

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

1.1	La technologie Spintronic	11
1.2	Le matériau magnétique Yttrium Iron Garnet	11

II

Le filtre configurable en fréquences

1	Etude des résonateurs <i>Elliptika</i>	17
1.1	Les résonateurs de type <i>Openloop</i>	17
	Le résonateur Openloop res04_3GHz	18

2	Etude du couplage de résonance électrique et magnétique	19
2.1	Le banc de mesures utilisé	19
2.2	Mesure de la résonance électrique du filtre à simple STUB	20
2.3	La résonance magnétique de l'Yttrium Iron Garnet	22
2.4	Le couplage des résonances électrique et magnétique	22
2.4.1	Mise en évidence du couplage de résonance	22
2.4.2	Balayage en champs et en fréquences.	23
2.4.3	Utilisation du modèle de couplage harmonique.	24
2.4.4	Détermination du champs magnétique résonant	25
3	Etude du contrôle des pertes magnétiques dans le YIG	27
3.1	Balayage en courant et en fréquences	27
3.2	Correspondance des valeurs de S_{21} en champs et en courant	28

III

Conclusions

Annexes

Bibliographie

Glossaire



Introduction

1.1	La technologie Spintronic	11
1.2	Le matériau magnétique Yttrium Iron Garnet	11

1.1 La technologie Spintronic

1.2 Le matériau magnétique Yttrium Iron Garnet



Le filtre configurable en fréquences

1	Etude des résonateurs <i>Elliptika</i> ..	17
1.1	Les résonateurs de type <i>Openloop</i>	17
	Le résonateur Openloop res04_3GHz	18
2	Etude du couplage de résonance électrique et magnétique	19
2.1	Le banc de mesures utilisé	19
2.2	Mesure de la résonance électrique du filtre à simple STUB	20
2.3	La résonance magnétique de l'Yttrium Iron Garnet	22
2.4	Le couplage des résonances électrique et magnétique	22
2.4.1	Mise en évidence du couplage de résonance	22
2.4.2	Balayage en champs et en fréquences	23
2.4.3	Utilisation du modèle de couplage harmonique	24
2.4.4	Détermination du champs magnétique résonant	25
3	Etude du contrôle des pertes magnétiques dans le YIG	27
3.1	Balayage en courant et en fréquences	27
3.2	Correspondance des valeurs de S21 en champs et en courant	28

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

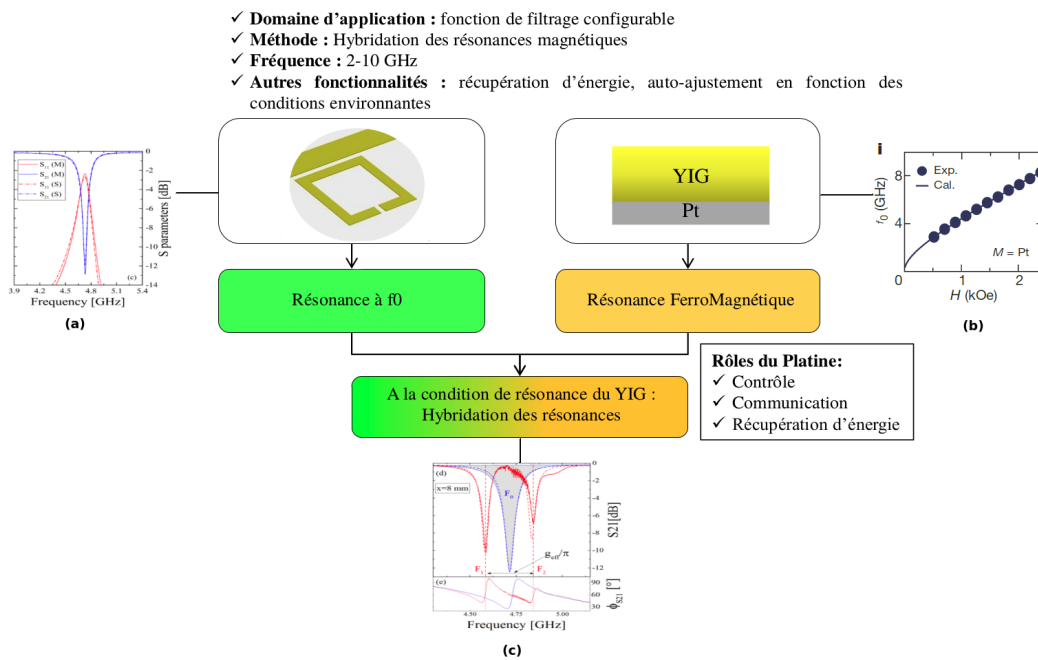


FIGURE 1.1 – *Filtre configurable*

Figure 1.1 | Filtre configurable. **a**, Les paramètres S_{11} et S_{21} du résonateur électrique¹ autour de 5 GHz. **b**, La courbe quadratique² 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.

