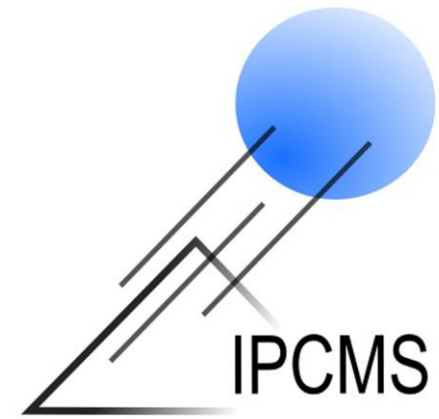


Université

de Strasbourg



THE UNIVERSITY OF
**WESTERN
AUSTRALIA**



Spectroscopie d'onde de spin

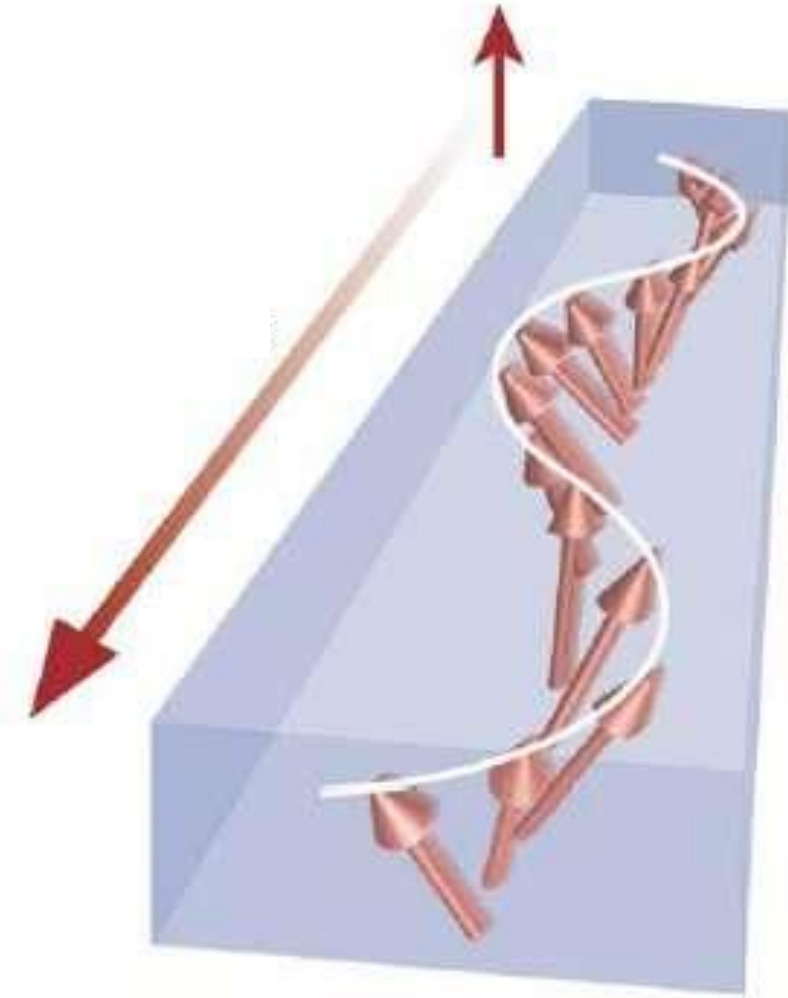
Stage 2019

Superviseurs :

JUPILLE Pierre-Julien
PERCEBOIS Gaëtan

BAILLEUL Matthieu
GRASSI Matias

- Quelques Rappels de magnétisme
- Résonance Ferromagnétique (FMR)
- Spectroscopie d'onde de spin
- Interaction Dzyaloshinskii-Moriya

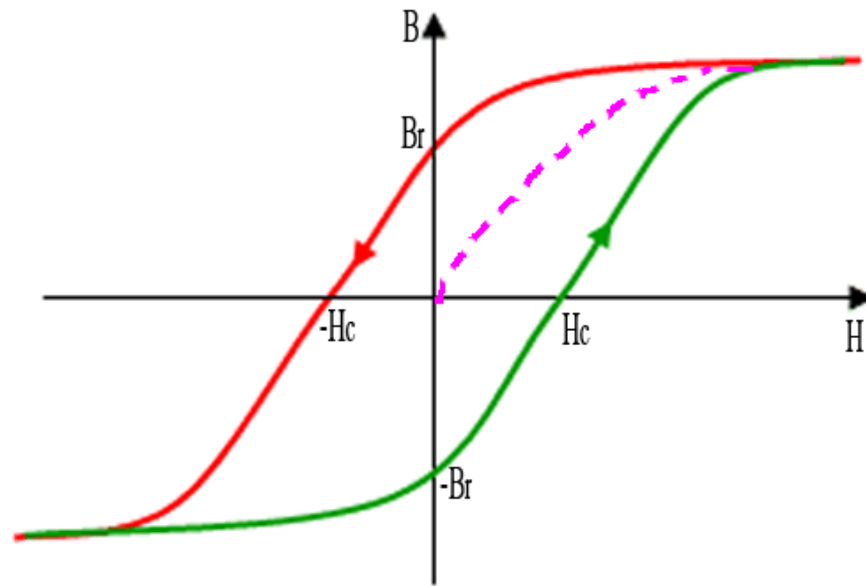


- Stage fait à l'IPCMS
- Equipe DMONS
- Théorie, expériences et analyse



Ferromagnétisme

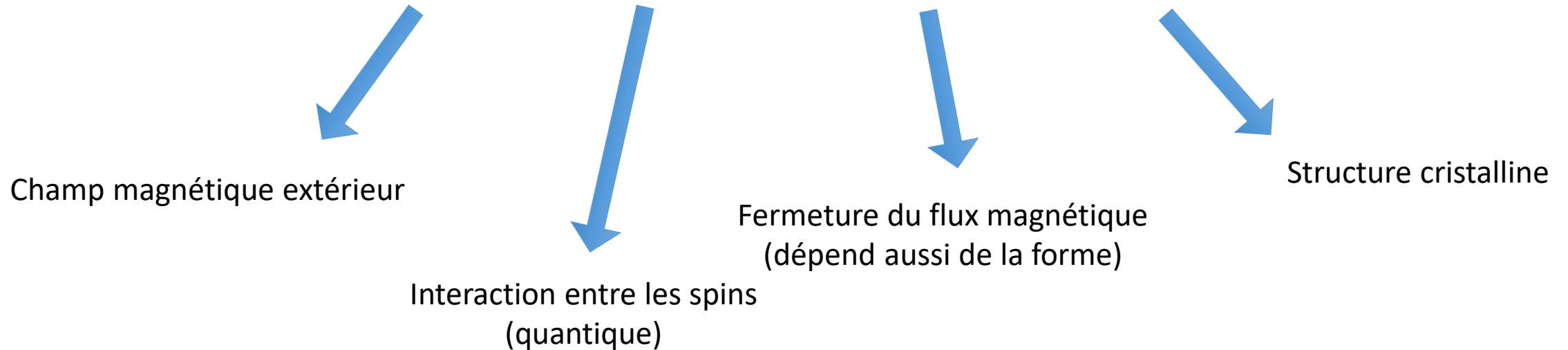
→ Conserve une partie de son aimantation lorsque l'on revient à champs nul.



$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

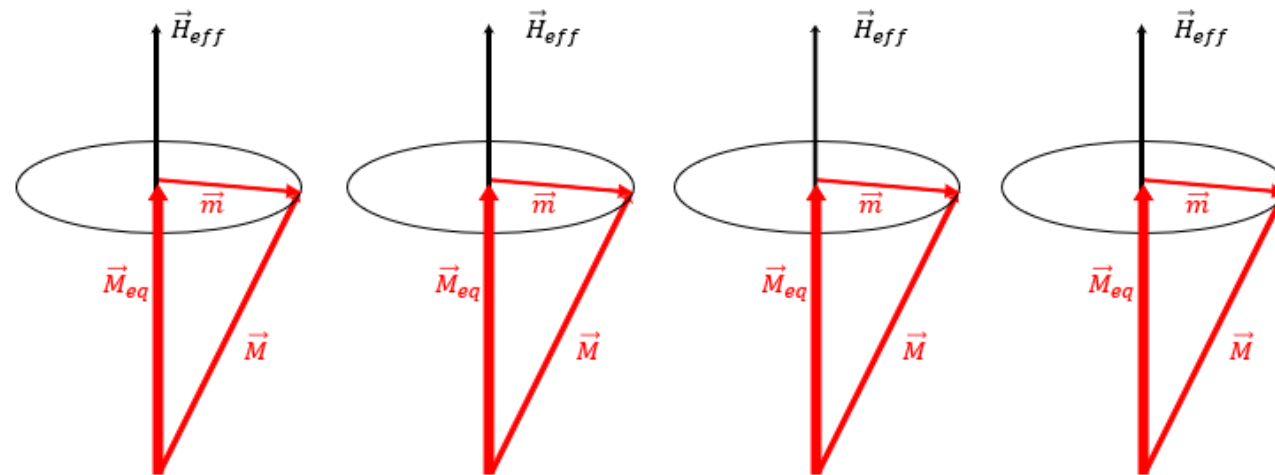
La configuration magnétique d'un matériau est donnée par la minimisation de l'énergie libre

$$E_f = E_{Zeeman} + E_{\text{échange}} + E_{\text{dipolaire}} + E_{\text{anisotropie}}$$



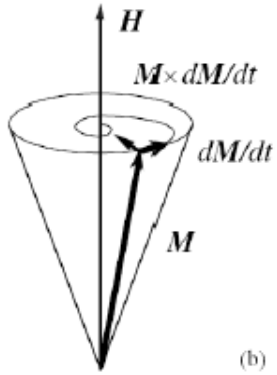
Principe de la FMR

Tous les moments magnétiques précessent en phase



En générant une oscillation dans le régime des hyperfréquences (domaine GHz), on mesure l'absorption du matériau et donc son domaine de résonance.

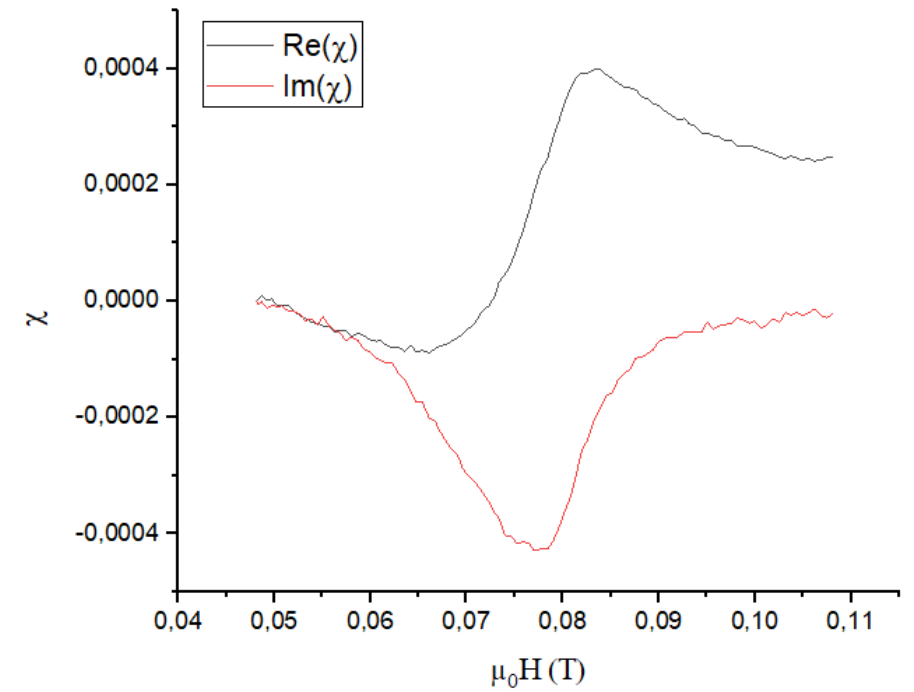
Equation du mouvement et solution



Amortissement d'une précession [4]

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \mu_0 \vec{M} \times \vec{H}_{eff} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_S} (\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t})}_{\text{Terme d'amortissement}} \quad [4]$$

Équation de Landau-Lifshitz-Gilbert



Signal de transmission d'une onde spin

Les solutions de cette équation sont semblables à celles d'un oscillateur harmonique amorti.

