



HEIG-VD
CAPTEURS
CAPTEUR DE PROXIMITÉ INDUCTIF

Mini-projet

Élèves :
Bianchi ROMAIN
Larghi ANDREA

Enseignants :
Michel DEMIERRE

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Objectifs	1
1.2	Matériel	1
2	Séance 1 - Caractéristique de la bobine	1
2.1	Objectifs	1
2.2	Méthode	1
2.3	Caractérisation de la bobine	2
2.3.1	Impédance	2
2.3.2	Sensibilité	6
2.4	Conclusion	6
3	Séance 2 - Fréquence de résonance et fonction de transfert	7
3.1	Objectifs	7
3.2	Théorie	7
3.2.1	Signal d'excitation	7
3.2.2	Fréquence de résonance	8
3.2.3	Optimisation de la sensibilité	8
3.2.4	Fonction de transfert	9
3.3	Pratique	10
3.3.1	Matériel	10
3.3.2	Fréquence de résonance	10
3.4	Résultats	11
3.5	Analyse	11
3.6	Conclusion	11
4	Séance 3 - Caractérisation du démodulateur seul	11
4.1	Objectifs	11
4.2	Théorie	12
4.2.1	Le multiplicateur	12
4.2.2	Le filtre	12
4.3	Méthode	12
4.3.1	Multiplicateur	12
4.3.2	Filtrage	13
4.4	Multiplicateur	13
4.4.1	Fréquence de 100 kHz	14
4.4.2	Fréquence de 300 kHz	14
4.4.3	Analyse	15
4.5	Filtrage	15
4.5.1	Représentation des signaux	15
4.6	Conclusion	15
5	Conclusion	16

Table des figures

1	analyseur d'impédance	2
2	Schéma électrique en série	2
3	Schéma électrique en parallèle	2
4	Inductance en fonction de la fréquence	3
5	Résistances en fonction de la fréquence	3
6	Zoom sur la figure 4	4
7	Zoom sur la figure 5	4
8	Inductance en fonction de la distance	4
9	Résistances en fonction de la distance	5
10	Impédance de la bobine aux distances	5
11	Sensibilité en fonction de la fréquence	6
12	Schéma du circuit résonant	7
13	Schéma du circuit résonant parallèle	8
14	Schéma du circuit résonant parallèle	8
15	Montage	10
16	Recherche de la fréquence de résonance	11
17	Schéma avec multiplicateur et filtre	11
18	Schéma du multiplicateur	12
19	Montage réalisé	13
20	Filtre RC	13
21	U_p , U'_{mod} et U_{mult} avec un déphasage de 0° à 100 kHz	14
22	U_p , U'_{mod} et U_{mult} avec un déphasage de 60° à 100 kHz	14
23	U_p , U'_{mod} et U_{mult} avec un déphasage de 120° à 100 kHz	14
24	U_p , U'_{mod} et U_{mult} avec un déphasage de 180° à 100 kHz	14
25	U_p , U'_{mod} et U_{mult} avec un déphasage de 0° à 300 kHz	14
26	U_p , U'_{mod} et U_{mult} avec un déphasage de 60° à 300 kHz	14
27	U_p , U'_{mod} et U_{mult} avec un déphasage de 120° à 300 kHz	14
28	U_p , U'_{mod} et U_{mult} avec un déphasage de 180° à 300 kHz	14
29	Filtre avec RC avec déphasage de 0°	15
30	Filtre avec RC avec déphasage de 60°	15
31	Filtre avec RC avec déphasage de 120°	15
32	Filtre avec RC avec déphasage de 180°	15

Liste des tableaux

1	Liste du matériel	1
---	-----------------------------	---

1 Introduction

Dans le cadre du cours "Capteurs", trois séances de laboratoires portant sur l'étude du comportement d'un capteur inductif à courant de Foucault ont été effectuées. Ce document présent est un rapport intermédiaire de ce mini-projet répondant aux objectifs.

1.1 Objectifs

- Appliquer les connaissances acquises au cours ;
- Observer comment se comportent la résistance et l'inductance du capteur ;
- Optimiser la sensibilité du capteur ;
- Déterminer la fonction de transfert et la transformée de Möbius.

1.2 Matériel

Nom	Marque	Modèle	N° de série
Capteur (maquette)	-	HEIG-VD	09
Circuit imprimé	-	HEIG-VD	12
Boite de laboratoire	-	HEIG-VD	1
Multimètre	Keysight	34460A	MY53102179
Oscilloscope	Tektronix	DPO 2014B	C030007
Générateur de signal	SIGLENT	SDG2082X	SDG"XCA1160916
Générateur de tension	GWINSTEK	GPD-3303S	A140629
Analyseur d'impédance	Keysight	E4990A	MY54100421

TABLE 1 – Liste du matériel

2 Séance 1 - Caractéristique de la bobine

2.1 Objectifs

Le but de cette première séance est de caractériser le capteur de proximité inductif à travers l'analyse de la résistance et l'inductance de la bobine, en fonction de la distance cible-capteur et de la fréquence.

2.2 Méthode

1. Brancher la maquette sur l'analyseur d'impédance comme montré ci-dessous (cf. fig. 1) ;
2. Déterminer la distance mécanique initiale et se positionner à 0.5 mm de celle-ci ;
3. Enregistrer la mesure de l'appareil qui permet d'obtenir la résistance ainsi que l'inductance de la bobine sur un intervalle de 150 kHz à 15 MHz ;
4. Répéter l'opération par pas de 0.05 mm jusqu'à atteindre 0.90 mm ce qui totalise 9 mesures.