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

2. 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*.

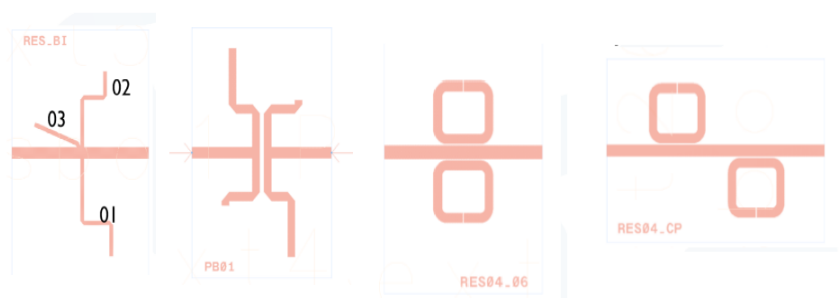
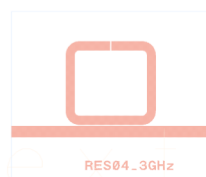


FIGURE 1.1 – Résonateurs Elliptika

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

$w = 1 \text{ mm}$
Res04_3GHz
Gap = 0.12 mm

FIGURE 1.2 – Openloop res04_3GHz

Section 2. Etude du couplage de résonance 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 satique 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 :

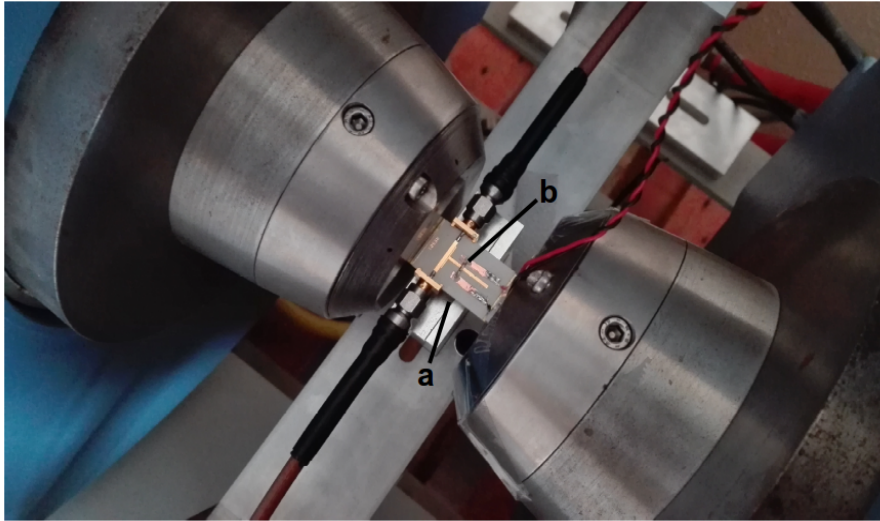


FIGURE 2.2 – *Banc de mesures-2, laboratoire Spintronic*

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($6\text{ }\mu\text{m}$)/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.

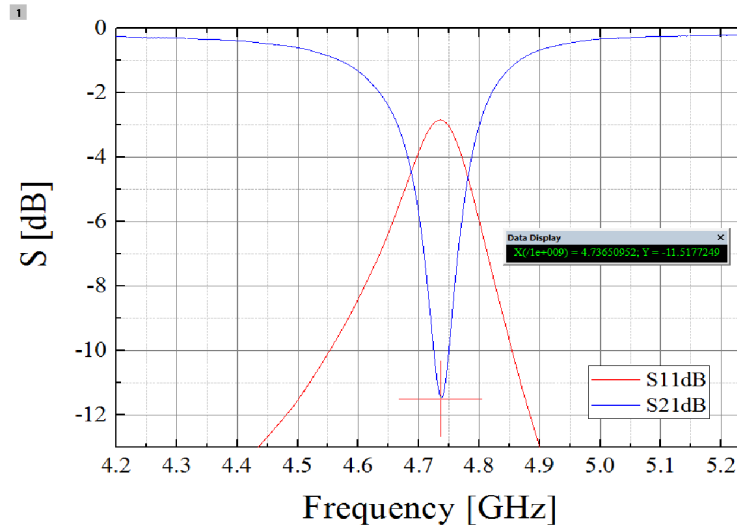
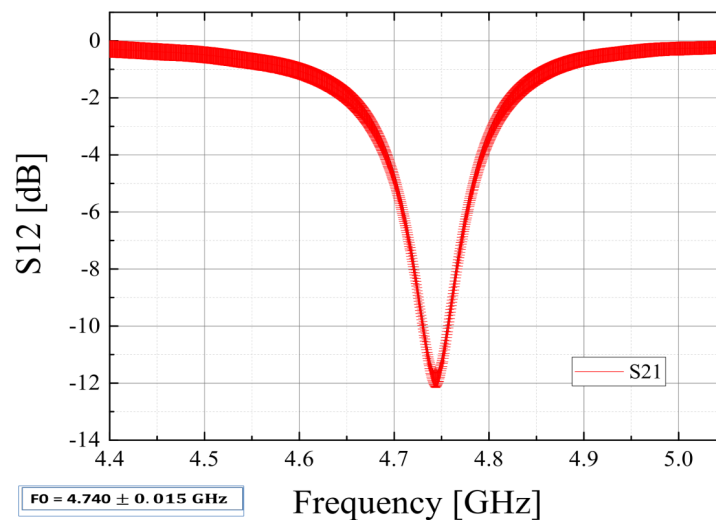
FIGURE 2.3 – *Résonance électrique*

