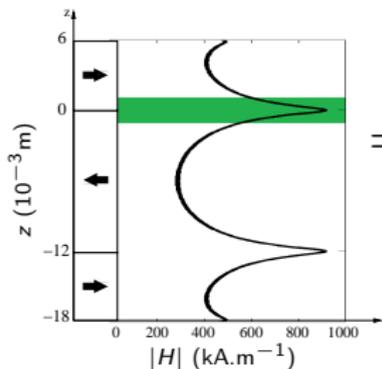


Variation de  $\eta(f, H)$

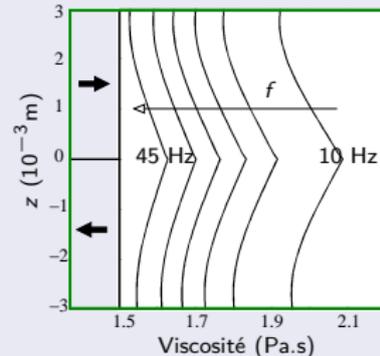
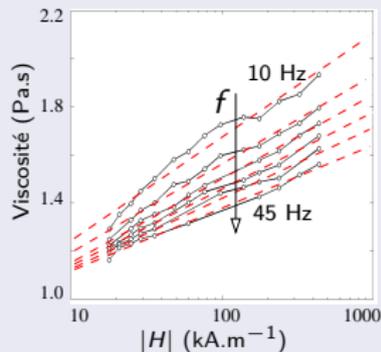


# Modèle magnétovisqueux

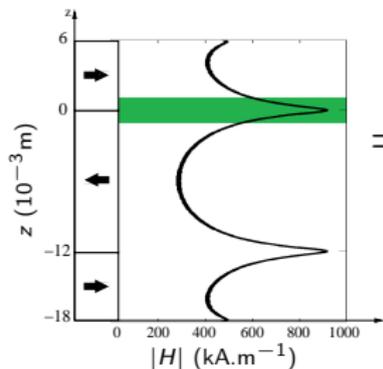
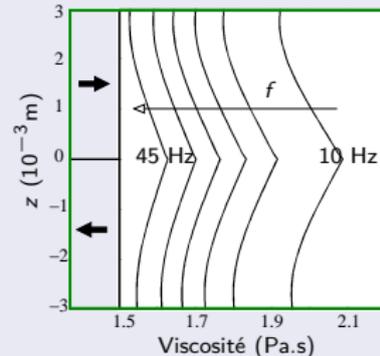
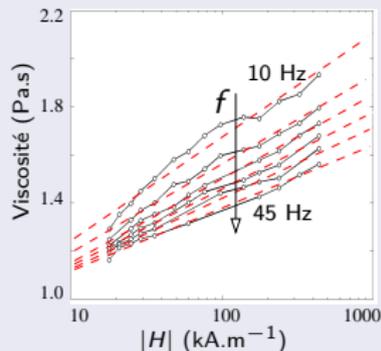
$H(\epsilon, z) :$



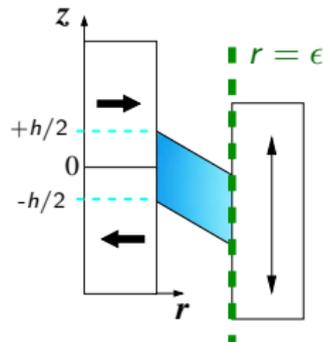
Variation de  $\eta(f, H)$



## Modèle magnétovisqueux

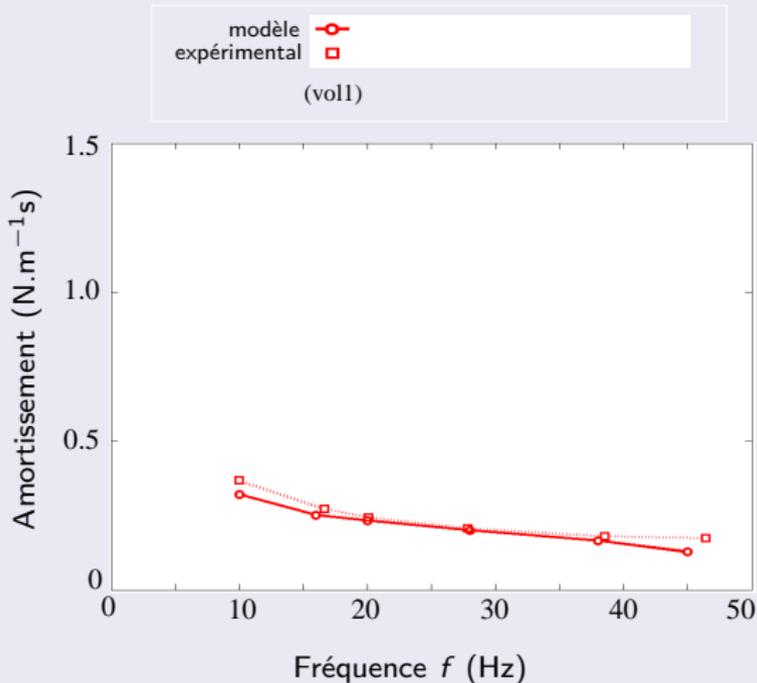
 $H(\epsilon, z) :$ Variation de  $\eta(f, H)$ 

