



HEIG-VD  
CAPTEURS  
CAPTEUR DE PROXIMITÉ INDUCTIF

---

## Mini-projet

---

*Élèves :*  
Bianchi ROMAIN  
Larghi ANDREA

*Enseignants :*  
Michel DEMIERRE

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Objectifs . . . . .	1
1.2	Matériel . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Séance 1 - Caractéristique de la bobine</b>	<b>1</b>
2.1	Objectifs . . . . .	1
2.2	Méthode . . . . .	1
2.3	Caractérisation de la bobine . . . . .	2
2.3.1	Impédance . . . . .	2
2.3.2	Sensibilité . . . . .	5
2.4	Conclusion . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Séance 2 - Fréquence de résonance et fonction de transfert</b>	<b>6</b>
3.1	Objectifs . . . . .	6
3.2	Théorie . . . . .	7
3.2.1	Signal d'excitation . . . . .	7
3.2.2	Fréquence de résonance . . . . .	7
3.2.3	Optimisation de la sensibilité . . . . .	8
3.2.4	Fonction de transfert . . . . .	9
3.3	Pratique . . . . .	9
3.3.1	Montage . . . . .	9
3.3.2	Fréquence de résonance . . . . .	10
3.4	Résultats . . . . .	10
3.4.1	Fréquence de résonance . . . . .	10
3.4.2	Optimisation de la sensibilité . . . . .	10
3.4.3	Fonction de transfert . . . . .	11
3.5	Analyse . . . . .	12
3.6	Conclusion . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Séance 3 - Caractérisation du démodulateur seul</b>	<b>13</b>
4.1	Objectifs . . . . .	13
4.2	Théorie . . . . .	14
4.2.1	Le multiplicateur . . . . .	14
4.2.2	Le filtre . . . . .	14
4.3	Méthode . . . . .	14
4.3.1	Multiplicateur . . . . .	14
4.3.2	Filtrage . . . . .	15
4.4	Multiplicateur . . . . .	15
4.4.1	Fréquence de 100 kHz . . . . .	16
4.4.2	Fréquence de 300 kHz . . . . .	16
4.4.3	Analyse . . . . .	17
4.5	Filtrage . . . . .	17
4.5.1	Représentation des signaux . . . . .	17
4.5.2	Signal de sortie . . . . .	18
4.6	Conclusion . . . . .	18

<b>5 Séance 4 - Déphasage et linéarité</b>	<b>18</b>
5.1 Objectif . . . . .	18
5.2 Méthode . . . . .	18
5.3 Résultats . . . . .	19
5.4 Analyse . . . . .	21
5.5 Conclusion . . . . .	21
<b>6 Séance 5 - Réglage de la sensibilité</b>	<b>21</b>
<b>7 Conclusion</b>	<b>22</b>

## 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	Inductance en fonction de la distance . . . . .	4
7	Résistances en fonction de la distance . . . . .	4
8	Impédance de la bobine aux distances . . . . .	5
9	Sensibilité en fonction de la fréquence . . . . .	6
10	Schéma du circuit résonant . . . . .	7
11	Schéma du circuit résonant parallèle . . . . .	8
12	Schéma du circuit résonant parallèle . . . . .	8
13	Montage . . . . .	9
14	Recherche de la fréquence de résonance . . . . .	10
15	Représentation dans le plan complexe de l'impédance . . . . .	11
16	Représentation dans le plan complexe de la fonction de transfert . . . . .	12
17	Schéma avec multiplicateur et filtre . . . . .	13
18	Schéma du multiplicateur . . . . .	14
19	Montage réalisé . . . . .	15
20	Filtre RC . . . . .	15
21	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $0^\circ$ à 100 kHz . . . . .	16
22	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $60^\circ$ à 100 kHz . . . . .	16
23	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $120^\circ$ à 100 kHz . . . . .	16
24	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $180^\circ$ à 100 kHz . . . . .	16
25	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $0^\circ$ à 300 kHz . . . . .	16
26	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $60^\circ$ à 300 kHz . . . . .	16
27	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $120^\circ$ à 300 kHz . . . . .	16
28	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $180^\circ$ à 300 kHz . . . . .	16
29	Filtre avec RC avec déphasage de $0^\circ$ . . . . .	17
30	Filtre avec RC avec déphasage de $60^\circ$ . . . . .	17
31	Filtre avec RC avec déphasage de $120^\circ$ . . . . .	17
32	Filtre avec RC avec déphasage de $180^\circ$ . . . . .	17
33	Tension de sortie théorique et mesurée . . . . .	18
34	Montage - Séance 4 [ <b>donneelabo</b> ] . . . . .	19
35	Réponse du capteur - séance 4 . . . . .	20
36	Régressions selon le déphasage . . . . .	20

## Liste des tableaux

1	Liste du matériel . . . . .	1
2	Résumé des fréquences de résonance . . . . .	10
3	Résistance calculée et utilisée . . . . .	11
4	Tensions de sortie . . . . .	12
5	Tension aux différents déphasages et distances . . . . .	19

## 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 fait l'objet d'un rapport intermédiaire de ce mini-projet.

### 1.1 Objectifs

- Observer comment se comportent l'impédance de la bobine en présence d'une cible ;
- Optimiser la sensibilité du capteur ;
- Déterminer la fonction de transfert et la transformée de Möbius ;
- Démodulation.

### 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 l'impédance du capteur en fonction de la distance à laquelle se trouve la cible.

### 2.2 Méthode

1. Brancher la maquette sur l'analyseur d'impédance comme montré ci-dessous (cf. fig. 1) ;
2. Déterminer la distance de butée 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 100 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.

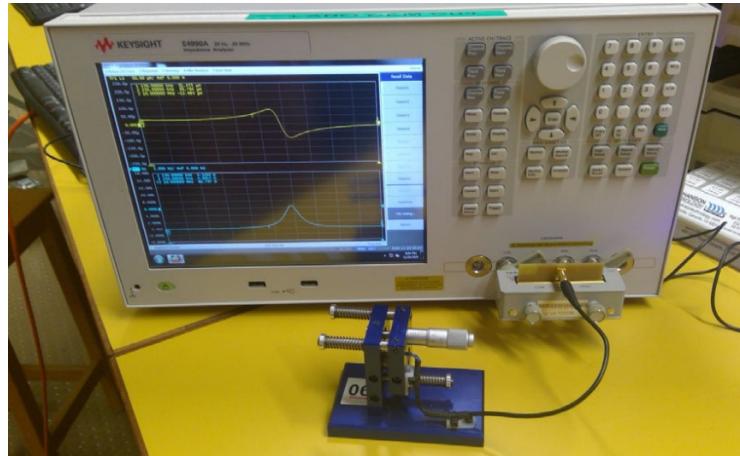


FIGURE 1 – analyseur d’impédance

## 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 [ $\Omega$ ] ;  
 $R_b$ , la résistance de la bobine [ $\Omega$ ] ;  
 $L_b$ , l’inductance de la bobine ;  
 $\omega$ , la pulsation  $= 2 \cdot \pi \cdot f$  [rad/s] ;  
 $f$ , la fréquence [Hz].

Représentations schématiques du circuit :

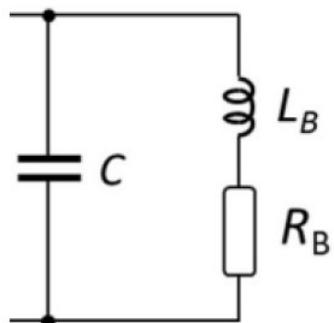


FIGURE 2 – Schéma électrique en série

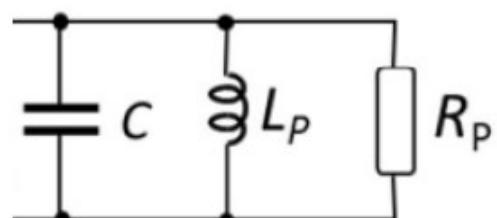


FIGURE 3 – Schéma électrique en parallèle

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

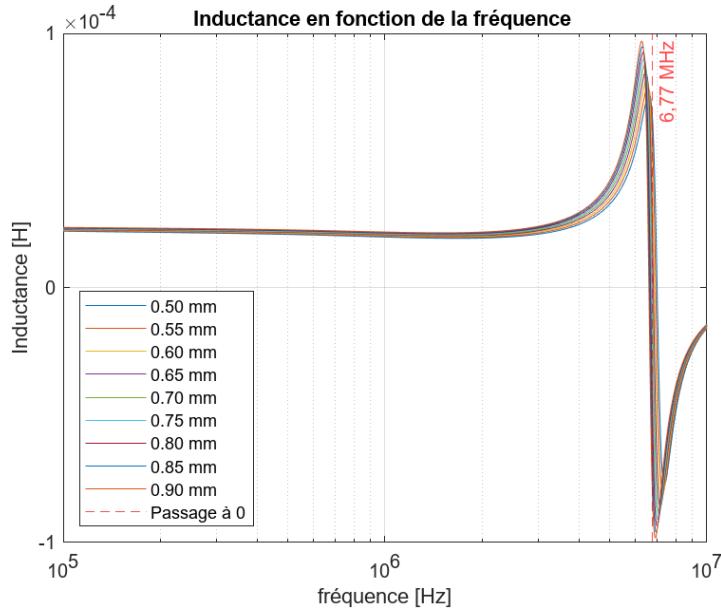


FIGURE 4 – Inductance en fonction de la fréquence

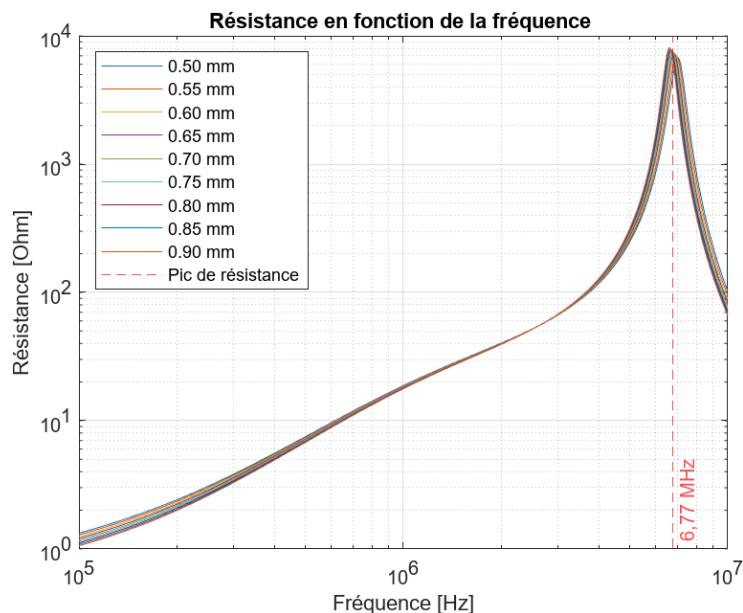


FIGURE 5 – Résistances en fonction de la fréquence

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 L** 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 puisque 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

