

Rapport de projet S5

Département micro-ondes de Télécom-Bretagne

**Etude d'un filtre configurable basé sur l'utilisation
de matériaux issus de la spintronic**

RÉDIGÉ PAR RODOLPHE JEUNEHOMME
SOUS LA DIRECTION DE VINCENT CASTEL
Télécom-Bretagne, Novembre 2016 à Mars 2017

Résumé - Executive summary

Français
English

Table des matières

Résumé - Executive summary

Français	5
English	5

I

Introduction

La technologie Spintronic	13
Le matériau magnétique Yttrium Iron Garnet	14

II

Le filtre configurable en fréquences

1 Etude des résonateurs <i>Elliptika</i>	19
1.1 Les résonateurs de type <i>Openloop</i>	19
Le résonateur Openloop res04_3GHz	20

2	Etude du couplage de résonnance électrique et magnétique	21
2.1	Le banc de mesures utilisé	21
2.2	Mesure de la résonance électrique du filtre à simple STUB	22
2.3	La résonance magnétique de l'Yttrium Iron Garnet	24
2.4	Le couplage des résonances électrique et magnétique	24
2.4.1	Mise en évidence du couplage de résonance	24
2.4.2	Balayage en champs et en fréquences	25
2.4.3	Utilisation du modèle de couplage harmonique	26
2.4.4	Détermination du champs magnétique résonant	27
3	Etude du contrôle des pertes magnétiques dans le YIG .	29
3.1	Temps de stabilisation des paramètres S du filtre configurable	29
3.2	Balayage en courant et en fréquences	30
3.3	Correspondance des valeurs de S21 en champs et en courant	31
3.4	Détermination du coefficient de couplage	32
4	Etude de la détection de la tension DC en bout de chaîne	35
4.1	Mesures à champs nul	35
4.2	Mesures à champs magnétique positif	35
4.3	Mesures à champs magnétique négatif	36
4.4	Interprétation des résultats de mesures de la tension DC	36
5	Influence du courant injecté dans le platine	39
5.1	Courbe d'hystéresis	39
5.2	Impédance - Rapport courant/tension	40
5.3	Contribution en champs magnétique du courant injecté dans le platine 40	
5.3.1	La composante Hx parallèle à l'élément platine	40
5.3.2	La composante Hy perpendiculaire à l'élément platine	41
5.3.3	Interprétation de la contribution du courant injecté sur les valeurs en champs magnétique	41

IV

Conclusion

Annexes

Bibliographie

Glossaire



Introduction

Le département micro-ondes de Télécom-Bretagne souhaite concevoir un filtre à largeur de bande configurable. Ce filtre est une application des concepts de spintronique et d'objets communicants.

En 2010, une équipe de recherche japonaise a publié un article¹ détaillant la transmission d'un signal électrique dans un isolant. Ce nouveau concept de transmission de signal est une application du concept de spintronique dans les matériaux magnétiques isolant électriquement. De nombreux travaux de recherches ont émergé suite à la mise en évidence de cette preuve de concept et ont permis de faire progresser l'état de l'art.

Dans le cadre de ce projet, le filtre configurable sera constitué d'un résonateur et d'une structure hybride à base d'un matériau magnétique isolant électriquement, l'Yttrium Iron Garnet (YIG) et d'un métal normal, le platine (Pt). L'application d'un champ magnétique statique sur le dispositif permettra de changer les propriétés résonantes du filtre.

Les objectifs de ce projet sont :

- La conception d'un prototype de filtre configurable fonctionnant à l'air libre et à température ambiante (la conception d'un filtre à largeur de bande configurable a déjà été étudiée par une équipe scientifique en 2015² au sein d'une cavité résonnante).
- L'étude de l'interaction magnon-photon en utilisant l'association YIG/Pt (couplage des résonances électrique du filtre et magnétique du YIG).
- Le contrôle des pertes magnétiques dans le YIG avec la mise en jeu des phénomènes de *Spin Hall Effect* (SHE) et de *Spin Transfer Torque* (STT).
- La détection d'un courant de spin grâce aux phénomènes physiques réciproques au SHE et au STT que sont les phénomènes de *Spin Pumping* (SP) et de *Inverse Spin Hall Effect* (ISHE). La présence d'un tel courant sera mis en évidence par la détection d'une tension DC aux bornes du platine partageant une interface commune avec le YIG.
- La conception d'un boîtier sous le logiciel ADS permettant d'obtenir une structure fiable et solide qui servira à contenir au sein d'une cavité le matériau magnétique (YIG) sur lequel une couche de platine (Pt) d'épaisseur nanométrique a été déposée par pulvérisation cathodique.

La technologie Spintronic

Cette thématique de recherche, communément appelé spintronic ou électronique de spin, fut révélée au grand public lors de l'obtention du prix Nobel de physique par Albert Fert en 2007 pour ses travaux sur la magnétorésistance géante. Cette découverte a joué un rôle cruciale sur l'augmentation drastique de la capacité de nos disques dur magnétique (de 1Gb/in² à 600 Gb/in² avec l'utilisation des têtes GMRs).

1. LETTERS, Nature, *Transmission of electrical signals by spin wave*

2. Physical Review Letters, *Spin Pumping In Electrodynamically Coupled Magnon-Photon Systems*



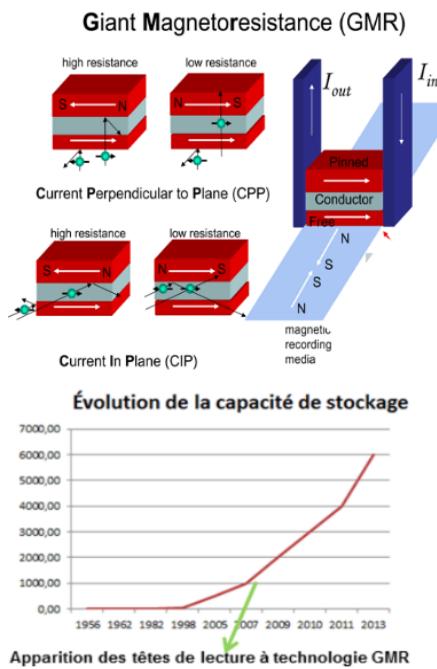
Prix Nobel : 2007



Albert Fert

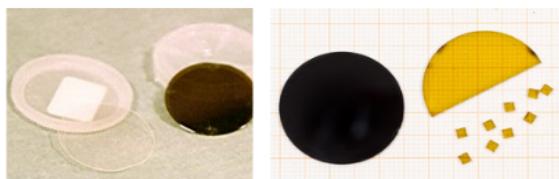


Peter Grünberg

FIGURE 1.1 – *Spintronic*

Le matériau magnétique Yttrium Iron Garnet

L'Yttrium Iron Garnet ou YIG est le matériau magnétique le plus utilisé dans les systèmes radiofréquences. C'est un matériau magnétique isolant électriquement mais aussi celui possédant le moins de pertes magnétiques (inférieures à 10^{-4}).

FIGURE 1.2 – *Yttrium Iron Garnet*

Le filtre configurable en fréquences

1	Etude des résonateurs <i>Elliptika</i>	19
1.1	Les résonateurs de type <i>Openloop</i>	19
	Le résonateur Openloop res04_3GHz	20
2	Etude du couplage de résonnance électrique et magnétique	21
2.1	Le banc de mesures utilisé	21
2.2	Mesure de la résonance électrique du filtre à simple STUB	22
2.3	La résonance magnétique de l'Yttrium Iron Garnet	24
2.4	Le couplage des résonances électrique et magnétique	24
2.4.1	Mise en évidence du couplage de résonance	24
2.4.2	Balayage en champs et en fréquences	25
2.4.3	Utilisation du modèle de couplage harmonique	26
2.4.4	Détermination du champs magnétique résonant	27
3	Etude du contrôle des pertes magnétiques dans le YIG	29
3.1	Temps de stabilisation des paramètres S du filtre configurable	29
3.2	Balayage en courant et en fréquences	30
3.3	Correspondance des valeurs de S21 en champs et en courant	31
3.4	Détermination du coefficient de couplage ..	32
4	Etude de la détection de la tension DC en bout de chaîne	35
4.1	Mesures à champs nul	35
4.2	Mesures à champs magnétique positif	35
4.3	Mesures à champs magnétique négatif	36
4.4	Interprétation des résultats de mesures de la tension DC	36
5	Influence du courant injecté dans le platine	39
5.1	Courbe d'hystéresis	39
5.2	Impédance - Rapport courant/tension	40
5.3	Contribution en champs magnétique du courant injecté dans le platine	40
5.3.1	La composante Hx parallèle à l'élément platine	40
5.3.2	La composante Hy perpendiculaire à l'élément platine	41
5.3.3	Interprétation de la contribution du courant injecté sur les valeurs en champs magnétique	41

Le filtre configurable est constitué d'un résonateur électrique et d'une structure hybride à base d'un matériau magnétique isolant électriquement, l'Yttrium Iron Garnet (YIG) et d'un métal normal, le platine (Pt). L'application d'un champ magnétique statique sur le dispositif permettra de changer les propriétés résonantes du filtre.

La figure 1.3 ci-dessous illustre le principe de fonctionnement théorique du filtre configurable ainsi que ses différents composants.