$$c(f) = \frac{1}{V} \int_{-h/2}^{h/2} \eta(H(\epsilon, z), f) \frac{dv_z}{dr} 2\pi R_p dz$$



# Analyse des valeurs du modèle

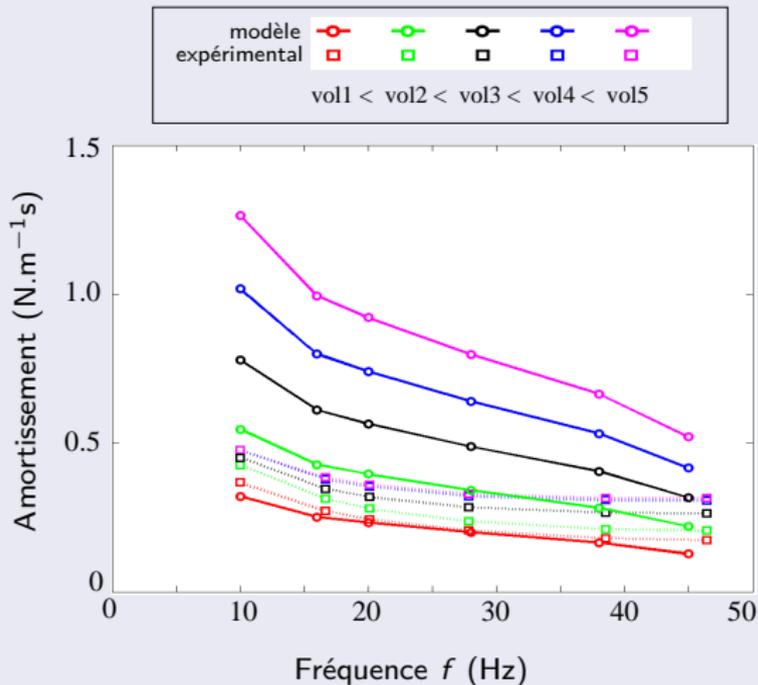
## Confrontation des résultats



- Volume petit : valeurs du modèle sont en bon accord
- Cohérence des résultats :
  1. décroissance avec  $f$
  2. croissance avec  $vol$

# Analyse des valeurs du modèle

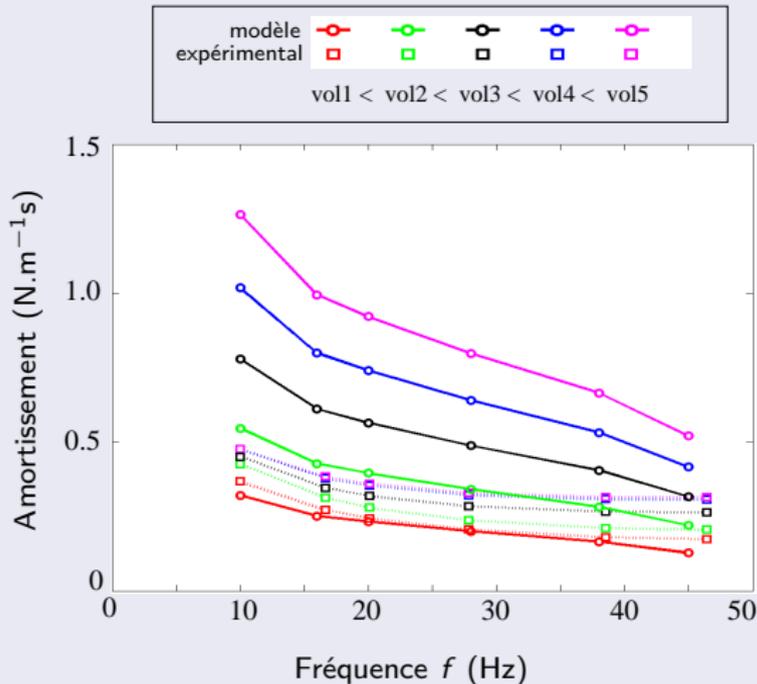
## Confrontation des résultats



- Volume petit : valeurs du modèle sont en bon accord
- Cohérence des résultats :
  1. décroissance avec  $f$
  2. croissance avec  $vol$
- Incohérence des résultats :
  1. dépendance surestimée de l'effet du volume
  2. le volume maximum non prédit