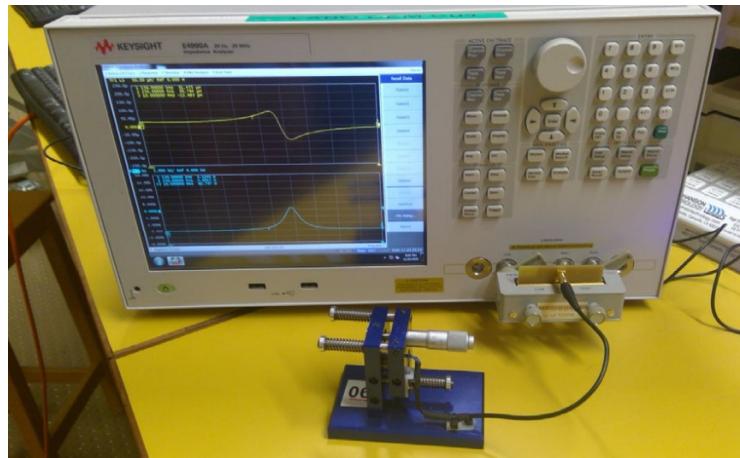


FIGURE 1 – analyseur d’impédance

2.3 Caractérisation de la bobine

2.3.1 Impédance

Les mesures réalisées avec l’analyseur d’impédance ont été sauvegardées en un total de 9 fichiers CSV, un pour chacune des distances. Chaque fichier comporte une colonne propre à la fréquence, l’inductance et la résistance. Ainsi, il est possible de déterminer l’impédance relative à la fréquence selon les 9 positions de la bobine.

Impédance de la bobine :

$$Z_b = R_b + j\omega L_b \quad (1)$$

Avec :

Z_b , l’impédance de la bobine [Ω] ;
 R_b , la résistance de la bobine [Ω] ;
 L_b , l’inductance de la bobine ;
 ω , la pulsation $= 2 \cdot \pi \cdot f$ [rad/s] ;
 f , la fréquence [Hz].

Représentations schématiques du circuit :

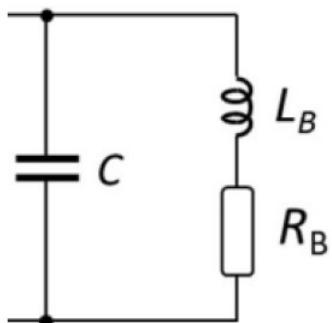


FIGURE 2 – Schéma électrique en série

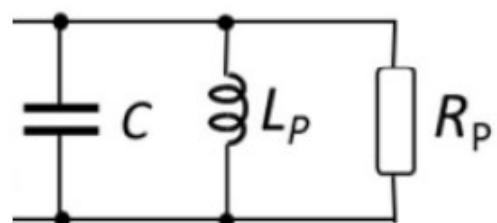


FIGURE 3 – Schéma électrique en parallèle

L'impédance ainsi déterminée a permis de représenter graphiquement l'inductance et la résistance de la bobine en fonction de la fréquence :