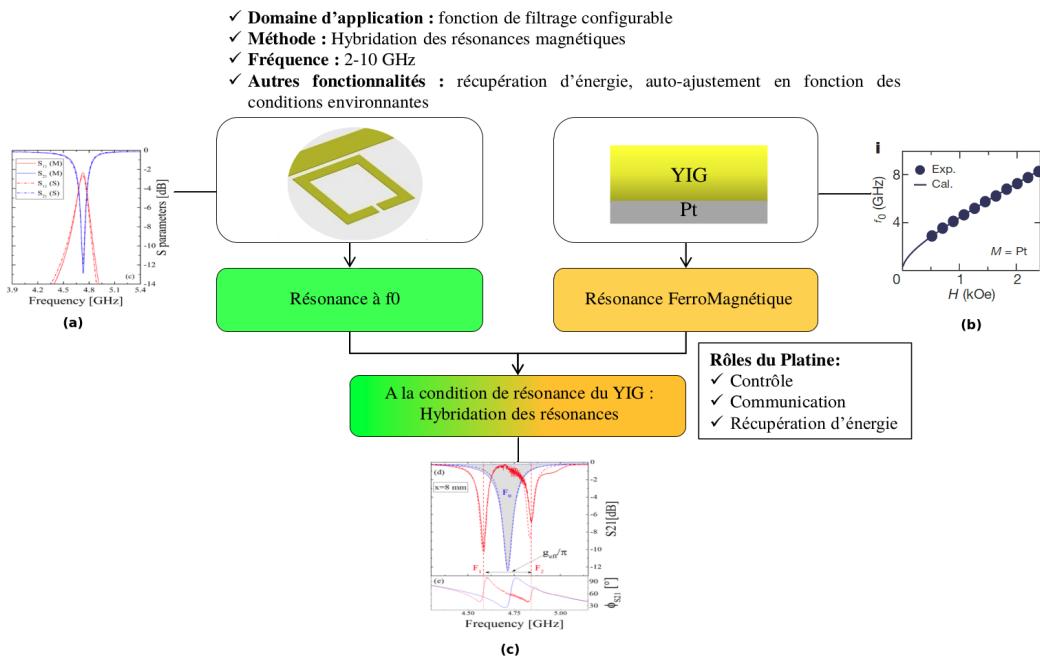


FIGURE 1.3 – *Filtre configurable*

Figure 1.3 | Filtre configurable. **a**, Les paramètres S_{11} et S_{21} du résonateur électrique³ autour de 5 GHz. **b**, La courbe quadratique⁴ illustrant la dépendance magnétique H de résonance magnétique du YIG à une fréquence f_0 donnée. **c**, Résultat du couplage entre les résonateurs magnétique et électrique². La courbe S_{21} en bleu illustre la fréquence f_0 à laquelle le filtre résonne à champ magnétique nul. La courbe en rouge correspond au nouveau paramètre de transmission S_{21} du filtre à la condition de résonance magnétique du YIG.

Ce dispositif novateur sera à même de communiquer son état de fonctionnement par le biais de phénomènes physiques complexes qui se traduisent en bout de chaîne par une simple tension DC.

Le but de cette partie est d'étudier par la mesure le *couplage des résonances magnétique et électrique* dans le filtre afin de pouvoir identifier les modèles théoriques physiques permettant de pouvoir contrôler et prévoir la configurabilité du filtre en fonction d'un champs magnétique statique appliqué ou d'un courant injecté dans le platine.

3. ArXiv, *Control of magnon-photon coupling strength in a planar resonator/YIG thin film configuration*

4. LETTERS, Nature, *Transmission of electrical signals by spin wave*

Section 1. Etude des résonateurs *Elliptika*

Plusieurs types de résonateurs électriques ont été conçus par l'entreprise brestoise *Elliptika*, spécialisée dans la conception de circuits RF et hyperfréquences. Ces résonateurs électriques ont pour rôle de constituer la base du filtre configurable.

La figure 1.1 ci-dessous illustre différentes formes de résonateurs conçues par *Elliptika*.

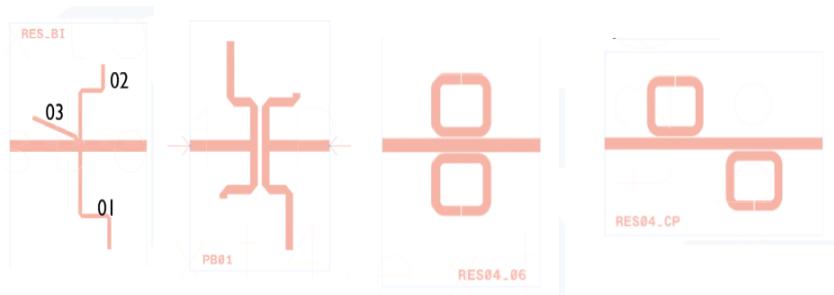


FIGURE 1.1 – Résonateurs Elliptika

1.1 Les résonateurs de type *Openloop*

Plusieurs types de résonateurs *Openloop* ont été réalisés. Un résonateur *Openloop* est caractérisé par son Gap (distance séparant les deux brins de la boucle).

A partir de résonateurs *Openloop* simples, différents modèles de résonateurs plus complexes et constitués de plusieurs résonateurs *Openloop* ont été réalisés.

Le résonateur Openloop res04_3GHz

w=1 mm
Res04_3GHz
Gap = 0.12 mm

FIGURE 1.2 – Openloop res04_3GHz

Section 2. Etude du couplage de résonnance électrique et magnétique

Le résonateur électrique utilisé pour les mesures est le résonateur à simple STUB présenté dans le chapitre précédent. Un matériau magnétique (YIG), sur lequel a été déposé par pulvérisation cathodique une fine couche de platine (Pt), est positionné sur le court-circuit du résonateur électrique et donc à la position du maximum de champs magnétique émis par le résonateur à simple STUB. Un champs magnétique statique est appliqué sur le dispositif afin de faire résonner magnétiquement le YIG et donc de pouvoir étudier le couplage des résonances électrique et magnétique.

2.1 Le banc de mesures utilisé

La photographie [2.1](#) ci-dessous illustre le banc de mesure utilisé. Ce banc de mesures est installé au département micro-ondes de Télécom-Bretagne.



FIGURE 2.1 – *Banc de mesures-1, laboratoire Spintronic*

Figure 2.1 | Banc de mesures-1. **a**, un poste de travail Windows et le logiciel LabView afin de récolter automatiquement les données des différents instruments de mesures utilisés. **b**, un générateur de fréquences (9KHz-20GHz) KEYSIGHT. **c**, un générateur de courant/tension KIKUSUI pour générer le champs magnétique statique créé par les bobines (f). **d**, un Gaussmètre LakeShore pour mesurer le champs magnétique statique créé par l'injection d'un courant dans les bobines (f). **e**, un générateur et détecteur de courant/tension KEITHLEY pour générer un courant I dans le platine ou détecter une tension DC dans le platine. **f**, deux bobines servant à générer le champs magnétique statique et entre lesquelles est positionné le filtre. **g**, un analyseur de réseau pour l'étude des paramètres S du filtre.

La photographie 2.2 illustre le positionnement du filtre entre les deux bobines ainsi que le positionnement de l'association YIG/Pt sur le résonateur électrique :

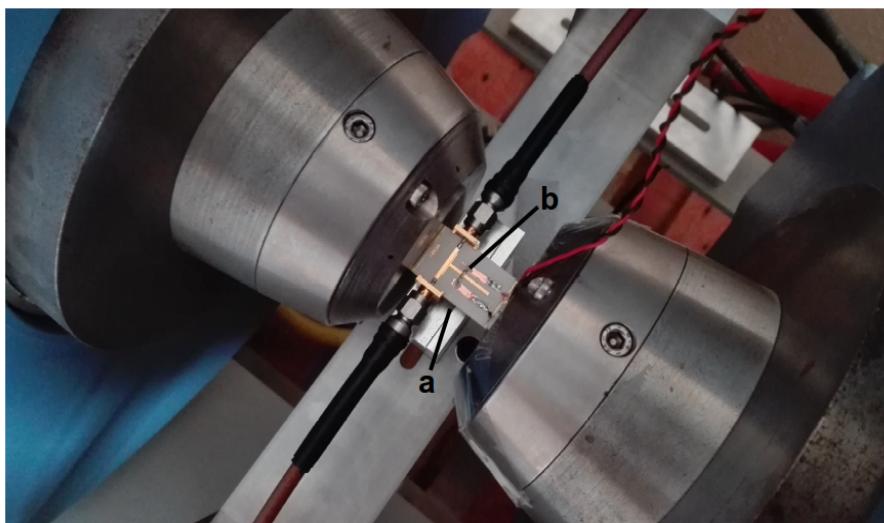


FIGURE 2.2 – *Banc de mesures-2, laboratoire Spintronic*

Figure 2.2 | Banc de mesures-2. **a**, le résonateur électrique à simple STUB. **b**, l'association YIG/PT à la position de court-circuit du résonateur électrique.

Le filtre situé entre les deux bobines est le prototype de filtre configurable nous servant de test à l'étude du couplage de résonance électrique et magnétique. L'association YIG(6 μ m)/Pt(6 nm) est positionné sur le court-circuit du résonateur électrique à l'aide de laque d'argent afin de le fixer et de pouvoir conduire le courant entre les fils reliés au générateur de courant/tension KEITHLEY et le platine.