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

L'inductance et la résistance à 150 kHz en fonction de la distance ont ensuite été représentées :

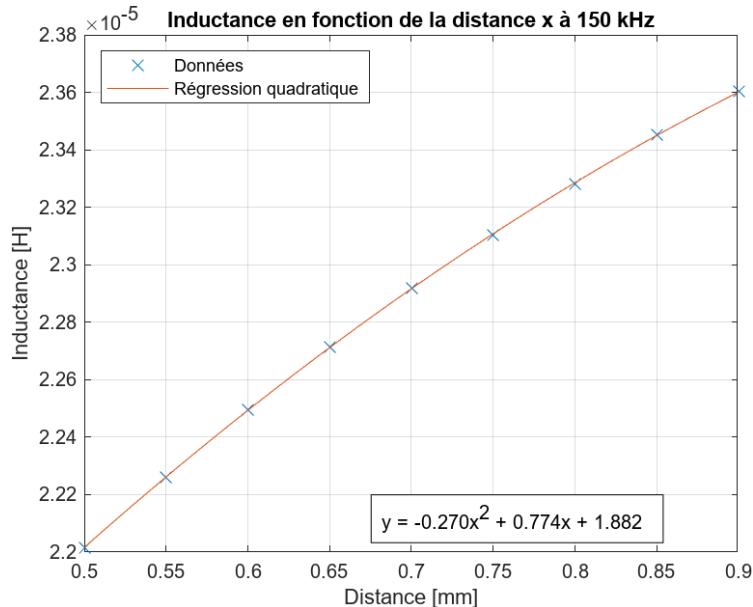


FIGURE 6 – Inductance en fonction de la distance

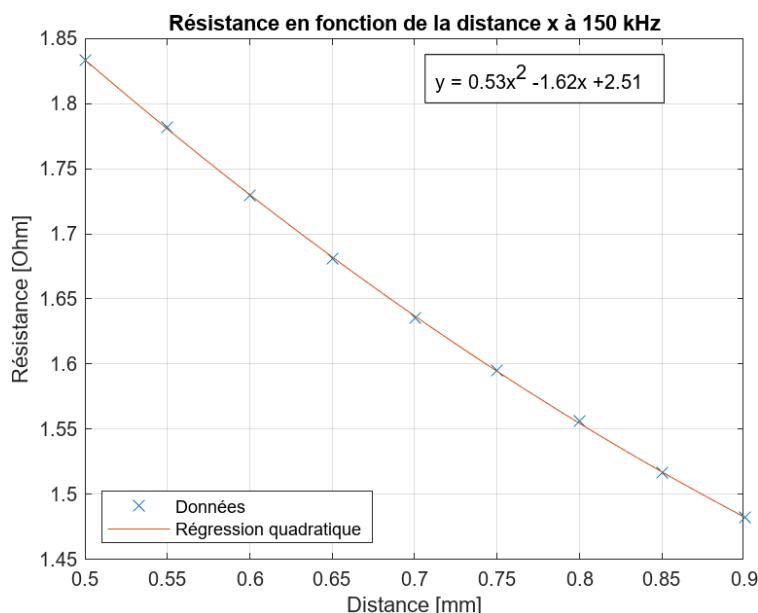


FIGURE 7 – Résistances en fonction de la distance

Les courbes tracées permettent de déterminer le type de matériau de la cible, ferromagnétique ou non-ferromagnétique. Les figures 6 et 7 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 et comportant des marques d'oxydation, 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 :

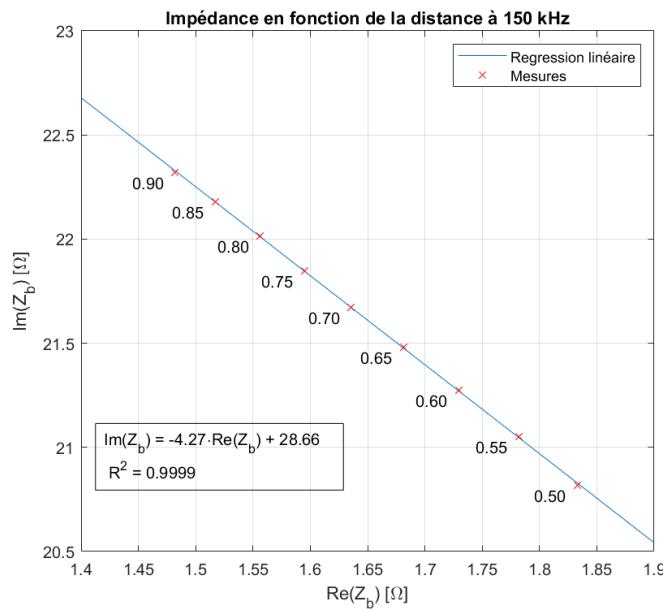


FIGURE 8 – Impédance de la bobine aux distances

La figure 8 montre que l'impédance évolue de manière "quasi" linéaire, avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0.9999$ . 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 détectables.

### 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 [ $\Omega/mm$ ];

$\delta Z$ , l'écart d'impédance =  $Z_{0.75} - Z_{0.65}$  [ $\Omega$ ];

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

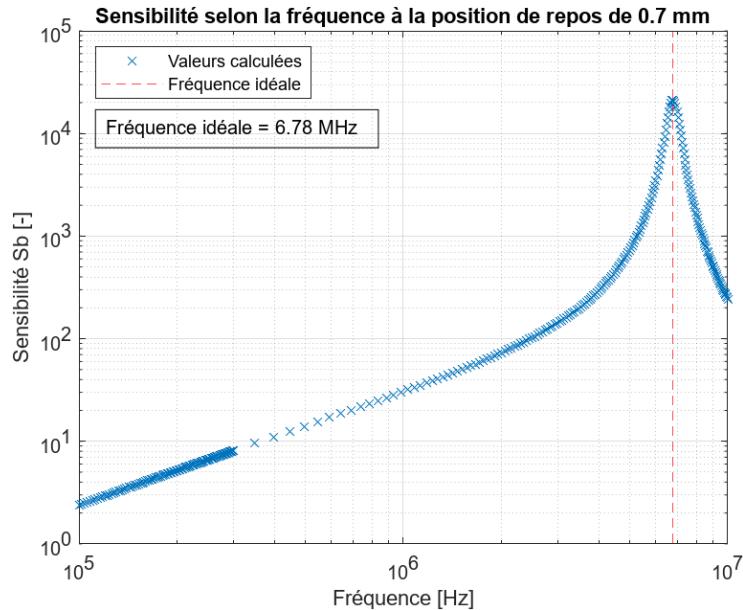


FIGURE 9 – Sensibilité en fonction de la fréquence

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 [ $\Omega/\text{mm}$ ] 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 en fonction de la position de la cible ;
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 7)
  - Pic de sensibilité (cf. fig. ??).

## 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 ??).

- 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.

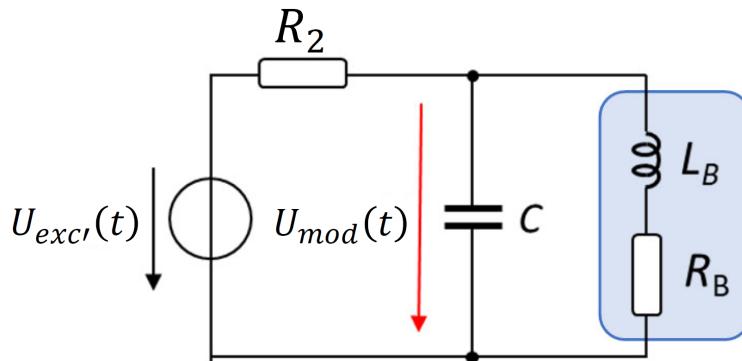


FIGURE 10 – Schéma du circuit résonant

Cette capacité  $C$  étant fournie, la fréquence de résonance sera déterminée théoriquement puis par manipulation. Enfin, une résistance sera ajoutée pour obtenir une tension comme conditionneur pour le circuit résonnant.

## 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 :

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_B \cdot C} - \frac{R_B^2}{L_B^2}} \quad (3)$$

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  $R_P$ .

