Simulation micromagnétique de la susceptibilité hyperfréquence de nanoparticules ferromagnétiques

F. Boust, N. Vukadinovic, S. Labbé

CANUM 2006, Guidel

31/05/2006

Sommaire

- **Introduction**
- **Outils de simulation micromagnétique**
  - ***Recherche de la configuration d'équilibre : approche temporelle***
  - ***Réponse dynamique : approche fréquentielle***
- **Plot nanométrique présentant une configuration magnétique de type vortex**
  - ***Modèles analytiques***
  - ***Simulations numériques***
  - ***Résultats expérimentaux***
- **Conclusion et perspectives**
- **Couches minces présentant une configuration magnétique en ruban**
  - ***Comparaison simulation-expérience***

Introduction

- **Activités de recherche intenses sur le thème de la dynamique de l'aimantation dans des systèmes magnétiques mésoscopiques**

→ **applications : l'enregistrement magnétique à haute densité de stockage, l'électronique de spin, les nouveaux composants hyperfréquences,...**

- **Deux régimes de dynamique de l'aimantation :**
  - **Mouvements de forte amplitude (retournement de l'aimantation)**
  - **Mouvements de faible amplitude (expériences de résonance ferromagnétique (RFM), spectroscopie Brillouin) :**
    - **Réponse linéaire**
    - **Domaine fréquentiel**
    - **Tenseur de susceptibilité dynamique** $\overline{\overline{\chi}}$

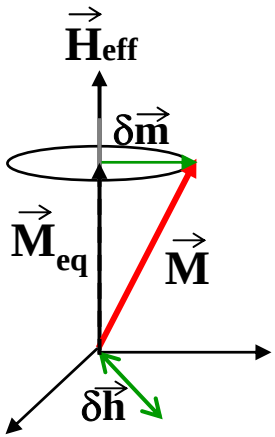
$$\delta\vec{m} = \overline{\overline{\chi}}\,\delta\vec{h}$$

Réponse magnétique dynamique **Champ magnétique excitateur rf**

G. Hillebrands and K. Ounadjela, *Spins Dynamics in Confined Magnetic Structures*, Springer (2002)

Cas d'une distribution d'aimantation uniforme

- Matériau possédant une aimantation $\vec{M}_{eq}$ et un champ effectif $\vec{H}_{eff}$ homogènes soumis à un champ excitateur rf uniforme $\delta\vec{h}$



Mode gyromagnétique uniforme

- Expression analytique pour $\overline{\overline{\chi}}$

Modèle micromagnétique

Hypothèses

On se place à une échelle intermédiaire où M, la densité d'aimantation, est une grandeur continue et constante en module.

Son évolution est régie par l'équation de Landau-Lifshitz:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -|\gamma|\mu_0 \left(\mathbf{M} \wedge \mathbf{H}_{eff} + \alpha \frac{\mathbf{M}}{M_s} \wedge (\mathbf{M} \wedge \mathbf{H}_{eff}) \right)$$

échange

anisotropie

$$\mathbf{H}_{eff}(\mathbf{M}) = A\Delta\mathbf{M} + K(\mathbf{M}.\mathbf{u})\mathbf{u} + \mathbf{H}_d(\mathbf{M}) + \mathbf{H}_{ext}$$

démagnétisant

avec $\mathbf{H}_d(\mathbf{x},t) = \mathbf{grad}_x(\mathbf{div}_x(\int_\Omega \frac{\mathbf{M}(\mathbf{y},t)d\mathbf{y}}{4\pi|\mathbf{x}-\mathbf{y}|}))$

Résolution en temps de l'équation de LL
Code EMicroM

- **Approche volume fini avec maillage cubique régulier**

  ⬇

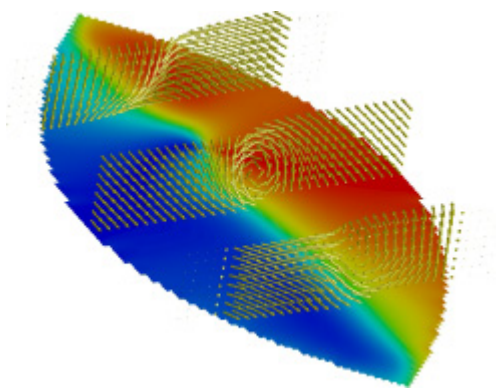
  Opérateur champ démagnétisant avec structure Toeplitz 3D

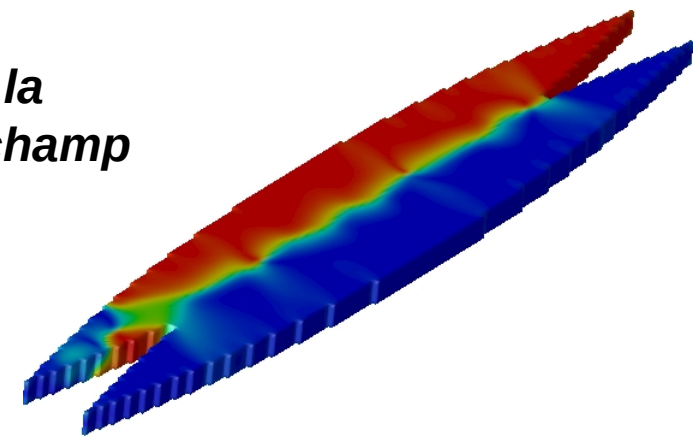
  ⬇

  Remplacement des produits matrice.vecteur par des FFT

- **Schéma en temps explicite d'ordre 2**

  Optimisation du pas de temps (*garantissant la décroissance de l'énergie dans le cas d'un champ extérieur constant*)





S. Labbé and P. Leca, C. R. Acad. Sci. Paris 327, 415 (1998)

Calcul avec ~10^6 ddl

Calcul du tenseur de susceptibilité dynamique (1)
Différentes approches

- ***Approche harmonique***

  - Linéarisation de l'équation de LL ou LLG autour de la configuration d'équilibre

  - Dépendance harmonique (excitation et réponse)

  S. Labbé and P. Y. Bertin (1999), J. Magn. Magn. Mater. 206, 93 (1999)

  N. Vukadinovic, O. Vacus, M. Labrune, O. Acher, D. Pain, PRL 85 2817 (2000)

- ***Approche temporelle***

  - Intégration directe de l'équation de LL ou LLG (excitation temporelle de faible amplitude)

  - Transformée de Fourier de l'excitation et de la réponse → $\overline{\overline{\chi}}(\omega)$

  O. Gérardin, H. Le Gall, M. J. Donahue, and N. Vukadinovic, JAP 89 7012 (2001) CODE OOMF (NIST)

  J.-C. Toussaint, A Marty, N. Vukadinovic, J. Ben Youssef, and M. Labrune, Comp. Mater. Science 24, 175 (2002)

Calcul du tenseur de susceptibilité dynamique (2)
Résolution de LL linéarisée (SMicroM)

Réponse $\delta\vec{m}(\vec{r},t)$ **à un faible champ excitateur harmonique** $\delta\vec{h}(t)$

$$\vec{m}(\vec{r},t) = \vec{m}_{eq}(\vec{r}) + \delta\vec{m}(\vec{r},t),\ \ \vec{H}(\vec{r},t) = \vec{H}_{eq}(\vec{r}) + \delta\vec{h}(t) + \vec{H}_{eff}(\delta\vec{m})$$

- **Linéarisation de l'équation de LL autour de** $m_{eq}(\vec{r})$

$$\left|\delta\vec{h}\right| << \left|\vec{H}_{eq}(\vec{r})\right|,\ \left|\vec{H}_{eff}(\delta\vec{m})\right| << \left|\vec{H}_{eq}(\vec{r})\right|,\ \left|\delta\vec{m}\right| << \left|\vec{m}_{eq}\right| = 1$$

- **Dépendance harmonique pour** $\delta\vec{m}$ **et** $\delta\vec{h}$

- **Système linéaire :**

$$\left(-\frac{i\omega}{\gamma}\mathbf{I} + \mathbf{D_2} - \mathbf{D_1}\mathbf{D_H}\right)\delta\vec{m} = \mathbf{D_1}\delta\vec{h}$$

$$\mathbf{D_1}\vec{v} = \vec{m}_{eq} \times \vec{v},\ \ \mathbf{D_2}\vec{v} = \left(\vec{H}_{eq} + \frac{i\alpha\omega}{|\gamma|}\vec{m}_{eq}\right) \times \vec{v},\ \ \mathbf{D_H}\vec{v} = \left(\vec{H}_{eff} - \vec{H}_{app}\right)(\vec{v})$$

S. Labbé and P. Y. Bertin (1999), J. Magn. Magn. Mater. 206, 93 (1999)

N. Vukadinovic, O. Vacus, M. Labrune, O. Acher, and D. Pain, PRL 85 2817 (2000)

Calcul du tenseur de susceptibilité dynamique (3)

