

# **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

<b>2</b>	<b>Etude du couplage de résonance électrique et magnétique</b>	<b>19</b>
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	24
2.4.5	Balayage en courant et en fréquences.	26

**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

<b>1</b>	<b>Etude des résonateurs <i>Elliptika</i> ..</b>	<b>17</b>
1.1	Les résonateurs de type <i>Openloop</i> .....	17
	Le résonateur Openloop res04_3GHz .....	18
<b>2</b>	<b>Etude du couplage de résonance électrique et magnétique .....</b>	<b>19</b>
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 .....	24
2.4.5	Balayage en courant et en fréquences .....	26



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 du filtre configurable ainsi que ses différents composants.

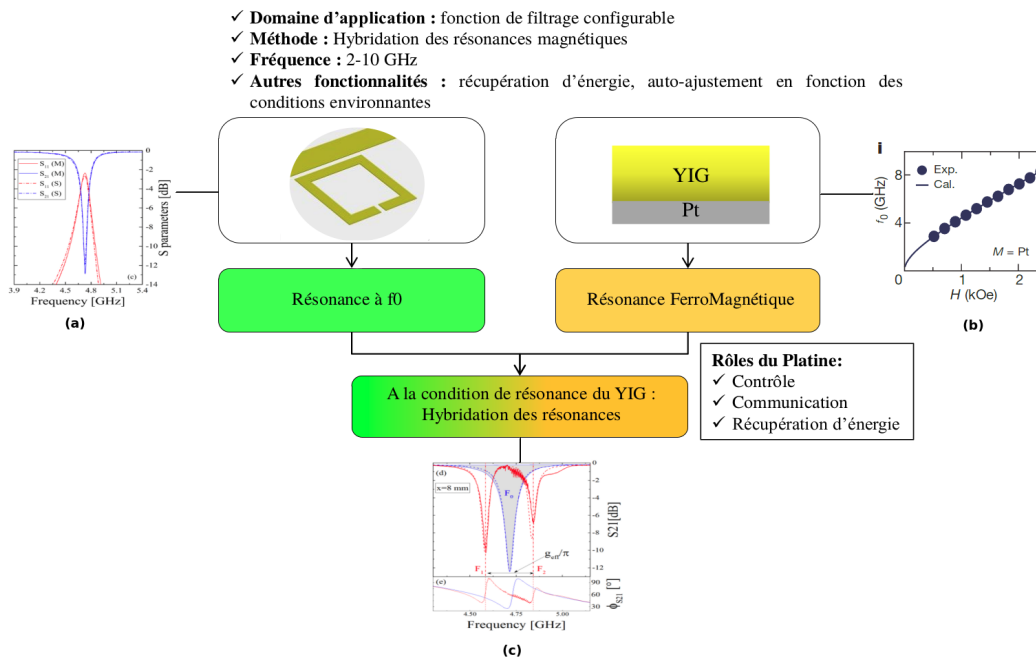


FIGURE 1.1 – *Filtre configurable*

**Figure 1.1 | Filtre configurable.** **a**, Les paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  du résonateur électrique<sup>1</sup> autour de 5 GHz. **b**, La courbe quadratique<sup>2</sup> 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 électrique<sup>2</sup>. 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.

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*.

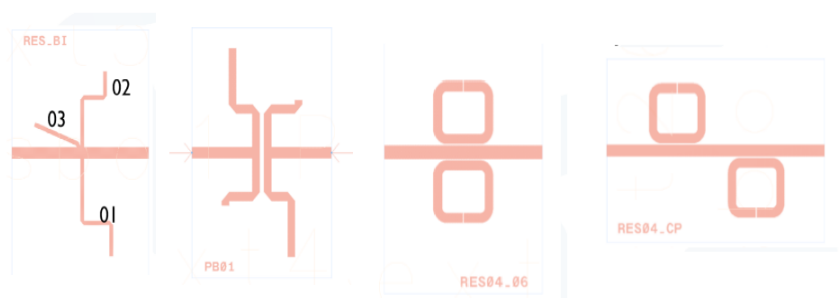
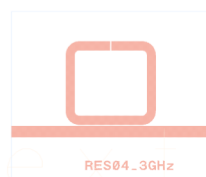