Fréquence de résonance en fonction du champ appliqué

$$f_{res} = \frac{\gamma}{2\pi} \mu_0 \sqrt{(H_0 + (N_x - N_z)M_S)(H_0 + (N_y - N_z)M_S)} \quad [2]$$

Formule de Kittel

f_{res} : fréquence de résonance (GHz)

μ_0 : perméabilité magnétique

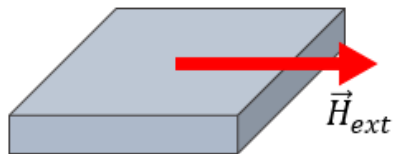
$\mu_0 H_0$: champ magnétique appliqué (T)

$\mu_0 M_S$: magnétisation de saturation (T)

N_x, N_y et N_z : facteurs de démagnétisation (dépend de la forme du matériau)

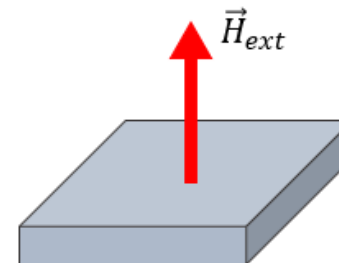
Pour une couche mince :

Champ appliqué parallèle : $N_x = N_z = 0$ et $N_y = 1$



$$f^{\parallel} = \frac{\gamma}{2\pi} \mu_0 \sqrt{H_{ext} (H_{ext} + M_{eff}^{\parallel})}$$

Champ appliqué perpendiculaire : $N_x = N_y = 0$ et $N_z = 1$

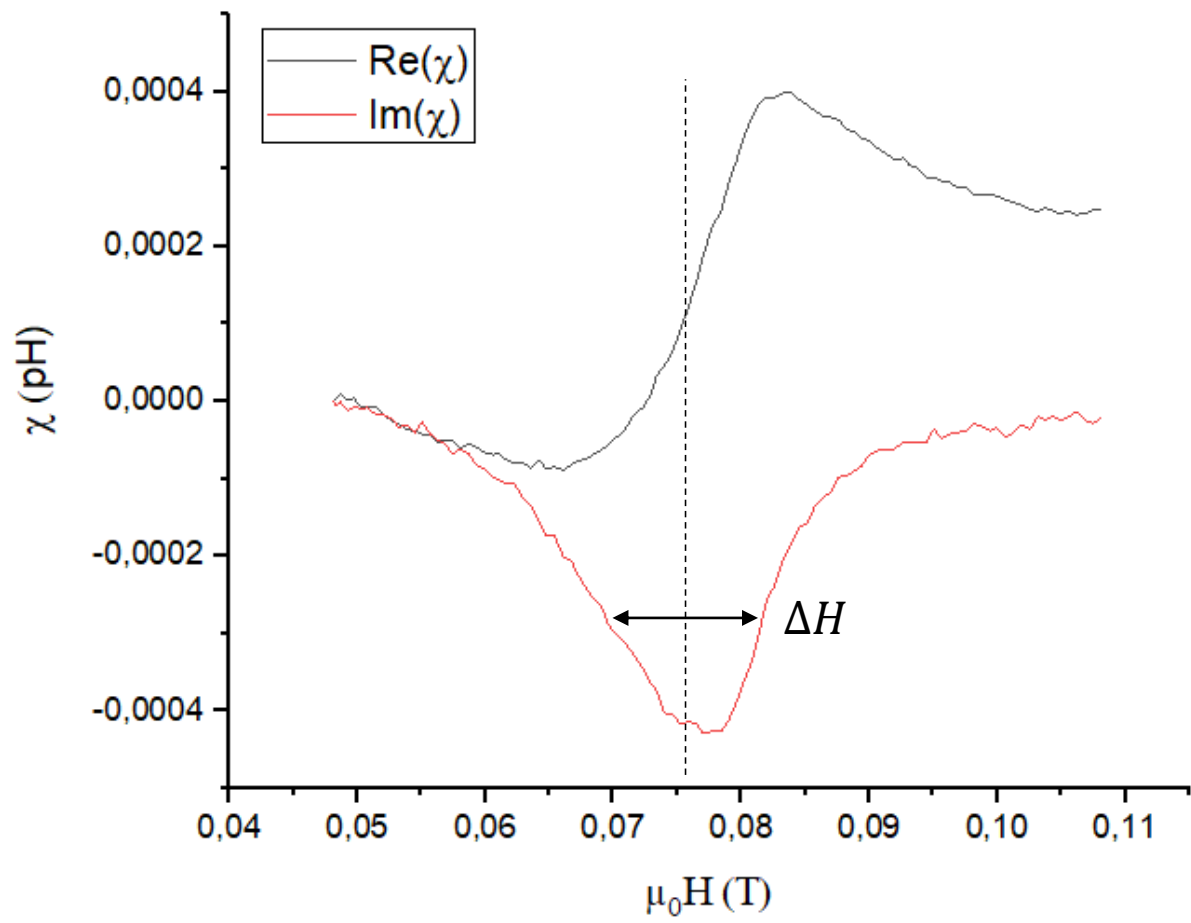


$$f^{\perp} = \frac{\gamma}{2\pi} \mu_0 [H_{ext} - M_{eff}^{\perp}]$$

Amortissement de la précession

$$\mu_0 \Delta H = \left[\frac{2\pi}{\gamma} 2 \alpha \right] f + \mu_0 \Delta H_0$$

$\mu_0 \Delta H$: Largeur à mi-hauteur (T)
 $\mu_0 \Delta H_0$: Largeur à mi-hauteur à fréquence nulle (T)
 α : facteur d'amortissement



Résonance ferromagnétique (FMR)

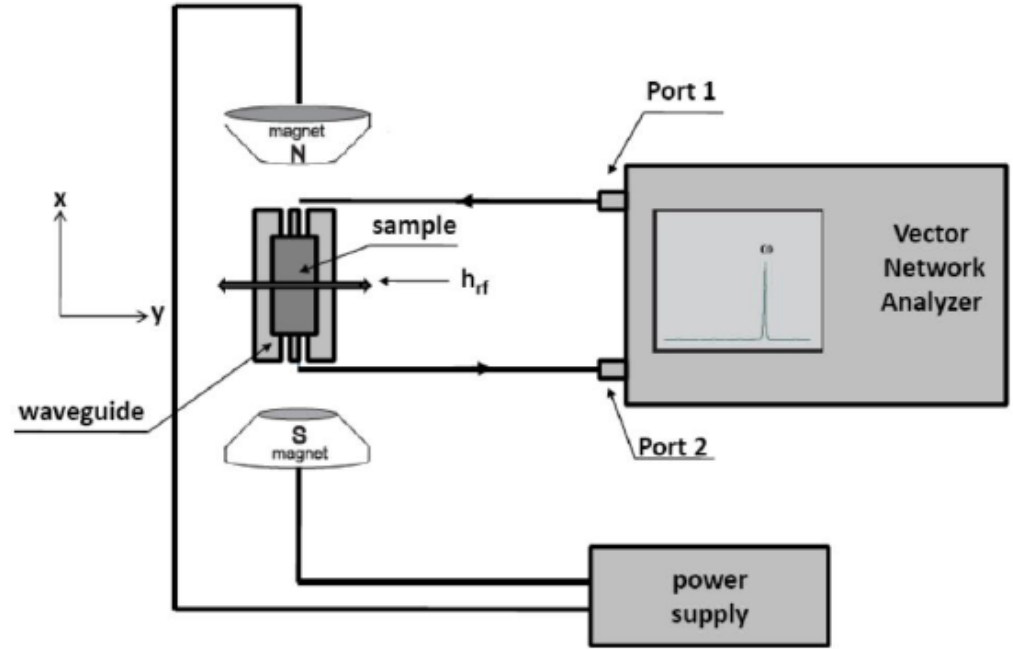
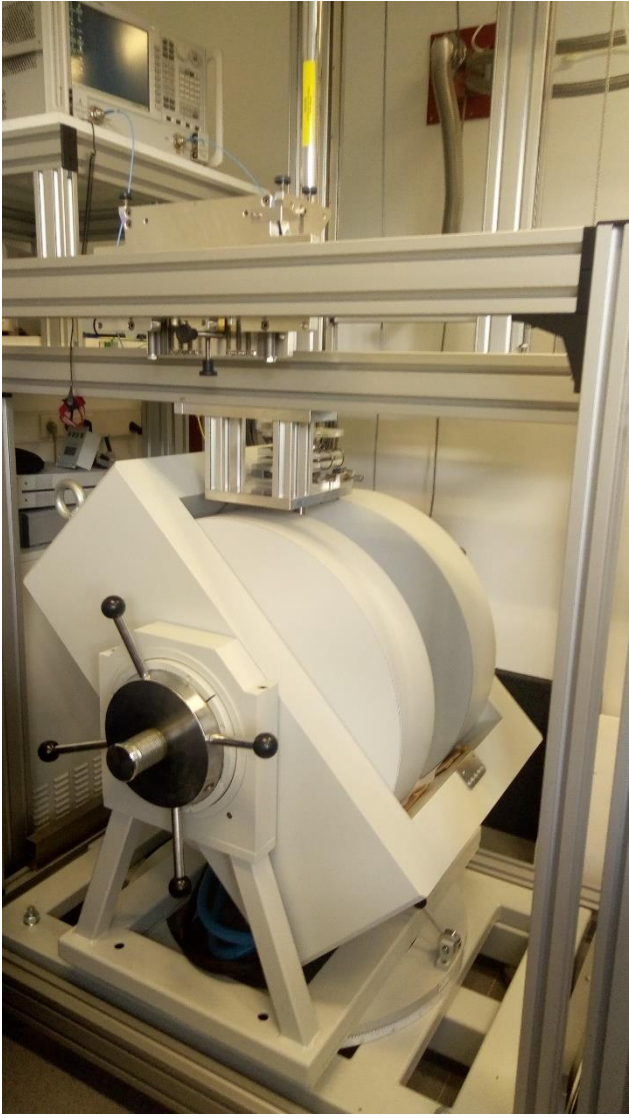
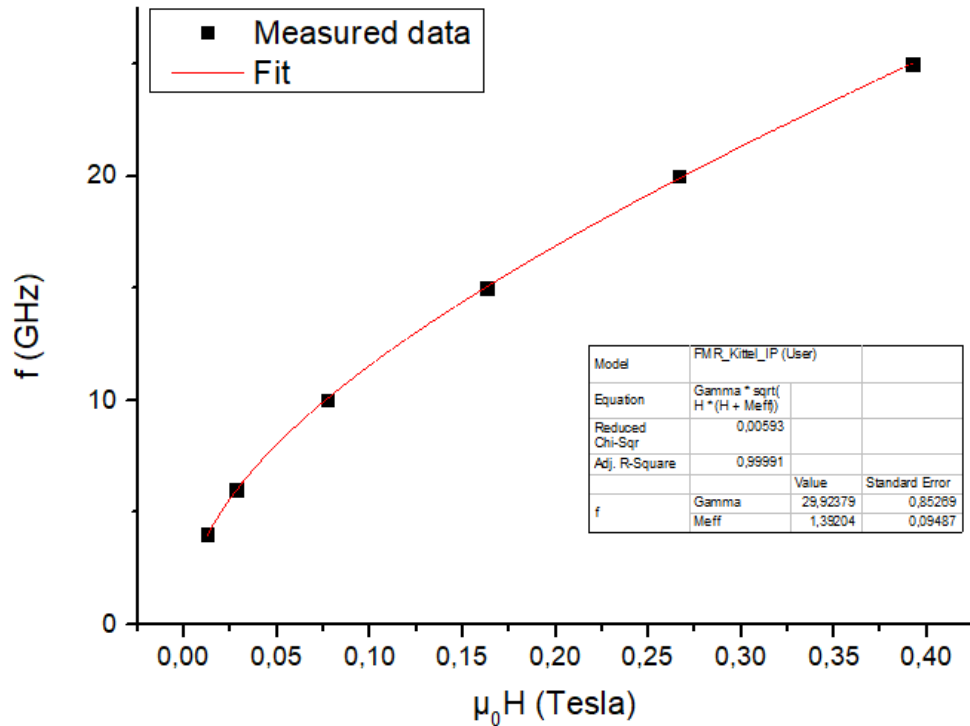