- **Résolution du système linéaire correspondant au problème discrétisé pour chaque fréquence :**
  - $\delta\vec{m}$ **et** $\delta\vec{h}$ **sont des vecteurs à 3N composantes**
  - **Système linéaire dense et complexe de dimension 3N x 3N**
    - **Méthode itérative (Gradient Conjugué) + préconditionnement (conservant la structure Toeplitz)**

- **Eléments du tenseur de susceptibilité dynamique :**
  - **Base orthonormée d'excitation** $\left(\delta\vec{h}_1, \delta\vec{h}_2, \delta\vec{h}_3\right)$
  - **Réponse dynamique** $\left(\delta\vec{m}_1, \delta\vec{m}_2, \delta\vec{m}_3\right)$

$$\chi_{ij}(\vec{r},\omega) = M_S\, \delta\vec{m}_i(\vec{r},\omega,\delta\vec{h}_i)\cdot\delta\vec{h}_j \;,\; i,j = 1,2,3$$ **Susceptibilité locale**

$$\chi_{ij}(\omega) = \left\langle \chi_{ij}(\vec{r},\omega)\right\rangle_r$$ **Susceptibilité moyennée spatialement**

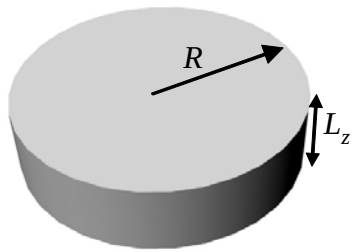
Plot nanométrique présentant une configuration magnétique de type vortex

- **Système physique**

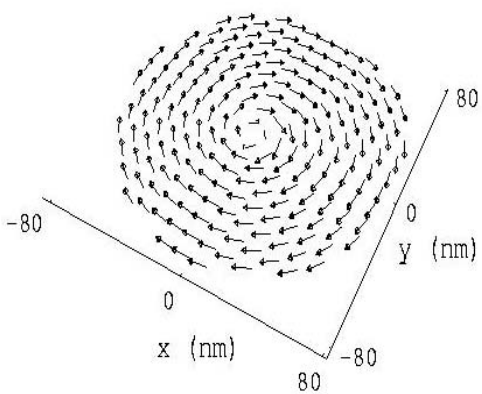
  - Plot cylindrique

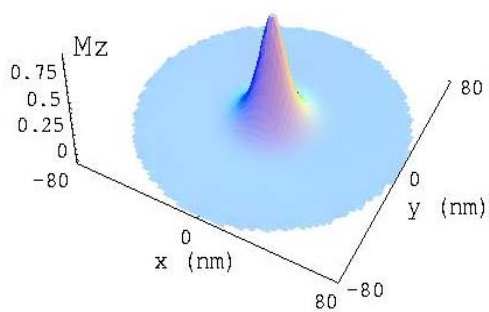
  - Matériaux ferromagnétiques doux

  (énergie d'anisotropie négligeable, ex : Py)

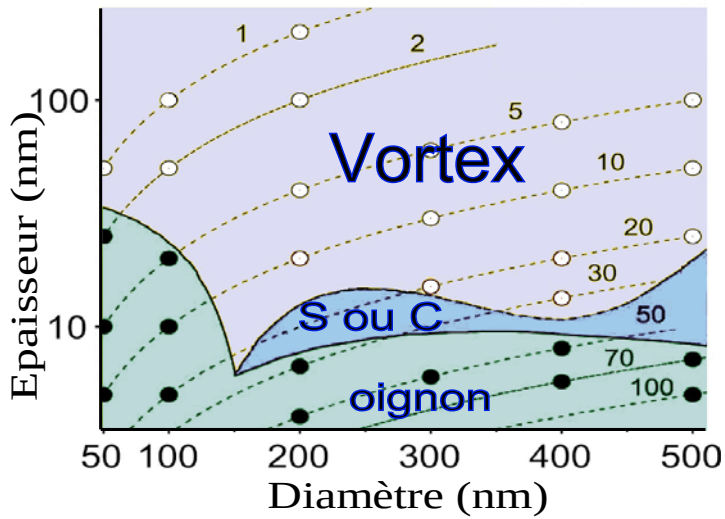


- **Définition et stabilité de l'état vortex**





L_z = 20 nm, R = 80 nm



structure micromagnétique stable pour $L_z > \Lambda$ et $R >> \Lambda$ avec $\Lambda = (2A/\mu_0 M_S^2)^{1/2}$

K. L. Metlov and K. Y. Guslienko, J. Magn. Magn. Mater. 242-245, 511 (2002)

K. Ha, R. Hertel, and J. Kirschner, Phys. Rev. B 67, 224432 (2003)

Modèles analytiques : configuration d'équilibre de l'aimantation

- **Hypothèses**

  - Structure invariante par rotation autour de l'axe z

  - Aimantation indépendante de z

- **Profil de l'aimantation**

$$m_r(r,\theta,z)=0$$
$$m_\theta(r,\theta,z)=f(r)$$
$$m_z(r,\theta,z)=\sqrt{1-f^2(r)}$$

$$f(r)=\frac{2ar}{a^2+r^2} \quad r\le a \qquad et \qquad a=0.59\Lambda \quad si\ L_z\le\Lambda$$
$$f(r)=1 \quad r>a \qquad\qquad a=0.68\left(\Lambda^2 L_z\right)^{1/3} \quad si\ L_z\ge\Lambda$$

N. A. Usov and S. E. Peschany, J. Magn. Magn. Mater. 118, L290 (1993)

Modèles analytiques : spectre des excitations

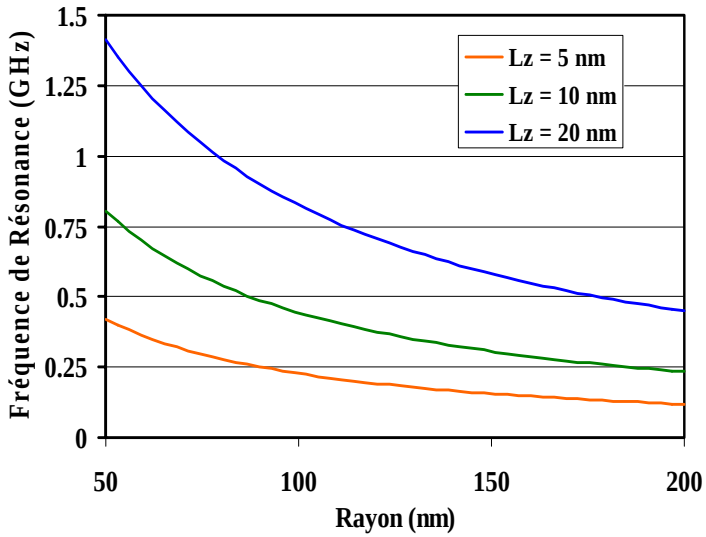
- **Deux types d'excitation :**

  - mode de translation du cœur de vortex

  - modes de précession

Mode de translation du cœur de vortex

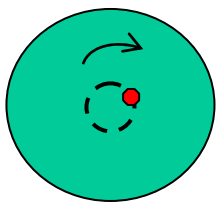
(fr ≤ 2GHz)



- **Phénoménologie :**

  Mouvement gyrotropique du cœur de vortex

m_z >0 au cœur du vortex



$$\omega_0 = 2\gamma M_S \left(4\pi F(L/R) - (\Lambda/R)^2/2\right),$$

$$F(u) = \int \frac{f(ut)}{t}\left[\int_0^1 d\rho\, \rho J_1(\rho t)\right]^2 dt,$$

$$f(x) = 1 - \frac{1-e^{-x}}{x}$$

- **Hypothèses :**

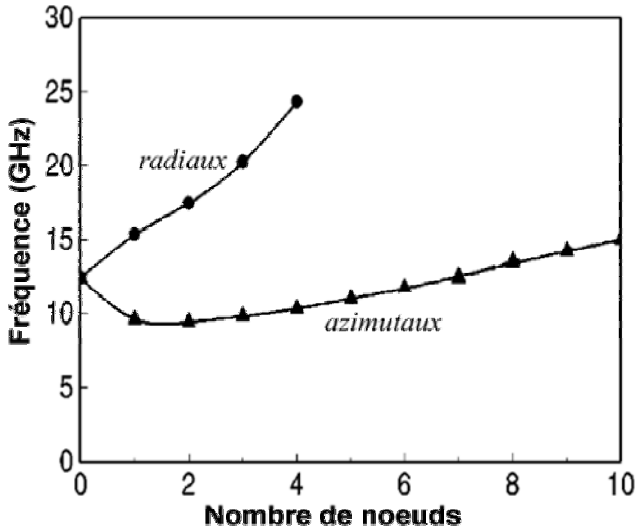
  - plot fin (invariance de M suivant z)