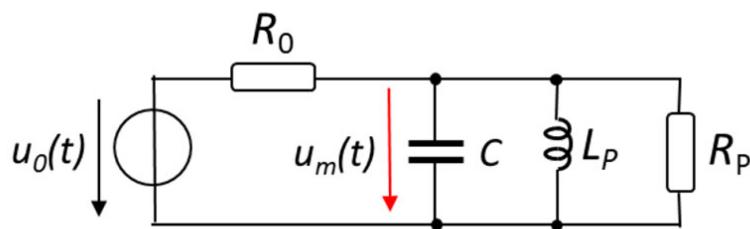


FIGURE 11 – Schéma du circuit résonant parallèle

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

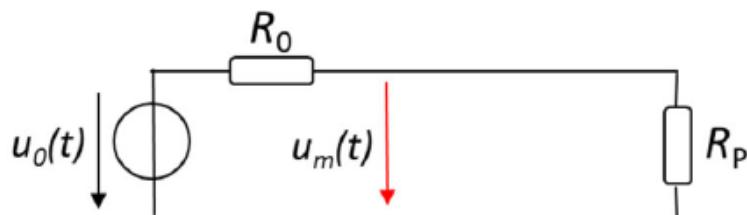


FIGURE 12 – Schéma du circuit résonant parallèle

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

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

Pour notre système :

$$U_m(t) = \frac{R_P}{R_0 + R_P} \cdot \frac{4}{\pi} A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Ce qui donne en valeur crête :

$$U_m = \frac{R_P}{R_0 + R_P} \cdot \frac{4}{\pi} A \quad (4)$$

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 :

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

$$R_P = R_B \cdot (1 + Q^2) \quad (5)$$

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot L_B}{R_B} \quad (6)$$

### 3.2.4 Fonction de transfert

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

$$\underline{H}(\underline{Z}_b) = \frac{\underline{Z}_b}{(1 + j \cdot \omega \cdot C \cdot R_0)\underline{Z}_b + R_0} \quad (7)$$

## 3.3 Pratique

### 3.3.1 Montage

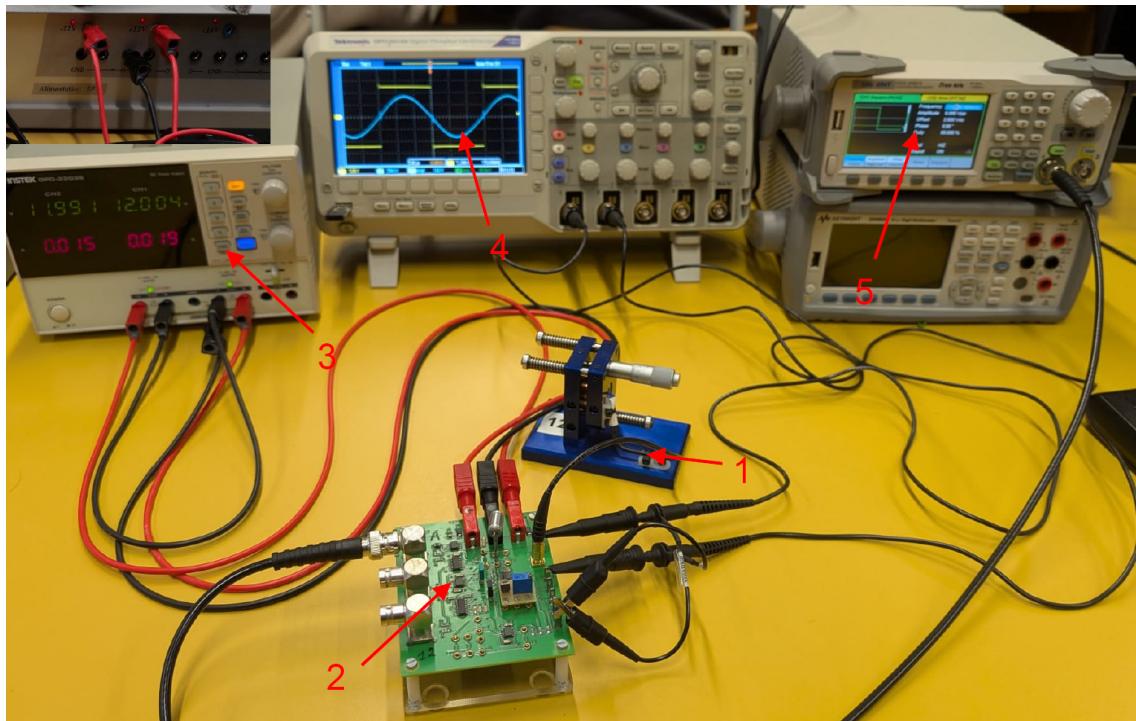


FIGURE 13 – Montage

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 ( $U_{mod}$ ). La maquette est

### 3.3.2 Fréquence de résonance

Pour rechercher la fréquence de résonance, la capacité de précision a été montée sur l'emplacement C2. La fréquence d'excitation a ensuite été ajustée jusqu'à ce que les deux tensions soient en phase. Les deux tensions sont en phase lorsqu'elles passent à zéro au même moment.

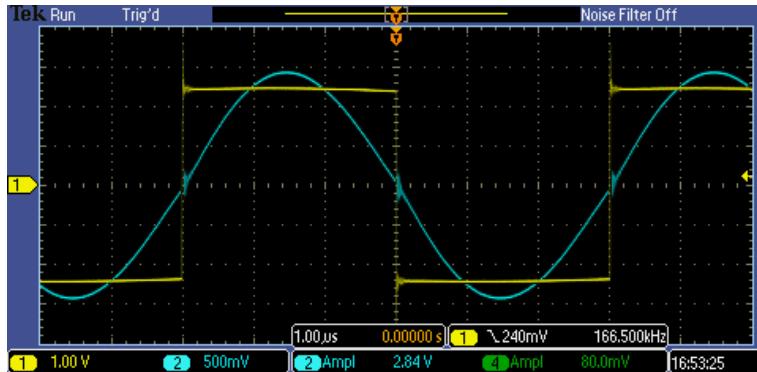


FIGURE 14 – Recherche de la fréquence de résonance

Il est possible d'observer que la fréquence de résonance  $f_0$  est de 166.5 kHz.

Après remplacement de la résistance  $R_2$  par  $R_0$ , l'amplitude du signal de sortie  $U_{mod}$  a été mesurée au multimètre pour une meilleure précision. Il est important de noter que cet appareil donne une valeur RMS de l'amplitude, il faudra donc multiplier par  $\sqrt{2}$  la valeur mesurée pour avoir la valeur crête de  $U_{mod}$ .

## 3.4 Résultats

### 3.4.1 Fréquence de résonance

Comme vu dans la partie pratique, la fréquence de résonance mesurée  $f_0$  est de 166.5 kHz.

Le calcul théorique a été fait selon l'équation 3. Comme précisé, les valeurs de l'inductance et de la résistance varient en fonction de la fréquence. Le calcul a été réalisé itérativement, en effectuant une interpolation linéaire des caractéristiques de la maquette, grâce au programme MatLab et a convergé vers une valeur de 168.1 kHz

$f_0$	$f_{0,th}$
166.5 kHz	168.1 kHz

TABLE 2 – Résumé des fréquences de résonance

### 3.4.2 Optimisation de la sensibilité

Les calculs ont été effectués selon les équations 5 et 6. Dans un premier temps, le facteur de qualité à  $f_{0,th}$  a été déterminé.

$$Q = 13.29$$

Il a ensuite été possible de déterminer  $R_P$ .

$$R_P = 322.66 \Omega$$

La résistance réelle utilisée a été mesurée à  $324 \Omega$ .

$R_P$	$R_0$
$322.66 \Omega$	$324 \Omega$

TABLE 3 – Résistance calculée et utilisée

La valeur crête théorique de  $U_{mod}$  a été calculée grâce à l'équation 4 :

$$U_{mod,th} = \frac{322.66}{324 + 322.66} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{5}{2} = 1.588 \text{ V}$$

La valeur crête de la tension de sortie  $U_{mod}$  a été mesurée comme précisé précédemment.

$$U_{mod,RMS} = 1.074 \text{ V}$$

$$U_{mod} = U_{mod,RMS}\sqrt{2} = 1.519 \text{ V}$$

### 3.4.3 Fonction de transfert

La fonction de transfert à la fréquence de résonance a été calculée selon l'équation 7 pour les différentes positions.