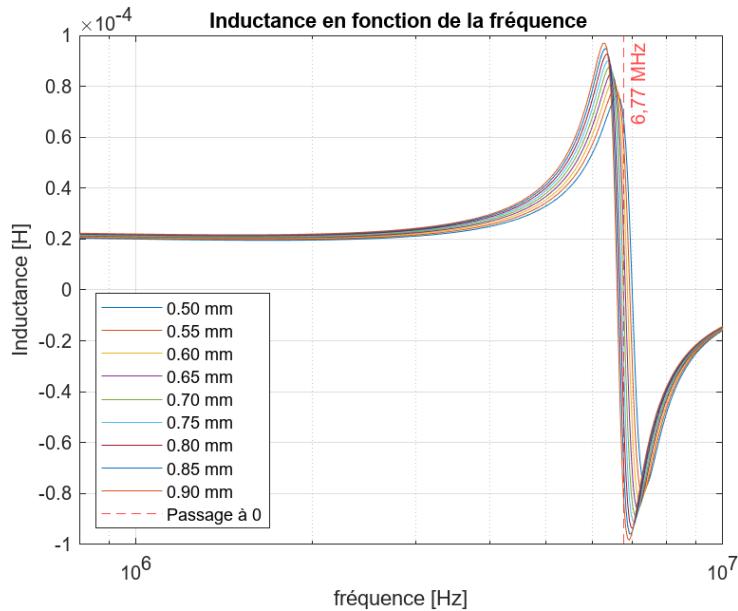


FIGURE 4 – Inductance en fonction de la fréquence

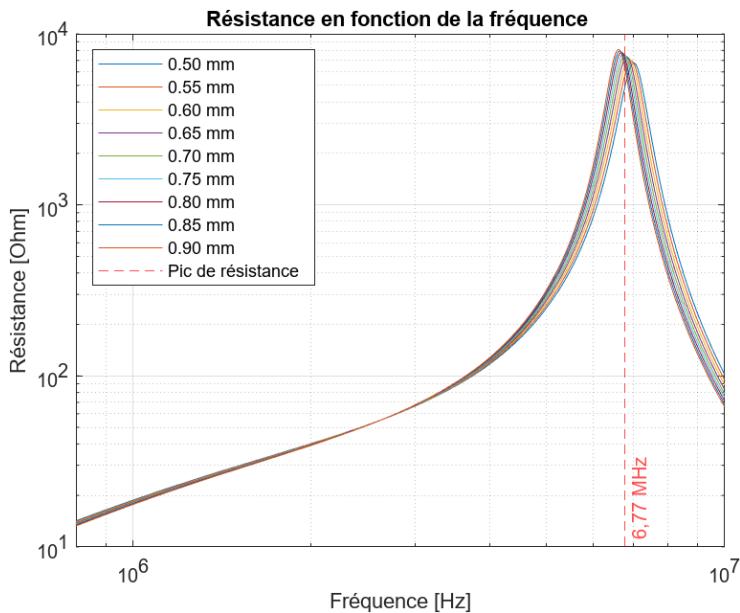


FIGURE 5 – Résistances en fonction de la fréquence

L'allure des courbes représentées sur les graphiques (cf. fig. 4 et 5) correspondent au comportement d'un circuit RLC. Ce résultat est représentatif du montage étudié. En effet, la **Résistance** est celle du fil de la bobine, **L'inductance** est celle de la bobine, le **Condensateur** est la capacité relative à la cible et à sa distance.

La fréquence de résonance du circuit peut-être aisément relevée puis-ce qu'il s'agit du passage à 0 de l'inductance et le pic de résistance. On relève graphiquement à la posi-

tion de repos une fréquence de résonance de 6.77 Mhz. La figure 4 montre encore qu'à basse fréquence l'inductance est constante ce qui suggère la présence d'une cible non-ferromagnétique

La figure 5 montre que les courbes se croisent à 1.63 MHz.

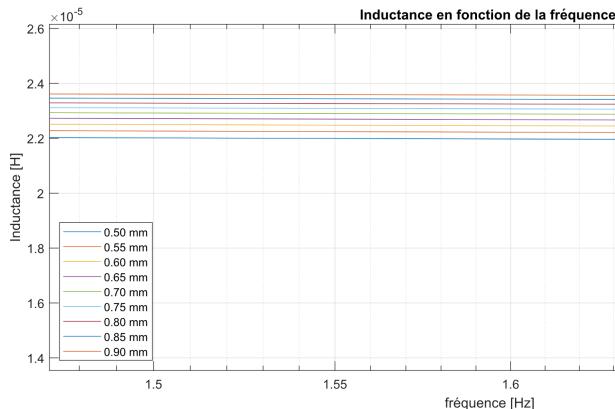


FIGURE 6 – Zoom sur la figure 4

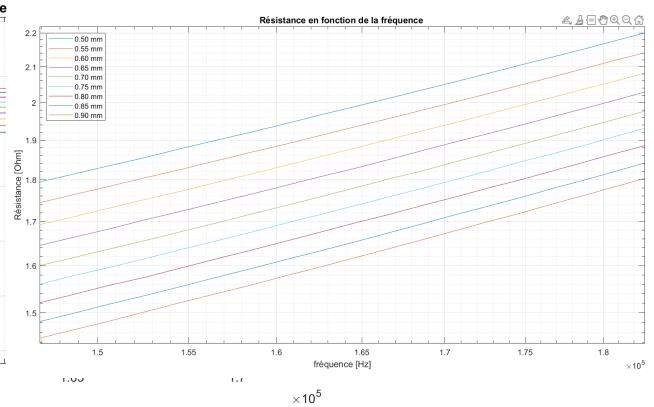


FIGURE 7 – Zoom sur la figure 5

Il est enfin possible de constater qu'en basse fréquence (140-160 kHz) les différentes courbes évoluent de manière linéaire.

L'inductance et la résistance en fonction de la distance ont ensuite été représentés :