  - charges magnétiques volumiques

K. Y. Guslienko, B. A. Ivanov, V. Novosad, Y. Otani, H. Shima, and K. Fumamichi, JAP 91, 8037 (2002)

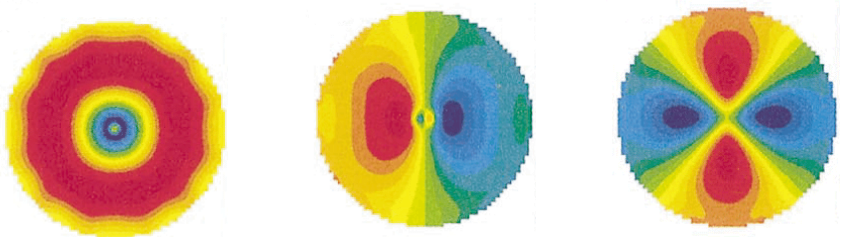
Modes de précession (fr >2GHz)

$$m_{n,m}(r,t) = F_n(r)e^{i(m\phi+\omega_{n,m}t)}$$



- **Hypothèses :**
  - Cœur rigide
  - Découplage cœur - structure orthoradiale

- **Classification :**
  - modes radiaux (m=0)
  - mode azimutaux (m≠0)



n=2, m=0 n=0, m=1 n=0, m=2

L. Giovannini, F. Montoncello, F. Nizzoli, G. Gubbiotti, G. Carlotti, T. Okuno, T. Shinjo, and M. Grimsditch PRB 70, 172404 (2004)

K. Y. Guslienko, W. Scholz, R. W. Chantrell, and V. Novosad, PRB 71, 144407 (2005)

Couplage entre mode de translation et modes de précession azimutaux

- **Résultats :**

  - Levée de dégénérescence des mode azimutaux (apparition de doublets) liée au mouvement du cœur de vortex

C. E. Zaspel, B. A. Ivanov, J. P. Park, and P. A. Crowell, PRB 72, 024427 (2005)

Simulations numériques : paramètres utilisés

- **Paramètres matériaux :**

  - Permalloy isotrope

  - $A = 1.3\ 10^{-11}$ J/m, $M_s = 8\ 10^5$ A/m, $\gamma = 1{,}76\ 10^{11}\ s^{-1}\ T^{-1}$, $\alpha = 0.025$

- **Paramètres géométriques du plot cylindrique**

  - Rayon R = 80 nm

  - Epaisseur 10 nm $\leq L_z \leq$ 80 nm

- **Discrétisation spatiale (maille cubique Δx, Δy, Δz)**

  - Critère : $\Delta x, \Delta y, \Delta z \leq \pi / 5 \times Min(\delta, \Lambda), \quad \delta = \sqrt{\frac{A}{K}}, \quad \Lambda = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_S^2}}$

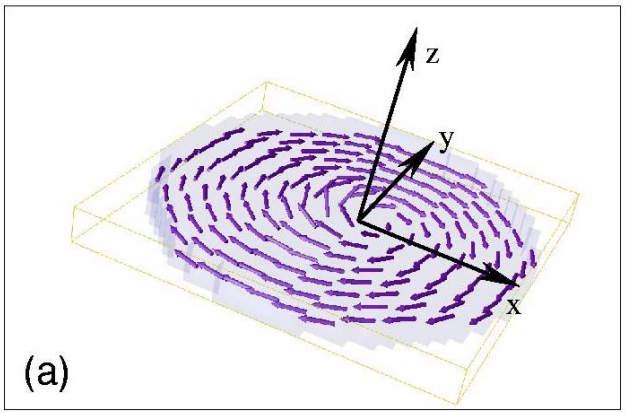
  - Λ = 5,7 nm , Δ_i = 2,5 nm, i =x,y,z

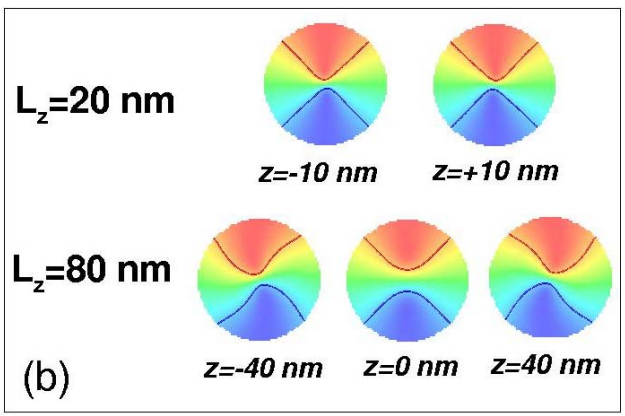
F. Boust, N. Vukadinovic, and S. Labbé , J. Magn. Magn. Mater. 272-276, 708 (2004)

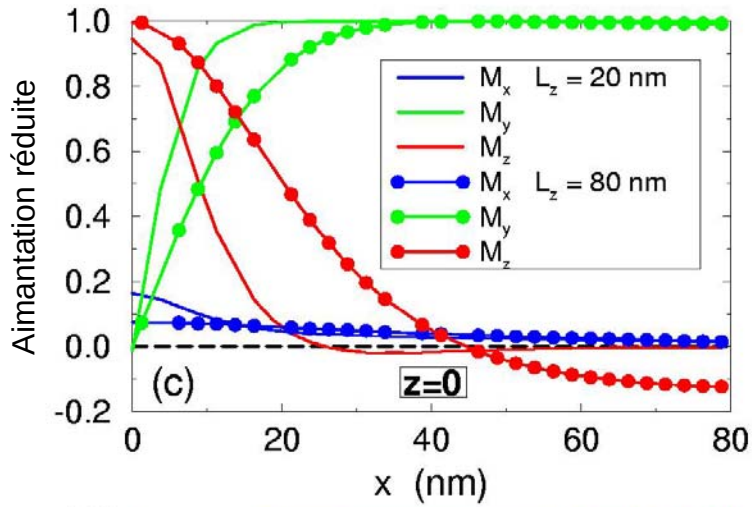
F. Boust and N. Vukadinovic, PRB 70, 172408 (2004)

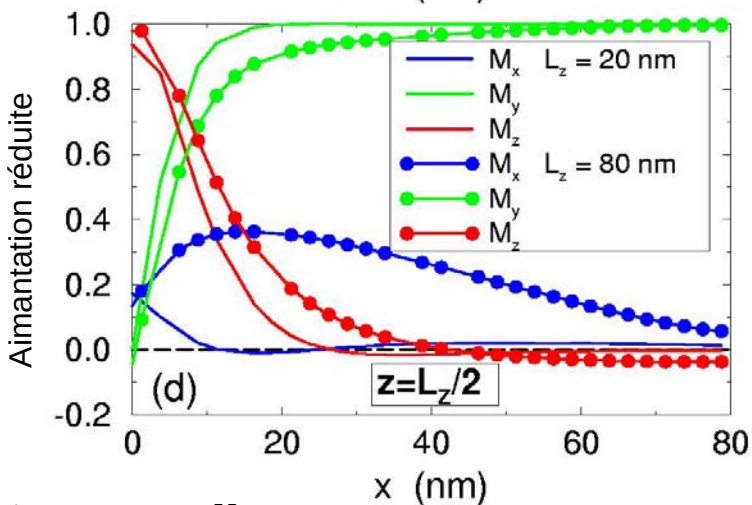
Simulations numériques : configuration d'équilibre de l'aimantation