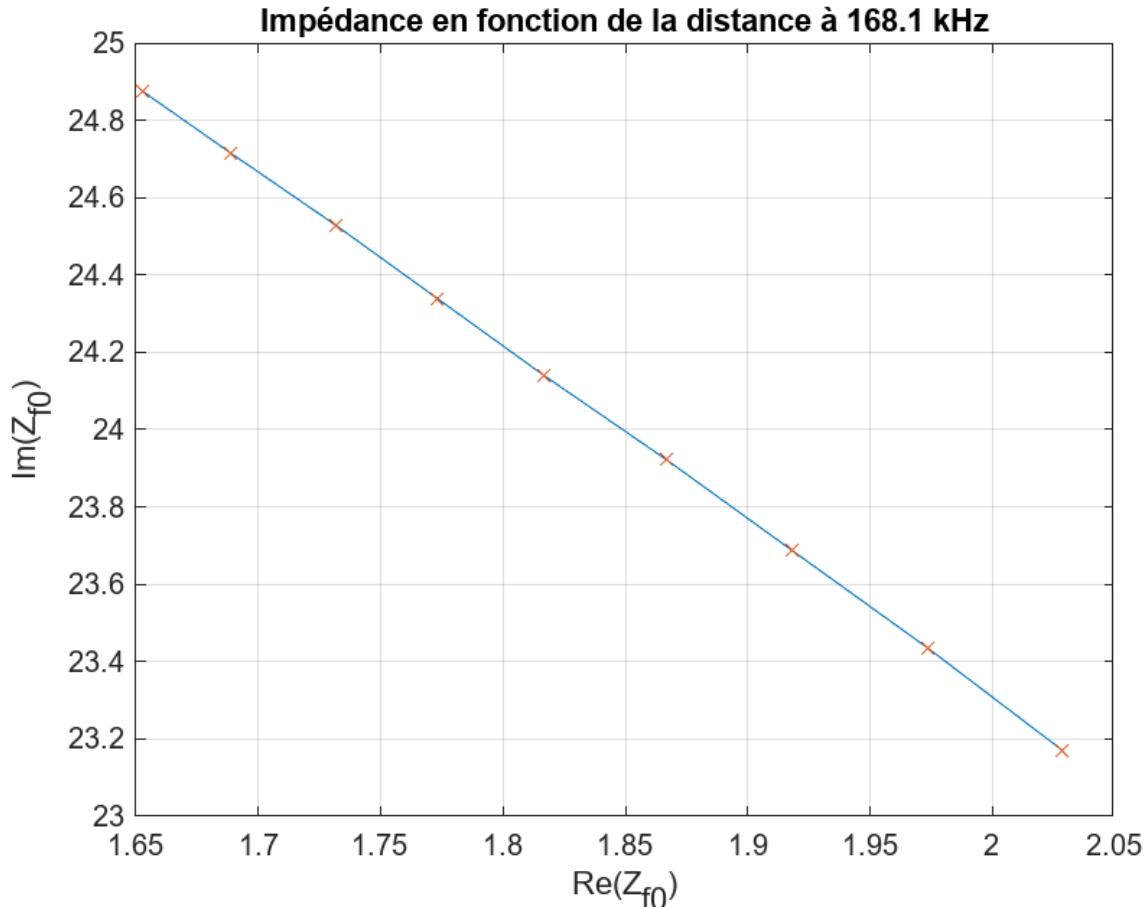


FIGURE 15 – Représentation dans le plan complexe de l'impédance

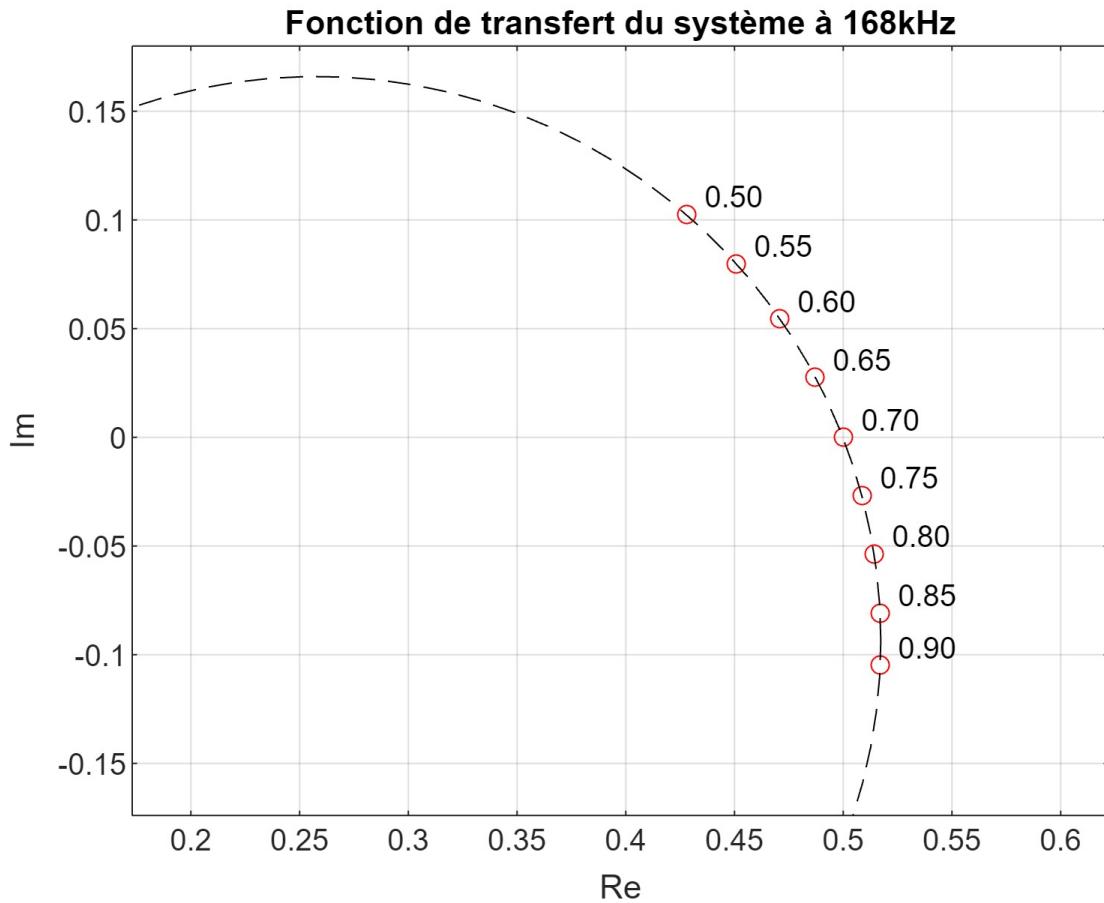


FIGURE 16 – Représentation dans le plan complexe de la fonction de transfert

### 3.5 Analyse

En ce qui concerne la fréquence de résonance, la valeur calculée et celle trouvée par recherche sont relativement proches,  $\pm 1\%$ . La différence peut venir de plusieurs sources.

Dans un premier temps, l'erreur peut venir des calculs. En effet, les données utilisées sont une interpolation des mesures. Il est donc possible, quoique peu probable, qu'elles ne reflètent pas la réalité.

Dans un second temps, il est possible que la recherche n'ait pas été effectuée correctement. Comme il est possible de le deviner sur la figure 14, le signal est bruité à 0 V. Il est donc possible qu'une légère erreur ait été commise.

Pour ce qui est de l'optimisation de la sensibilité, le seul point de contrôle disponible est la valeur crête de  $U_{mod}$ .

$U_{mod}$	$U_{mod,th}$
1.519 V	1.588 V

TABLE 4 – Tensions de sortie

Les deux valeurs ayant moins de 5% de variation, il est cohérent de penser que la théorie est

en adéquation avec la pratique. Il est donc censé d'estimer que la sensibilité est maximisée pour cette fréquence.

Enfin, la fonction de transfert montre une distribution circulaire sur le plan complexe. Cette distribution est attendue. De plus, la fonction de transfert est uniquement réel à la position de repos, respectivement 0.7mm, ce qui est attendu. Il est donc fortement probable que les paramètres choisis, respectivement la fréquence de résonance ainsi que la résistance soient corrects pour ce système.

### 3.6 Conclusion

Durant cette séance, il a été possible de déterminer la fréquence de résonance du système. Cette fréquence est de 166.5 kHz. La fréquence de résonance théorique varie légèrement, respectivement de 1%.

Il a également été possible d'optimiser la sensibilité du système.

Enfin, la représentation de Möbius de la fonction de transfert a validé les point précédents, en validant la position de repos à 0.7mm.

## 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 ;

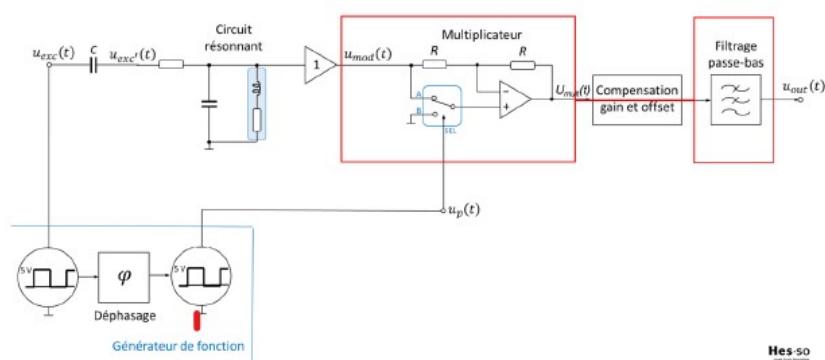


FIGURE 17 – Schéma avec multiplicateur et filtre

## 4.2 Théorie

### 4.2.1 Le multiplicateur

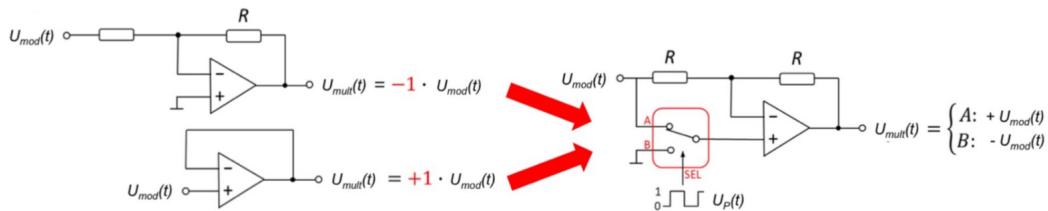


FIGURE 18 – Schéma du multiplicateur

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

Le filtre 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 le 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.

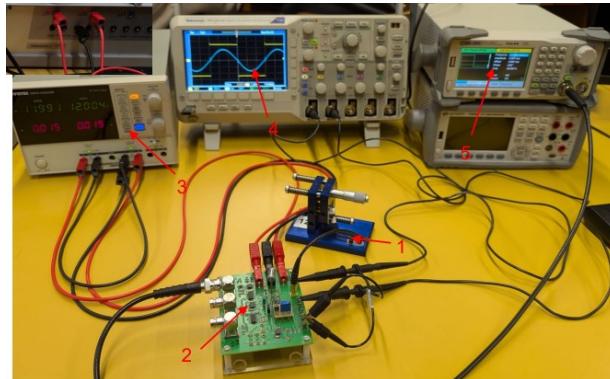


FIGURE 19 – Montage réalisé

— 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  $C_6 = \text{nc}$  ;
- $R_{10} = R_{13} = \approx 10 \text{ k}\Omega$ .

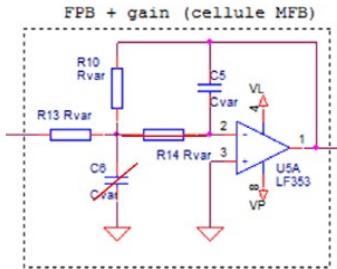


FIGURE 20 – Filtre RC

Il serait possible d'obtenir un filtre d'ordre 2. Pour cela, il est nécessaire de redimensionner les deux résistances et les deux condensateurs, pour un filtre de Butterworth par exemple.

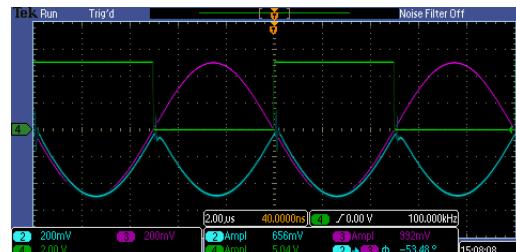
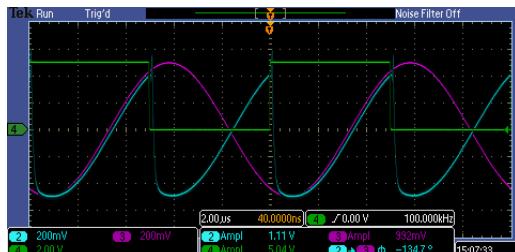
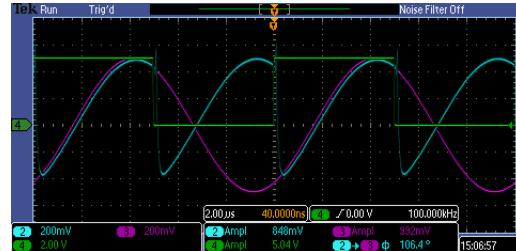
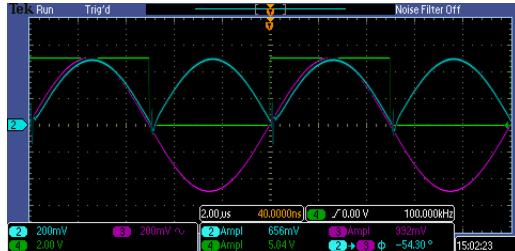
— Mesures :

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

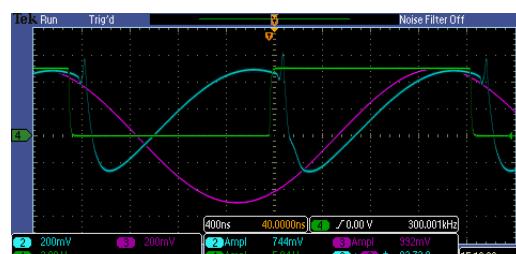
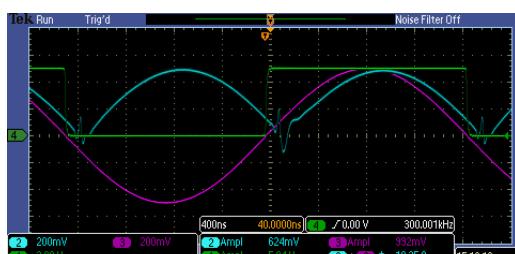
#### 4.4 Multiplicateur

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.