FIGURE 1.1 – Résonateurs Elliptika

### 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 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 :

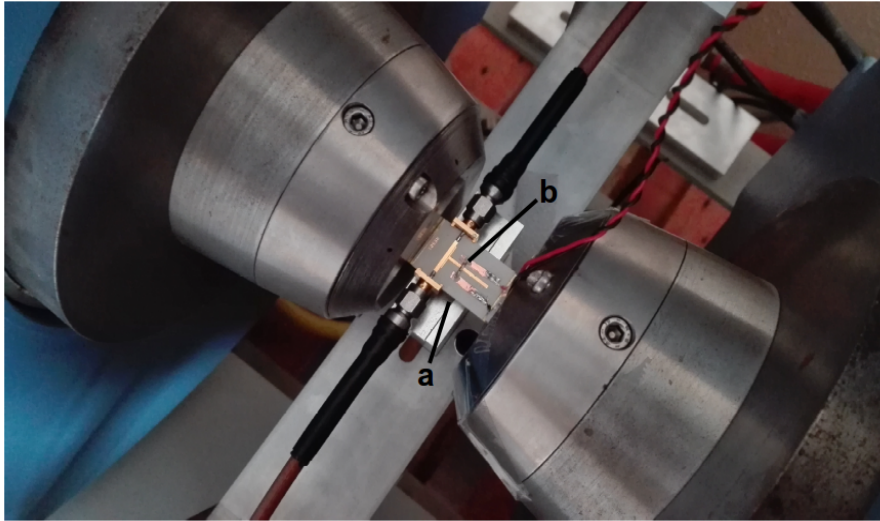


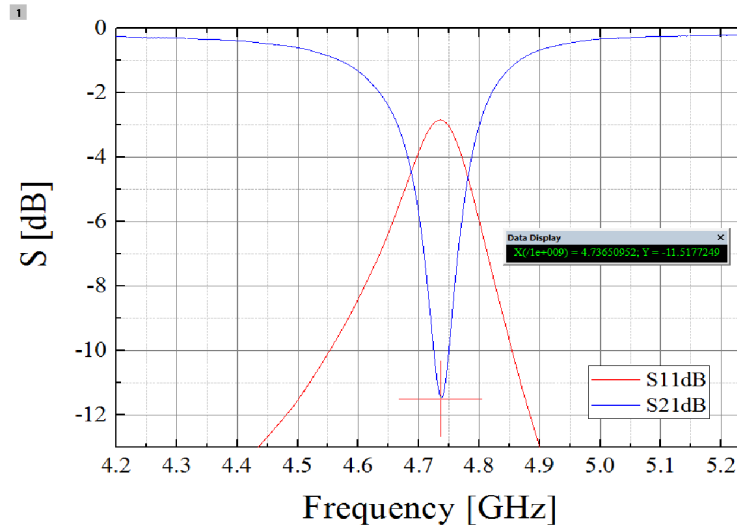
FIGURE 2.2 – *Banc de mesures-2, laboratoire Spintronic*

**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  $\mu\text{m}$ )/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

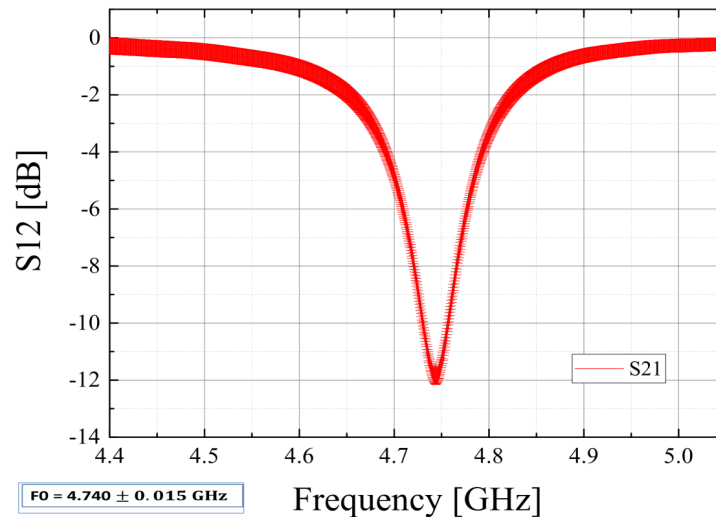
Le filtre à simple STUB utilisé est un filtre coupe-bande. La figure 2.3 ci-dessous représente les paramètres  $S_{11}$  de réflexion et  $S_{21}$  de transmission du filtre avec l'association YIG/Pt à champs magnétique nul.