2.2 Mesure de la résonance électrique du filtre à simple STUB

Le filtre à simple STUB utilisé est un filtre coupe-bande. La figure 2.3 ci-dessous représente les paramètres S_{11} de réflexion et S_{21} de transmission du filtre avec l'association YIG/Pt à champs magnétique nul.

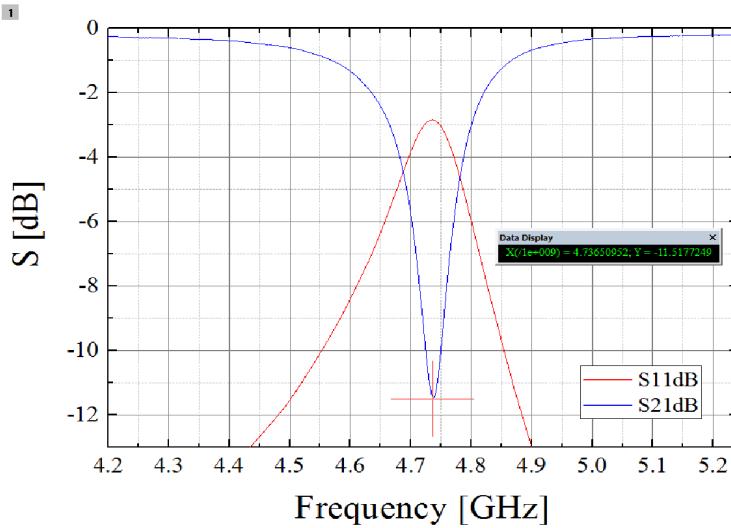
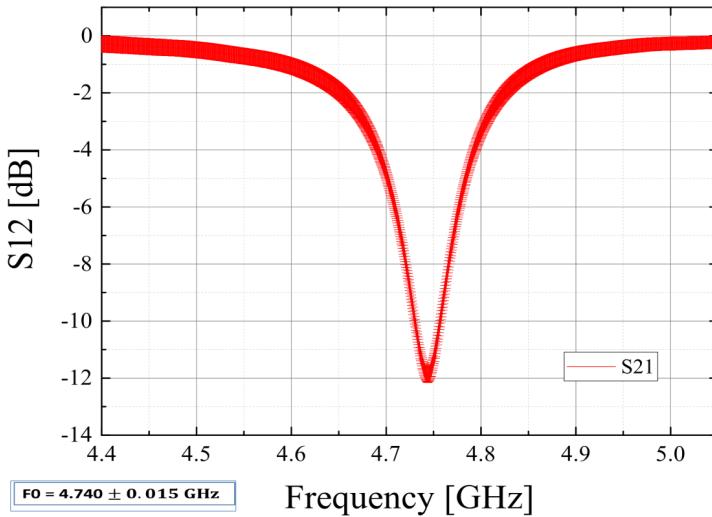
FIGURE 2.3 – Résonance électrique

Figure 2.3 | Résonance électrique. Le paramètre $f_0 \simeq 4.736 \text{ GHz}$ correspond à la fréquence à laquelle le filtre coupe-bande à simple STUB ne laisse plus passer le signal.

Afin d'étudier la reproductibilité du dispositif et de déterminer une incertitude sur la valeur du paramètre de résonance f_0 , plusieurs mesures du paramètres S_{21} du filtre avec l'association YIG/Pt ont été effectuées après avoir réinstallé plusieurs fois le dispositif entre les bobines.

La figure 2.4 ci-dessous, illustre l'incertitude de mesures sur la résonance électrique du dispositif.

FIGURE 2.4 – Résonance électrique - Reproductibilité des mesures

L'incertitude sur la valeur du paramètre de transmission S_{21} est plus élevé lorsque celle-ci est proche de 0. L'incertitude trouvée à hauteur de la fréquence f_0 est $f_0 \simeq 4.740 \pm 0.015 \text{ GHz}$.

2.3 La résonance magnétique de l'Yttrium Iron Garnet

L'Yttrium Iron Garnet ou YIG entre en résonance magnétique sous l'effet d'un de l'application d'un champs magnétique H statique.

La figure 2.5 ci-dessous illustre la courbe théorique de résonance magnétique du YIG¹ en fonction du champs magnétique qui lui est appliqué.

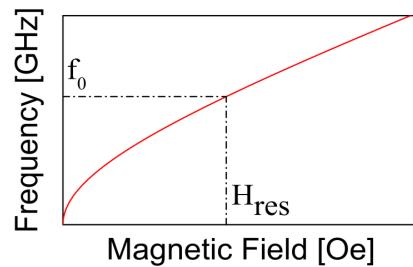


FIGURE 2.5 – *Résonance magnétique du YIG*

La courbe de résonance magnétique du YIG est d'allure quadratique et permet de déterminer la valeur H_{res} du champs magnétique à appliquer à la fréquence de résonance électrique f_0 du filtre pour faire résonner le YIG.

2.4 Le couplage des résonances électrique et magnétique

2.4.1 Mise en évidence du couplage de résonance

Afin de mettre en évidence le couplage de résonance, un balayage en champs magnétique avec un pas arbitraire à la fréquence f_0 de résonance électrique du filtre (résonateur électrique + association YIG/PT) a été effectué.

La figure 2.6 ci-dessous illustre l'allure du paramètre de transmission $S21$ du filtre à $H=983.48$ Oe, $H_{res}=995.92$ Oe et $H=1010.58$ Oe.

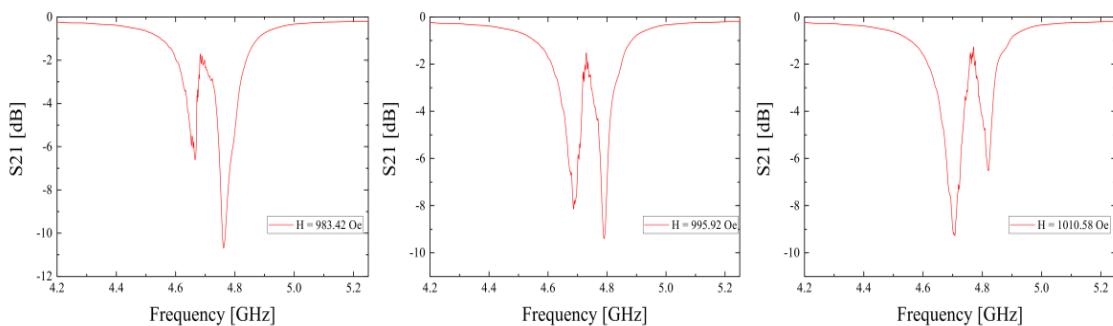


FIGURE 2.6 – *Paramètre $S21$ autour de $H = H_{res}$*

1. ArXiv, *Control of magnon-photon coupling strength in a planar resonator/YIG thin film configuration*

Lorsqu'un champs magnétique H statique est appliqué sur le dispositif *filtre + association YIG/PT*, un phénomène de séparation de la fréquence de résonance f_0 en deux fréquences distinctes f_1 et f_2 apparaît. Ce phénomène de *splitting* est dû au couplage des résonances électrique et magnétique. La présence d'irrégularités le long des pentes des courbes des pics de résonance est dûe à la résonance des autres modes magnétique présent dans le *YIG* dont le nombre dépend des dimensions de ce dernier².

2.4.2 Balayage en champs et en fréquences

Afin d'étudier le comportement de ce phénomène de *splitting*, un balayage en champs et en fréquence avec respectivement un pas de 2.9 Oe et de 210 KHz a été effectué. Les données stockées par le logiciel *Labview* ont été analysées à l'aide d'un script *matlab*. La figure 2.7 ci-dessous représente la dépendance en champs et en fréquence du paramètre de transmission *S21*.