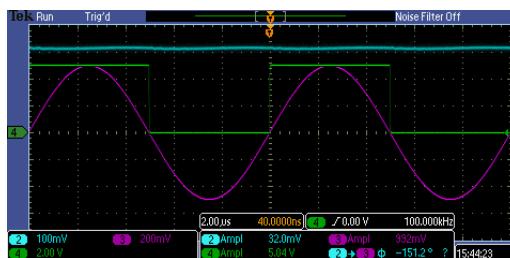


FIGURE 29 – Filtre avec RC avec déphasage de  $0^\circ$

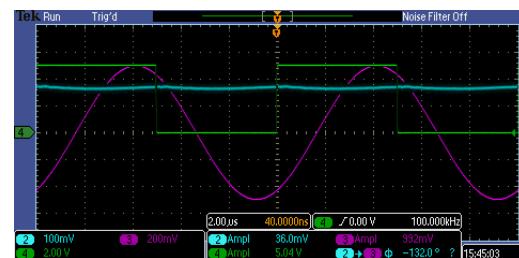


FIGURE 30 – Filtre avec RC avec déphasage de  $60^\circ$

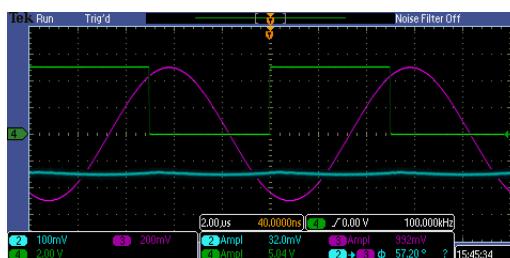


FIGURE 31 – Filtre avec RC avec déphasage de  $120^\circ$

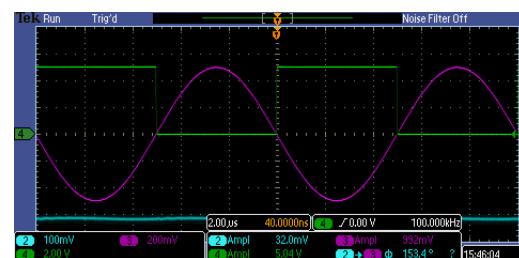


FIGURE 32 – Filtre avec RC avec déphasage de  $180^\circ$

Les captures ci-dessus montrent la tension continue de sortie attendue et illustrent une diminution de celle-ci à mesure que le déphasage augmente, avec une amplitude maximale positive à  $0^\circ$  et maximale négative à  $180^\circ$ .

#### 4.5.2 Signal de sortie

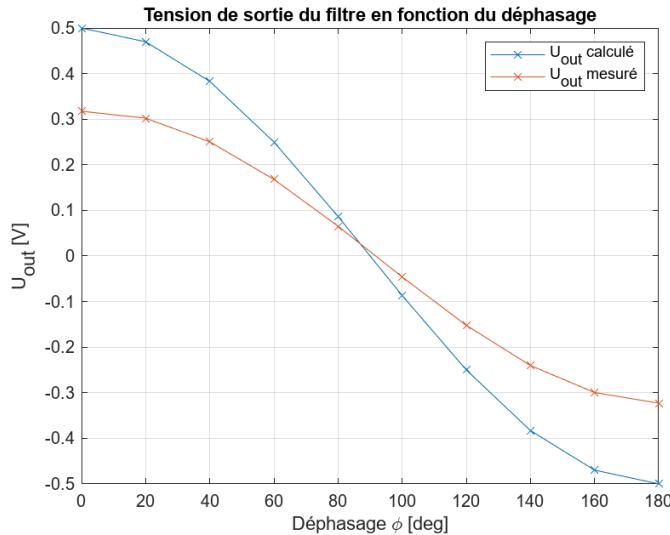


FIGURE 33 – Tension de sortie théorique et mesurée

La tension de sortie mesurée est représentée avec la tension de sortie théorique. Il est possible de voir que les deux courbes ont la même allure, celle d'un cosinus. Cependant, l'amplitude de tension mesurée est inférieure à celle calculée. Cette différence pourrait s'expliquer par une imperfection de démodulateur.

#### 4.6 Conclusion

Cette dernière séance a fourni des résultats qui correspondent aux comportements énoncés dans la partie théorique.

Résumer des résultats :

- Le fonctionnement du multiplicateur a pu être observé ;
- 300 kHz est une fréquence trop haute pour ce système ;
- La tension de sortie du démodulateur est continue et suit l'allure d'un cosinus pour une variation de déphasage.

### 5 Séance 4 - Déphasage et linéarité

#### 5.1 Objectif

L'objectif de cette séance est de déterminer lequel des déphasages entre les signaux  $U_{exc}$  et  $U_p$  génère la réponse la plus linéaire.

#### 5.2 Méthode

- Montage :
  1. Alimenter le PCB à -12 et 12 V ;
  2. Le jumper J3 doit être monté entre 1 et 2 ;

3. Alimenter  $U_{exc}$  avec un signal carré 0-5 V ;
4. Alimenter  $U_p$  avec un signal carré 0-5 V ;
5. Brancher la sortie  $U_{out}$  au multimètre de table pour plus de précision.

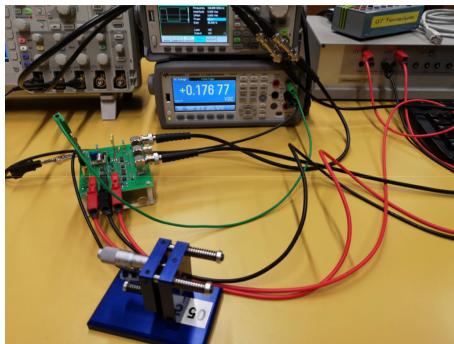


FIGURE 34 – Montage - Séance 4 [donneelabot]

— Mesures :

1. Positionner le capteur à 0.5 mm ;
2. Mesurer la tension  $U_{out}$  obtenue pour chaque déphasage entre  $U_{exc}$  et  $U_{mod}$  de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  par pas de  $30^\circ$  ;
3. Répéter l'opération 2 pour chaque distance par pas de 0.05 mm jusqu'à 0.9 mm.

### 5.3 Résultats

Voici les différentes valeurs mesurées permettant de visualiser la réponse du capteur aux différents déphasages et positions :

Distance [mm]	Déphasage [°]						
	0	30	60	90	120	150	180
0.5	263.24	424.82	484.9	413.9	225.17	-29.66	-269.25
0.55	277.65	444.38	504.05	427.65	230.19	-34.88	-283.6
0.6	292.83	464.76	528.86	441.71	235.16	-40.49	-298.9
0.65	307.48	484.06	542.34	454.6	239.39	-46.32	-313.7
0.7	323.25	504.52	561.7	467.82	243.46	-53	-329.57
0.75	337.95	523.13	578.93	479.2	246.25	-59.61	-344.45
0.8	353.22	542.29	596.52	490.75	249.12	-66.53	-359.78
0.85	368.82	561.63	614.06	502.05	251.64	-73.82	-375.41
0.9	383.79	579.89	630.41	512.35	253.66	-81.05	-390.45

TABLE 5 – Tension aux différents déphasages et distances

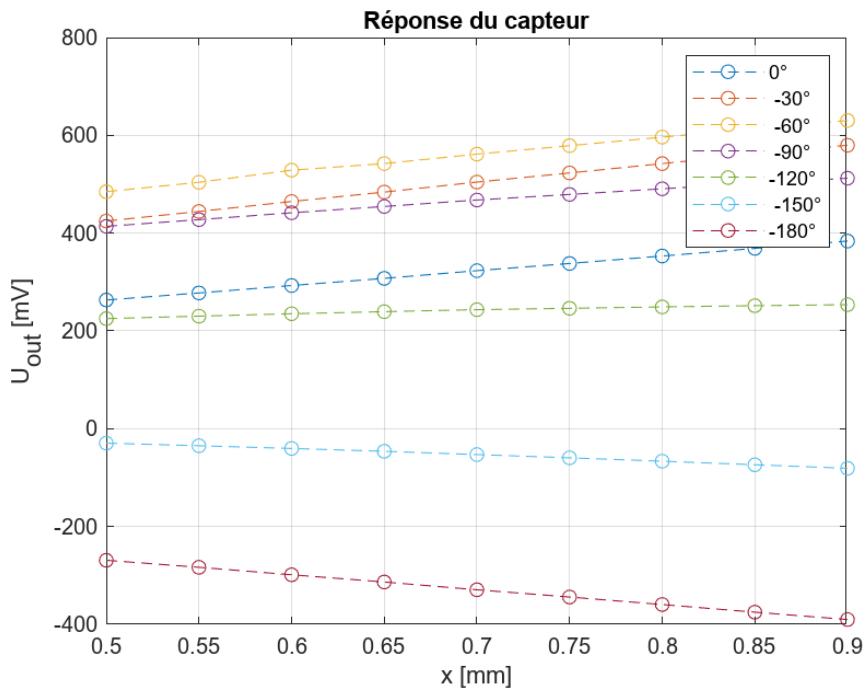


FIGURE 35 – Réponse du capteur - séance 4

L'erreur de linéarité a ensuite été tracée :



FIGURE 36 – Régressions selon le déphasage

Minimum à 0° (0.4706 %)

## 5.4 Analyse

Les valeurs présentées dans la figure 35 semblent cohérentes, avec des courbes qui, visuellement, apparaissent globalement linéaires.