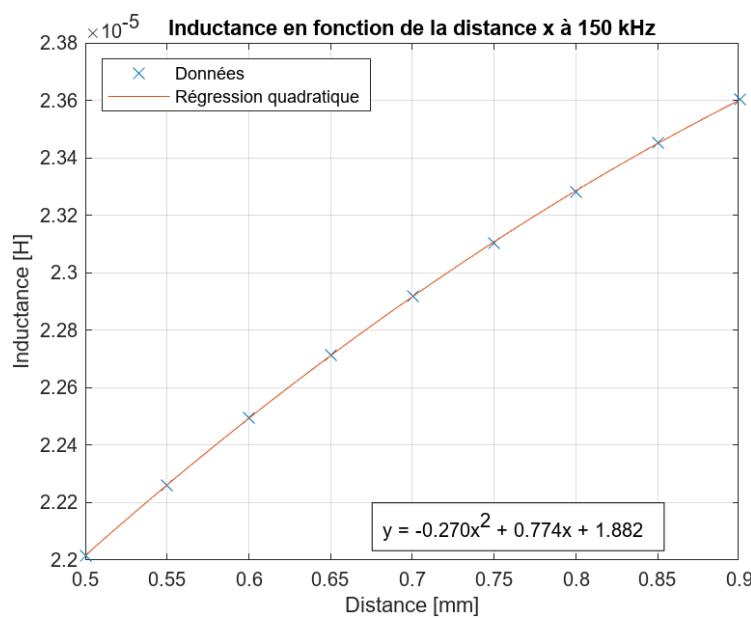


FIGURE 8 – Inductance en fonction de la distance

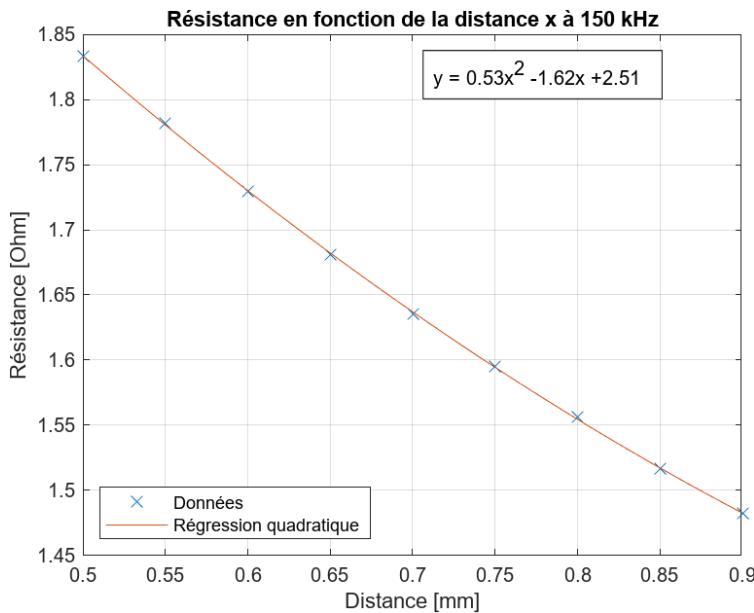


FIGURE 9 – Résistances en fonction de la distance

Les courbes tracées permettent de déterminer le type de matériau de la cible, ferromagnétique ou non-ferromagnétique. Les figures 8 et 9 montrent une augmentation de l'inductance et une diminution de la résistance lors de l'éloignement de la cible ce qui correspond au comportement d'un matériau conducteur non-ferromagnétique. De plus, la cible est de couleur "orangée", ce qui permet de conclure qu'elle est en **cuivre**.

L'impédance de la bobine aux différentes distances pour une fréquence de 150kHz à finalement été tracée :

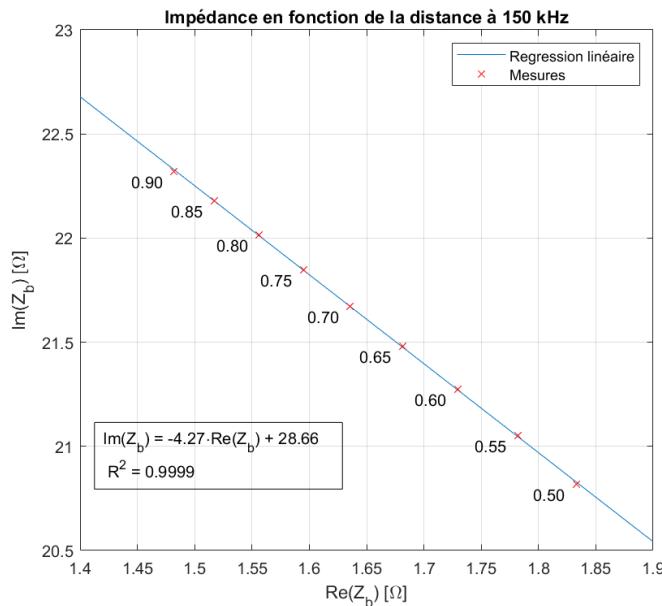


FIGURE 10 – Impédance de la bobine aux distances

La figure 10 montre que l'impédance évolue de manière "quasi" parfaitement linéaire, avec une variance de 0.9999. On remarque toute fois que la distance entre les point ne sont pas

les mêmes. Plus la cible s'éloigne, plus les points se rapprochent et la sensibilité diminue (eq :2). Ceci montre les limites de ce système, car si la sensibilité est trop faible alors les valeurs relevées ne sont plus tolérables.

2.3.2 Sensibilité

Grâce aux valeurs relevées, il est également possible de déterminer la sensibilité de ce capteur qui, pour une position de repos à 0.7 mm s'exprime :

$$S_b|_{x=0.7} = \left. \frac{|\delta Z_b|}{\delta x} \right|_{x=0.7} \quad (2)$$

Avec :

S_b , la sensibilité [Ω/mm] ;

δZ , l'écart d'impédance = $Z_{0.75} - Z_{0.65}$ [Ω] ;

δx , l'écart de distance = $x_{0.75} - x_{0.65}$ [mm].

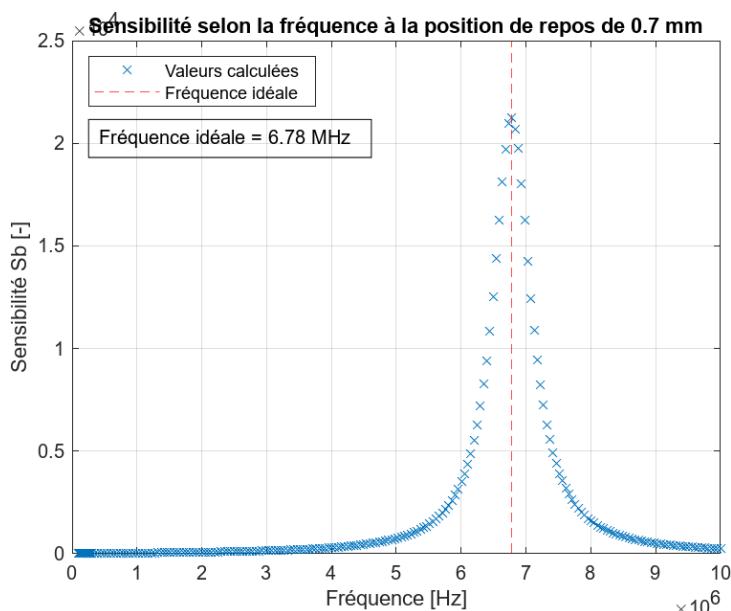


FIGURE 11 – Sensibilité en fonction de la fréquence

Le graphique ci-dessus montre la sensibilité calculée avec l'équation 2 en fonction de la fréquence, pour une position de repos de 0.7mm. Cette représentation permet d'observer qu'un pic sensibilité se forme de 5 à 9 MHz, culminant à 21'235 [Ω/mm] à la fréquence de 6.78 MHz.