Schéma d'un montage permettant de réaliser des mesures de résonance ferromagnétique [4]

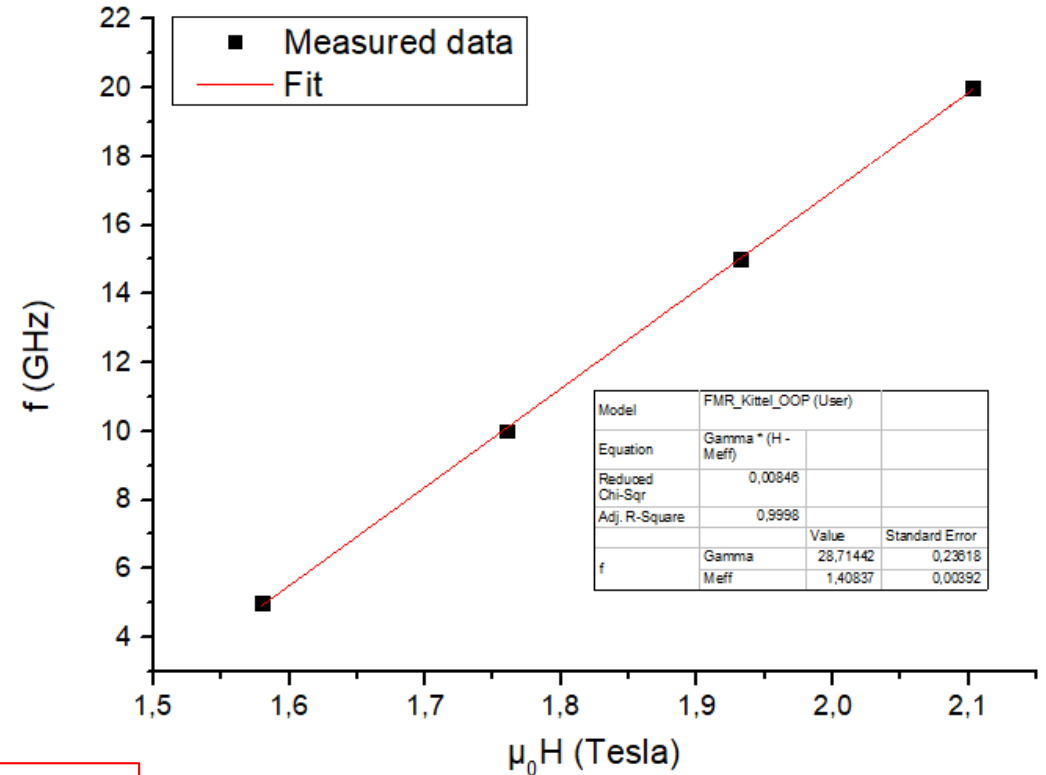


- Permet de déterminer les caractéristiques magnétiques des matériaux
- Composé d'un électro-aimant et d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA)

Mesures dans le plan :



Mesures hors du plan :



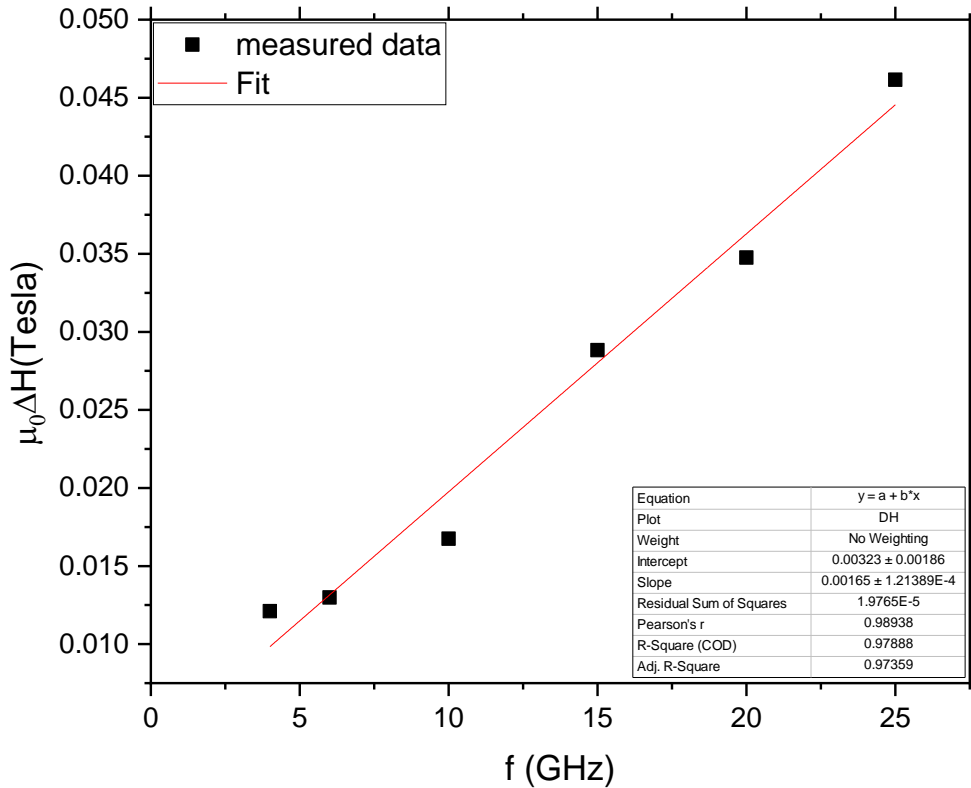
$$f^{\parallel} = \frac{\gamma}{2\pi} \mu_0 \sqrt{H_{ext} (H_{ext} + M_{eff}^{\parallel})}$$

$$\mu_0 M_{eff} = (1,40 \pm 0,09) T$$

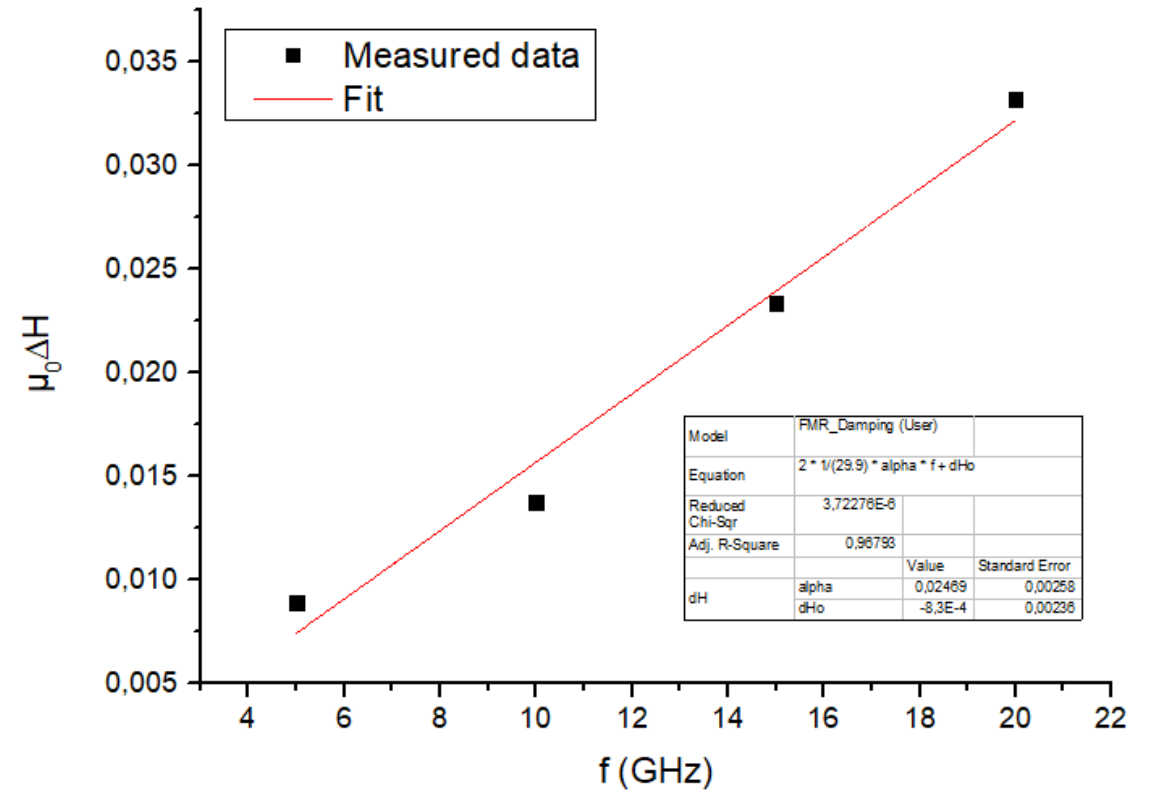
$$\frac{\gamma}{2\pi} = (29,3 \pm 0,6) \frac{GHz}{T}$$

$$f^{\perp} = \frac{\gamma}{2\pi} \mu_0 [H_{ext} - M_{eff}^{\perp}]$$

Mesures dans le plan :



Mesures hors du plan :