Effet d'épaisseur





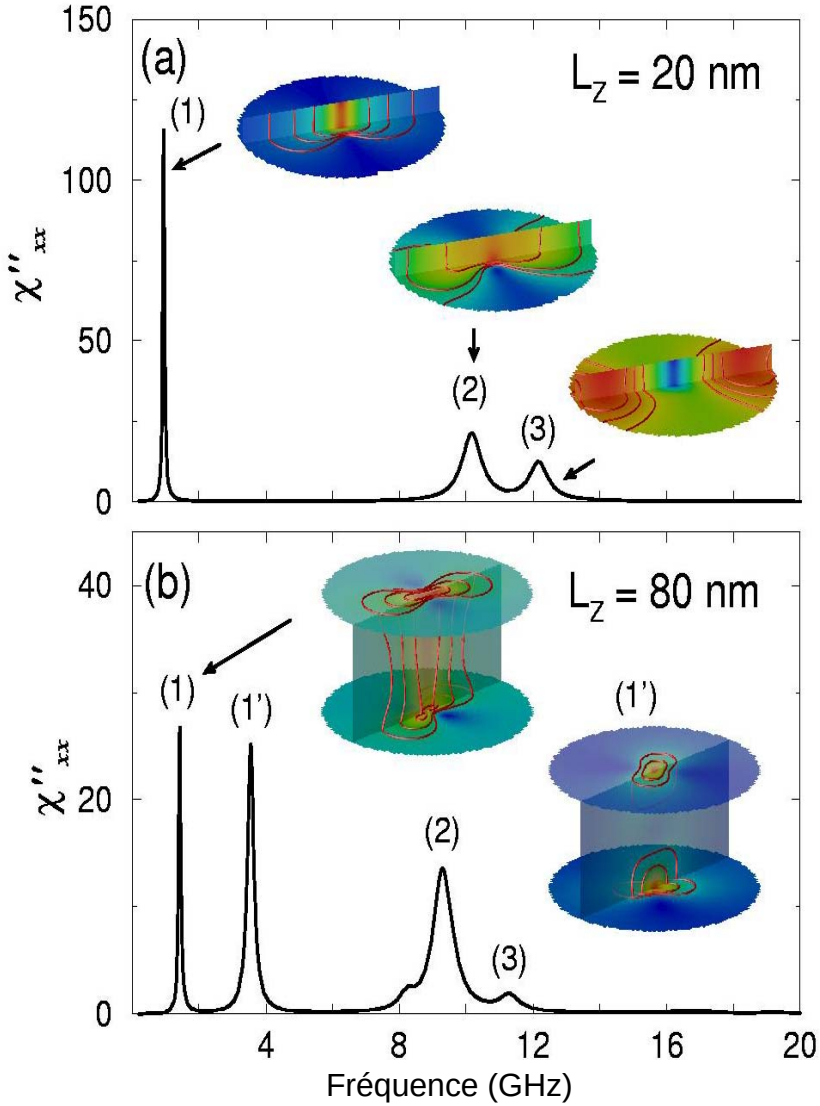


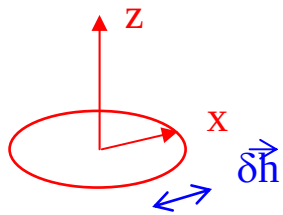


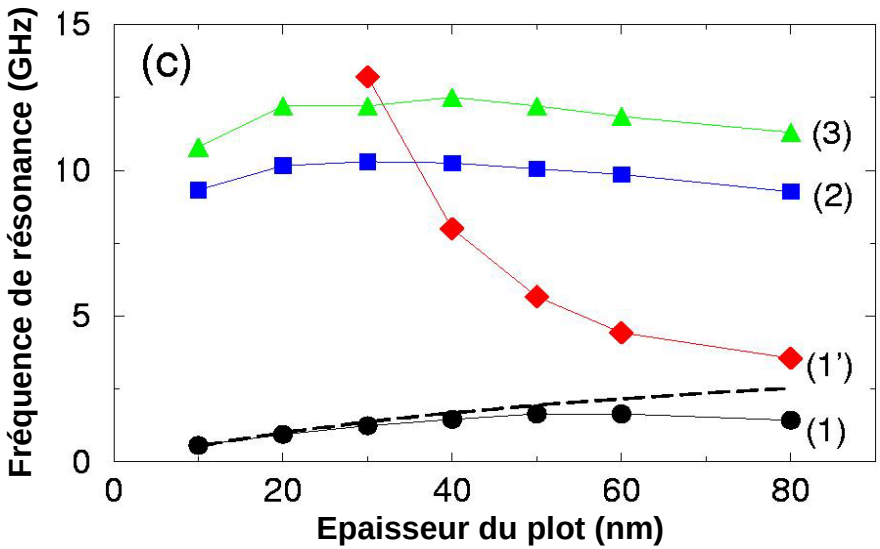
- La taille du cœur évolue dans l'épaisseur
- La composante radiale de l'aimantation n'est pas nulle

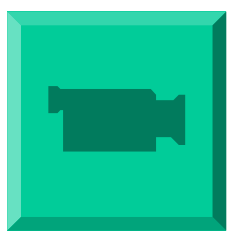
Simulations numériques : réponse dynamique