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 YIG<sup>1</sup> en fonction du champs magnétique qui lui est appliqué.

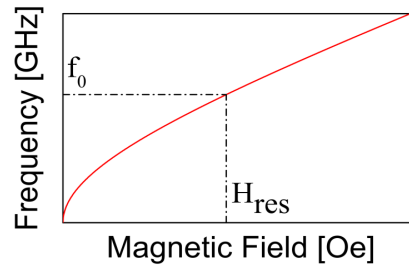


FIGURE 2.5 – *Résonance magnétique du YIG*

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.

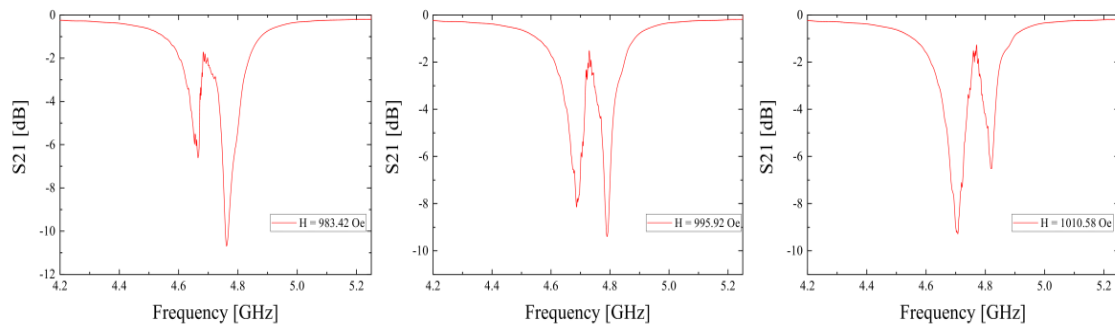


FIGURE 2.6 – *Paramètre  $S_{21}$  autour de  $H = H_{res}$*

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 dernier<sup>2</sup>.

#### 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  $2.9 \text{ Oe}$  et de  $210 \text{ KHz}$  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  $S_{21}$ .