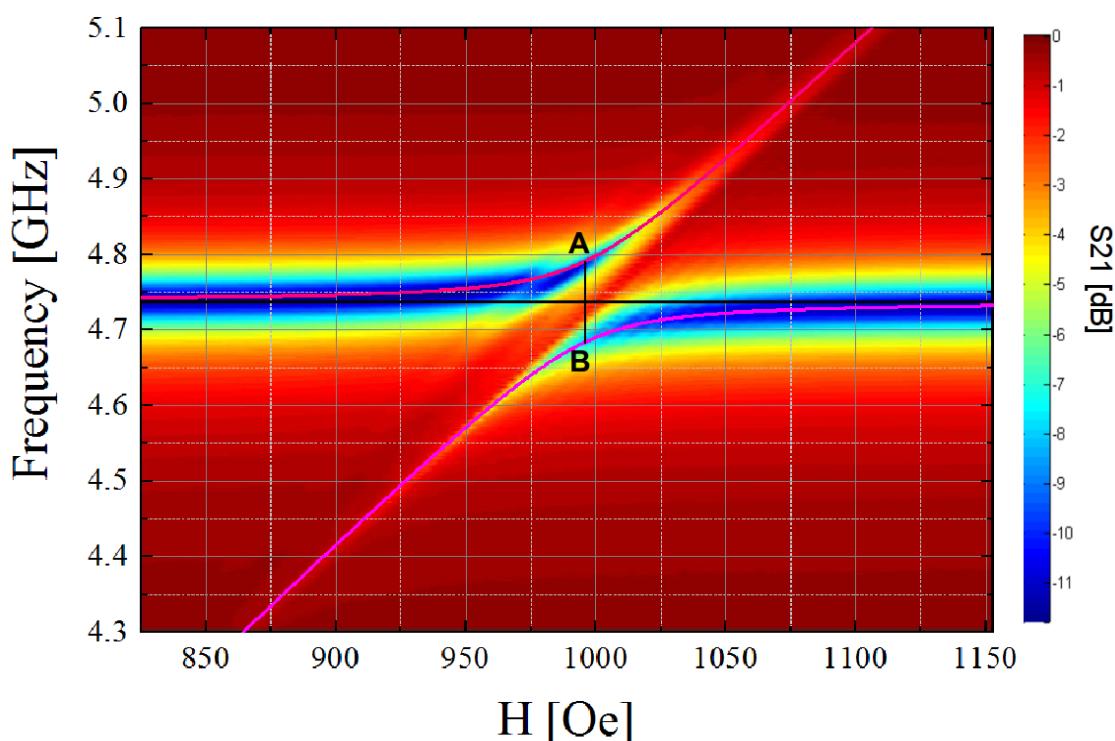


FIGURE 2.7 – *Paramètre S_{21} - Balayage en champs magnétique et en fréquences*

Figure 2.7 | Balayage en champs et en fréquences. **Courbes roses**, les courbes des minimums locaux du paramètre de transmission S_{21} aux alentours des fréquences f_1 et f_2 auxquelles se superposent les courbes de f_1 et f_2 du molède de couplage harmonique pour une valeur de coefficient de couplage $k = 0.1504$ et d'aimantation du YIG à saturation $M_s = 1750 \text{ A.m}^{-1}$. **Segment AB**, la valeur du gap de fréquences pour une valeur de champs injecté dans le platine $H = H_{res} = 995.92 \text{ Oe}$. **Courbe noire horizontale**, la fréquence de résonance f_0 du filtre à champs nul.

Le paramètre S_{21} est ici représenté par un code couleur. Il varie du rouge foncé pour 0

2. Seul la résonance du mode fondamental est étudiée dans ce rapport.

26 Section 2. Etude du couplage de résonance électrique et magnétique

dB au bleu foncé pour -12 dB (c'est à dire lorsque le signal ne passe plus). Les conditions de résonance maximum du filtre correspondent aux coordonnées des zones du graphe où la couleur est proche du bleu foncé.

La position en fréquence des résonances f_1 et f_2 varie en fonction de la valeur du champs magnétique injecté dans le YIG. On observe ainsi l'apparition d'une bande de résonance interdite.

2.4.3 Utilisation du modèle de couplage harmonique

Le modèle de couplage harmonique³ entre les résonances électrique et magnétique est utilisé dans le but de déterminer les formules analytiques qui permettront de décrire le comportement de la variation des fréquences de résonances f_1 et f_2 en fonction du champs magnétique statique appliqué sur le filtre.

Ce modèle s'appuie sur les formules analytiques suivantes :

$$f_1 = \frac{1}{2} * \left(f_0 + f_r \right) + \sqrt{\left(f_0 - f_r \right)^2 + k^4 * f_0^2}$$

$$f_2 = \frac{1}{2} * \left(f_0 + f_r \right) - \sqrt{\left(f_0 - f_r \right)^2 + k^4 * f_0^2}$$

avec dans le cas du YIG,

$$f_r = \frac{1.8 * 10^7}{2 * \pi} * \sqrt{|H * (H + M_s)|}$$

et,

$$k = \sqrt{\frac{f_{gap}}{f_0}}, \quad f_{gap} = f_2 - f_1 \text{ à } H=H_{res}, \quad M_s \equiv \text{Aimentation du YIG à saturation.}$$

En jouant sur la valeur du paramètre k , associé aux pertes magnétiques dans le YIG, et celle de M_s , les courbes représentatives des formules du modèle de couplage harmonique de f_1 et f_2 se superposent parfaitement avec celle des positions des minimums de $S21$, c'est à dire les points où se situe la résonance. Les courbes se superposent lorsque $k=0.1504$ et $M_s=1750 A.m^{-1}$.

Les courbes de f_1 et f_2 avec les valeurs de k et M_s ainsi trouvées sont représentées en rose sur la figure 2.7. La courbe noire horizontale sur cette même figure représente la résonance f_0 du filtre lorsque $H=0 Oe$. Les fréquences f_1 et f_2 tendent toutes deux vers f_0 lorsque le champs magnétique tend vers $H_{res} \pm \infty$.

Ceci démontre que le modèle de couplage harmonique est un bon modèle pour représenter analytiquement le couplage de résonance électrique et magnétique dans le filtre.

3. Arxiv, *Study of the cavity-magnon-polariton transmission line shape*.

2.4.4 Détermination du champs magnétique résonant

Toujours en se basant sur le résultat des mesures en champs et en fréquences du paramètre de transmission $S21$ (voir figure 2.7), il est possible de déterminer ainsi la valeur exacte H_{res} du champs magnétique à appliquer sur le filtre tel que le couplage de résonance électrique et magnétique soit au maximum.

En effet, d'après le modèle de couplage harmonique³, le couplage entre les résonances électrique et magnétique est maximum lorsque $f_0 - f_1 = f_2 - f_0$.

La figure 2.8 ci-dessous représente les courbes $f_0 - f_1$ en bleu et $f_2 - f_0$ en rouge :

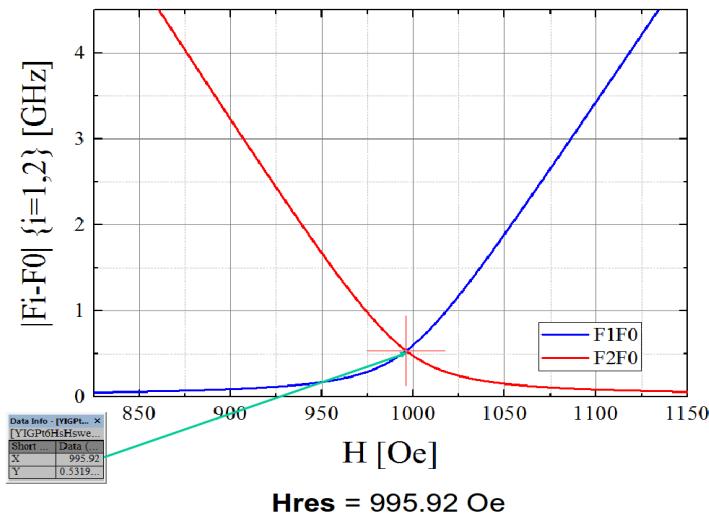


FIGURE 2.8 – Distance des fréquences de résonance f_1 et f_2 à f_0

Les courbes se croisent au point d'abscisse $H_{res} \simeq 995.92$ Oe. Lorsque le champs magnétique appliqué est voisin de H_{res} , l'écart des fréquences de résonances f_1 et f_2 avec la fréquence fondamentale f_0 se comporte de manière non-linéaire en fonction du champs magnétique appliqué. De plus, la position du point d'abscisse H_{res} correspond à un *gap* de $f_2 - f_1 \simeq 634$ MHz. Le *gap* à $H=H_{res}$ à une valeur plus proche de celle du minimum de $f_2 - f_1$ que de celle de son maximum.

Le segment noir et verticale AB sur la figure 2.7 illustre la position du *gap* à $H=H_{res}$ ainsi que son écartement.

La figure 2.9 suivante illustre la valeur du paramètre $S21$ mesuré en dB à $H=0$ Oe et à $H=H_{res}$:

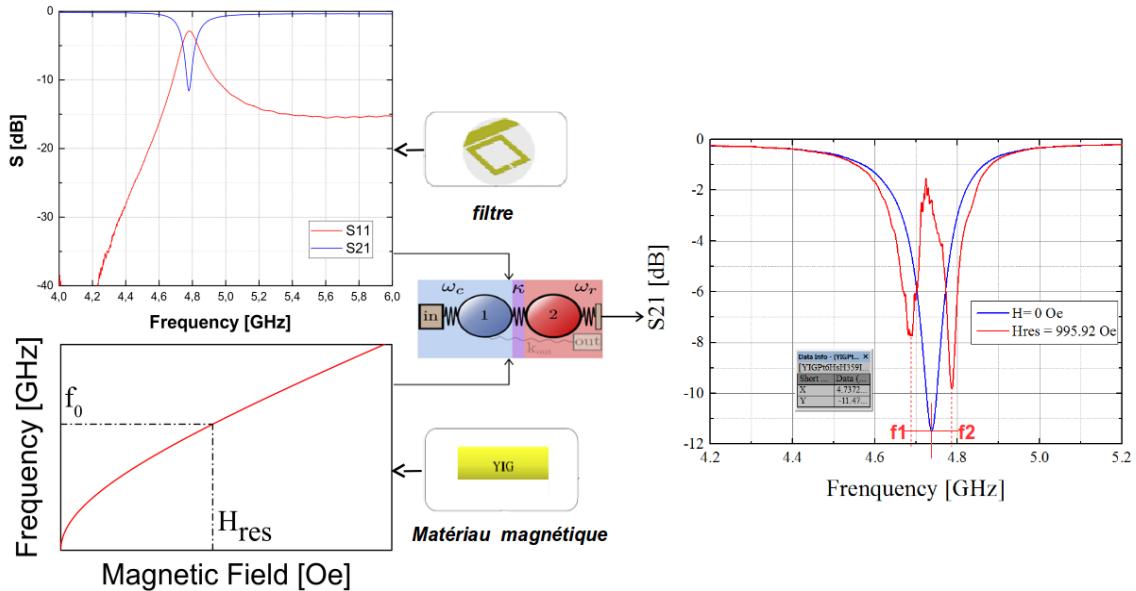


FIGURE 2.9 – *Hybridation de la résonance à $H=H_{res}$*

Pour une valeur de champs appliqué $H=H_{res}$, il y a donc bien une hybridation de la résonance f_0 du mode fondamental en deux résonances distinctes, f_1 et f_2 . Cette hybridation résulte du couplage entre les résonances électriques du filtre à simple STUB et magnétique du YIG.