Effet d'épaisseur



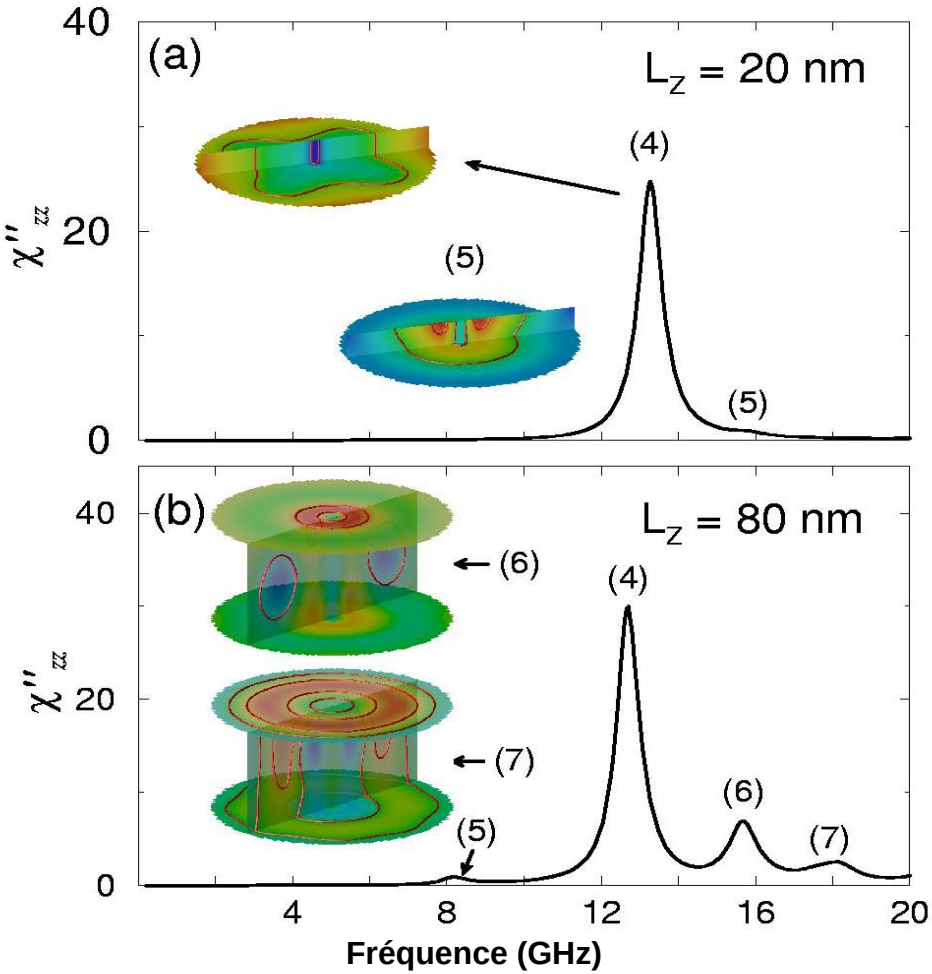


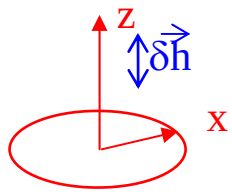


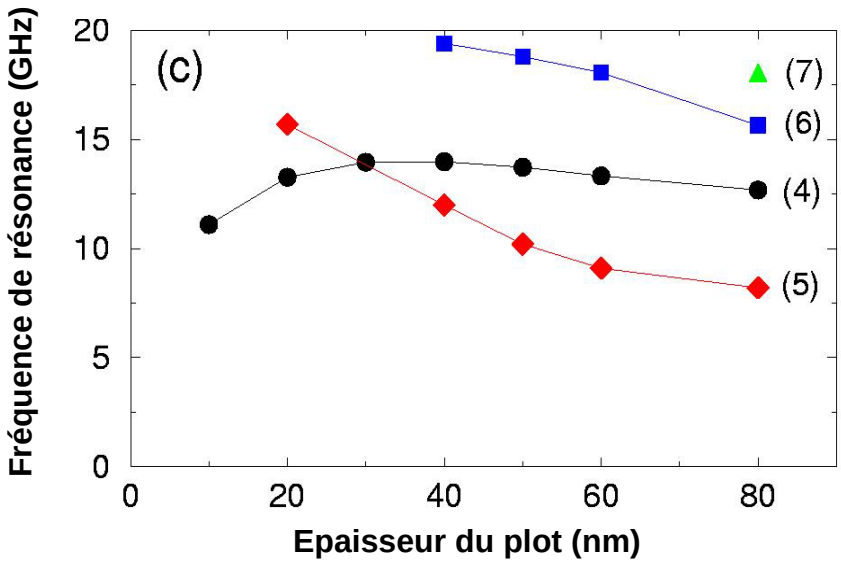


Simulations numériques : réponse dynamique

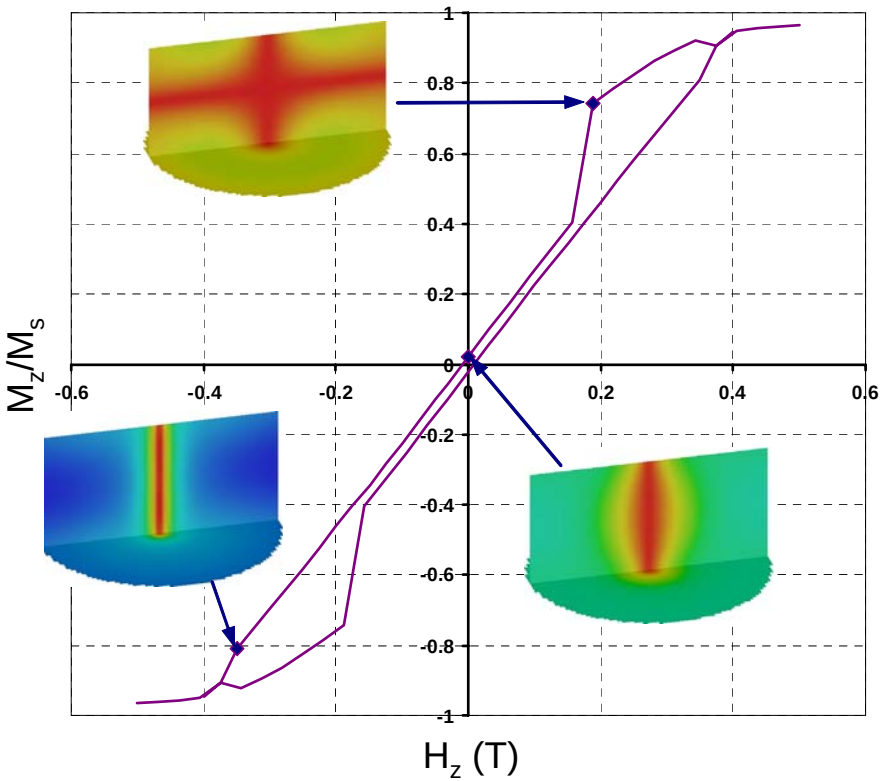
Effet d'épaisseur

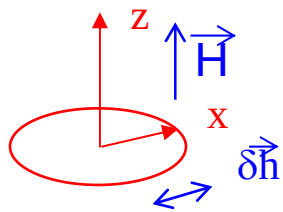


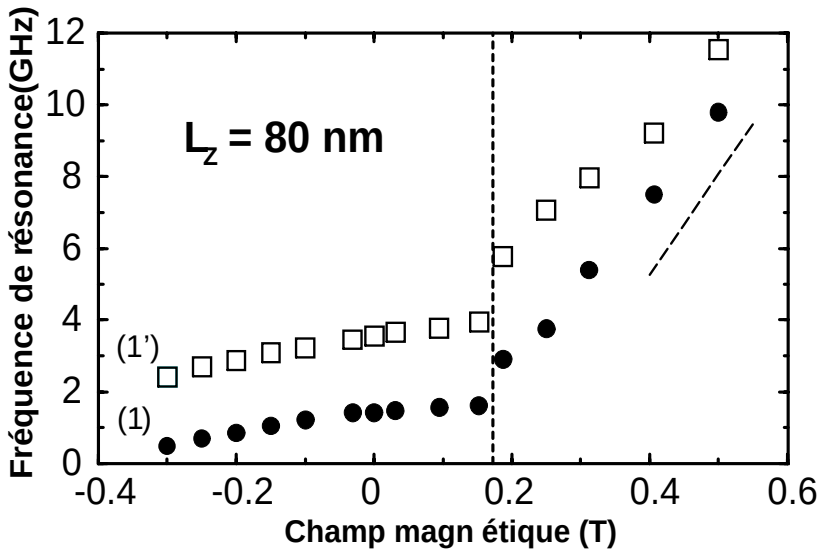




Simulations numériques : effet d'un champ magnétique polarisant







Dynamique de l'état vortex : résultats expérimentaux récents

- **Microscopie Kerr résolue en temps**

M. Buess, R. Hollinger, T. Haug, K. Perzlmaier, U. Krey D. Pescia, M. R. Scheinfein, d. Weiss,and C. H. Back, PRL 93 077207 (2004)

J. P. Park and P. A. Crowell, PRL 95, 167201 (2005)

Modes de précession radiaux et azimutaux

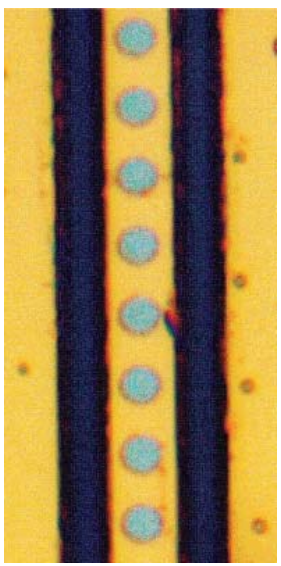
Mode de translation du cœur de vortex
Modes de précession azimutaux
+ couplage

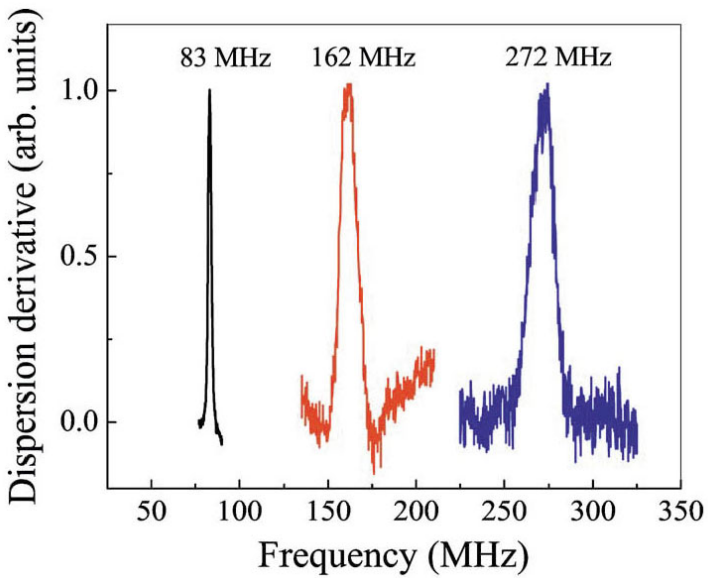
- **Diffusion Brillouin**

L. Giovannini, F. Montoncello, F. Nizzoli, G. Gubbiotti, G. Carlotti, T. Okuno, T. Shinjo, and M. Grimsditch PRB 70, 172404 (2004)

Modes de précession radiaux et azimutaux

- **« Résonance ferromagnétique » (guide co-planaire)**





Modes de translation du cœur de vortex

V. Novosad, F. Y. Fradin, P. E. Roy, K. S. Buchanan, K. Y. Guslienko, and S. Bader, PRB 72, 024455 (2005)

Conclusion et perspectives (1)

- **Les simulations micromagnétiques constituent un outil performant pour étudier la réponse haute fréquence d'objets magnétiques submicroniques**
- **Les codes EMicroM et SMicroM basés sur l'exploitation de la structure Toeplitz de l'opérateur démagnétisant permettent de traiter des problèmes à grand nombre de ddl (). (limitation maillage cubique?)**
- **Il reste nécessaire de développer des modèles analytiques (compréhension physique, études paramétriques). Toutefois ceux-ci ne décrivent que partiellement la dynamique d'objets 3D à configuration d'aimantation non uniforme.**
- **La comparaison avec des résultats expérimentaux est incontournable (exemple des plots à grand rapport de forme L_z / R)**