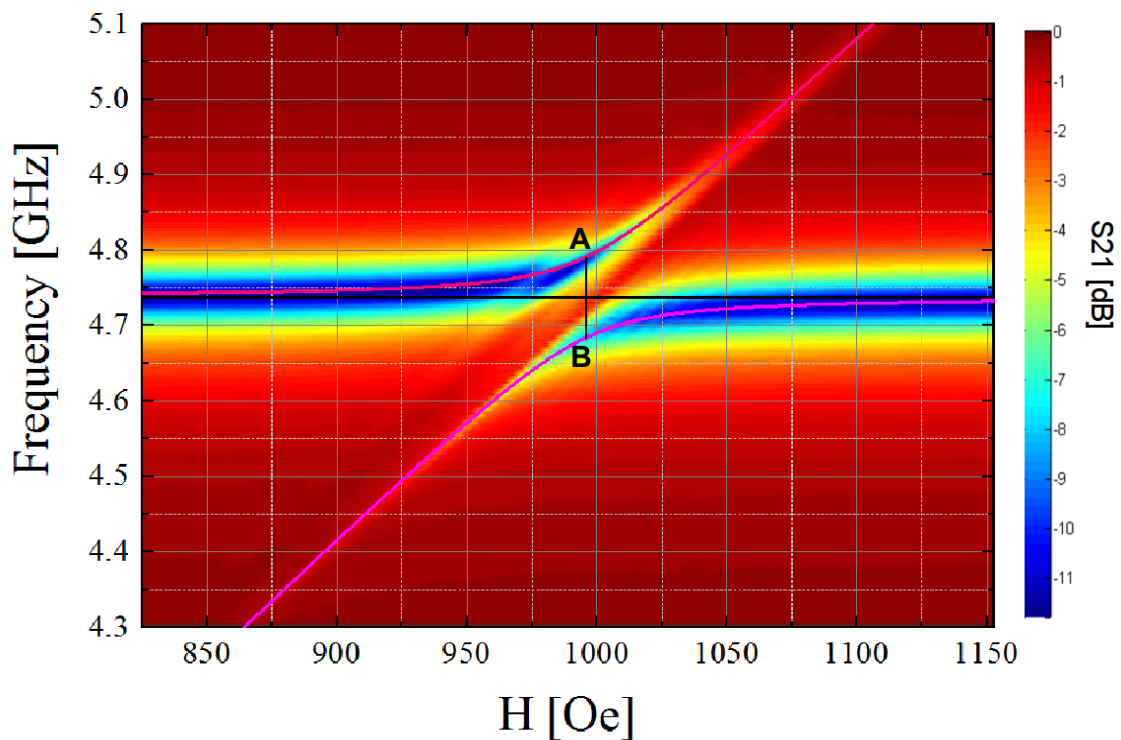


FIGURE 2.7 – *Paramètre  $S_{21}$  - Balayage en champs magnétique et en fréquences*

Le paramètre  $S_{21}$  est ici représenté par un code couleur. Il varie du rouge foncé pour 0 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. On observe ainsi l'apparition d'une bande de résonance interdite.

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



### 2.4.3 Utilisation du modèle de couplage harmonique

Le modèle de couplage harmonique<sup>3</sup> 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.

### 2.4.4 Détermination du champs magnétique résonant

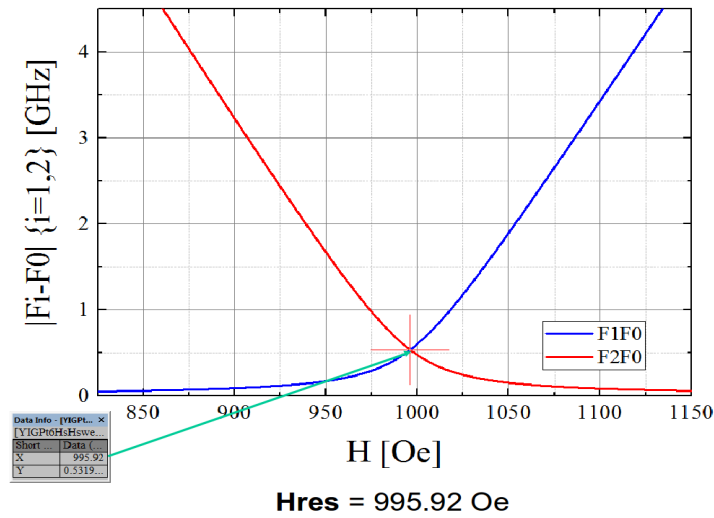
Toujours en se basant sur le résultat des mesures en champs et en fréquences du paramètre de transmission  $S_{21}$  (voir figure 2.7), il est possible de déterminer ainsi la valeur exacte  $H_{res}$  du champs magnétique à appliquer sur le filtre tel que le couplage de résonance électrique et magnétique soit au maximum.

En effet, d'après le modèle de couplage harmonique<sup>3</sup>, 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 :