Le positionnement de la résonance de plus haute fréquence f_2 est précis à quelques MHz (<10). En revanche, celui de la résonance f_1 est précis à environ 20 MHz. L'incertitude sur le résultat de la position de la résonance f_1 est donc plus grande comme on peut le constater sur l'allure du paramètre $S21$ au niveau de la résonance f_1 à $H=H_{res}$.

A $H=H_{res}$, la valeur du paramètre de transmission $S21$ à la résonance f_1 se rapproche le plus de celle à la résonance f_2 . Lorsque la valeur du champs magnétique appliqué s'éloigne de H_{res} , la valeur de $S21$ aux alentours de la résonance f_1 se détériore.

Section 3. Etude du contrôle des pertes magnétiques dans le YIG

Afin d'établir un contrôle sur les pertes magnétiques du YIG et de pouvoir évaluer la configurabilité de la résonance du filtre, un courant est injecté dans le platine. Ce courant injecté va être converti en onde de spin dans le YIG grâce à la combinaison des phénomènes de *Spin Hall Effect* et de *Spin Torque Transfer*¹ et va modifier les propriétés résonantes du filtre.

3.1 Temps de stabilisation des paramètres S du filtre configurable

Cette section traite du temps mis par le prototype de filtre configurable pour se stabiliser lors de l'injection d'un courant dans le platine. La figure 3.1 illustre le temps mis par le paramètre S_{21} pour se stabiliser lors de l'injection d'un courant dans le platine.

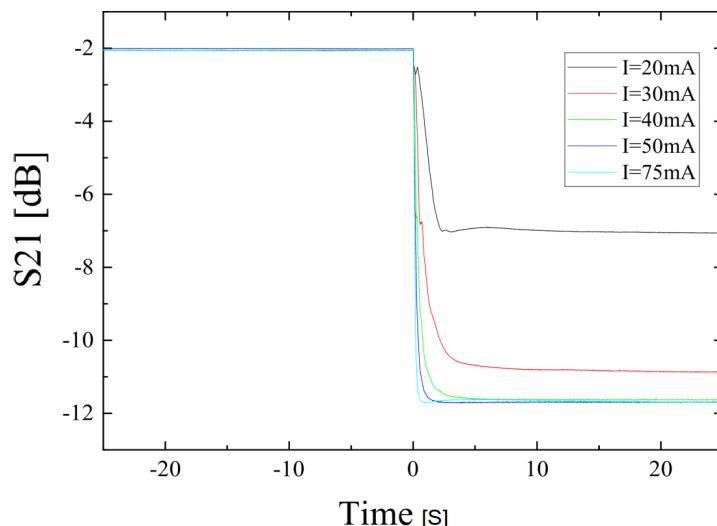


FIGURE 3.1 – Temps de transition de S_{21} - 1

1. LETTERS Nature, *Transmission of electrical signals by spin wave*.

Plus la valeur du courant injecté est élevée et plus le paramètre S_{21} va mettre du temps à atteindre sa valeur d'équilibre. En effet, par exemple le temps d'attente avant que S_{21} ne se stabilise pour un courant injecté dans le platine d'une valeur de 20 mA est d'environ 3 s tandis qu'il n'est que de quelques ms pour $I=75\text{ mA}$.

La figure 3.2 illustre le temps mis par le paramètre S_{21} pour se stabiliser lors de l'injection d'un courant non-nul à un courant nul dans le platine.

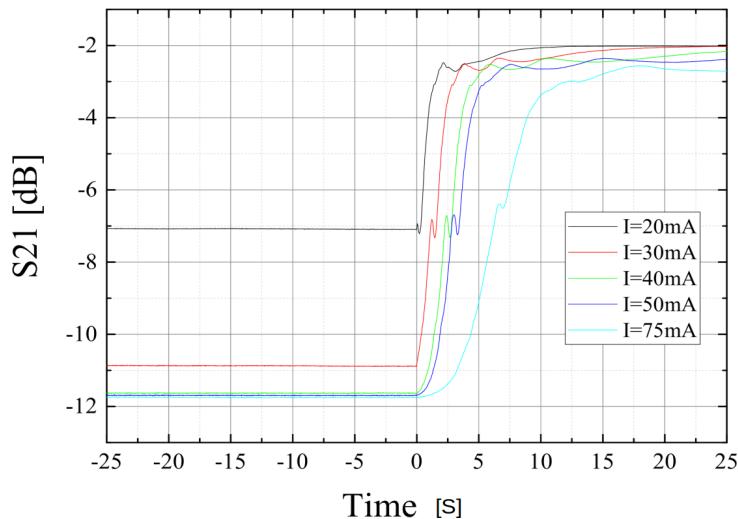


FIGURE 3.2 – Temps de transition de S_{21} - 2

Le temps pour S_{21} d'atteindre sa position d'équilibre lors du passage d'un courant non-nul à un courant nul est plus élevé que dans le cas précédent (minimum environ 3 s pour $I=20\text{ mA}$). Plus la valeur de courant injecté était grande et plus le paramètre S_{21} met du temps à se stabiliser.

3.2 Balayage en courant et en fréquences

Un champs magnétique $H=H_{res}$ est appliqué statiquement sur le filtre. A l'aide du logiciel *Labview*, un balayage en courant avec un pas de 2 mA et en fréquences avec un pas de 210 KHz est effectué. Les résultats de mesures sur la valeur du paramètre S_{21} sont illustrés sur la figure 3.3 suivante.

Le paramètre de transmission S_{21} est d'autant plus faible sur les endroits de la courbe où la couleur est proche du bleu, c'est à dire aux fréquences auxquelles le filtre va résonner.

La fréquence de résonance f_2 est la courbe rose la plus au dessus sur la figure 3.3. Sa valeur peut varier d'une centaine de MHz en fonction du courant injecté.

La fréquence de résonance f_1 est la courbe rose la plus en dessous sur la figure 3.3. Plus la valeur du courant injecté dans le platine est importante et plus la valeur de f_1 va s'éloigner fortement de la fréquence de résonance f_0 du filtre à champs nul et sans courant injecté dans le platine.

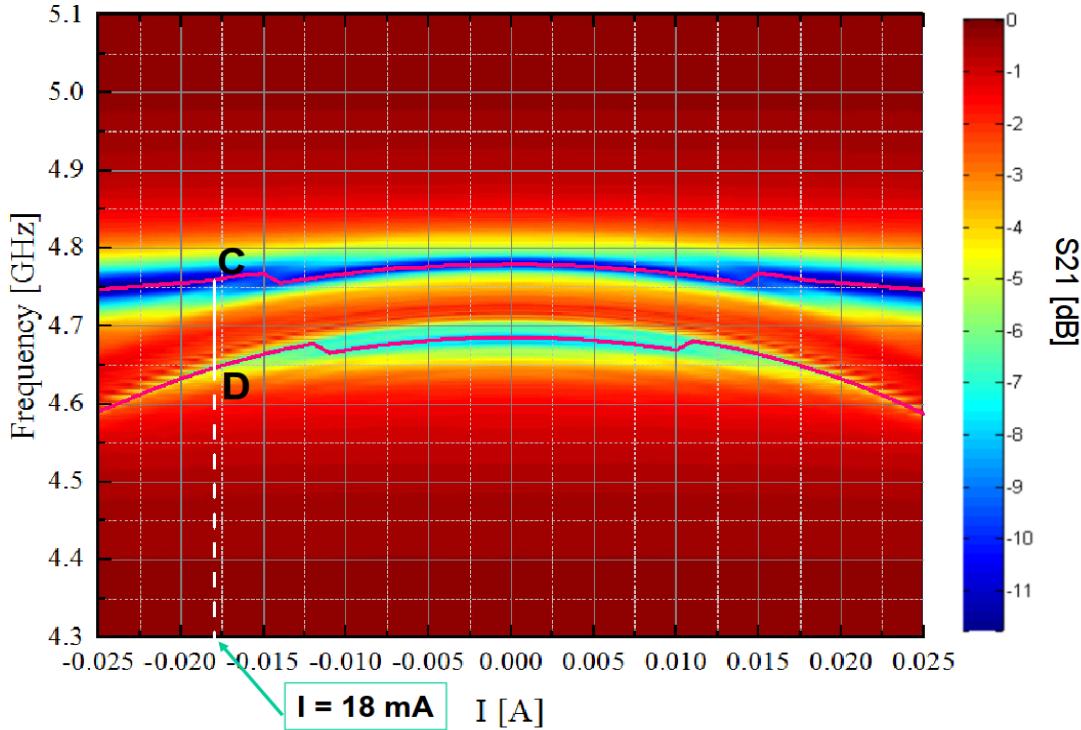
FIGURE 3.3 – *Paramètre S21 - Balayage en courant et en fréquences*

Figure 3.3 | Balayage en courant et en fréquences. **Courbes roses**, les courbes des minimums locaux du paramètre de transmission $S21$ aux alentours des fréquences $f1$ et $f2$. **c et d**, les valeurs respectives du paramètre $S21$ aux alentours de $f1$ et $f2$ pour une valeur de courant injecté dans le platine égale à 18 mA .