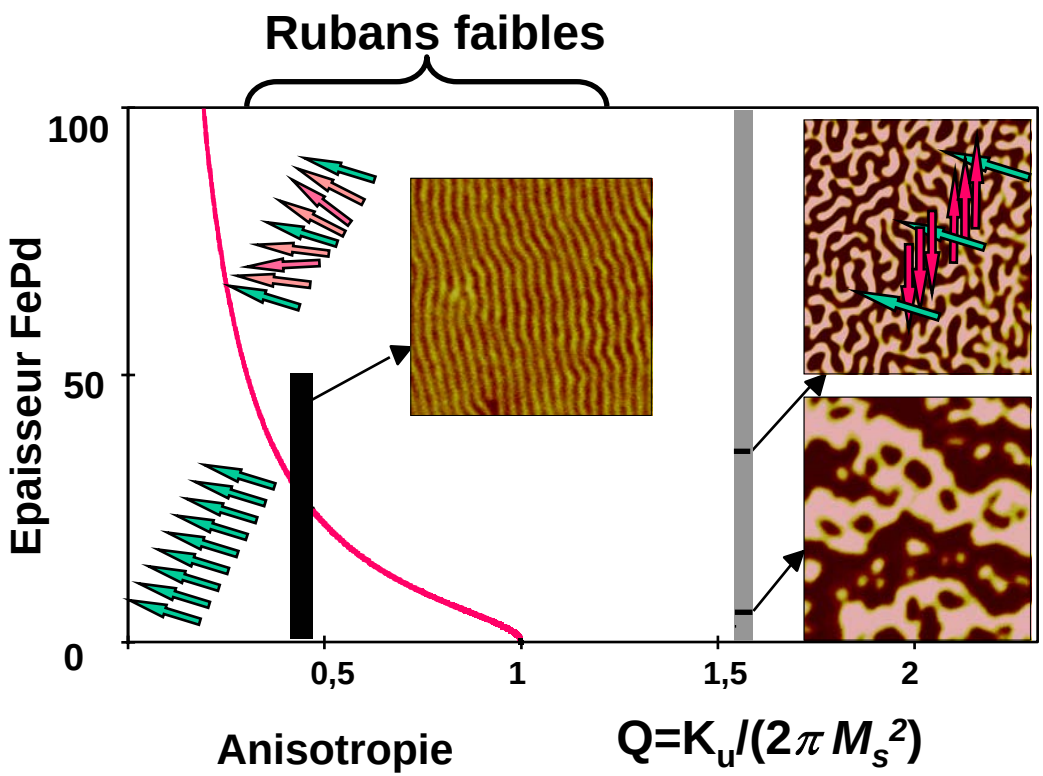
Conclusion et perspectives (2)

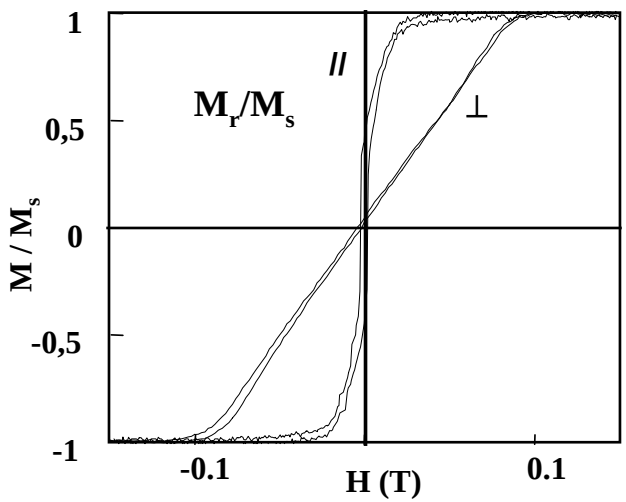
- **Le modèle micromagnétique doit être enrichi pour être plus représentatif de systèmes réels (stratification, défauts,..) ou pour prendre en compte de nouveaux effets physiques (transfert de spin, fluctuations thermiques)**

- **Les simulations micromagnétiques dynamiques concernent des objets de taille submicrométrique. Or, il existe un besoin de simulations pour des objets de plus grandes dimensions (1 à 100 μm^3)**

Couches minces présentant une configuration magnétique en ruban

A. Marty, J.-C. Toussaint, M. Labrune, J. Ben Youssef, N. Vukadinovic

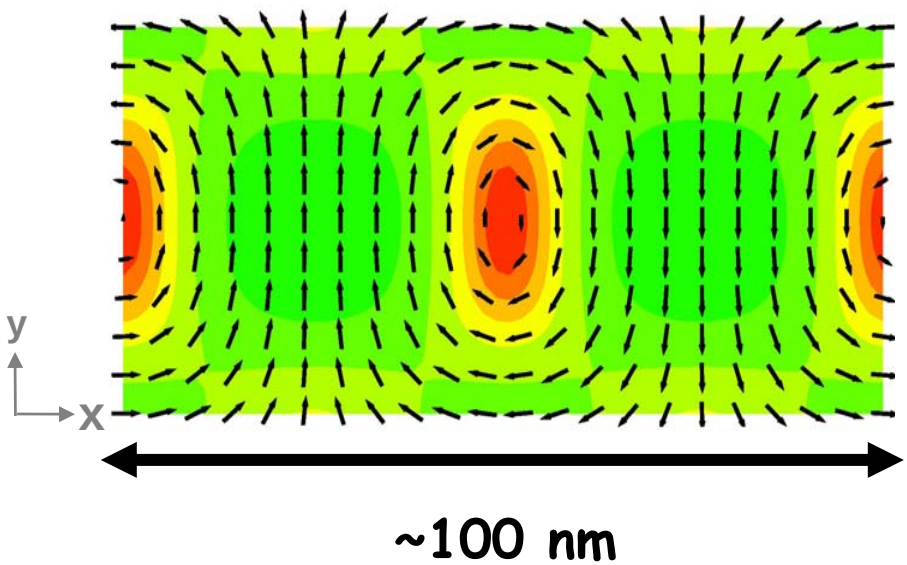




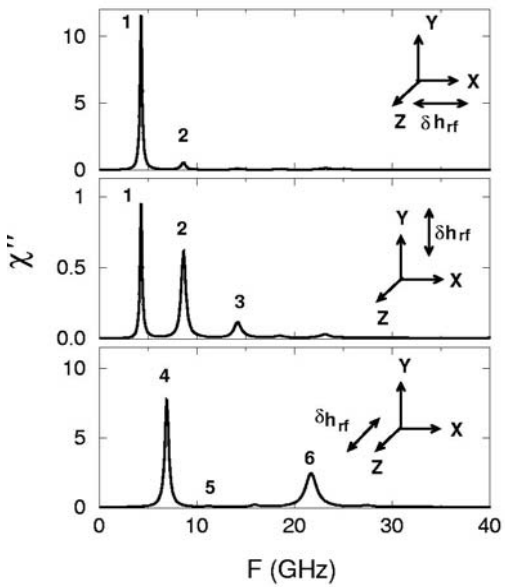
(d'après A. Marty ,CENG)

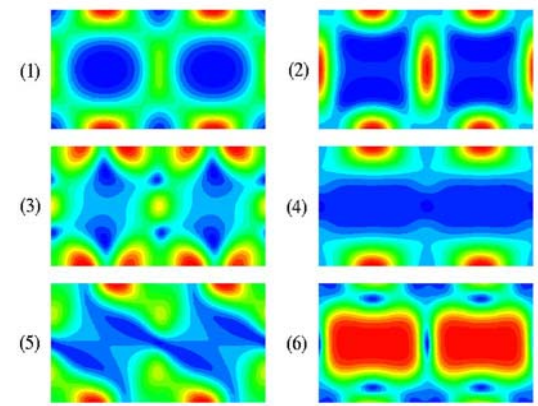
Couches minces présentant une configuration magnétique en ruban

Configuration d'équilibre



Spectre de susceptibilité





Couches minces présentant une configuration magnétique en ruban

Relaxation temporelle

Excitation : Marche de champ
$\delta h_0 = 0.001 \mu_0 M_s$

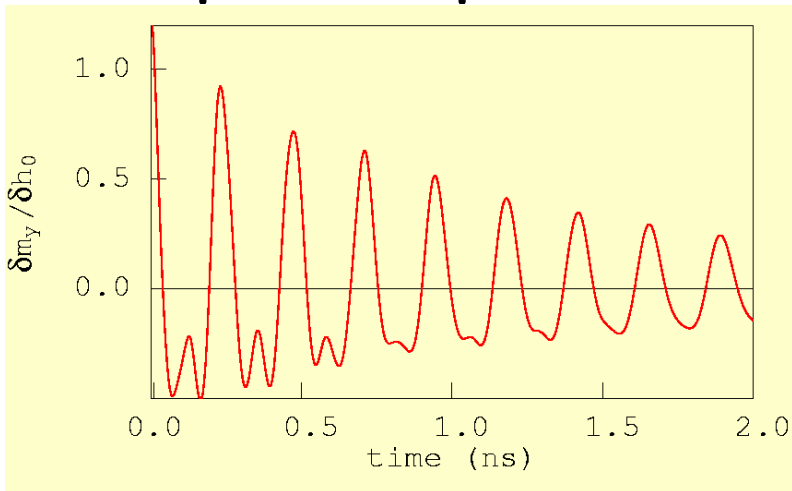
α **= 0.02**
à partir de mesures dans l'état saturé