2.4 Conclusion

Les premières analyses de ce capteur ont donné des résultats cohérents et qui permettent d'avoir une bonne appréhension des prochaines séances.

Résumer des résultats :

1. Le matériau constituant la cible est le cuivre ;

- Comportement conducteur non-ferromagnétique ;
 - Couleur "orangée".
2. Pour une fréquence de 150 kHz on observe une progression linéaire de l'impédance
 3. La fréquence de résonance du capteur est de 6.78 MHz ;
 - Passage à 0 de l'inductance et pic de résistance (cf. fig. 4 et 9)
 - Pic de sensibilité (cf. fig. 11)

3 Séance 2 - Fréquence de résonance et fonction de transfert

3.1 Objectifs

La première séance de ce projet a permis les observations suivantes :

- La fréquence idéale du système se situe à 6.78 MHz (Figure 11).
- À la fréquence de 2.6 MHz, la résistance étant constante en fonction de la position, il est difficile d'avoir un capteur de position avec ce système.
- Au-delà de la fréquence de 2.6 MHz, le modèle théorique devient trop différent de la réalité.
- À une fréquence proche de 150 kHz, pour l'inductance et la résistance, il est possible de considérer qu'entre deux positions, le système se comporte de manière linéaire.

Le but de cette séance sera donc d'abaisser la fréquence de résonance du système à une valeur exploitable. L'abaissement de la fréquence de résonance se fait par la mise en parallèle d'une capacité.

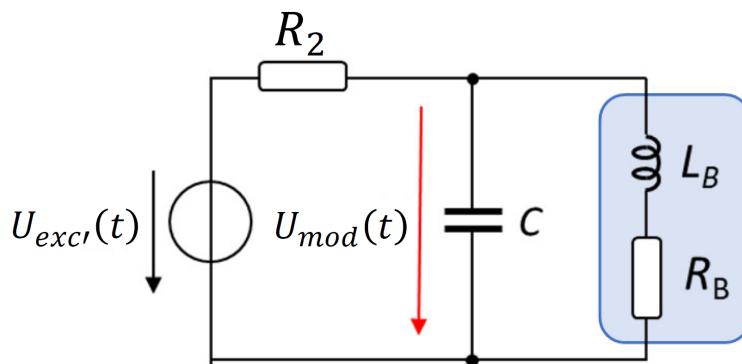


FIGURE 12 – Schéma du circuit résonant

Cette capacité C étant fournie, la fréquence de résonance sera déterminée théoriquement puis par manipulation. Enfin, une résistance sera ajoutée pour maximiser la sensibilité du système.

3.2 Théorie

3.2.1 Signal d'excitation

Le signal d'excitation est un signal carré, de fréquence f et d'amplitude A . Par décomposition en série de Fourier, ce signal peut être exprimé comme suit :

$$U_{exc}(t) = \frac{4}{\pi} A \cdot [\sin(\omega \cdot t) + \frac{1}{3} \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{5} \sin(5 \cdot \omega \cdot t) + \dots]$$

Le signal $U_{exc}(t)$ est traité par un filtre passe-bande RLC, conservant uniquement la première harmonique. Le signal d'excitation devient donc :

$$U_{exc'}(t) = \frac{4}{\pi} A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Ce signal sera celui appliqué à la maquette.

3.2.2 Fréquence de résonance

La fréquence de résonance est donnée par l'équation suivante :

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \sqrt{\frac{1}{L_B \cdot C} - \frac{R_B^2}{L_B^2}}$$

Avec L_B l'inductance de la bobine, R_B sa résistance et C la capacité de précision.

Lors du calcul, il est important de prendre en compte que L_B et R_B dépendent de la fréquence. Cette équation est donc implicite et nécessite une itération et une interpolation des données pour calculer la fréquence de résonance.

3.2.3 Optimisation de la sensibilité

Pour un circuit en parallèle, la sensibilité à la position de repos et à la fréquence de résonance est maximisée lorsque R_0 est égale à R_P .

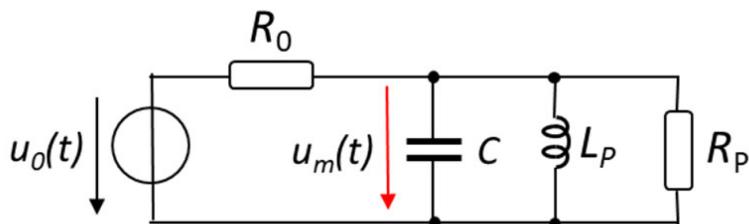


FIGURE 13 – Schéma du circuit résonant parallèle

En effet, à la fréquence de résonance, la capacité et l'inductance peuvent être ignorées. Le système se comporte alors comme un diviseur résistif.