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

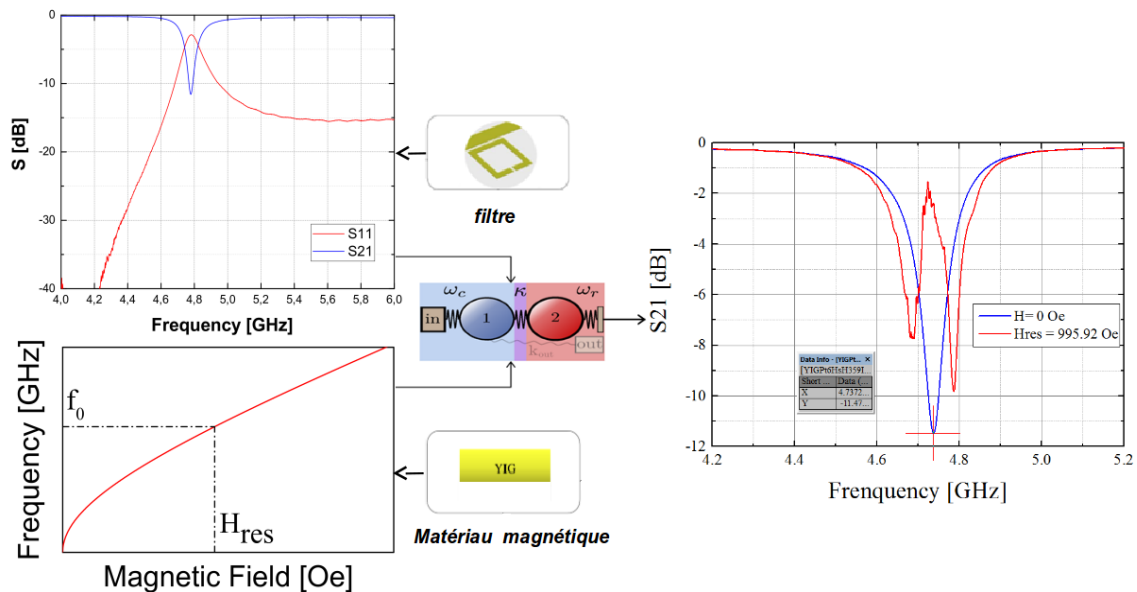


FIGURE 2.8 – Distance des fréquences de résonance  $f_1$  et  $f_2$  à  $f_0$ 

Les courbes se croisent au point d'abscisse  $H_{res} \simeq 995.92 \text{ Oe}$ . Lorsque le champ 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 champ 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  $S_{21}$  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.

#### 2.4.5 Balayage en courant et en fréquences

Afin d'établir un contrôle sur les pertes magnétiques du YIG et de pouvoir évaluer la configurabilité de la résonance du filtre, un courant  $I$  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*<sup>4</sup> et modifier les propriétés résonantes du filtre. 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  $2\text{ mA}$  et en fréquences avec un pas de  $210\text{ KHz}$  est effectué. Les résultats de mesures sur la valeur du paramètre  $S_{21}$  sont illustrés sur la figure 2.10 suivante :

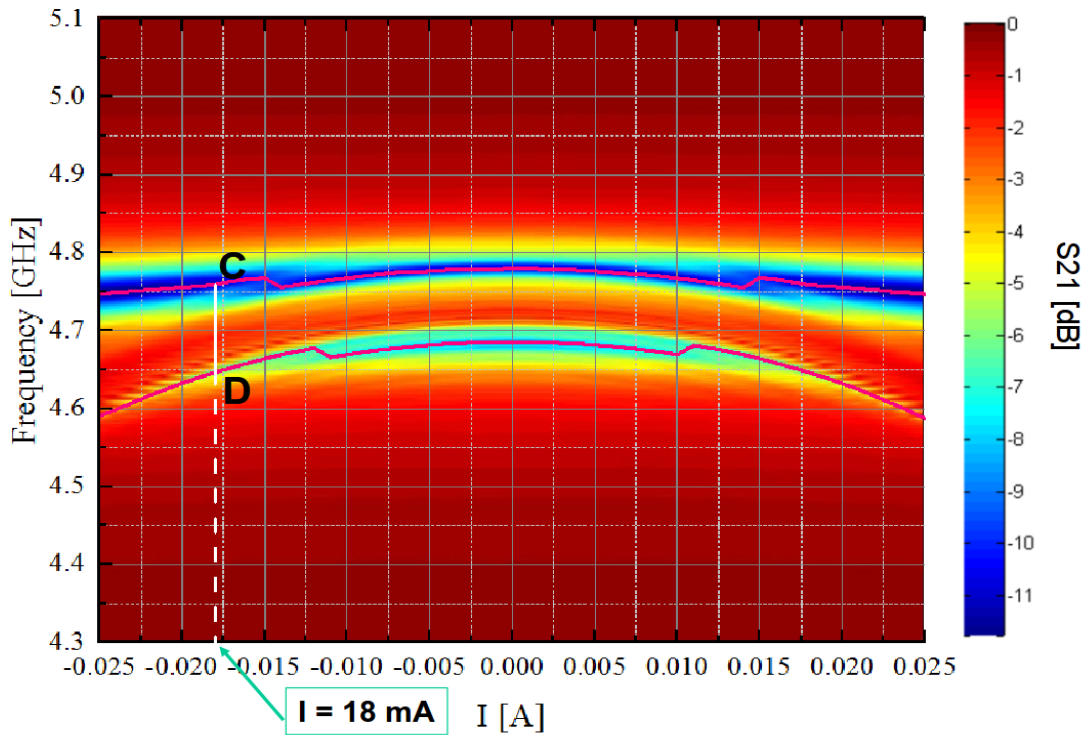


FIGURE 2.10 – Paramètre  $S_{21}$  - Balayage en courant et en fréquences

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















- 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*