Excellent accord
Des 2 méthodes

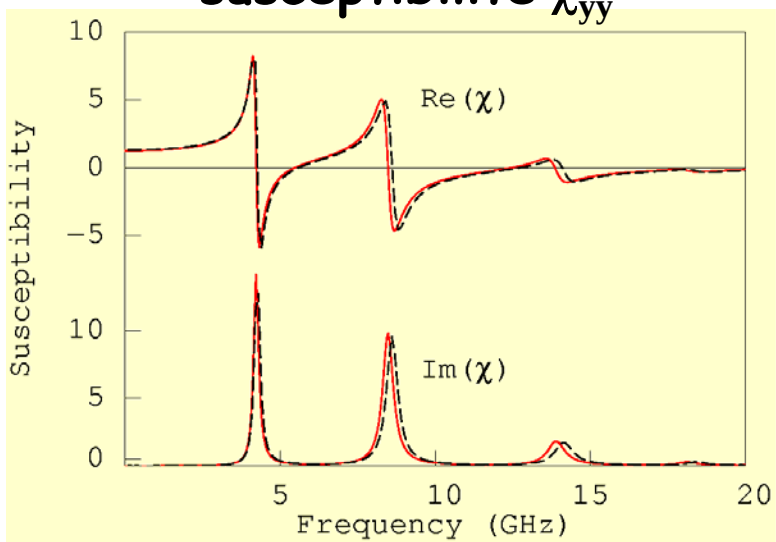
Temps-fréquence

Dynamical matrix

Réponse temporelle



susceptibilité χ_{yy}



J.-C. Toussaint, A Marty, N. Vukadinovic, J. Ben Youssef, and M. Labrune, Comp. Mater. Science 24, 175 (2002)

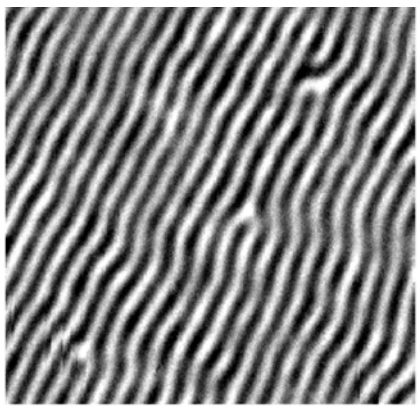
Comparaison avec des données expérimentales (1)

$4\pi M_S$ = 13190 G, A = 0.7 10^{-6} erg/cm
K_u = 2.4 10^6 erg/cm^3, γ = 1.85 10^7 s^{-1}Oe^{-1},
α = 0.02

- Echantillon : film partiellement ordonné de FePd,

h = 50 nm, Q = 0.35

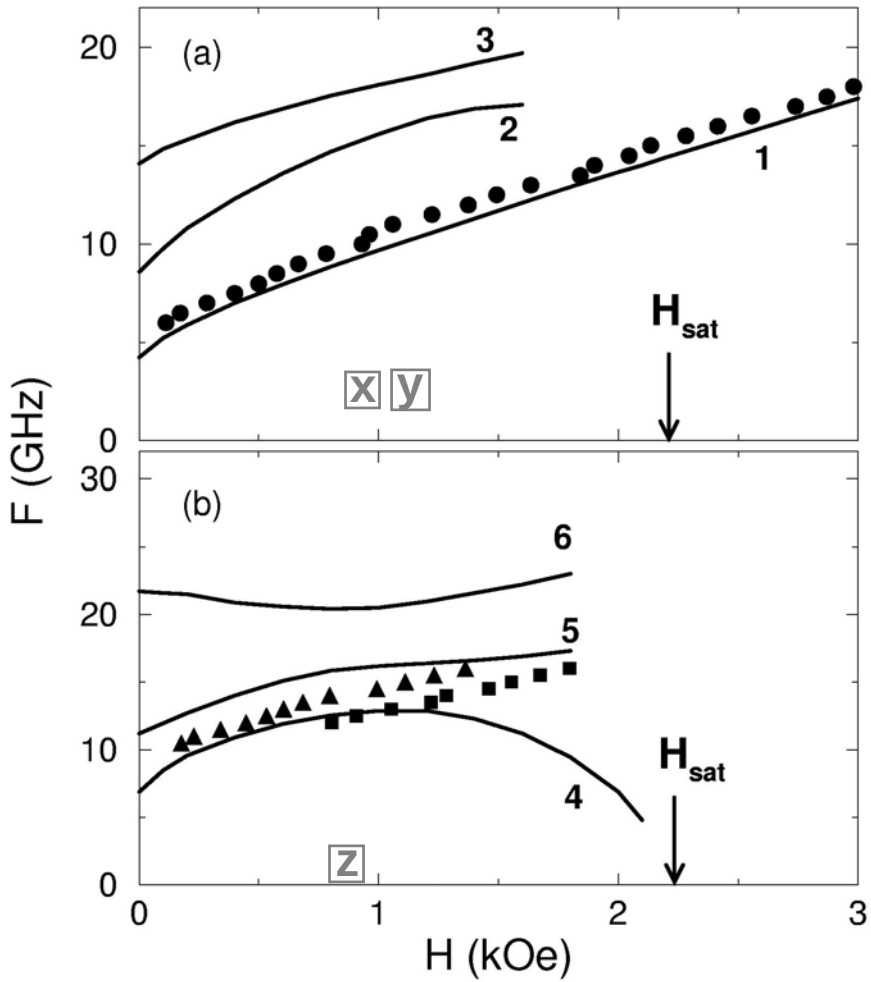
- Image MFM en champ magnétique nul



V. Gehanno et al., EPJB 10, 457 (1999)

Domaines en rubans faibles P_0=110 nm

- Mesures de résonance ferromagnétiqu dans la gamme de fréquence 6 GHz - 18 GHz



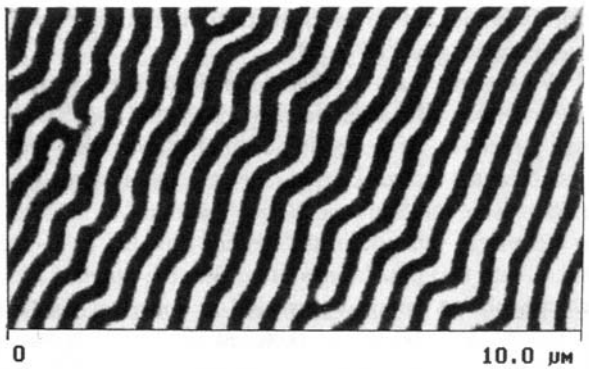
N. Vukadinovic, M. Labrune, J. Ben Youssef, A. Marty, J.-C. Toussaint, and H. Le Gall, PRB 65 054403 (2002)

Comparaison avec des données expérimentales (2)

- Echantillon : film amorphe de $Co_{63}Fe_{26}Zr_{11}$,

h = 300 nm, Q = 0.05

- Image MFM en champ magnétique nul



O. Acher et al., JAP 81, 4057 (1997)

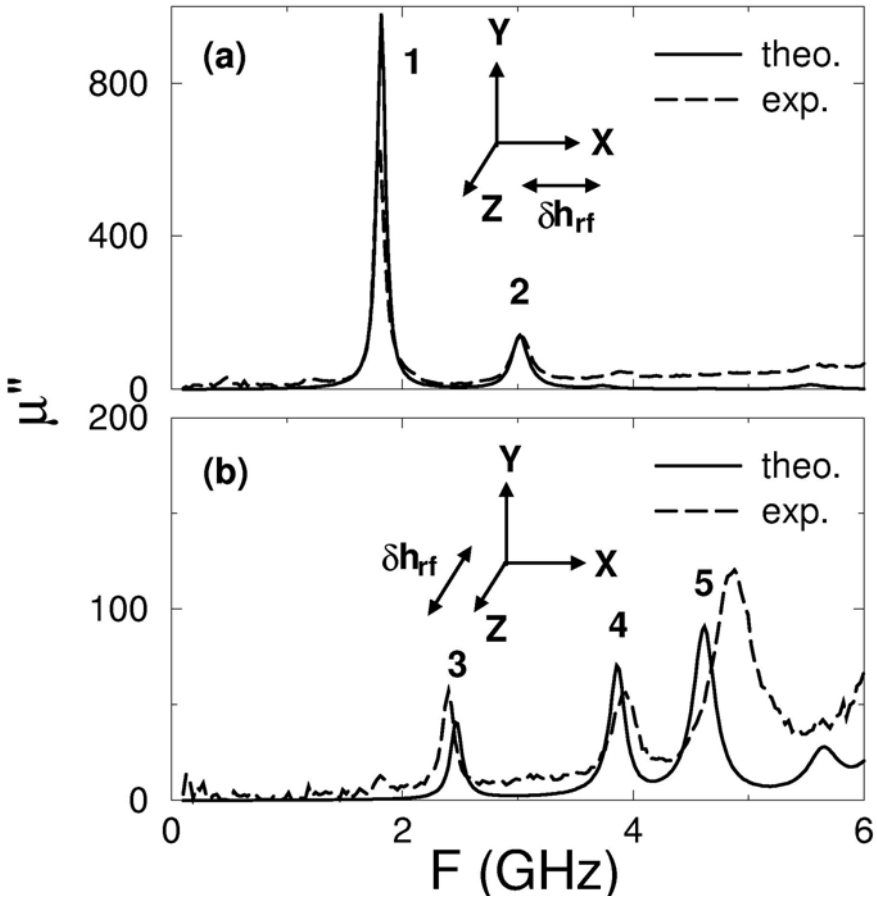
Domaines en rubans faibles P_0=500 nm

- Mesures de perméabilité dynamique dans la gamme de fréquence 10 MHz - 6 GHz

$4\pi M_S$ = 12000 G, A = 1.1 10^{-6} erg/cm

K_u = 2.3 10^5 erg/cm^3, K_P = 1.6 10^4 erg/cm^3

γ = 1.94 10^7 s^{-1}Oe^{-1}, α = 0.012



N. Vukadinovic, O. Vacus, M. Labrune, O. Acher, and D. Pain, PRL 85 2817 (2000)

Comparaison avec des données expérimentales (3)