L’interprétation des résultats de la mesure du balayage en courant et en fréquences est loin d’être évidente. En effet, la courbe de la résonance $f1$ est symétrique ce qui signifie que peu importe le sens du courant injecté dans le platine, la résonance $f1$ se décalera toujours dans le sens des fréquences inférieures. Alors qu’en injectant un courant de sens opposé dans le platine on aurait pu s’attendre à ce que le champs magnétique créé par le passage du courant dans le platine contribue à déplacer la résonance $f1$ soit positivement soit négativement. Or cette dernière se déplace toujours dans le même sens.

Afin de pouvoir interpréter ses résultats, une étude supplémentaire autour de la contribuition de l’injection d’un courant dans le platine et des phénomènes physiques complexes intervenant à l’interface entre le YIG et le platine est nécessaire.

3.3 Correspondance des valeurs de S21 en champs et en courant

En observant les résultats de mesures en champs et en courant, il est possible d’établir une correspondance sur les valeurs de $S21$.

Les points C et D sur la figure 3.3 correspondent aux valeurs des fréquences de résonance f_1 et f_2 pour une valeur de courant injecté $i=18\text{ mA}$. Ces valeurs sont ensuite reportés sur la figure 2.7 pour obtenir les points C et D . Ceux-ci correspondent à une valeur de champs magnétique $H=970.75\text{ Oe}$.

La figure 3.4 suivante illustre l'allure de S_{21} pour $H=970.75\text{ Oe}$ et pour $i=18\text{ mA}$.

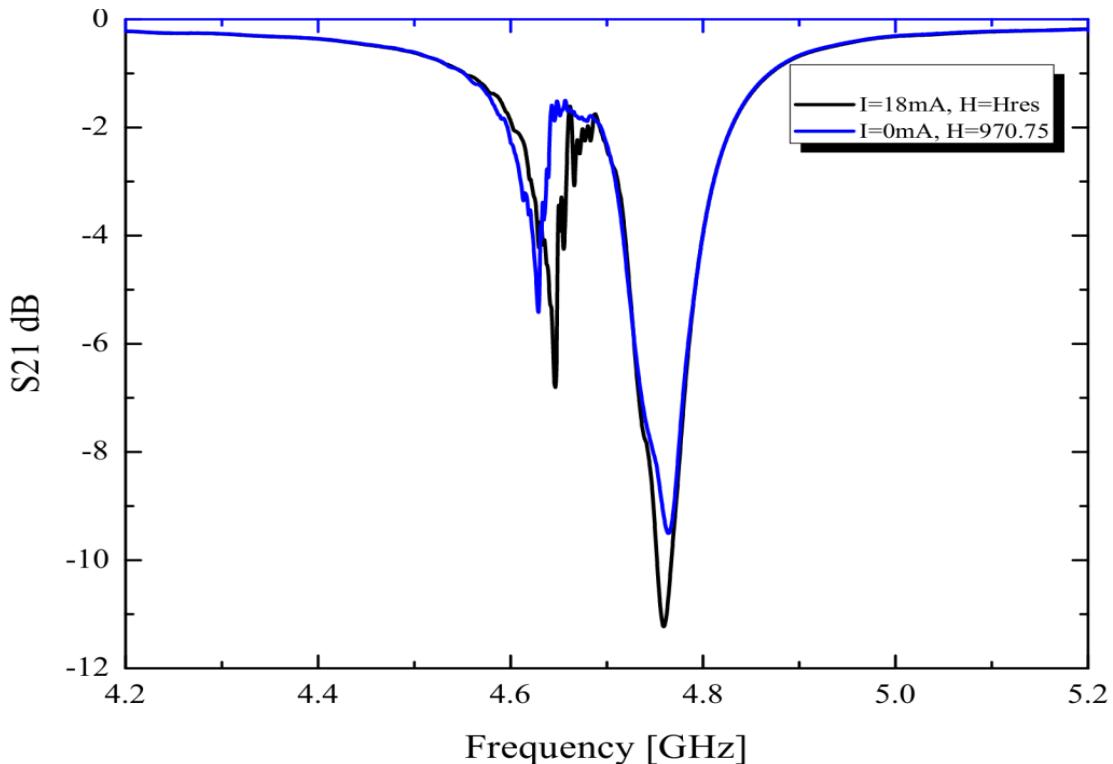


FIGURE 3.4 – Correspondance de S_{21} en champs et en courant

La similitude entre les deux courbes est clairement établie. Néanmoins, il y a un léger décalage présent autour de la fréquence de résonance f_1 . Ceci peut-être dû à la variation du gradient de température dans le YIG induite par l'injection d'un courant dans le platine pouvant modifier les propriétés du YIG comme son aimantation à saturation M_s . Pour $I=18\text{ mA}$ et $H=H_{res}$, la valeur du paramètre S_{21} atteint des minimums locaux plus important autour des fréquences de résonance f_1 et f_2 (entre 1 et 2 dB de différence) que pour la mesure de S_{21} à $H=970.75\text{ Oe}$.

3.4 Détermination du coefficient de couplage

Les pertes magnétiques sont reliées au gap de fréquences entre les fréquences de résonance

f_1 et f_2 par la formule suivante² :

$$\frac{\frac{f_1 - f_2}{2}}{2} = \frac{g_{\text{eff}}}{2 * \pi}$$

avec $\frac{g_{\text{eff}}}{2 * \pi}$ lié au coefficient de couplage k .

La figure 3.5 illustre les valeurs prises par $\frac{g_{\text{eff}}}{2 * \pi}$ en fonction du courant injecté dans le platine.

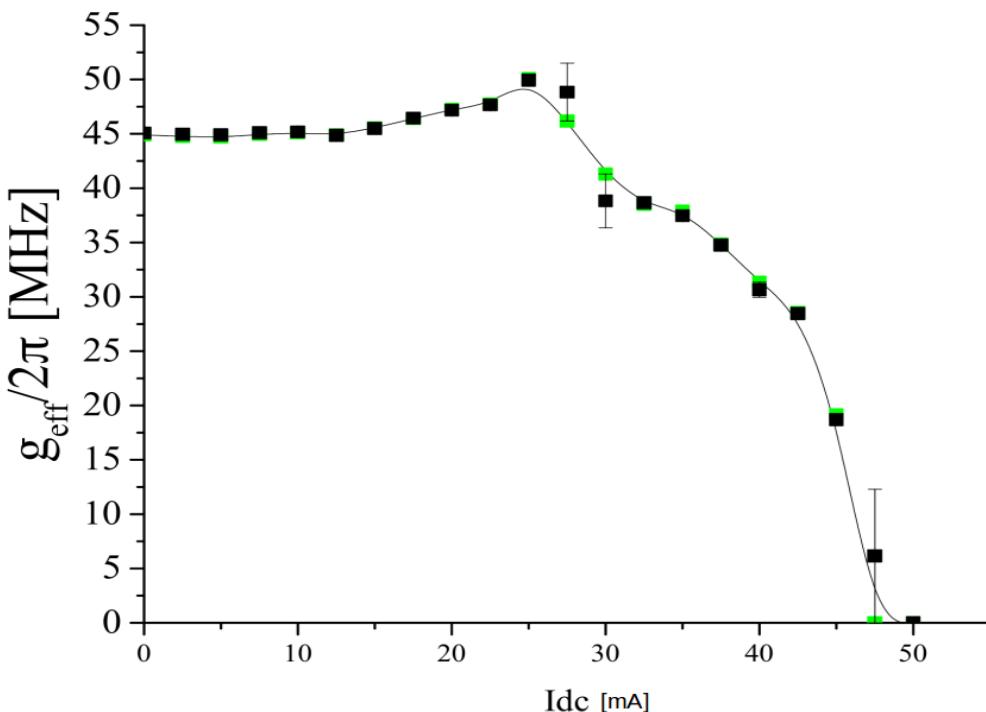


FIGURE 3.5 – Coefficient du couplage électrique et magnétique

A partir d'une valeur de courant injecté dans le platine supérieur à environ 25 mA, le coefficient de couplage se dégrade rapidement jusqu'à atteindre une valeur nulle à 50 mA. Les barres d'incertitudes illustrent la reproductibilité de la mesure. L'incertitude sur le coefficient de couplage sera d'autant plus élevée aux alentours de 50 mA ainsi qu'aux alentours du *glitch* de mesure entre 25 et 30 mA présent sur les mesures de balayage en courant et en fréquences (voir figure 3.3).

2. Article, *Control of Magnon-Photon Coupling Strength in a Planar Resonator/Yttrium-Iron-Garnet Thin-Film Configuration*

Section 4. Etude de la détection de la tension DC en bout de chaîne

Ce chapitre traite de l'étude de la détection de la tension DC en bout de chaîne à la condition de résonance du YIG pour une valeur de champs magnétique $H=H_{res}$ ainsi que de l'influence du courant injecté dans le platine sur la tension DC récupérée en bout de chaîne.