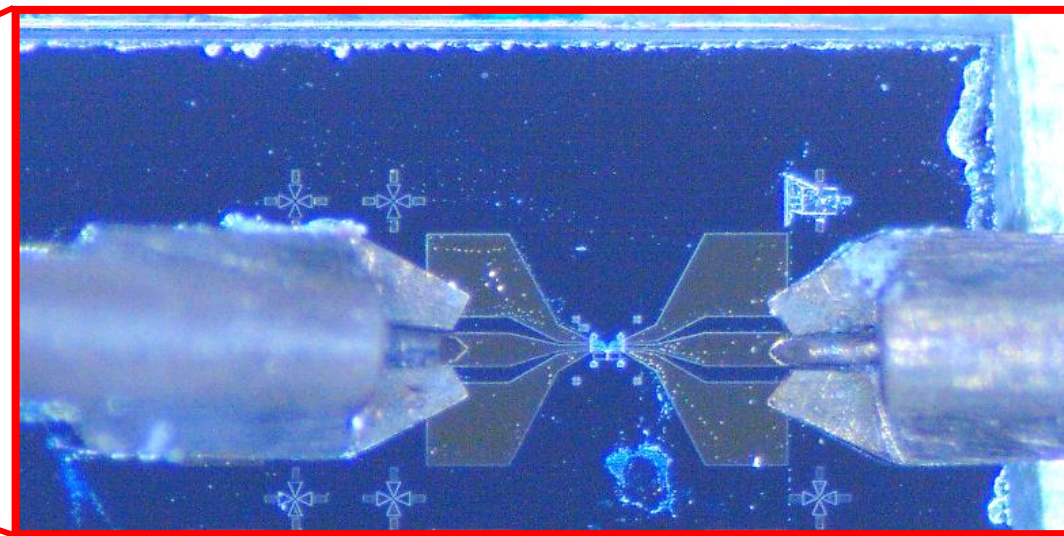
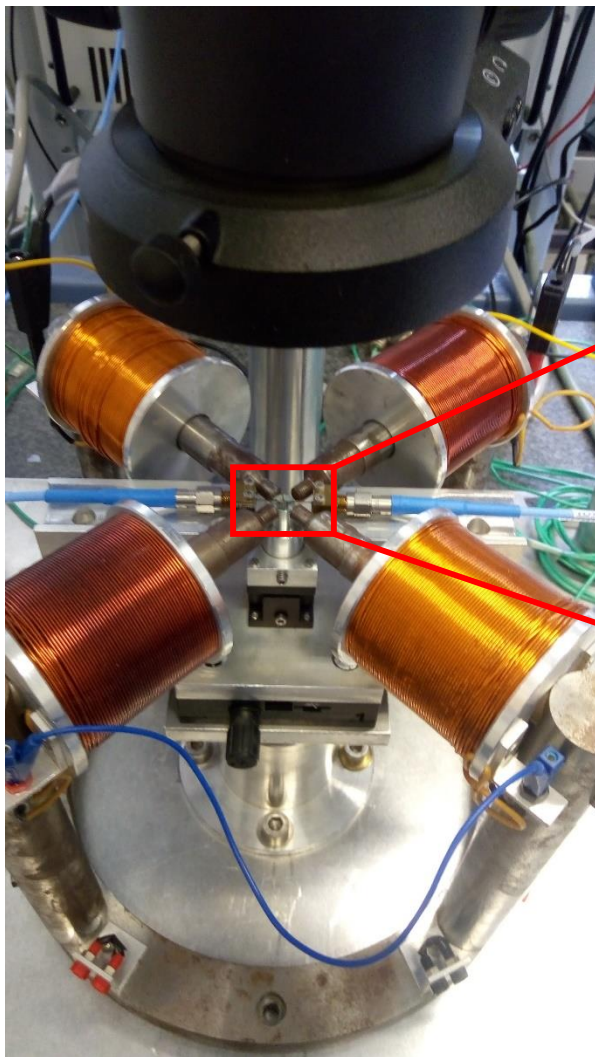


$$\mu_0 \Delta H = \left[\frac{2\pi}{\gamma} 2 \alpha \right] f + \mu_0 \Delta H_0$$

$$\alpha = (2,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$$

$$\mu_0 \Delta H_0 = (0,002 \pm 0,002) T$$

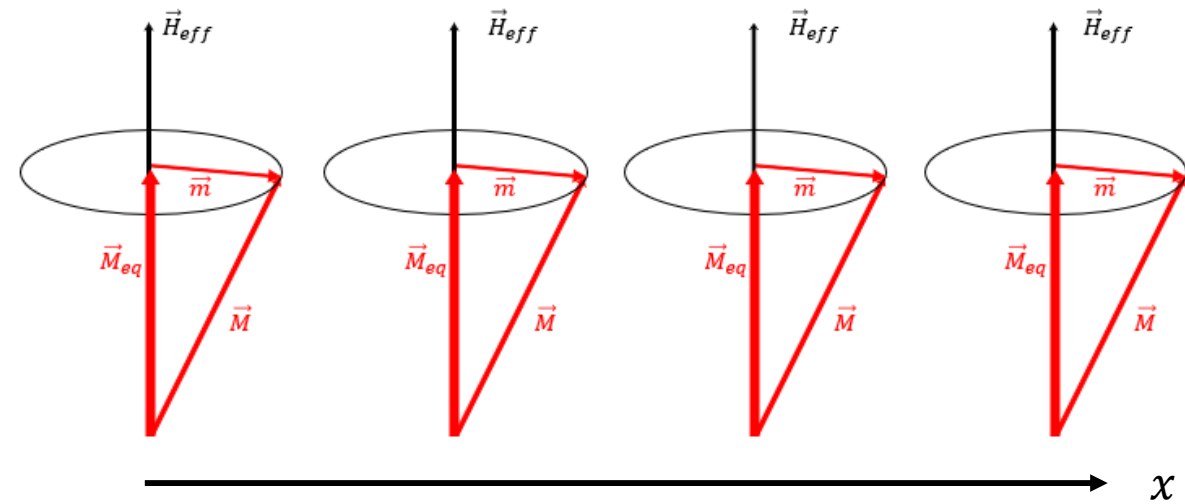
Spectroscopie d'onde de spin



\vec{H}_0

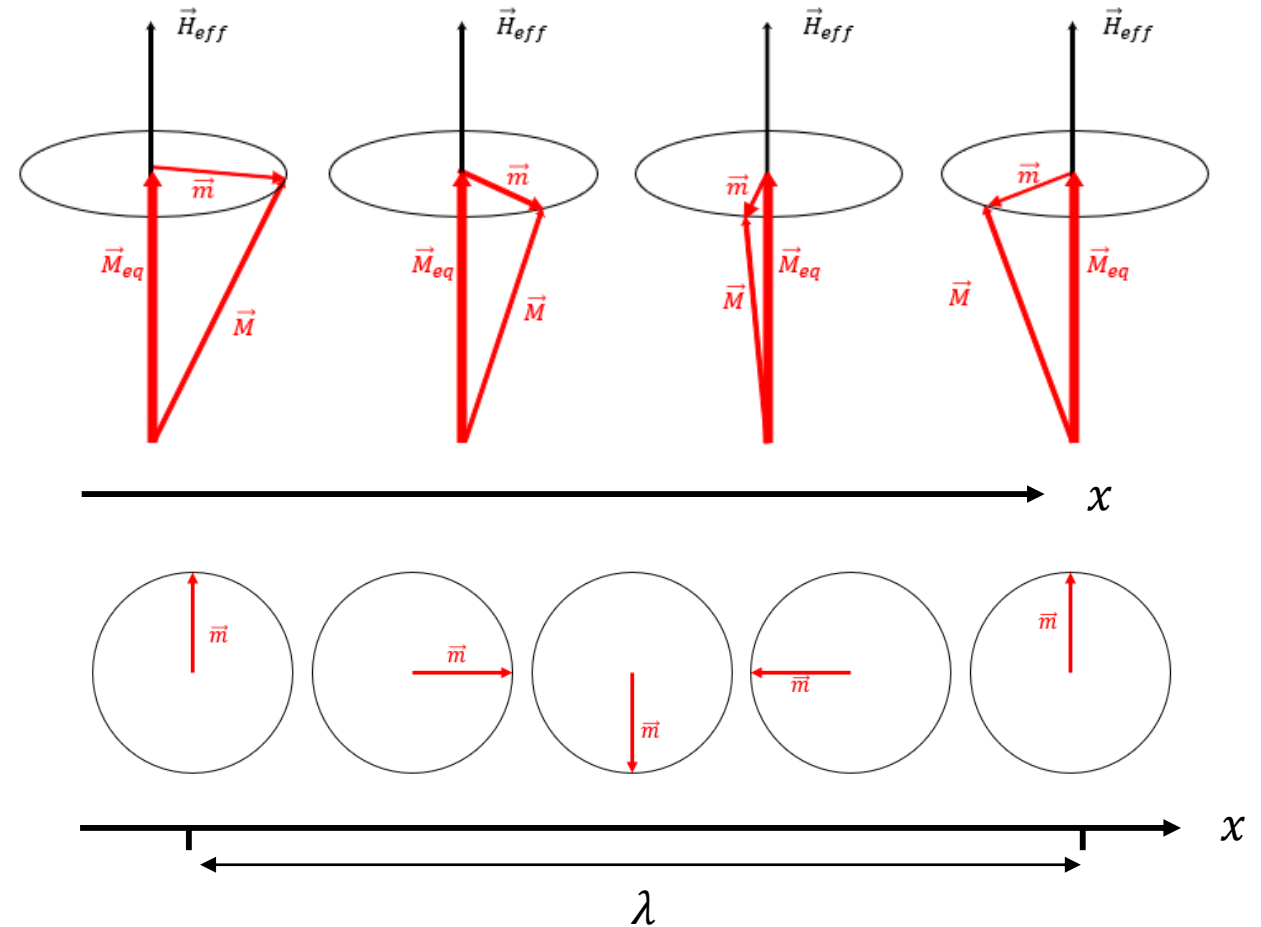
Onde de spin

Résonance ferromagnétique : $k = 0$

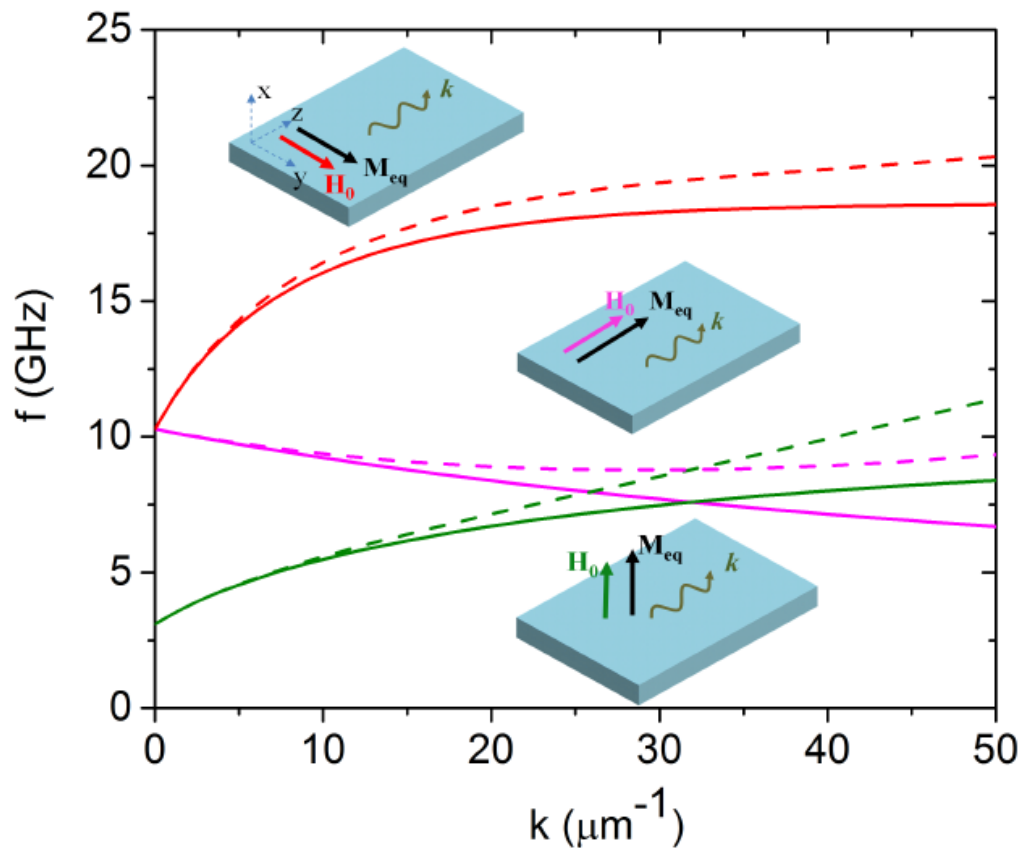


$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Onde de spin : $k \neq 0$



Relation de dispersion des ondes de spin



Relation de dispersion théorique pour un champ de 100 mT, une aimantation de saturation de 1T et une épaisseur de 50 nm [1]