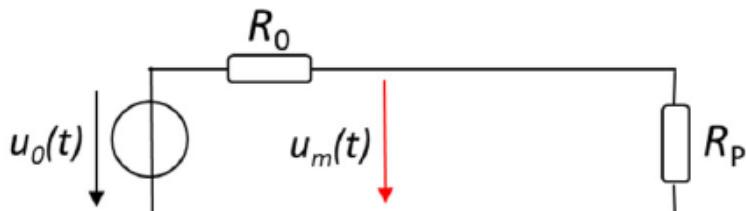


FIGURE 14 – Schéma du circuit résonant parallèle

Il est donc possible d'écrire l'équation suivante :

$$U_m(t) = \frac{R_P}{R_0 + R_P} U_0(t) = \frac{1}{2} U_0(t)$$

Pour notre système :

$$U_m(t) = \frac{2}{\pi} A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Ce qui donne en valeur crête :

$$U_m(t) = \frac{2}{\pi} A$$

Le système utilisé ayant sa résistance et son inductance en série, il convient de les transformer en parallèle. La conversion est régie par les équations suivantes :

$$L_P = L_B \cdot \left(1 + \frac{1}{Q^2}\right)$$

$$R_P = R_B \cdot (1 + Q^2)$$

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot L_B}{R_B}$$

3.2.4 Fonction de transfert

La fonction de transfert du système est donnée par l'équation suivante :

$$\underline{H}(\underline{Z}_b) = \frac{\underline{Z}_b}{(1 + j \cdot \omega \cdot C \cdot R_0) \underline{Z}_b + R_0}$$

3.3 Pratique

3.3.1 Matériel

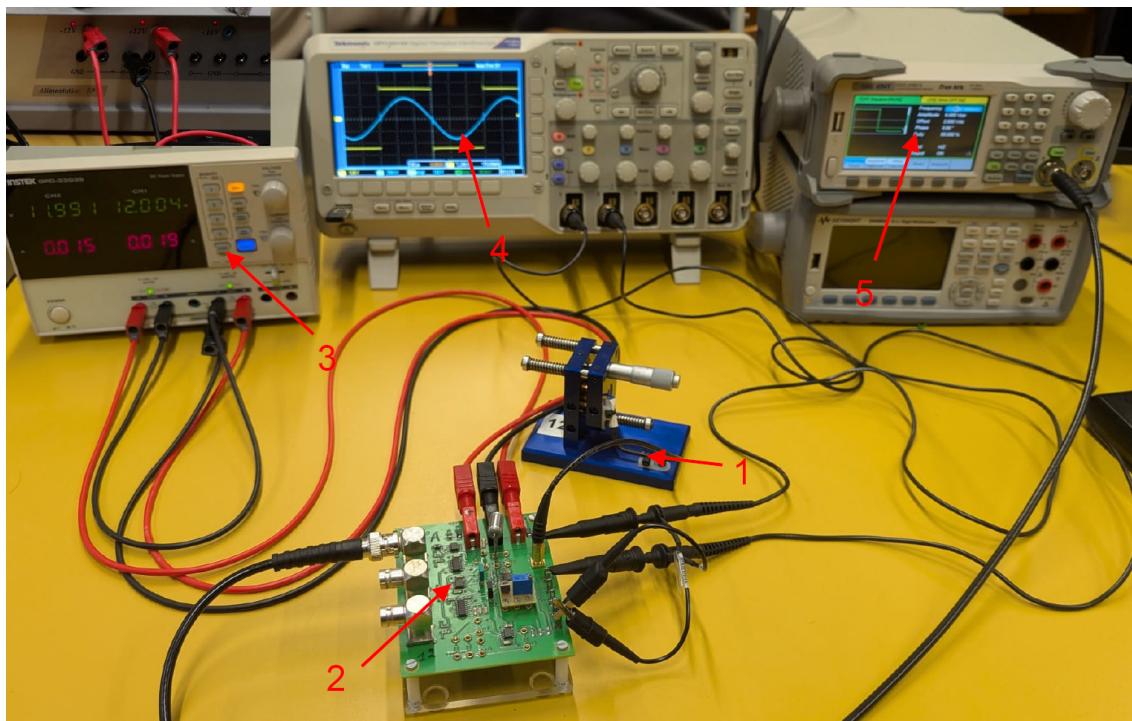


FIGURE 15 – Montage

1. Maquette
2. Carte électronique
3. Alimentation
4. Oscilloscope
5. Générateur de signaux

La sonde 1 est sur le signal d'excitation de la carte (U_{exc}), la sonde 2 est sur la sortie du système (U_{mod})

3.3.2 Fréquence de résonance

Pour rechercher la fréquence de résonance, la capacité de précision a été montée sur l'emplacement C2. De plus, une résistance de 820Ω a été montée sur l'emplacement R2.

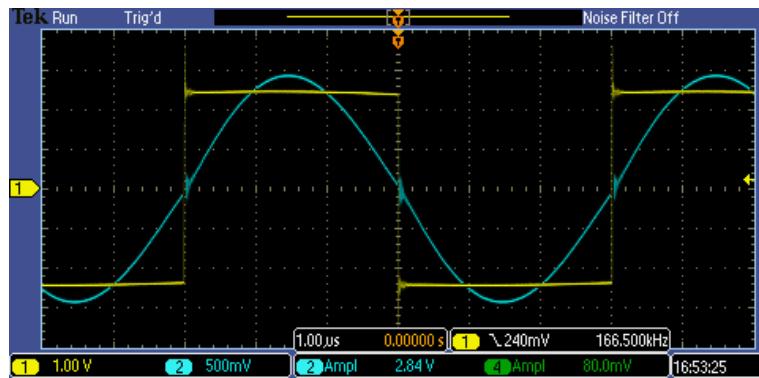


FIGURE 16 – Recherche de la fréquence de résonance

3.4 Résultats

3.5 Analyse

3.6 Conclusion

4 Séance 3 - Caractérisation du démodulateur seul

4.1 Objectifs

L'objectif de la séance est d'observer le comportement du démodulateur par le biais du multiplicateur et du filtre passe-bas ;