Les mesures en tension sont effectuées aux bornes du platine en augmentant progressivement la fréquence de 4.4 GHz à 5.1 GHz avec une précision de 5000 points de mesures. Les mesures sont ensuite récupérées dans un fichier à l'aide du logiciel *Labview*.

4.1 Mesures à champs nul

La figure 4.1 illustre la tension DC en bout de chaîne à champs magnétique nul.

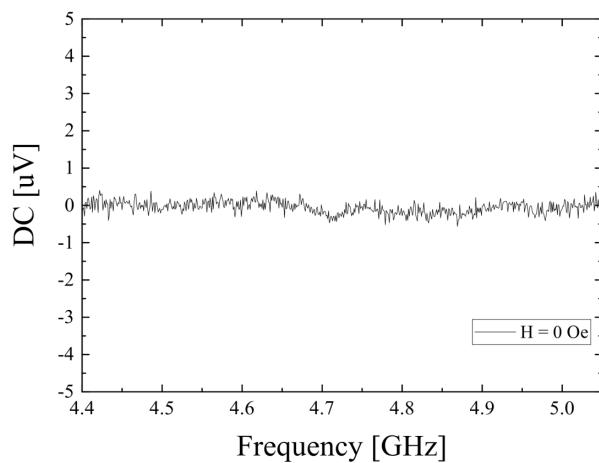
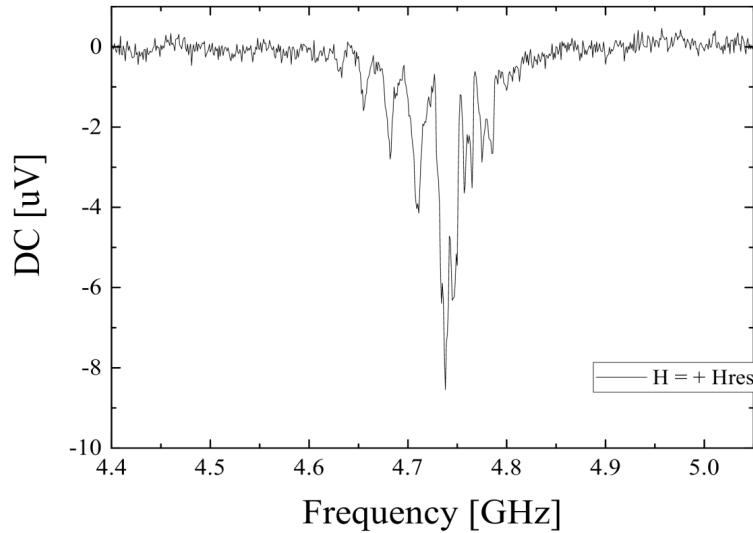


FIGURE 4.1 – Tension DC à $H=0$ Oe

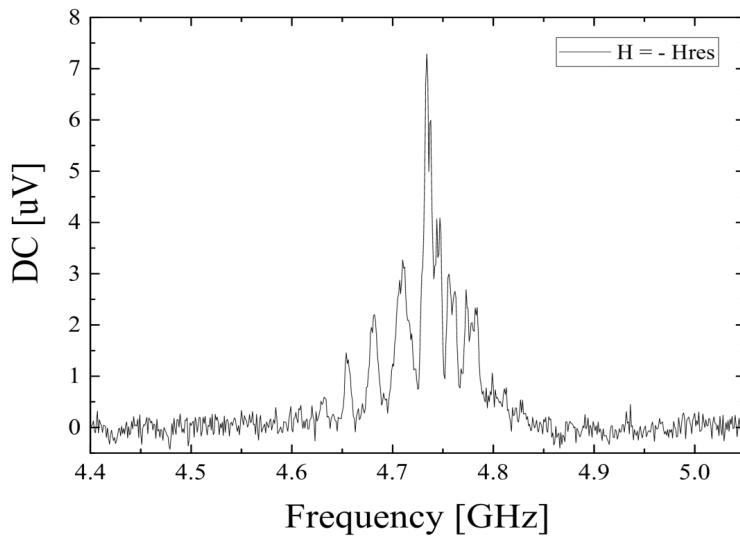
4.2 Mesures à champs magnétique positif

La figure 4.2 illustre la tension DC en bout de chaîne à champs magnétique $H=+H_{res}$.

FIGURE 4.2 – Tension DC à $H=+H_{\text{res}}$

4.3 Mesures à champs magnétique négatif

La figure 4.3 illustre la tension DC en bout de chaîne à champs magnétique $H=-H_{\text{res}}$.

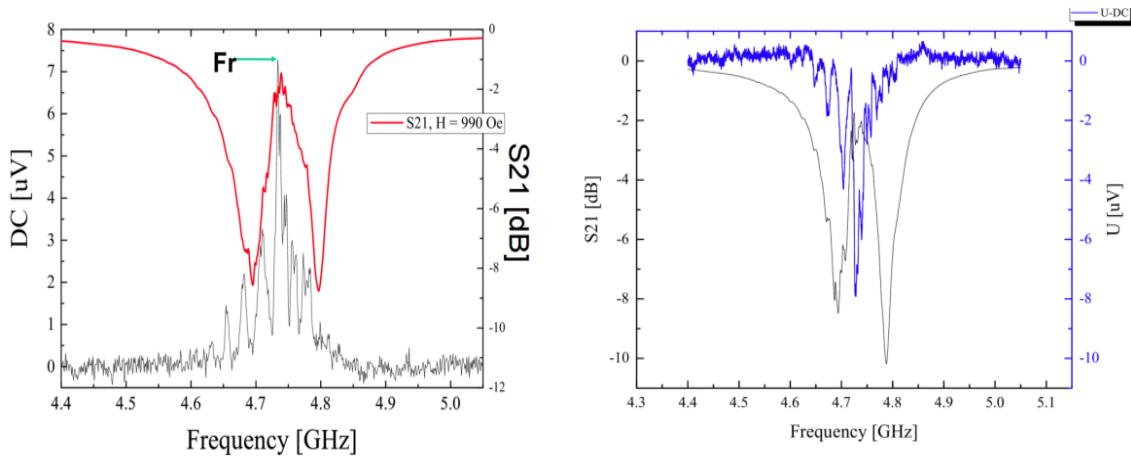
FIGURE 4.3 – Tension DC à $H=-H_{\text{res}}$

4.4 Interprétation des résultats de mesures de la tension DC

À champs nul, la tension DC détectée n'est autre que le bruit généré par l'environnement de mesures à l'air libre et l'application du signal RF dans le filtre.

Pour une valeur de champs positive $H=+H_{\text{res}}$, la tension détectée est négative tandis qu'à $H=-H_{\text{res}}$, la tension détectée est positive. Dans ces deux cas, la tension détectée est de l'ordre du micro-volt.

Lors de l'application d'un champs magnétique $H=\pm H_{\text{res}}$, le pic de tension le plus élevé est situé à la fréquence de résonance magnétique f_r du YIG comme illustré sur la figure 4.4 :

FIGURE 4.4 – Tension DC et S21 à $H=H_{res}$

Les différents pics de tensions apparaissent autres que celui centré à la fréquence de résonance f_r du YIG sont dûs à la résonance des autres modes que le mode fondamental dans le YIG.

L'apparition d'une tension DC en bout de chaîne est due à l'apparition d'un courant de spin dans le YIG à sa condition de résonance magnétique $H=H_{res}$. Ce courant de spin est ensuite converti en courant électrique dans le platine par le biais des phénomènes physiques de *Spin-Pumping* et de *Inverse Spin Hall Effect*¹ ayant lieu à l'interface entre le YIG et le platine.

1. Letters, *Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator*

Section 5. Influence du courant injecté dans le platine

Des mesures ont été effectuées pour déterminer la réponse en tension lors de l'injection d'un courant dans le platine et pour essayer de comprendre le phénomène physique responsable du décalage de la fréquence de résonance $f1$ s'effectuant toujours dans le même sens peu importe le sens du courant injecté.

5.1 Courbe d'hystéresis

La figure 5.1 illustre la tension détectée aux bornes du platine lors de l'injection d'un courant dans ce dernier. Les mesures ont été effectuées de -50 mA à $+50\text{ mA}$ et inversement pour obtenir le cycle d'hystéresis total avec une mesure tous les 5 mA .

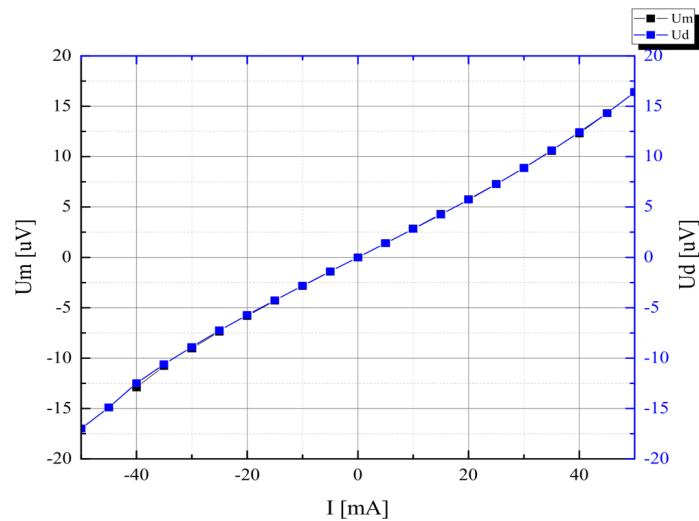


FIGURE 5.1 – Courbe d'hystéresis

Entre -20 mA et $+20\text{ mA}$ la réponse en tension est linéaire. Mais au delà de cette

intervalle, la réponse en tension a un caractère non linéaire et ne peut donc pas être modélisé par la formule $U=R.I$.