Magnetostatic Surface Wave (MSSW) :

[1]

$$\omega^2 = \omega_H [\omega_H + \omega_M] + \frac{\omega_M^2}{4} (1 - e^{-2kt})$$

Magnetostatic Backward Volume Wave (MSBVW) :

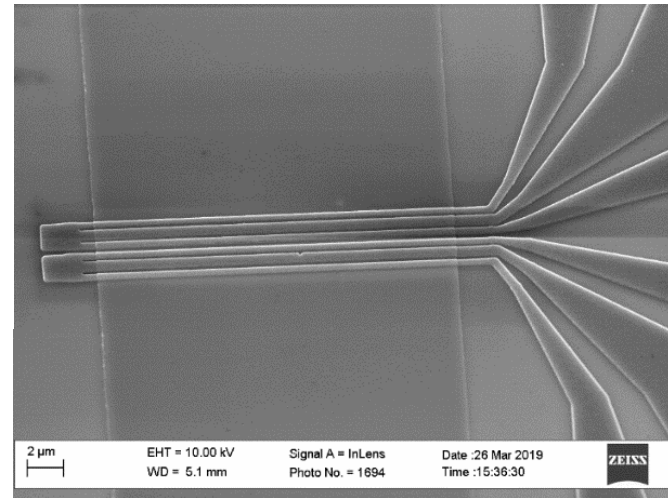
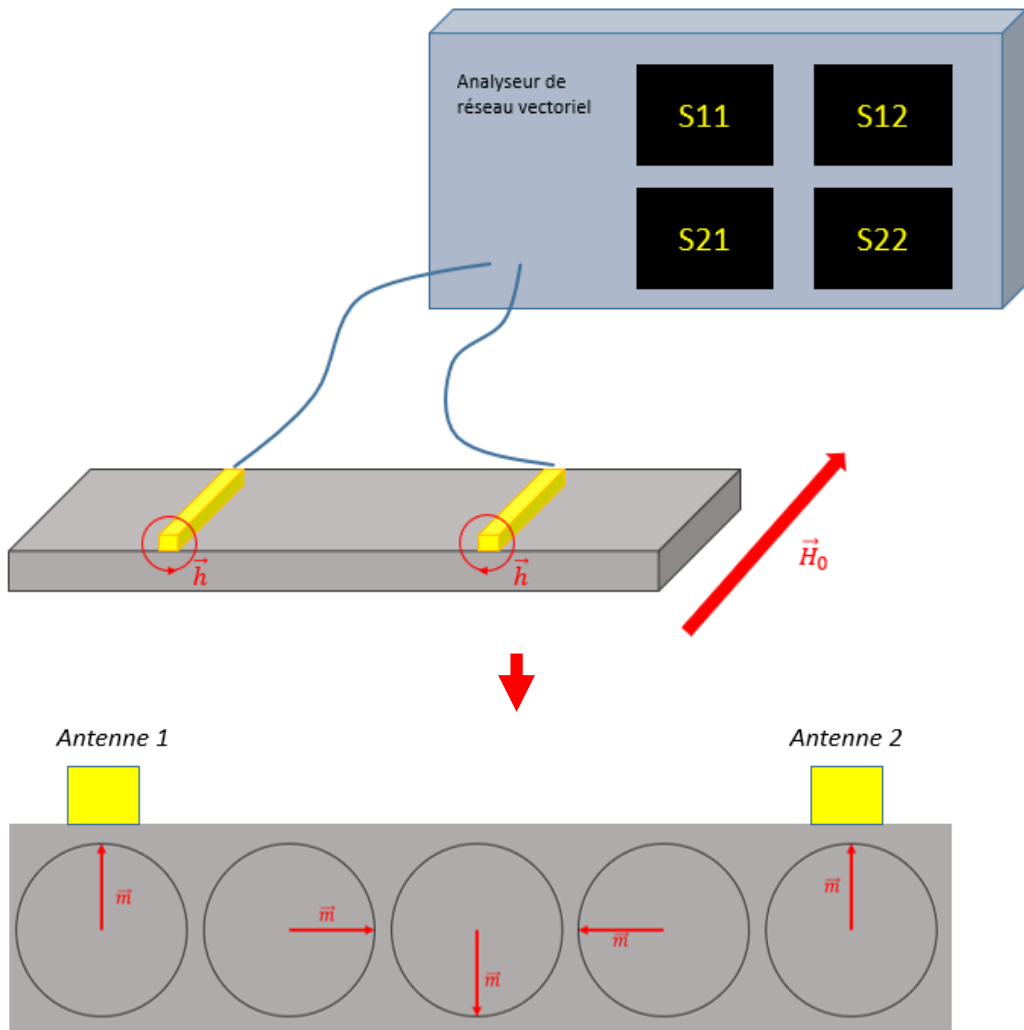
$$\omega^2 = \omega_H \left[\omega_H + \omega_M \left(\frac{1 - e^{-2kt}}{kt} \right) \right]$$

Magnetostatic Forward Volume Wave (MSFVW) :

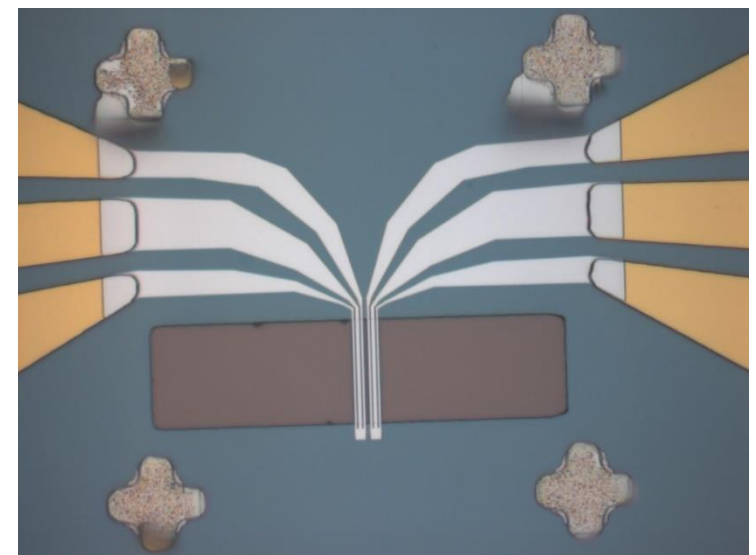
$$\omega^2 = \omega_H \left[\omega_H + \omega_M \left(1 - \frac{1 - e^{-2kt}}{kt} \right) \right]$$

t : épaisseur du matériau

Principe de mesure d'une onde de spin

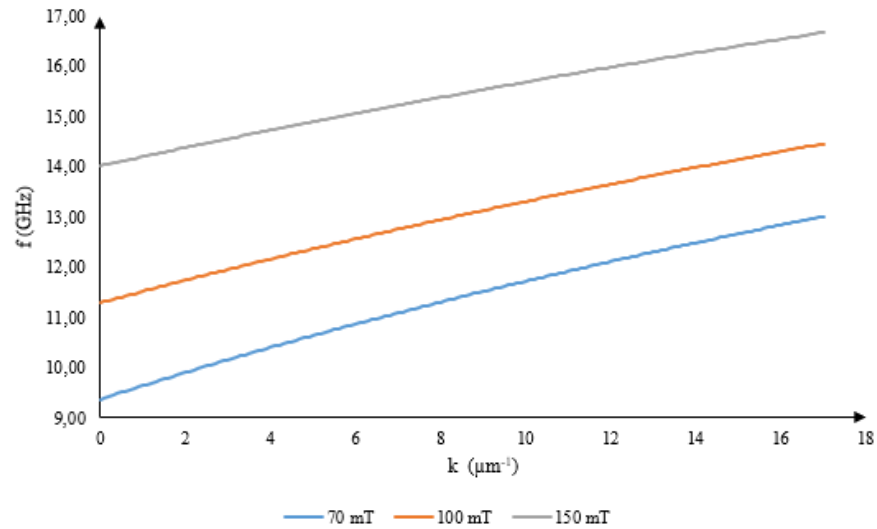
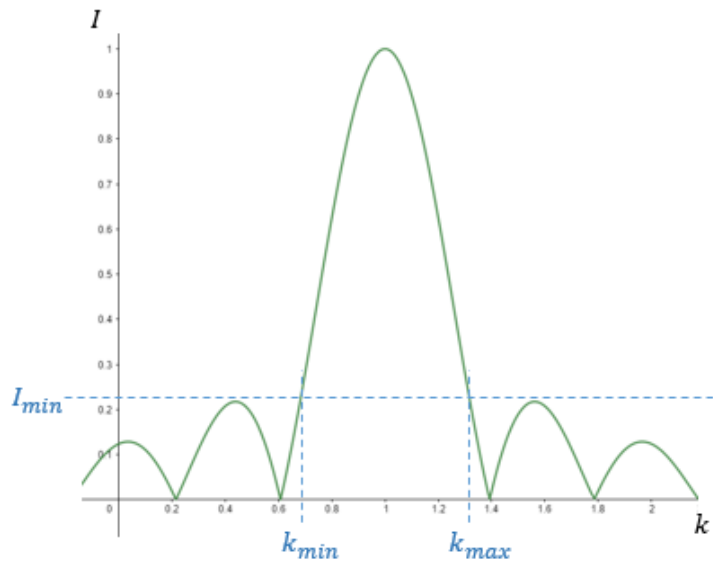
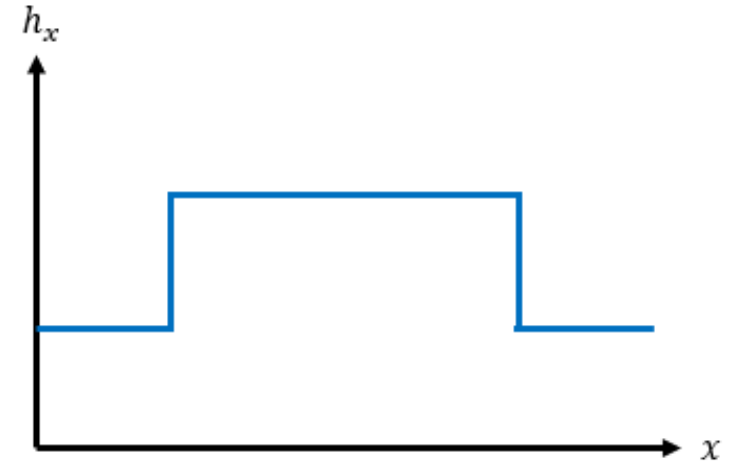
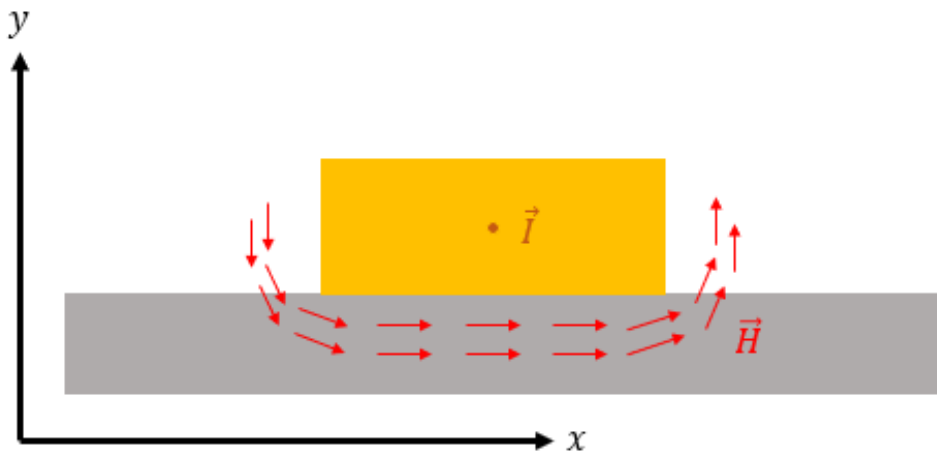