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 paramètre 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 élevée 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.

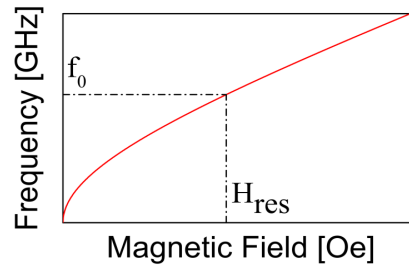


FIGURE 2.5 – *Résonance magnétique du YIG*

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 S_{21} du filtre à $H=983.48$ Oe, $H_{res}=995.92$ Oe et $H=1010.58$ Oe.

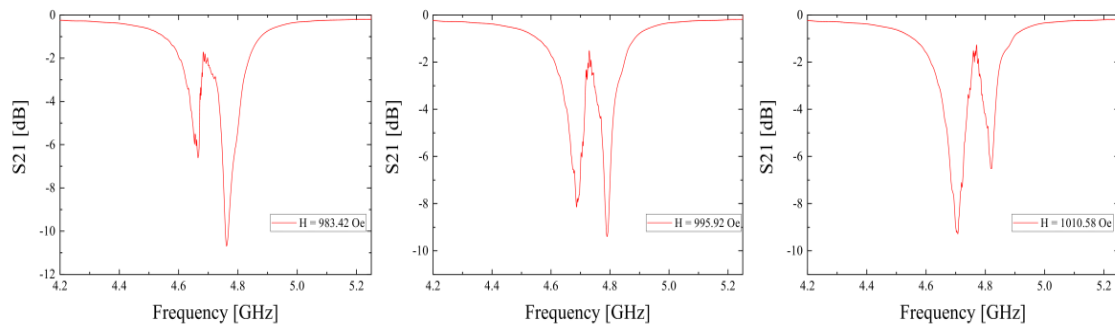


FIGURE 2.6 – *Paramètre S_{21} autour de $H = H_{res}$*

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

Lorsqu'un champ 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 due 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 S_{21} .