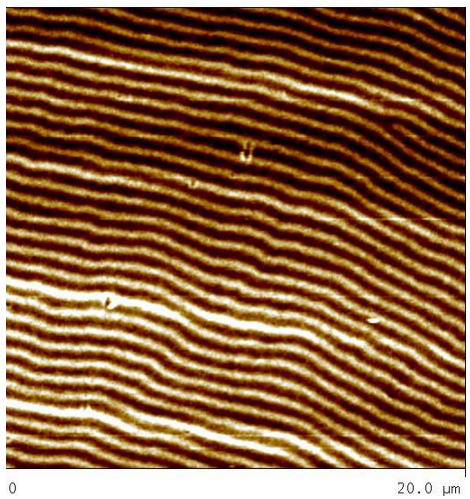
- Echantillon : film polycristallin de Permalloy ($Ni_{82}Fe_{18}$)

327 nm ≤ h ≤ 917 nm, (68 ≤ h/Λ ≤ 190)

Q ~ 0,01

- Image MFM en champ magnétique nu

h = 384 nm

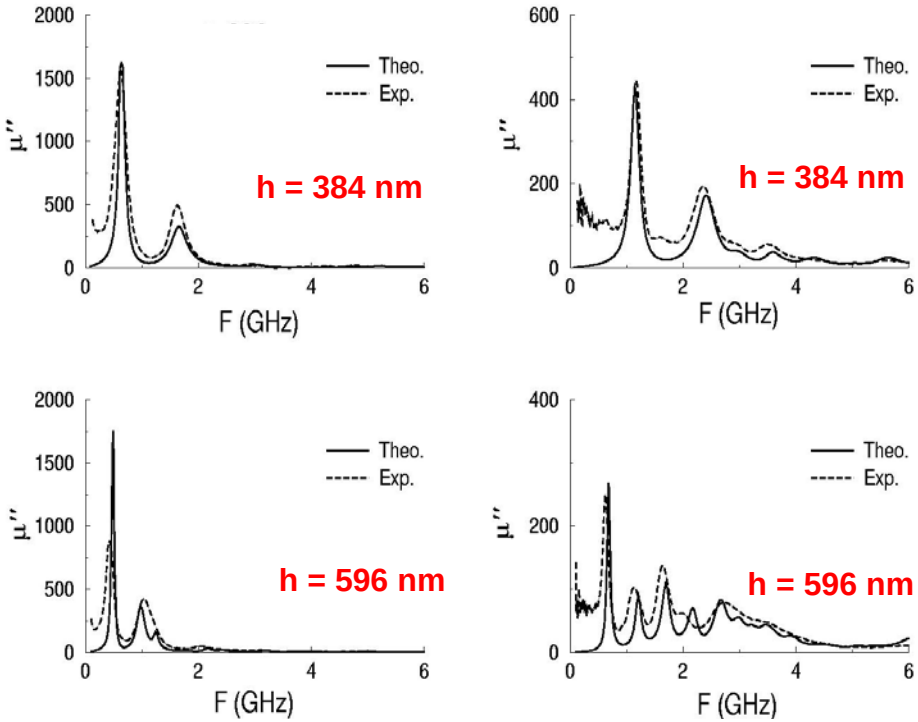


(Cliché LPMTM)

$4\pi M_S$ = 10400 G, A = 1. 10^{-6} erg/cm

K_u = 5,2 10^4 erg/cm^3, K_P = 2. 10^3 erg/cm^3
γ = 1,85 10^7 s^{-1}Oe^{-1}, α = 0,018

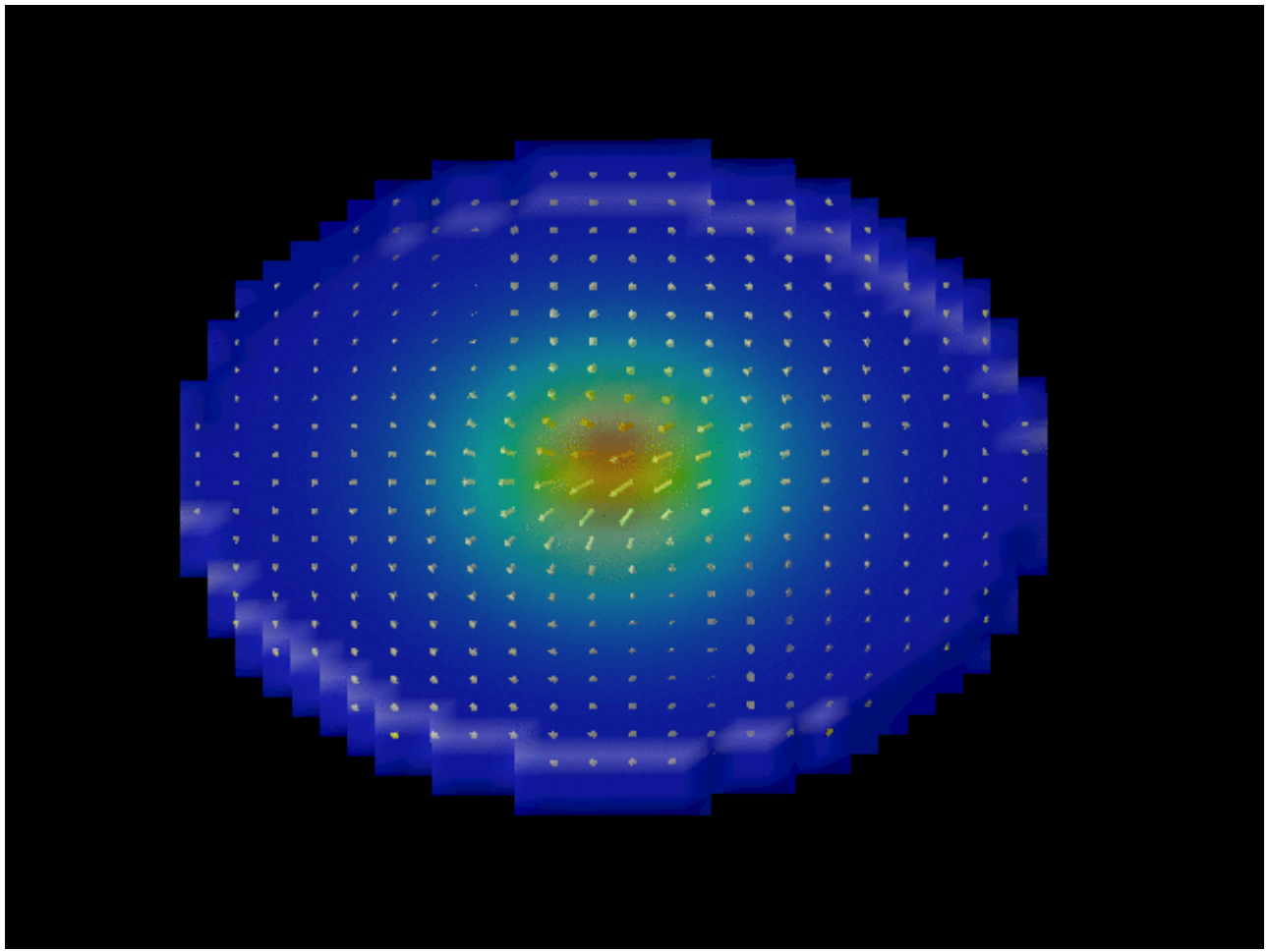
configuration x **configuration z**



Domaines en rubans faibles **P_0= 660 nm**

- Mesures de perméabilité dynamique dans la gamme de fréquence 10 MHz - 6 GHz

J. Ben Youssef, N. Vukadinovic, D. Billet, and M. Labrune, PRB 69 174402 (2004)



Plot de permalloy excité à 1GHz (au voisinage du mode de translation du cœur) par une sinusoïde x gaussienne