Antennes de mesures vues par un microscope électronique



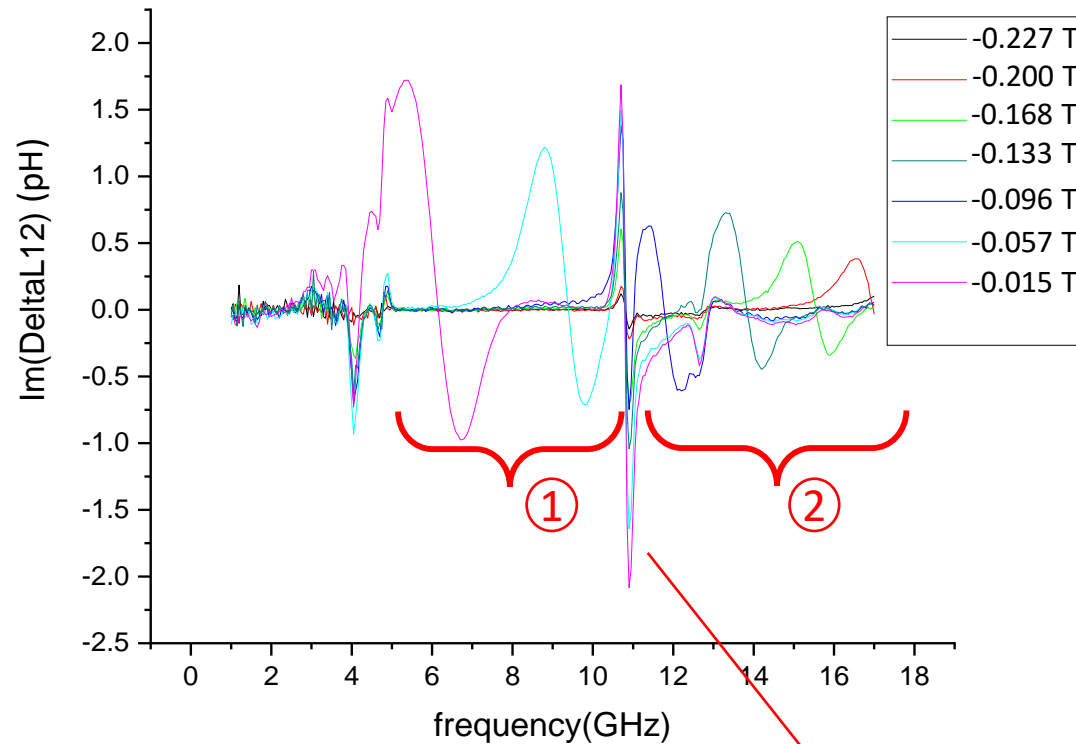
Antennes de mesures vues par un microscope optique

Principe de mesure d'une onde de spin

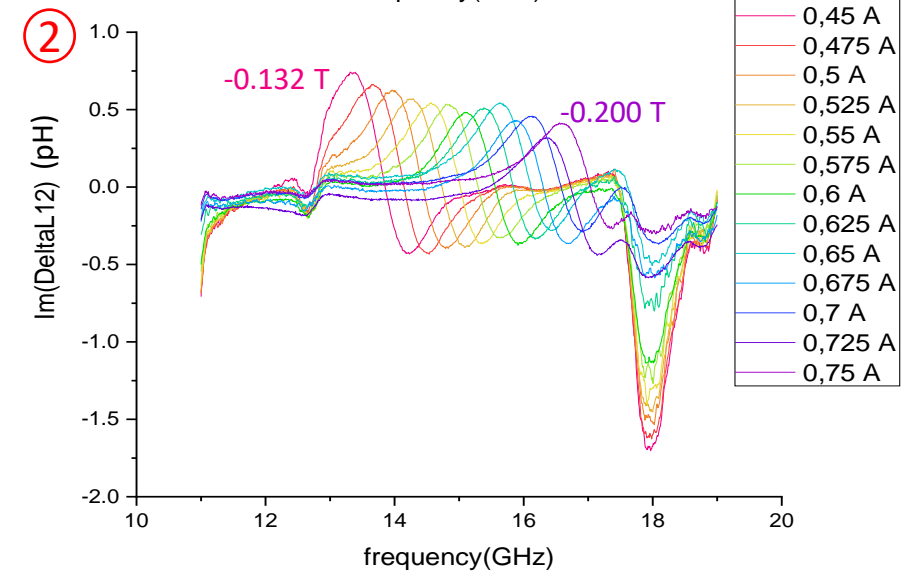
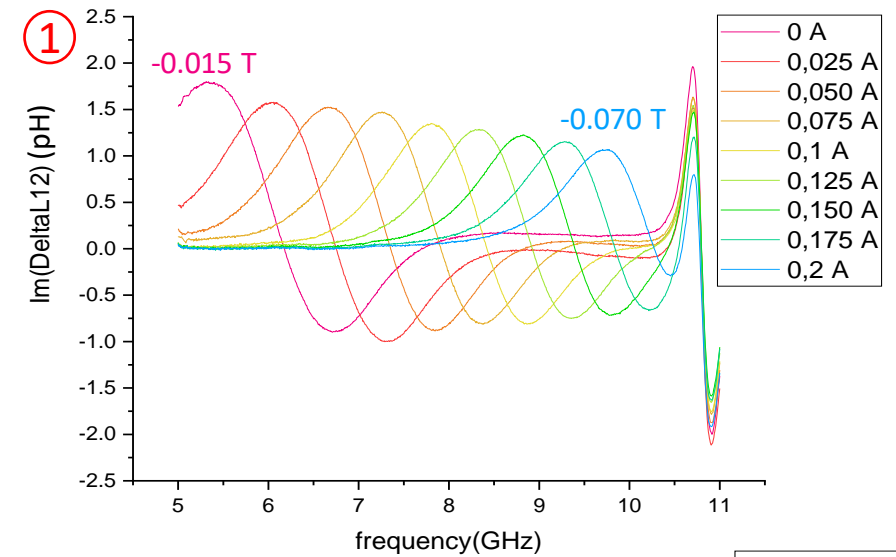


Pour notre antenne :
 $k = 3,5 \text{ rad. } \mu\text{m}^{-1}$

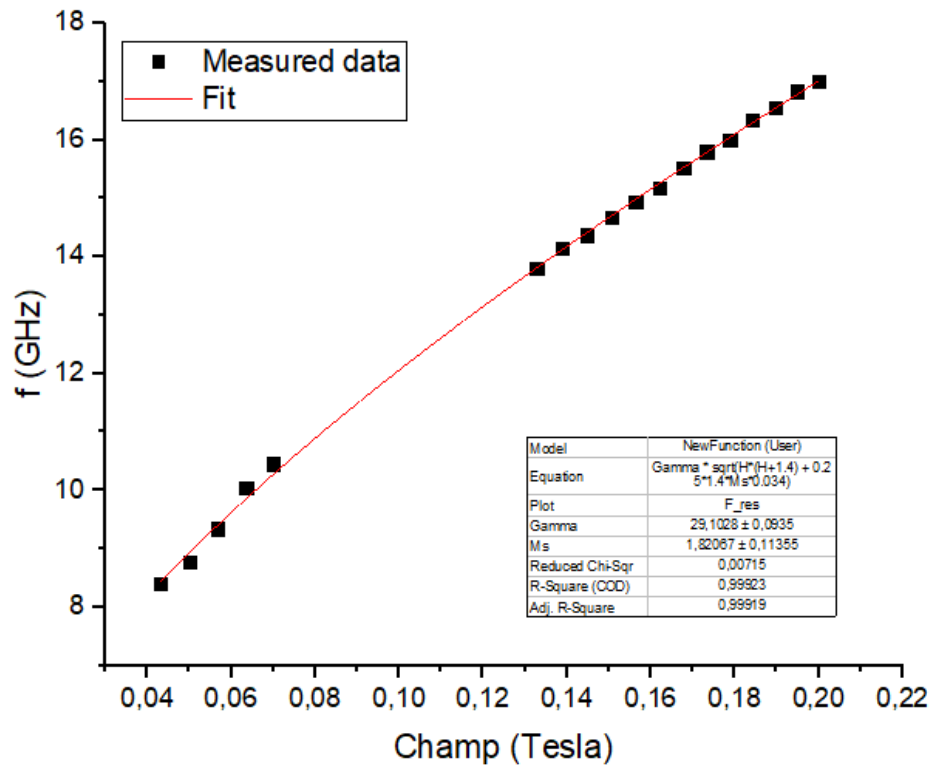
Mesure d'une onde de spin à différentes valeur de champ



Effet de résonance intrinsèque au montage expérimentale



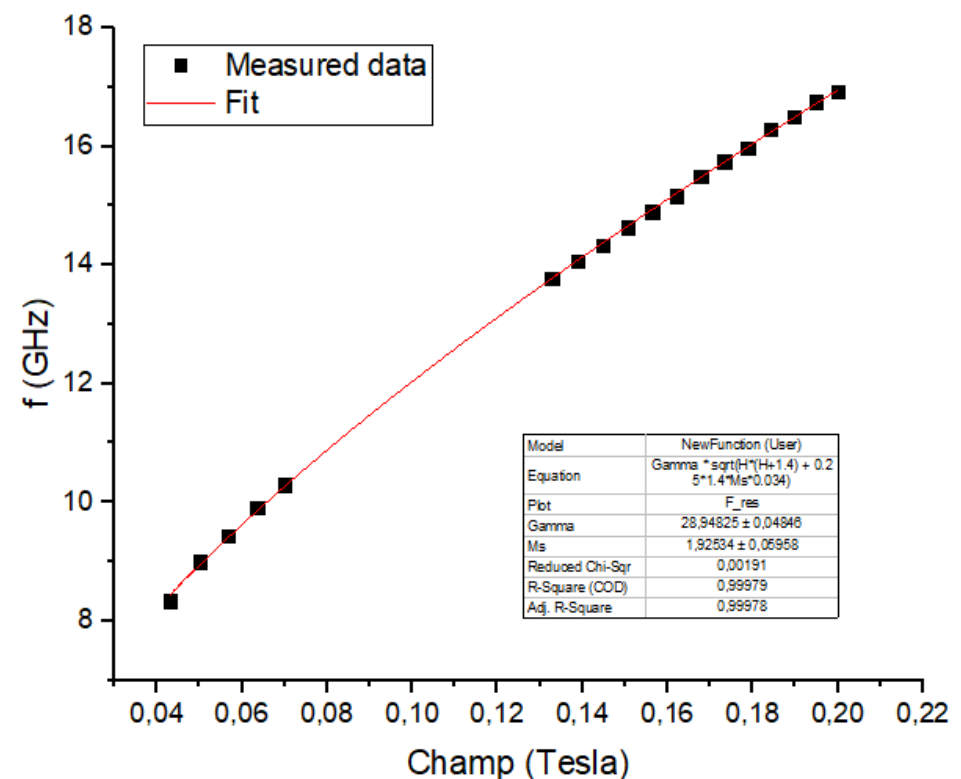
Antenne 1 :



$$\mu_0 M_S = (1,87 \pm 0,06) T$$

$$\frac{\gamma}{2\pi} = (29,0 \pm 0,2) \frac{GHz}{T}$$

Antenne 2 :