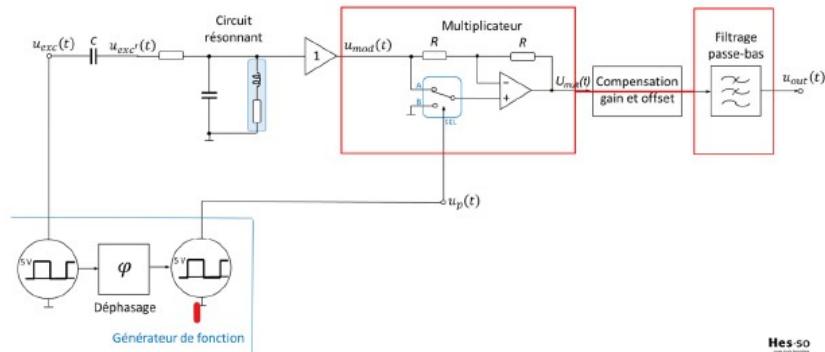


FIGURE 17 – Schéma avec multiplicateur et filtre

4.2 Théorie

4.2.1 Le multiplicateur

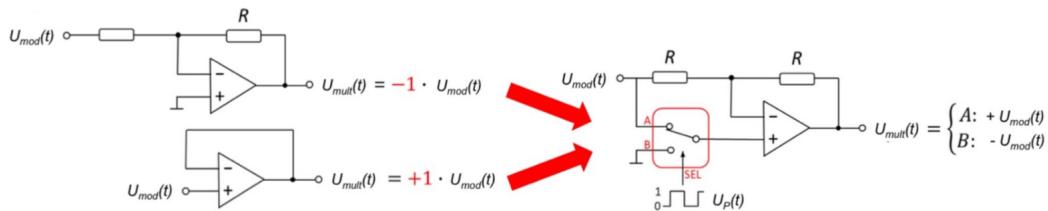


FIGURE 18 – Schéma du multiplicateur

Comme montré sur le schéma ci-dessus (cf. fig. 18), le rôle du multiplicateur est de multiplier le signal U_{mod} par la valeur du sélecteur. La sélection se fait par l'envoi d'un signal carré U_p vers le sélecteur qui prend la valeur :

- A : +1 quand l'amplitude max du signal est maximale ;
- B : -1 quand l'amplitude du signal carré est nulle

4.2.2 Le filtre

Les filtres passe-bas a plusieurs utilités :

- Il supprime la composante $2f_0$ provenant de la multiplication ;
 $A \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t) = \frac{A}{2} (\cos(\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi))$
- Il supprime des harmoniques du signal carré ;
- Il diminue du bruit en ne laissant que la bande passante utile.

4.3 Méthode

4.3.1 Multiplicateur

- Montage :
- Le jumper J6 doit être monté ;
- Le jumper J3 doit être positionné sur les pins 2 et 3 du PCB ;
- Brancher la sortie U_{mult} à l'oscilloscope ;
- Alimenter le PCB à -12 et 12 V ;
- Alimenter U'_{mod} avec un sinus 1 Vp ;
- Alimenter U_p avec un signal carré 0-5 V.

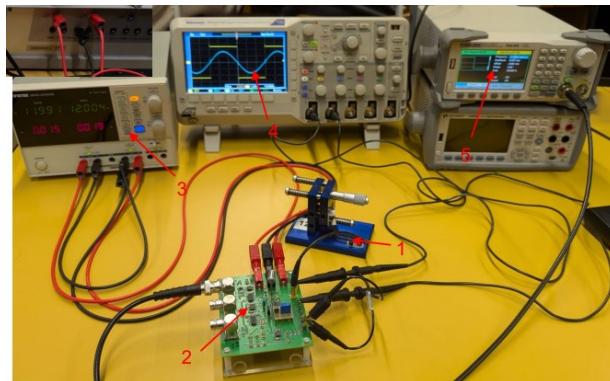


FIGURE 19 – Montage réalisé

— Mesures :

1. Régler le signal U'_{mod} à 100 kHz ;
2. Faire varier le déphasage de U_p de 0 à 180° par pas de 20° ;
3. Réeffectuer l'étape 2 pour une fréquence U'_{mod} de 300 kHz.

4.3.2 Filtrage

— Montage :

- Réaliser le montage du filtre ci-dessous ;
- $R_{14} = 0$ et $C_6 = \text{nc}$;
- $R_{10} = R_{13} = \approx 10 \text{ k}\Omega$.

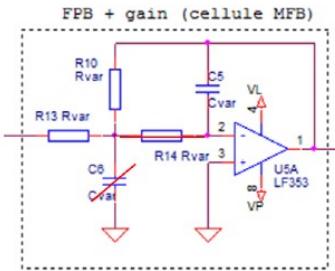


FIGURE 20 – Filtre RC

Il serait possible d'obtenir un filtre d'ordre 2, il suffit de rajouter une capacité C_6 de 10 nF.