La courbe d'erreur de linéarité 36 confirme une très bonne linéarité des courbes, avec une non-linéarité maximale de 7,5 % observée à 120°, tandis que la non-linéarité la plus faible, de 0,47 %, est relevée à 0°.

Cependant, l'**allure** de la non-linéarité diffère de celle attendue. En effet, pour ce type de capteur, il est généralement supposé que la linéarité maximale se situe dans une plage de déphasage comprise entre 80° et 130°.

Cela soulève donc les interrogations suivantes quant à la validité des résultats obtenus :

- Les valeurs semblent similaires pour 0° et 180°, ce qui pourrait s'expliquer par la  $\pi$ -périodicité du déphasage. Bien que cela puisse sembler inhabituel, y trouver un minimum n'est pas nécessairement incorrect ;
- Une erreur de montage pourrait être en cause : un problème lié à une résistance, un condensateur ou un fil mal connecté ;
- Une mesure aurait pu être effectuée sur une sortie incorrecte de la carte (par exemple  $U_{mult}$ ) ;
- Un défaut du fil du capteur est également envisageable, bien que peu probable compte tenu de la forte linéarité des résultats.

## 5.5 Conclusion

Les différentes mesures ont pu être réalisées lors de cette 4<sup>ème</sup> séance. Ceux-ci ont permis de déterminer une non-linéarité minimale du système de 0.47 % à 0°. Cependant, ces résultats ont été jugés très incertains. La prochaine manipulation permettra de confirmer cette supposition.

# 6 Séance 5 - Réglage de la sensibilité

## 7 Conclusion

Ces trois premières séances ont permis une première étude du capteur inductif.

Elles ont permis de :

- Déterminer le matériau de la cible du capteur comme étant du cuivre ;
- Déterminer la fréquence de résonance du circuit de la carte et déterminer la fonction de transfert correspondante, qui s'est avérée correspondre au résultat attendu ;
- Décrire et observer le comportement du multiplicateur et du filtre RC.

### Améliorations :

Bien que les résultats soient globalement bons, ces trois séances ont eu leurs lots de surprises. Le capteur initialement utilisé présentait un défaut de câblage ce qui a nécessité une reprise complète des mesures de la séance 1 et engendré un certain retard. Une erreur d'anticipation et une réaction trop lente de notre part qui aurait pu être évitée.

## Références

- [1] Demierre, Michel *Cours : mini-projet : séances 1,2,3,4,5*, [ HEIG-VD Capteurs]
- [2] Demierre, Michel *Cours : Suopport de cours* , [ HEIG-VD Capteurs]

Yverdon, 27 janvier 2025

Bianchi Romain



Larghi Andrea



# Séance 1

```
%NOTE: Changement de maquette : 09 ; montage elec 12
clear all;
close all;
clc;
% Fichiers Machine Impédances
mes_050 = readmatrix('Seance1/MesuresMachine/50.CSV');
mes_055 = readmatrix('Seance1/MesuresMachine/55.CSV');
mes_060 = readmatrix('Seance1/MesuresMachine/60.CSV');
mes_065 = readmatrix('Seance1/MesuresMachine/65.CSV');
mes_070 = readmatrix('Seance1/MesuresMachine/70.CSV');
mes_075 = readmatrix('Seance1/MesuresMachine/75.CSV');
mes_080 = readmatrix('Seance1/MesuresMachine/80.CSV');
mes_085 = readmatrix('Seance1/MesuresMachine/85.CSV');
mes_090 = readmatrix('Seance1/MesuresMachine/90.CSV');

%Calcul des valeurs complexes (z = R + iwl):
f = mes_050(:,1);
Z_050 = mes_050(:,3) + 2*pi*1i*f .* mes_050(:,2);
Z_055 = mes_055(:,3) + 2*pi*1i*f .* mes_055(:,2);
Z_060 = mes_060(:,3) + 2*pi*1i*f .* mes_060(:,2);
Z_065 = mes_065(:,3) + 2*pi*1i*f .* mes_065(:,2);
Z_070 = mes_070(:,3) + 2*pi*1i*f .* mes_070(:,2);
Z_075 = mes_075(:,3) + 2*pi*1i*f .* mes_075(:,2);
Z_080 = mes_080(:,3) + 2*pi*1i*f .* mes_080(:,2);
Z_085 = mes_085(:,3) + 2*pi*1i*f .* mes_085(:,2);
Z_090 = mes_090(:,3) + 2*pi*1i*f .* mes_090(:,2);
Z = [Z_050, Z_055, Z_060, Z_065, Z_070, Z_075, Z_080, Z_085, Z_090 ];

%Vecteur distance
x = 0.5:0.05:0.9;
figure;
```

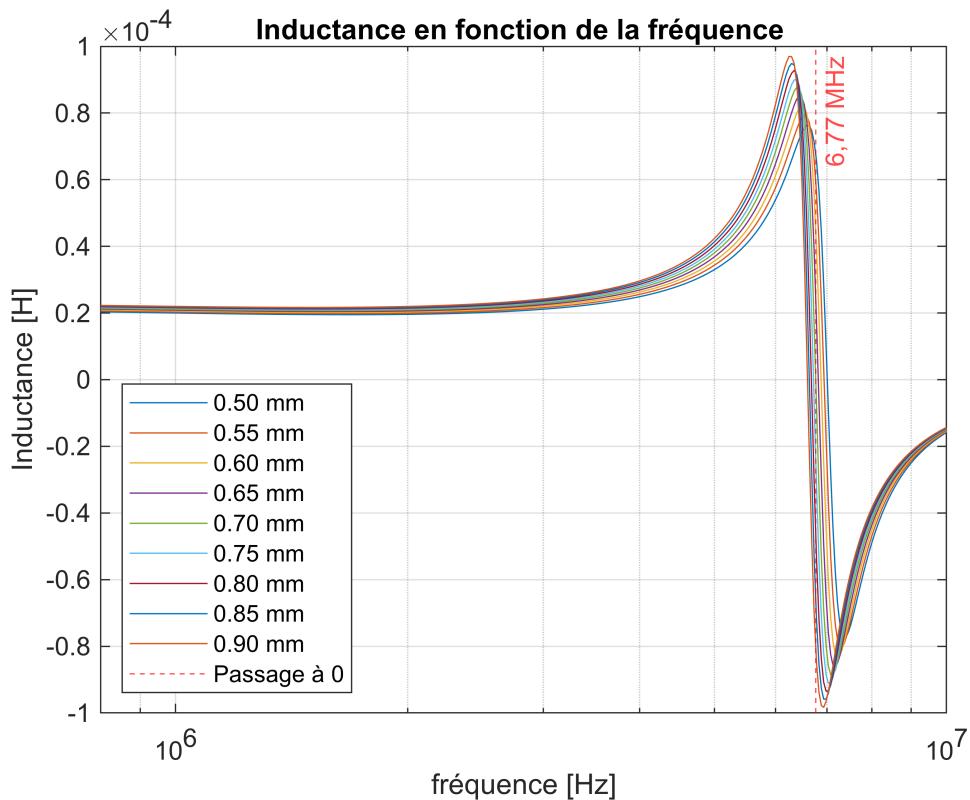
## Inductance en fonction de la fréquence L(f)

```
% Inductances
Lb_050 = mes_050(:,2);
Lb_055 = mes_055(:,2);
Lb_060 = mes_060(:,2);
Lb_065 = mes_065(:,2);
Lb_070 = mes_070(:,2);
Lb_075 = mes_075(:,2);
Lb_080 = mes_080(:,2);
Lb_085 = mes_085(:,2);
Lb_090 = mes_090(:,2);
Lb = [Lb_050, Lb_055, Lb_060, Lb_065, Lb_070, Lb_075, Lb_080, Lb_085, Lb_090 ];
% Graphique
plot(f, Lb)
```

```

title('Inductance en fonction de la fréquence ');
ylabel("Inductance [H]")
xlabel("fréquence [Hz]")
xline(6.767*1000000, '--r', '6,77 MHz');
legend('0.50 mm', '0.55 mm', '0.60 mm', '0.65 mm', '0.70 mm', '0.75 mm', '0.80 mm', '0.85 mm',
       '0.90 mm', 'Passage à 0')
xlim([8e5 1e7]);
set(gca, 'XScale', 'log')
grid;