# Analyse des valeurs du modèle

## Confrontation des résultats



- Volume petit : valeurs du modèle sont en bon accord
- Cohérence des résultats :
  1. décroissance avec  $f$
  2. croissance avec  $vol$
- Incohérence des résultats :
  1. dépendance surestimée de l'effet du volume
  2. le volume maximum non prédit



# Conclusion : partie 3

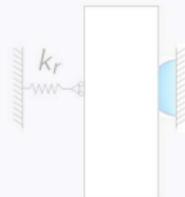
## 1. Comportement radial

- $J, \eta$

- Expérience

⊗

Modèle



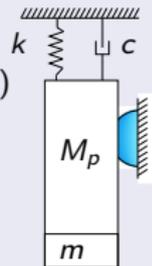
## 3. Comportement axial

- $(J, \eta_0, f, vol)$

- Expérience

⊗

Modèle



## 2. Cisaillement d'une goutte



- $\eta(H, f)$

- Expérience

↓

Modèle

## Conclusion générale

## Conclusion générale : joint de ferrofluide

Dépendances en fonction de  $\eta_0$ ,  $J$ ,  $vol$ ,  $f$ 

|          | $k_r$   | $k$   | $c$   | $m$   |
|----------|---|---|---|---|
| $\eta_0$ |   |   |  |   |
| $J$      |  |  |  |   |
| $vol$    |  |  |  |  |
| $f$      |   |  |  |  |

## Conclusion générale : haut-parleur

### Choix du ferrofluide :

- **Influence de  $J$  :**
  - $k_r$  élevée pour minimiser les modes "de tangage"
  - $k$  réduite pour réduire le volume derrière

## Conclusion générale : haut-parleur

### Choix du ferrofluide :

- **Influence de  $J$  :**

- $k_r$  élevée pour minimiser les modes "de tangage"
- $k$  réduite pour réduire le volume derrière

Un ferrofluide de saturation magnétique élevée est indiqué

## Conclusion générale : haut-parleur

### Choix du ferrofluide :

- **Influence de  $J$  :**

- $k_r$  élevée pour minimiser les modes "de tangage"
- $k$  réduite pour réduire le volume derrière

Un ferrofluide de saturation magnétique élevée est indiqué

- **Influence de  $\eta_0$  :**

Associée au niveau d'amortissement du haut-parleur

## Conclusion générale : haut-parleur

### Choix du ferrofluide :

- **Influence de  $J$  :**
  - $k_r$  élevée pour minimiser les modes "de tangage"
  - $k$  réduite pour réduire le volume derrière

Un ferrofluide de saturation magnétique élevée est indiqué
- **Influence de  $\eta_0$  :**

Associée au niveau d'amortissement du haut-parleur

### Volume :

- **Raideur radiale et amortissement :**
  - Variation significative tant que  $\nabla|H|$  significatif
  - Pour  $vol > vol_M$  :  $\Delta k_r \simeq 0$  et  $\Delta c \simeq 0$
- **Effet de masse ajoutée :**

Volume excessif  $\Rightarrow$  altération du rendement du haut-parleur

# Perspectives

## Perspectives :

- grands déplacements
- analyse du comportement radial en régime dynamique
- influence du joint à ferrofluide sur :
  - le rayonnement acoustique du haut-parleur
  - la distortion harmonique (sous-tâche du projet MAGIC)

# Comportement statique et dynamique d'une suspension de haut-parleur à joint de ferrofluide

Marcos Pinho

*Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine - UMR 6613*

**Philippe HERZOG**  
**Georges BOSSIS**  
**Gaël GUYADER**  
**Nicolas DAUCHEZ**  
**Jean-Michel GENEVAUX**  
**Bruno BROUARD**

Directeur de Recherches, LMA, Marseille  
Directeur de Recherches, LPMC, Nice  
Docteur, Technocentre Renault, Guyancourt  
Professeur, SUPMECA, Paris  
Professeur, LAUM, Le Mans  
Maître de Conférences, LAUM, Le Mans

Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Co-directeur  
Co-directeur  
Co-directeur

*Le Mans, 25 janvier 2011*