Valeur théorique :

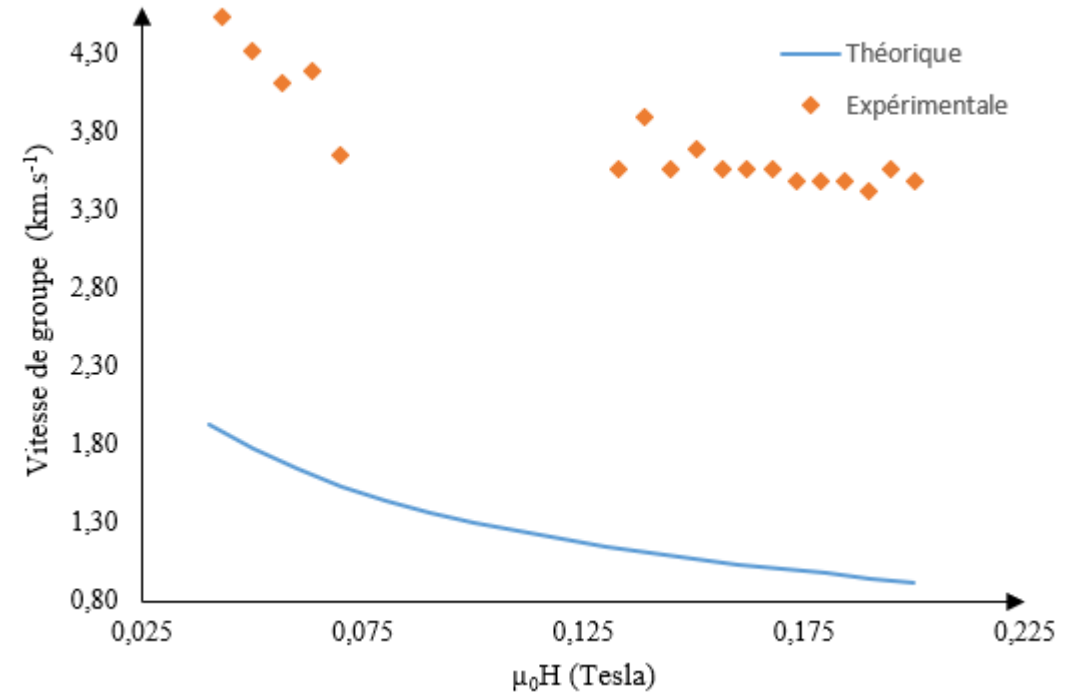
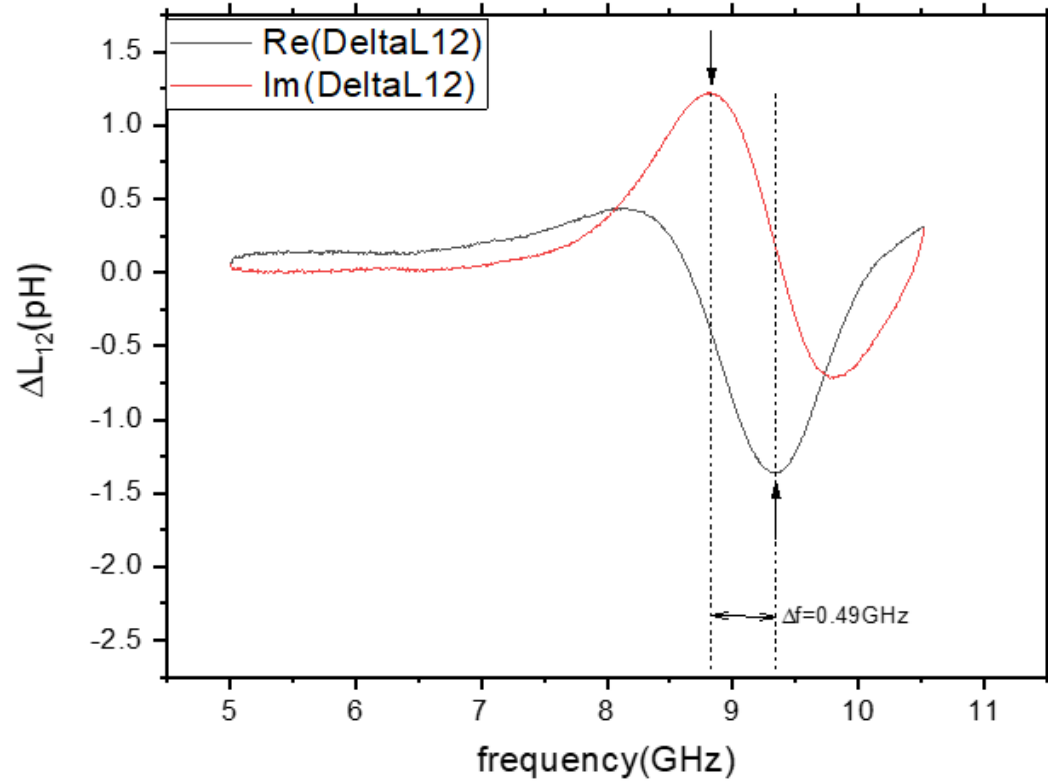
$$\mu_0 M_S = 1,82 T \quad [7]$$

Valeur mesurée FMR :

$$\frac{\gamma}{2\pi} = (29,3 \pm 0,6) \frac{GHz}{T}$$

Vitesse de groupe des ondes de spin

Vitesse de groupe :



$$\omega^2 = \omega_H(\omega_H + \omega_{eff}) + \frac{\omega_{eff}\omega_M}{4}(1 - e^{-2kt})$$

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{\omega_{eff}\omega_M}{4\omega} t e^{-2kt} \quad [1]$$

$$T_{propagation} = \frac{1}{4\Delta f} \quad v_g = \frac{d}{T_{propagation}}$$

d : distance entre les deux antennes (2,1 μm)

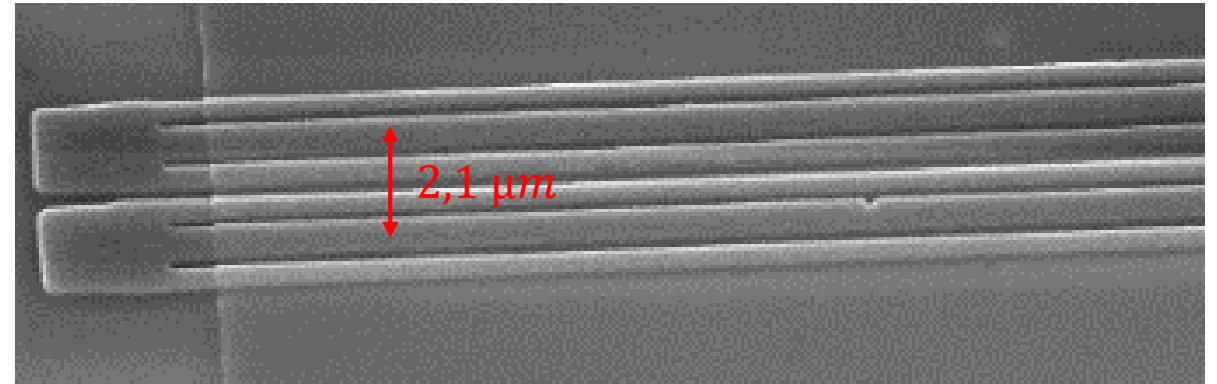
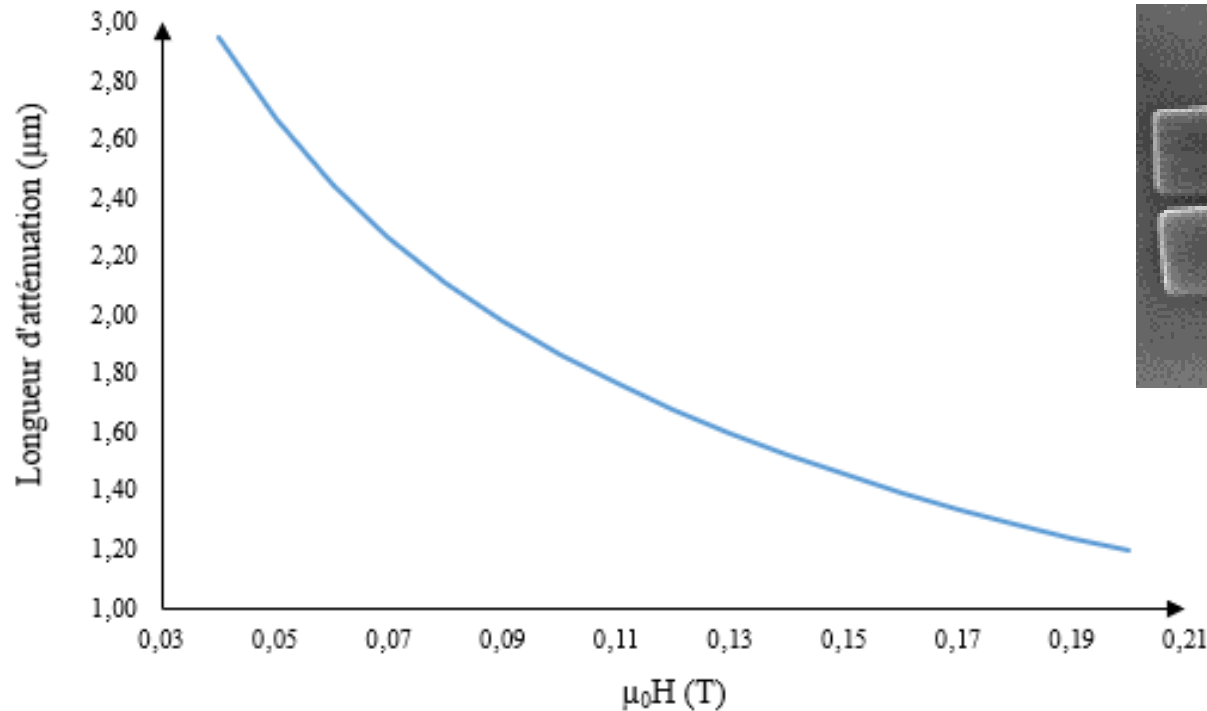
Longueur de relaxation

Temps de relaxation :

$$\frac{1}{T_{rel}} = \alpha \gamma \mu_0 \left(H_0 + \frac{M_S}{2} \right) \quad [1]$$

Longueur d'atténuation :

$$L_{att} = V_{groupe} T_{rel}$$



Environ la même taille que la distance qui sépare les antennes !!