```



## Inductance à 150 kHz en fonction de la distance L(x)

```

% Inductances à 150kHz
Lbx_050 = mes_050(26,2);
Lbx_055 = mes_055(26,2);
Lbx_060 = mes_060(26,2);
Lbx_065 = mes_065(26,2);
Lbx_070 = mes_070(26,2);
Lbx_075 = mes_075(26,2);
Lbx_080 = mes_080(26,2);
Lbx_085 = mes_085(26,2);
Lbx_090 = mes_090(26,2);
Lbx = [Lbx_050, Lbx_055, Lbx_060, Lbx_065, Lbx_070, Lbx_075, Lbx_080, Lbx_085, Lbx_090];

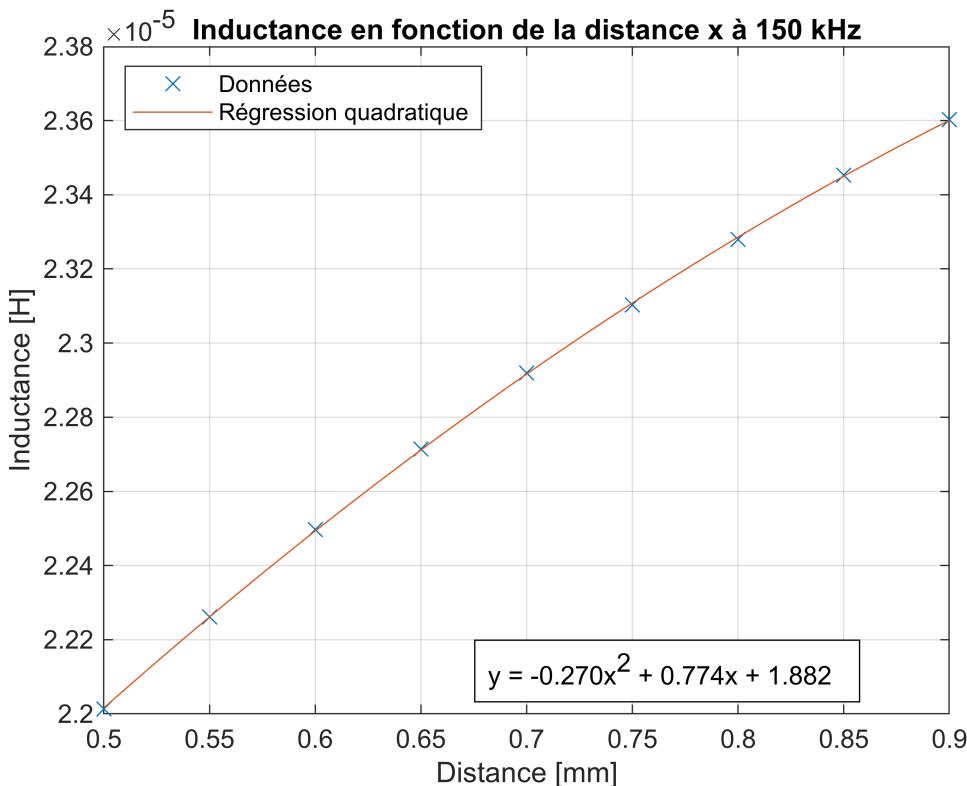
%Graphique

```

```

% Régression quadratique
coeffs1 = polyfit(x, Lbx, 2); % Ajustement d'une courbe d'ordre 2
x_fit = linspace(min(x), max(x), 100); % Points pour tracer la courbe lisse
Lbx_fit = polyval(coeffs1, x_fit); % Calcul des valeurs ajustées
% Tracé des données et de la régression
figure;
plot(x, Lbx, 'x', 'MarkerSize', 8, 'DisplayName', 'Données'); % Données mesurées
hold on;
plot(x_fit, Lbx_fit, '-', 'DisplayName', 'Régression quadratique'); % Courbe ajustée
grid on;
% Ajouter les labels et le titre
title('Inductance en fonction de la distance x à 150 kHz');
ylabel('Inductance [H]');
xlabel('Distance [mm]');
% Ajouter l'équation comme annotation
eqn1 = sprintf("y = %.3fx^2 + %.3fx + %.3f", coeffs1(1)*100000, coeffs1(2)*100000, coeffs1(3)*100000);
dim = [0.47 0.1 0.1 0.1]; % Position de l'annotation (valeurs normalisées entre 0 et 1)
annotation('textbox', dim, 'String', eqn1, 'FitBoxToText', 'on', 'BackgroundColor', 'w');
% Légende
legend('Location', 'northwest');
hold off;

```



## Résistance en fonction de la fréquence R(f)

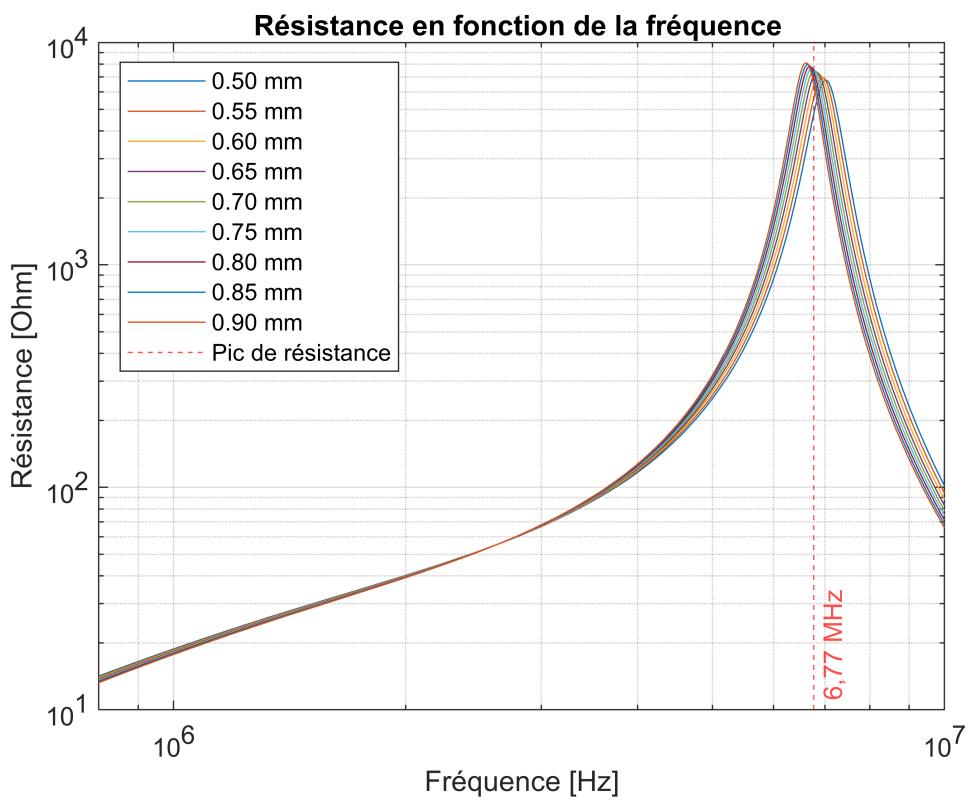
```
% Résistances
```

```

Rb_050 = mes_050(:,3);
Rb_055 = mes_055(:,3);
Rb_060 = mes_060(:,3);
Rb_065 = mes_065(:,3);
Rb_070 = mes_070(:,3);
Rb_075 = mes_075(:,3);
Rb_080 = mes_080(:,3);
Rb_085 = mes_085(:,3);
Rb_090 = mes_090(:,3);
Rb = [Rb_050, Rb_055, Rb_060, Rb_065, Rb_070, Rb_075, Rb_080, Rb_085, Rb_090 ];

% Graphique échelle log/log
loglog(f, Rb);
grid;
title('Résistance en fonction de la fréquence ');
x1 = xline(6.767*1000000,'--r', '6,77 MHz');
x1.LabelVerticalAlignment = 'bottom';
legend('0.50 mm', '0.55 mm', '0.60 mm', '0.65 mm', '0.70 mm', '0.75 mm', '0.80 mm', '0.85 mm', '0.90 mm');
xlim([8e5 1e7]);
ylabel("Résistance [Ohm]")
xlabel("Fréquence [Hz]")

```



## Résistance à 150 kHz en fonction de la distance R(x)

```

%Résistances à 150 kHz
Rbx_050 = mes_050(26,3);

```

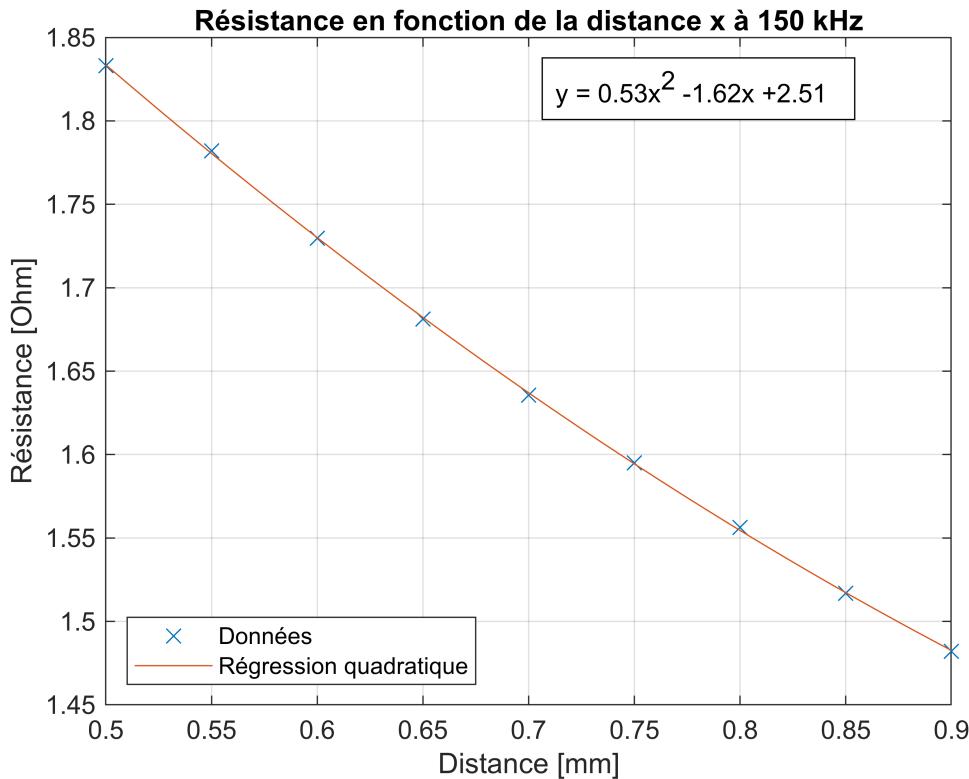
```

Rbx_055 = mes_055(26,3);
Rbx_060 = mes_060(26,3);
Rbx_065 = mes_065(26,3);
Rbx_070 = mes_070(26,3);
Rbx_075 = mes_075(26,3);
Rbx_080 = mes_080(26,3);
Rbx_085 = mes_085(26,3);
Rbx_090 = mes_090(26,3);
Rbx = [Rbx_050, Rbx_055, Rbx_060, Rbx_065, Rbx_070, Rbx_075, Rbx_080, Rbx_085, Rbx_090 ];

% Graphique

% Régression quadratique
coeffs2 = polyfit(x, Rbx, 2); % Ajustement d'une courbe d'ordre 2
x_fit = linspace(min(x), max(x), 100); % Points pour tracer la courbe lisse
Rbx_fit = polyval(coeffs2, x_fit); % Calcul des valeurs ajustées
% Tracé des données et de la régression
figure;
plot(x, Rbx, 'x', 'MarkerSize', 8, 'DisplayName', 'Données'); % Données mesurées
hold on;
plot(x_fit, Rbx_fit, '-', 'DisplayName', 'Régression quadratique'); % Courbe ajustée
grid on;
% Ajouter les labels et le titre
title('Résistance en fonction de la distance x à 150 kHz');
ylabel('Résistance [Ohm]');
xlabel('Distance [mm]');
% Ajouter l'équation comme annotation
eqn2 = sprintf("y = %.2fx^2 %.2fx %.2f", coeffs2(1), coeffs2(2), coeffs2(3)); % Formater l'équation
dim = [0.53 0.8 0.1 0.1]; % Position de l'annotation (valeurs normalisées entre 0 et 1)
annotation('textbox', dim, 'String', eqn2, 'FitBoxToText', 'on', 'BackgroundColor', 'w');
% Légende
legend('Location', 'southwest');
hold off;

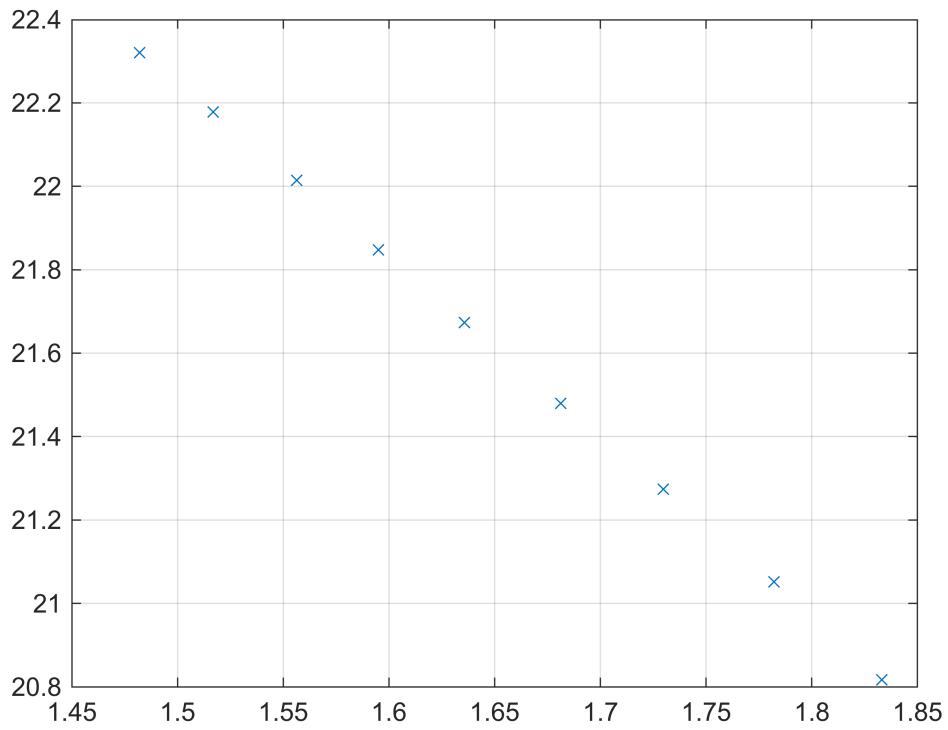
```