5.2 Impédance - Rapport courant/tension

La figure 5.2 illustre le rapport de la tension U/I dans le sens montant (mesures effectuées avec un pas positif) et dans le sens descendant (mesures effectuées avec un pas négatif).

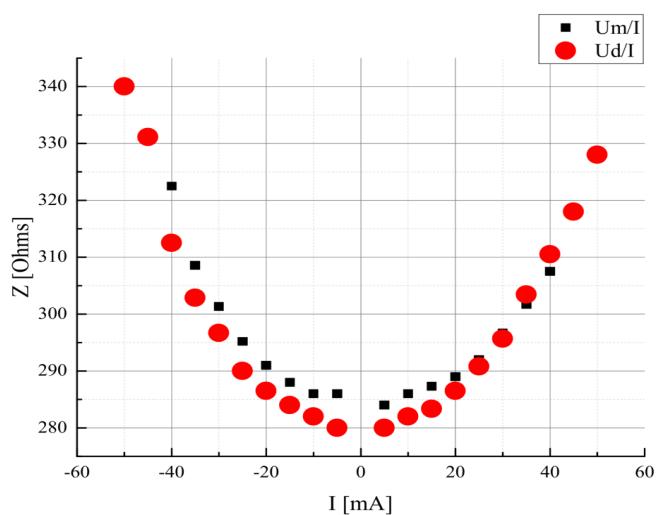


FIGURE 5.2 – Rapport courant/tension

La non-linéarité se retrouve également sur la figure ci-dessus.

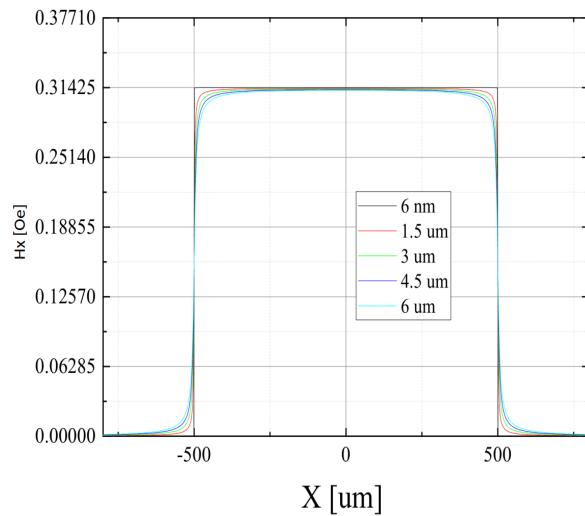
5.3 Contribution en champs magnétique du courant injecté dans le platine

Un article scientifique¹ détaille le modèle analytique du champs magnétique généré par l'injection d'un courant dans du platine.

5.3.1 La composante H_x parallèle à l'élément platine

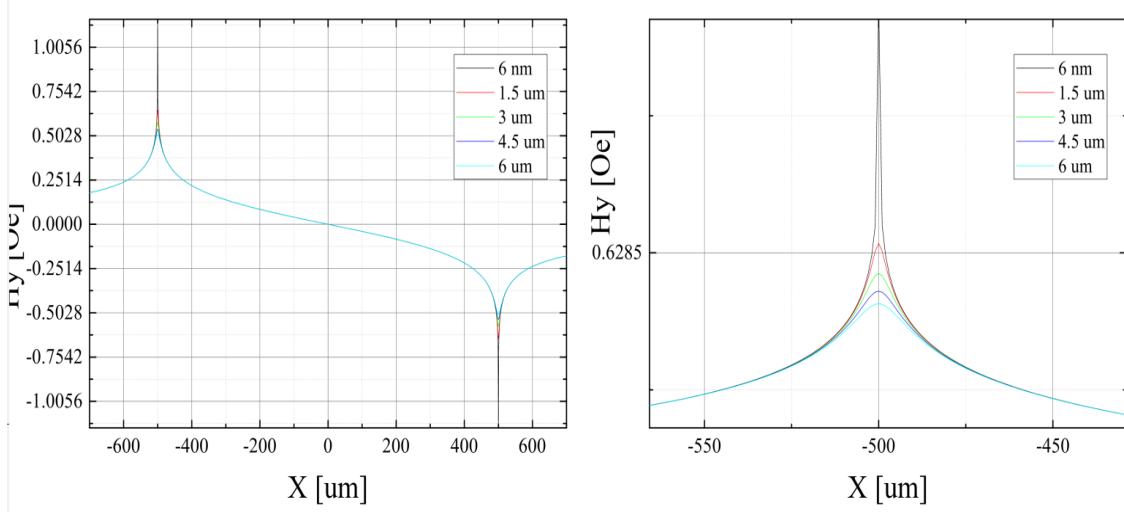
La figure 5.3 illustre la composante analytique H_x générée par l'injection d'un courant dans le platine en fonction de la distance par rapport à ce dernier.

1. Physical Review, *Nanosecond time-scale switching of permalloy thin film elements studied by wide-field time-resolved Kerr microscopy*

FIGURE 5.3 – *Composante Hx du champs magnétique généré par l'injection d'un courant*

5.3.2 La composante Hy perpendiculaire à l'élément platine

La figure 5.4 illustre la composante analytique Hy perpendiculaire à l'élément platine générée par l'injection d'un courant dans le platine.

FIGURE 5.4 – *Composante Hy du champs magnétique généré par l'injection d'un courant*

5.3.3 Interprétation de la contribution du courant injecté sur les valeurs en champs magnétique

Afin d'observer la contribution du courant injecté dans le platine sur le champs magnétique généré, la figure 5.5 illustre les maximums des valeurs des composantes de champs Hx et Hy .

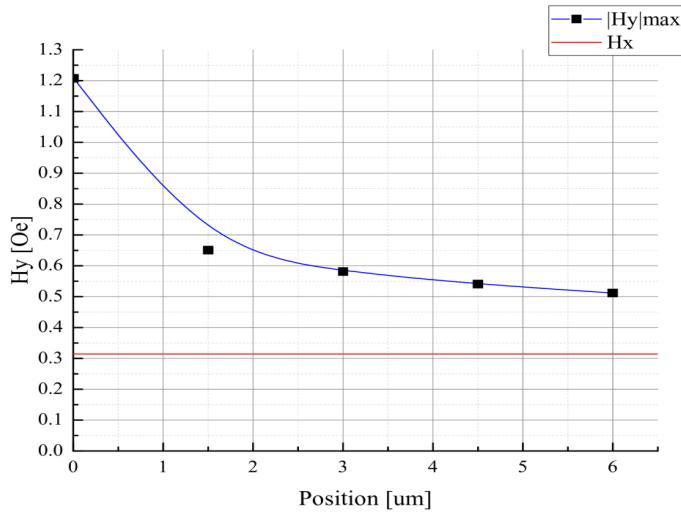


FIGURE 5.5 – Contribution en champs magnétique du courant injecté dans le platine

La contribution en champs magnétique lors de l'injection d'un courant dans un élément de platine d'épaisseur 6nm , est de 0.32 Oe pour la composante H_x et de 1.2 Oe au maximum pour la composante H_y à l'interface du platine.

Ceci permet de montrer que la contribution en champs magnétique de l'injection d'un courant dans le platine n'est pas le phénomène physique responsable de la variation du champs magnétique car cette contribution est minimale. Ceci permet d'éliminer l'hypothèse que selon la valeur et le sens du courant injecté dans le platine, la fréquence de résonance f_1 se décale vers la droite ou vers la gauche car dans les faits, cette dernière se décale toujours vers les fréquences plus faibles peu importe le sens du courant. De plus, comme cela a été vu dans la partie [3.2](#), pour une valeur injecté de 18 mA à $H=H_{\text{res}}=990\text{ Oe}$, la correspondance se situe pour une valeur de champs de $H=970\text{ Oe}$ à $I=0\text{ mA}$. Le courant injecté dans le platine entraîne donc une différence de 20 Oe dans ce cas de figure ce qui est bien supérieur à la contribution maximale du champs magnétique générée par l'injection d'un courant dans le platine.

Afin de déterminer les causes d'une telle variation sur le champs magnétique total lors de l'injection d'un courant dans le platine, plusieurs autres hypothèses restent à étudier pour comprend parfaitement le phénomène telles que la variation du gradient de température dans le YIG lors de l'injection d'un courant dans le platine et la variation des paramètres caractéristiques (aimantation à saturation, etc.) du YIG induite par ce courant. Ces hypothèses n'ont pas eu le temps d'être vérifiées au cours de ce projet de 6 mois mais peuvent constituer une piste de recherche sérieuse pour la compréhension du phénomène de *splitting* des résonances dans son ensemble.

- ArXiv, *Control of magnon-photon coupling strength in a planar resonator/YIG thin film configuration*
- LETTERS, Nature, *Transmission of electrical signals by spin wave*
- Arxiv, *Study of the cavity-magnon-polariton transmission line shape.*

- YIG : *Yttrium Iron Garnet*
- Pt : *Platine*