Interaction Dzyaloshinskii-Moriya d'interface

Energie de l'interaction DM :

$$E_{DM} = -\vec{D} \cdot (\vec{S}_i \times \vec{S}_j)$$

Energie d'échange :

$$E_{éch} = -J (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j)$$

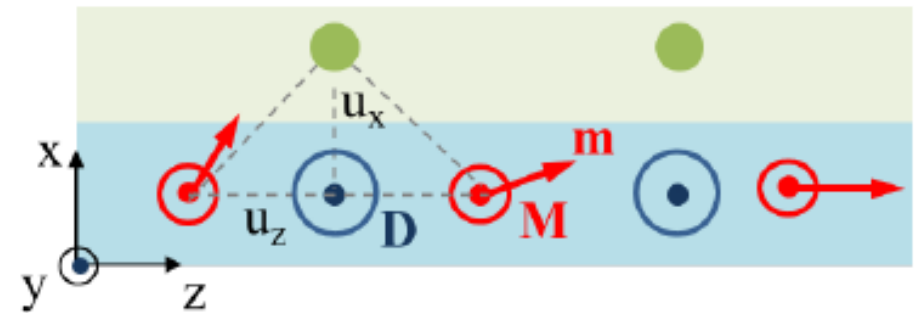


Schéma d'une interaction Dzyaloshinskii-Moriya à l'interface entre un ferromagnétique et un métal lourd [1]

- Observé expérimentalement comme une brisure de symétrie
- Correction du terme d'échange
- Perturbation du couplage des 2 moments atomiques
- A l'interface entre un milieu ferromagnétique et un métal lourd

Mesure de l'interaction Dzyaloshinskii-Moriya

$\mu_0 H$ (mT)	f_{NR} (MHz)
43,2	45
50	30
56,8	30
63,5	28
70,1	28

$$f_{NR} = \Delta f = \frac{2\gamma D_s}{\pi M_s t} k \quad [1]$$

Moyenne : $f_{NR} = 32 \text{ MHz}$

DMI faible :

$$D_s = 0,25 \frac{\text{pJ}}{\text{m}} \quad [1]$$

$$D_s = 0,52 \frac{\text{pJ}}{\text{m}}$$

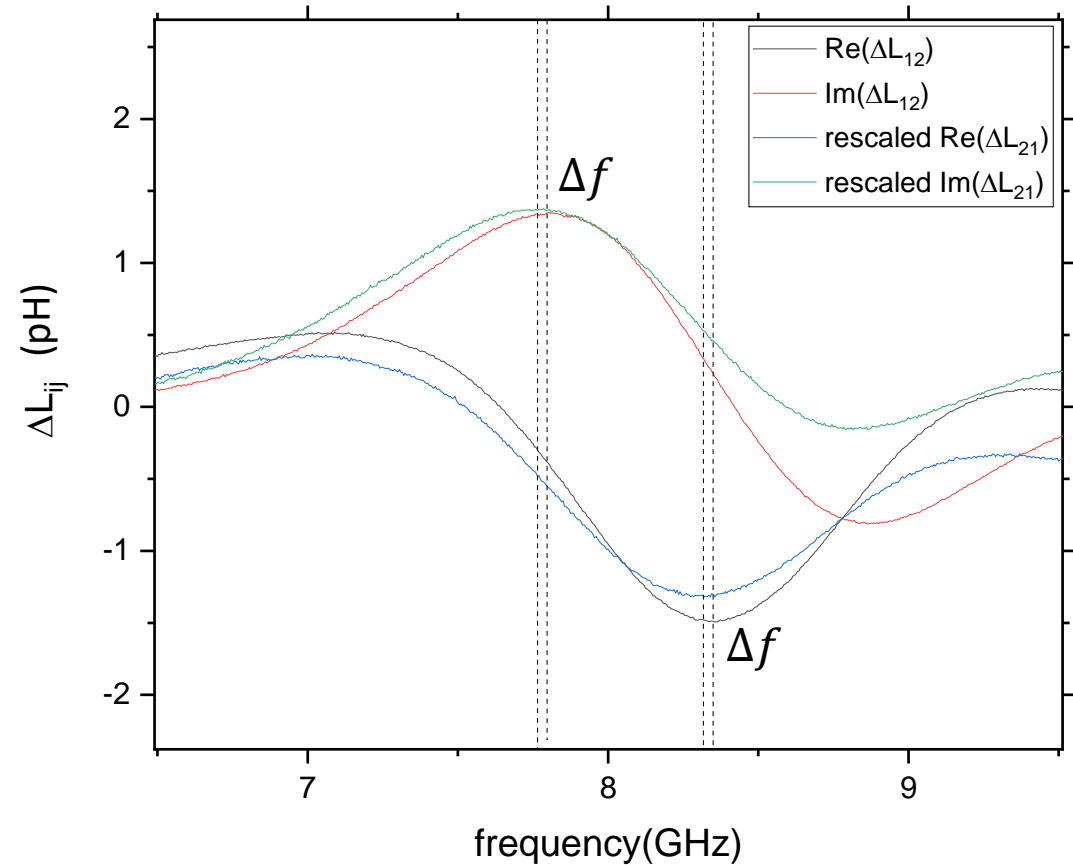
DMI fort :

$$D_s = 1,7 \frac{\text{pJ}}{\text{m}} \quad [7]$$

Pt/Pt

Ru(5nm)/Co(5nm)/Pt(5nm)

Pt/Co/ AlO_x



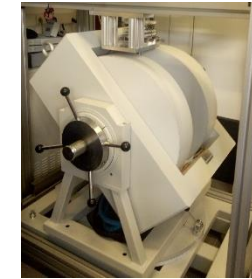
Transmission d'une onde de spin de l'antenne 1 vers l'antenne 2 et de l'antenne 2 vers l'antenne 1

Résumé :

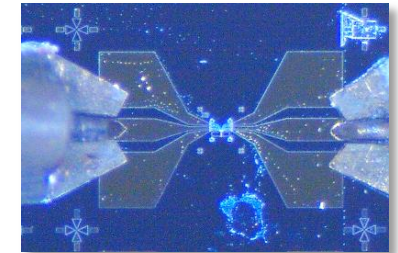
- Détermination des caractéristiques magnétiques
- Etude des ondes de spin dans le matériau



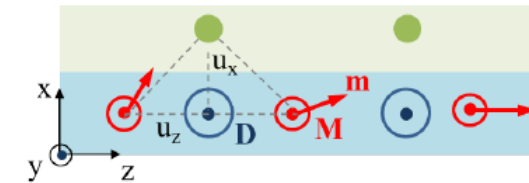
Etude FMR



Spectroscopie d'onde spin



Observation d'un effet de type Dzyaloshinskii-Moriya



Application : [6]

- Remplacer les courants d'électrons par des ondes de spins



Pas d'effet joule



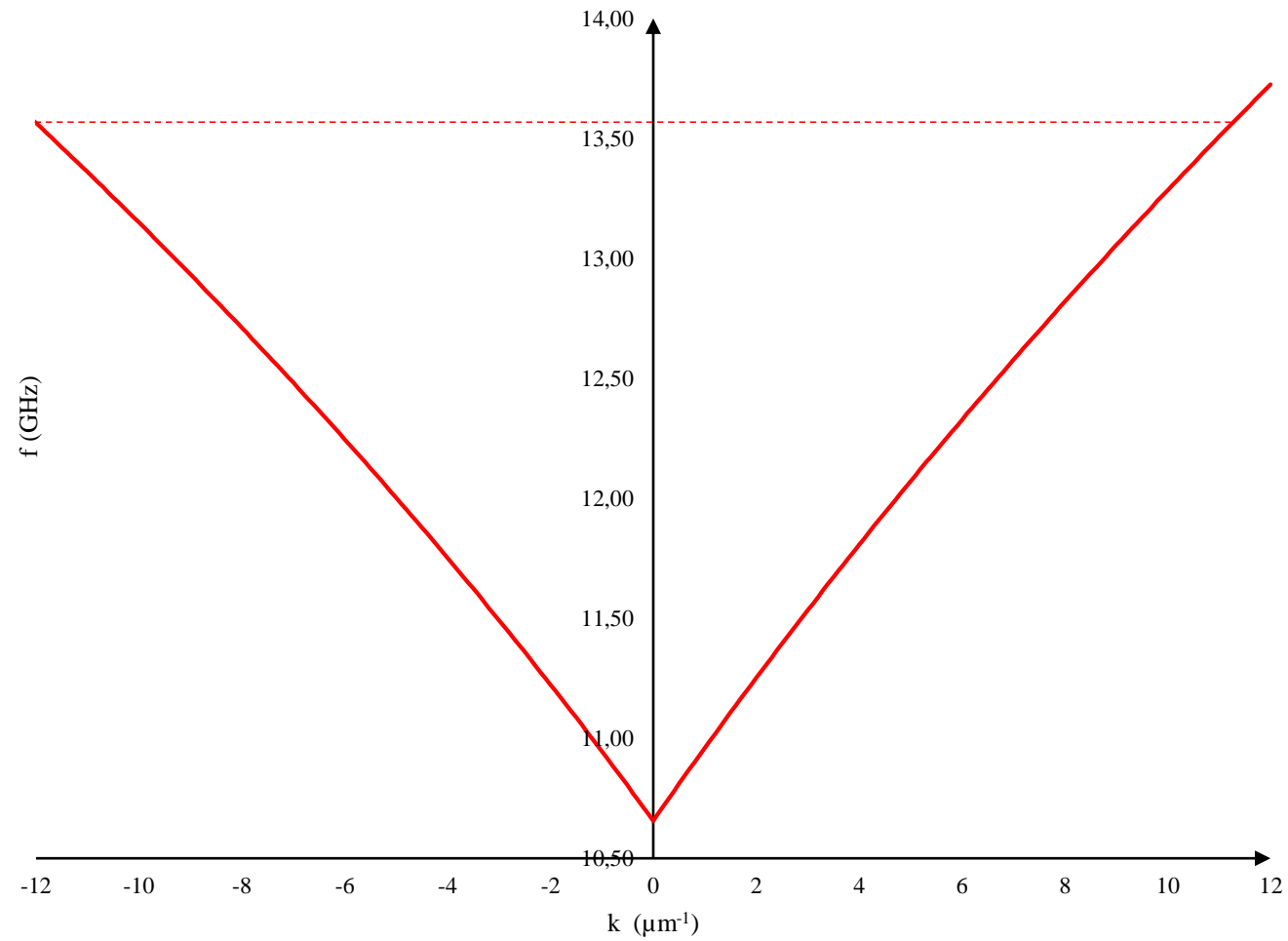
Réduction de la taille des systèmes

- [1] O. Gladii, Spin wave propagation and its modification by an electrical current in Py/Al₂O₃, Py/Pt and Fe/MgO films, Ecole doctorale de physique et chimie-physique, 2016
- [2] C. Kittel. Ferromagnetic resonance. J. Phys. Radium, 1951, 12 (3), pp.291-302.
- [3] François Alouges, Introduction à la théorie du micromagnétisme, juin 2009
- [4] Magnetization Dynamics in Magnetic and Superconducting Nanostructures. Juan Francisco Sierra García. October, 2008.
- [5] Alexandre Lopez. Étude de la dynamique de paroi de domaine magnétique dans des matériaux à fort couplage spin orbite
- [6] Chumak et al., Magnon spintronics, Nature Physics, published online 2 june 2015
- [7] David R. Lide, ed.,CRC Handbook of Chemistry and Physics, Internet Version 2005

Référence intéressante :

Spin wave, Theory and applications, Stancil, Springer, 2009

Relation de dispersion non réciproque



Relation de dispersion non réciproque