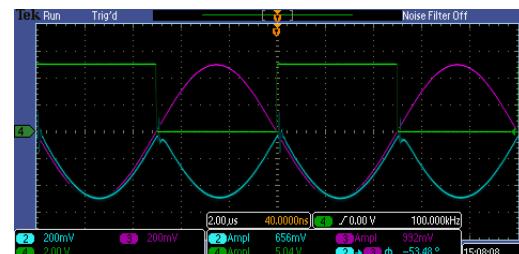
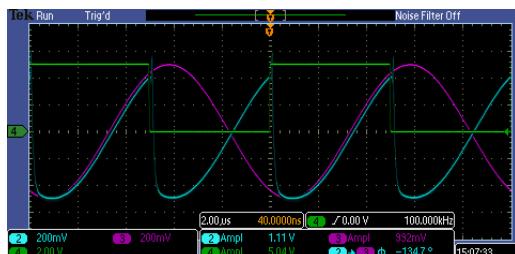
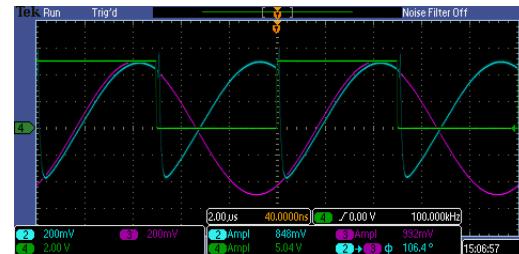
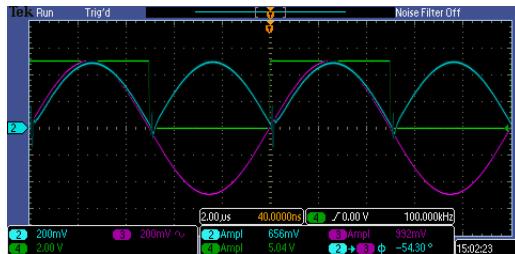
— Mesures :

1. Relever la tension U_{out} du démodulateur sur le multimètre, pour les mêmes déphasages que pour la manipulation précédente.

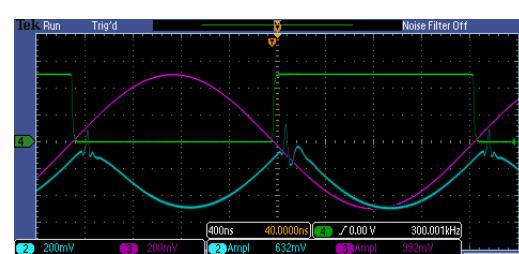
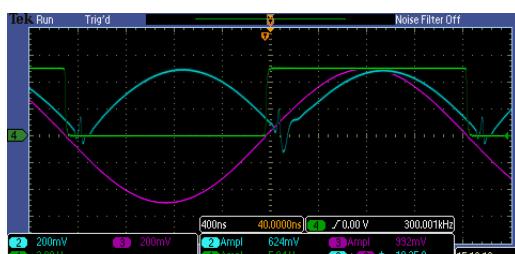
4.4 Multiplicateur

Cette section présente les captures des signaux observés à l'oscilloscope. Il a été décidé de ne montrer que les déphasages de 0° 60° 120° et 180° afin de ne pas surcharger le rapport. Sur les représentations, U_{mult} est sur le channel 2, U'_{mod} le 3 et U_p sur le 4.

4.4.1 Fréquence de 100 kHz



4.4.2 Fréquence de 300 kHz



4.4.3 Analyse

Les représentations permettent d'observer l'effet du multiplicateur décrit au point 4.2.1, puisque le signal U_{mult} s'inverse lors du passage à zéro du signal carré. Cette inversion se produit indépendamment de la valeur du déphasage.

Des différences apparaissent toutefois entre les séries de mesures à 100 kHz et à 300 kHz. À 300 kHz, l'électronique peine à suivre : le signal U_{mult} est déphasé par rapport au signal U'_{mod} , et de fortes aberrations sont visibles lors des flancs du signal U_p .

Une fréquence de 300 kHz est donc trop élevée pour ce système, ce qui justifie l'utilisation d'une fréquence de 150 kHz pour les manipulations précédentes.

4.5 Filtrage

4.5.1 Représentation des signaux

Ci-dessous sont représentés les signaux aux différents déphasages relevés à l'oscilloscope.

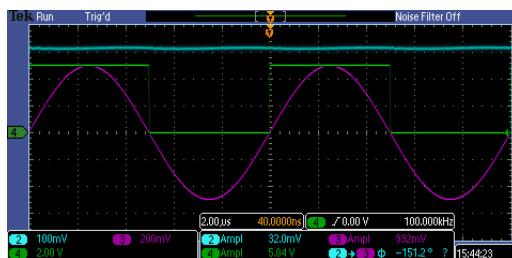


FIGURE 29 – Filtre avec RC avec déphasage de 0°

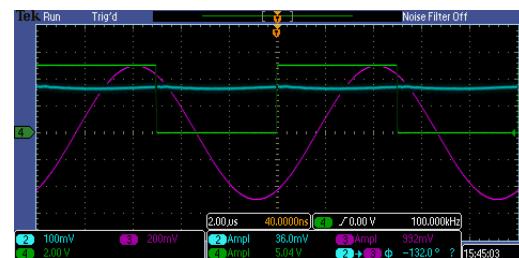


FIGURE 30 – Filtre avec RC avec déphasage de 60°



FIGURE 31 – Filtre avec RC avec déphasage de 120°

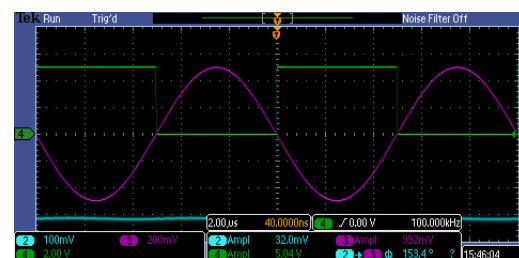


FIGURE 32 – Filtre avec RC avec déphasage de 180°

4.6 Conclusion

5 Conclusion

Yverdon, 29 décembre 2024

Bianchi Romain



Larghi Andrea