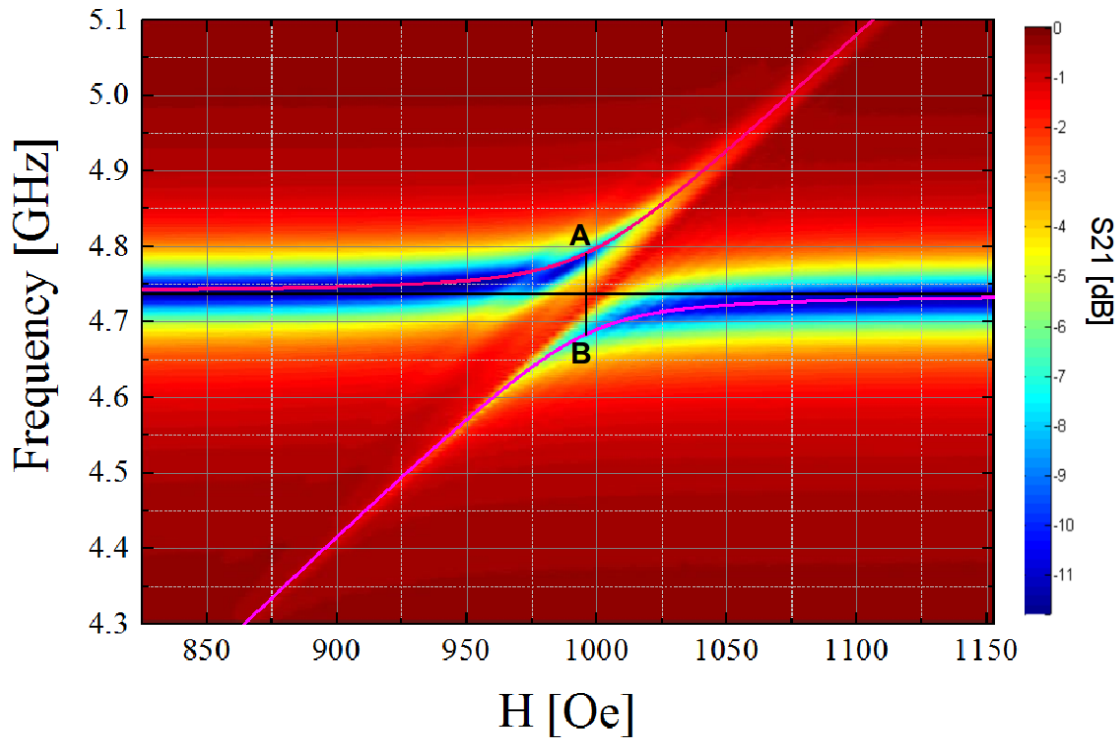


FIGURE 2.7 – *Paramètre S_{21} - Balayage en champs magnétique et en fréquences*

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 modèle 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.

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 ou 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 fomules 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 :

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

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

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 S_{21} , 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 S_{21} (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 :

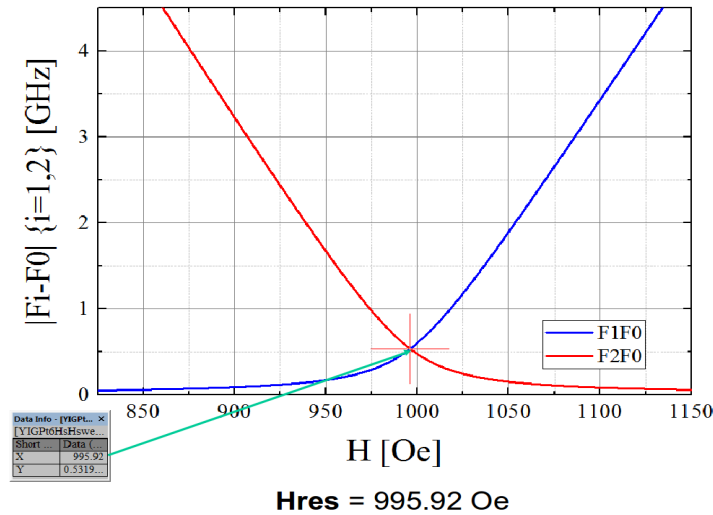


FIGURE 2.8 – Distance des fréquences de résonance f_1 et f_2 à f_0

Les courbes se croisent au point d'abscisse $H_{res} \simeq 995.92 \text{ Oe}$. 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 $f_2 - f_1 \simeq 634 \text{ MHz}$. Le *gap* à $H=H_{res}$ a 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 S_{21} mesuré en dB à $H=0 \text{ Oe}$ et à $H=H_{res}$:

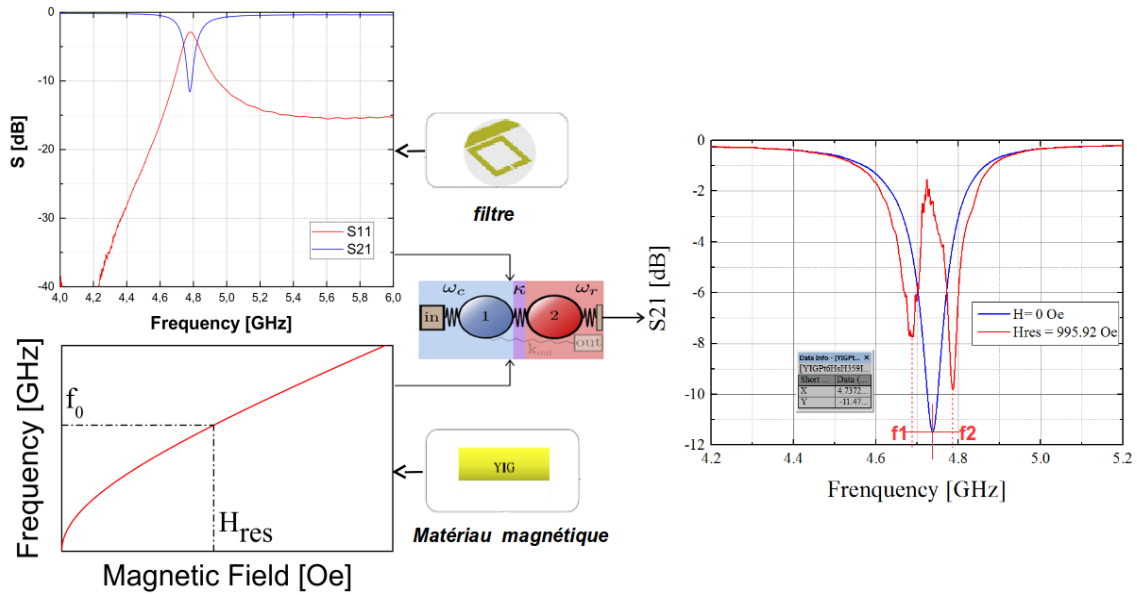


FIGURE 2.9 – Hybridation de la résonance à $H=H_{res}$

Pour une valeur de champs appliqué $H=H_{res}$, il y a donc bien une hybridation de la résonance f_0 du mode fondamentale en deux résonances distinctes, f_1 et f_2 . Cette hybridation résulte du couplage entre les résonances électrique 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 S_{21} au niveau de la résonance f_1 à $H=H_{res}$.

A $H=H_{res}$, la valeur du paramètre de transmission S_{21} 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 S_{21} 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 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 [3.1](#) 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 [3.1](#). 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 [3.1](#). 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.

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

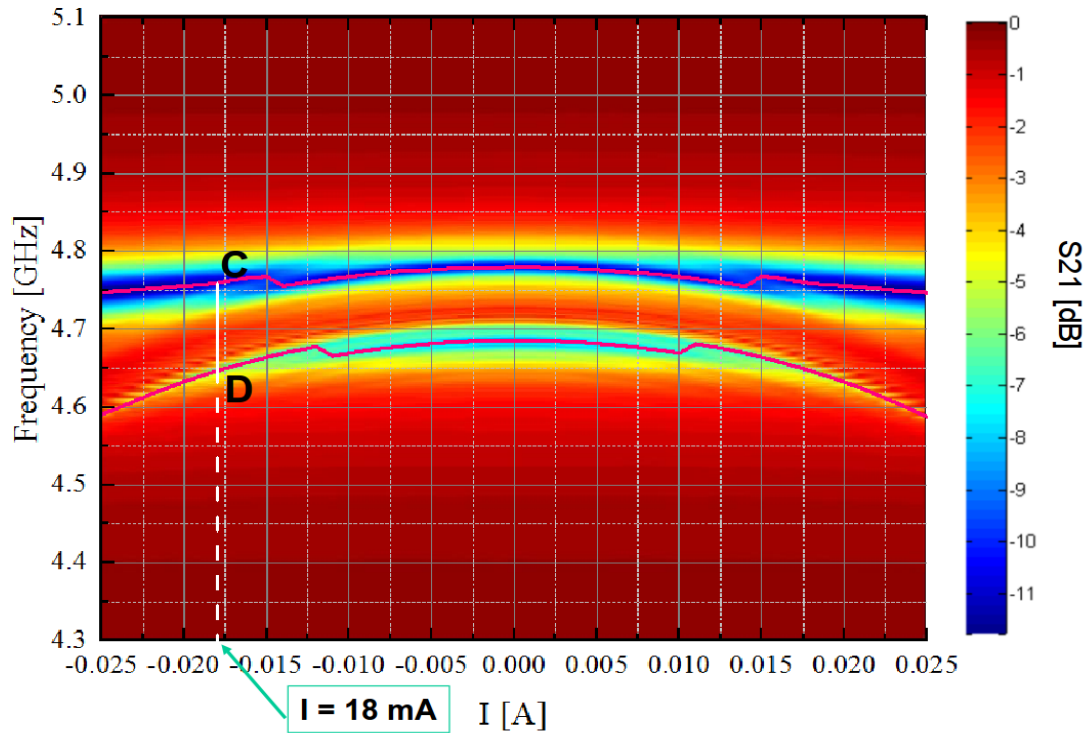


FIGURE 3.1 – *Paramètre S_{21} - Balayage en courant et en fréquences*

Figure 3.1 | Balayage en courant 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 . **c et d**, les valeurs respectives du paramètre S_{21} aux alentours de f_1 et f_2 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 f_1 est symétrique ce qui signifie que peu importe le sens du courant injecté dans le platine, la résonance f_1 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 f_1 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 contribution 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.

3.2 Correspondance des valeurs de S_{21} en champs et en courant

- 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 : *Yittrium Iron Garnet*
- Pt : *Platine*