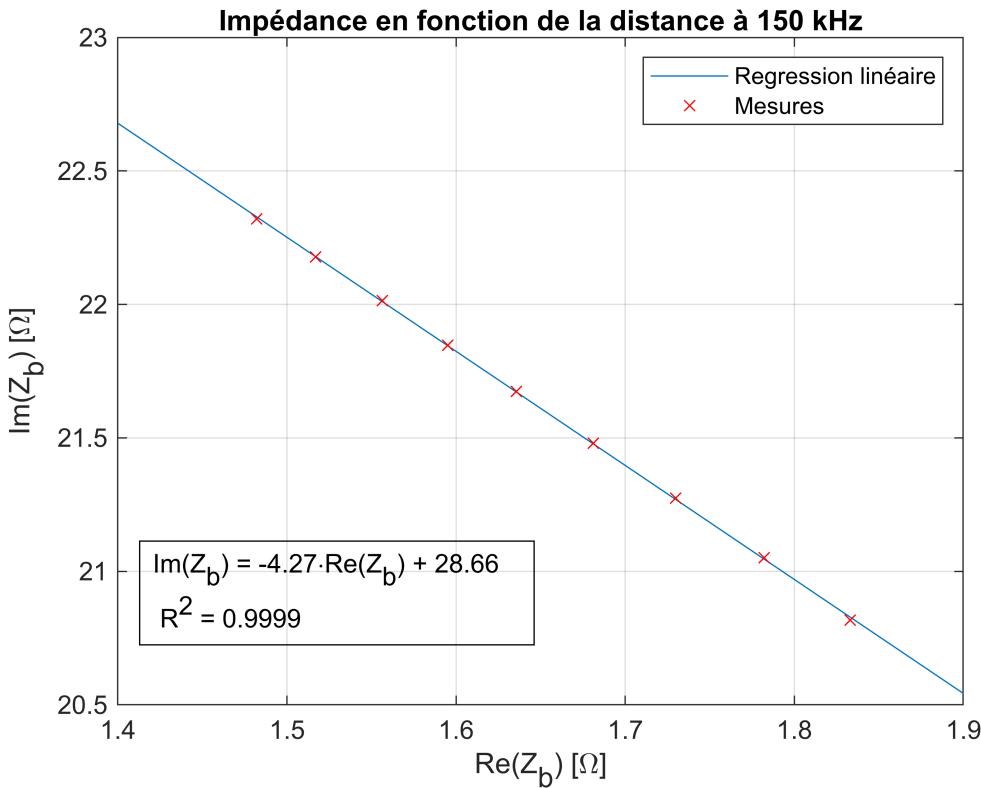
## Impédance à 150 kHz

```
% Impédance
Z150 = [Z_050(26), Z_055(26), Z_060(26), Z_065(26), Z_070(26), Z_075(26), Z_080(26), Z_085(26)];

% Graphique
figure;
plot(real(Z150),imag(Z150), 'x');
%Regression lineaire
x_reg = linspace(1.4,1.9,1000);
reg = polyfit(real(Z150(1,:)),imag(Z150(1,:)),1);
%Parametres
a = reg(1,1);
b= reg(1,2);
r = fitlm(real(Z150(1,:)),imag(Z150(1,:)));
R2 = r.Rsquared.Ordinary;
eqn3 = sprintf("Im(Z_{b}) = %.2f\cdot Re(Z_{b}) + %.2f \n R^2 = %.4f",reg(1),reg(2),R2);
grid on;
```



```
% Impédance avec régression linéaire
imZb = polyval(reg,x_reg);
plot(x_reg,imZb,"-",real(Z150(1,:)),imag(Z150(1,:)),"rx")
title('Impédance en fonction de la distance à 150 kHz');
annotation("textbox",[0.15 0.01 0.3 0.3],'string',eqn3,'FitBoxToText','on');
legend('Régression linéaire','Mesures','location','northeast');
xlabel('Re(Z_{b}) [\Omega]');
ylabel('Im(Z_{b}) [\Omega]');
grid on;
```

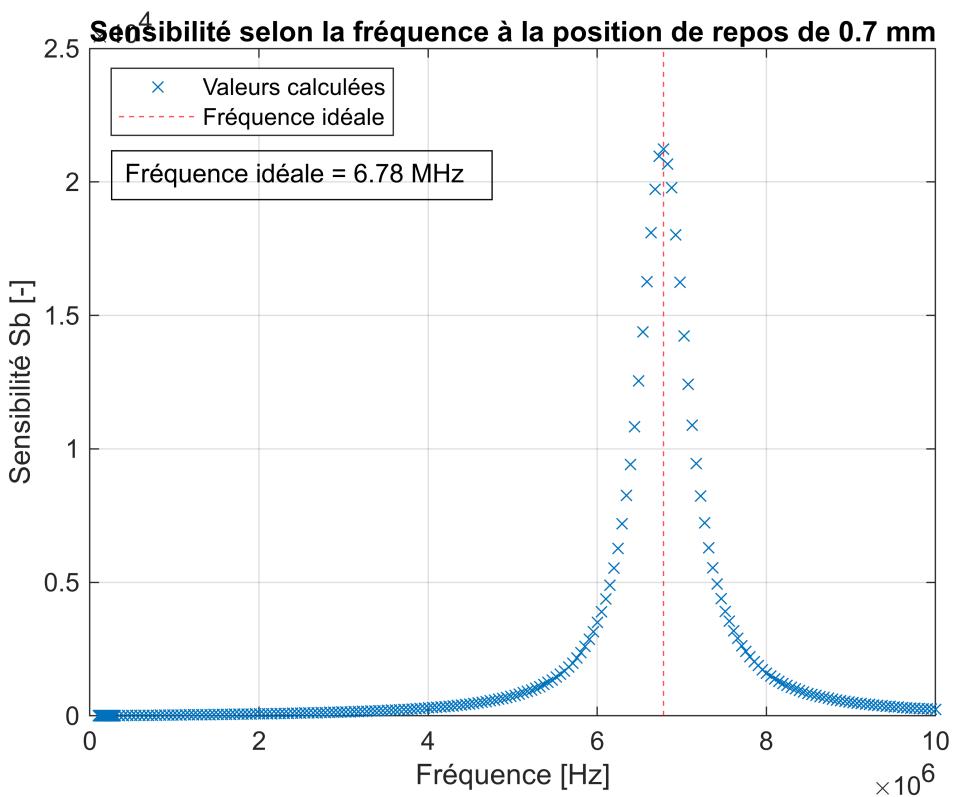


## Sensibilité

```

S = abs(Z(:, 4)-Z(:, 6))/0.1;
% Trouver le max
[vmax, indicefmax] = max(S);
fmax = f(indicefmax);
fmaxstr=sprintf("Fréquence idéale = %.2f MHz",fmax/(1e6));
% Graphique
plot(f,S,"x")
xlabel('Fréquence [Hz]');
ylabel('Sensibilité Sb [-]');
title('Sensibilité selon la fréquence à la position de repos de 0.7 mm');
xline(fmax,'--r');
annotation("textbox",[0.15 0.5 0.3 0.3],'string',fmaxstr,'FitBoxToText','on');
legend('Valeurs calculées','Fréquence idéale','Location','northwest');
grid on;

```



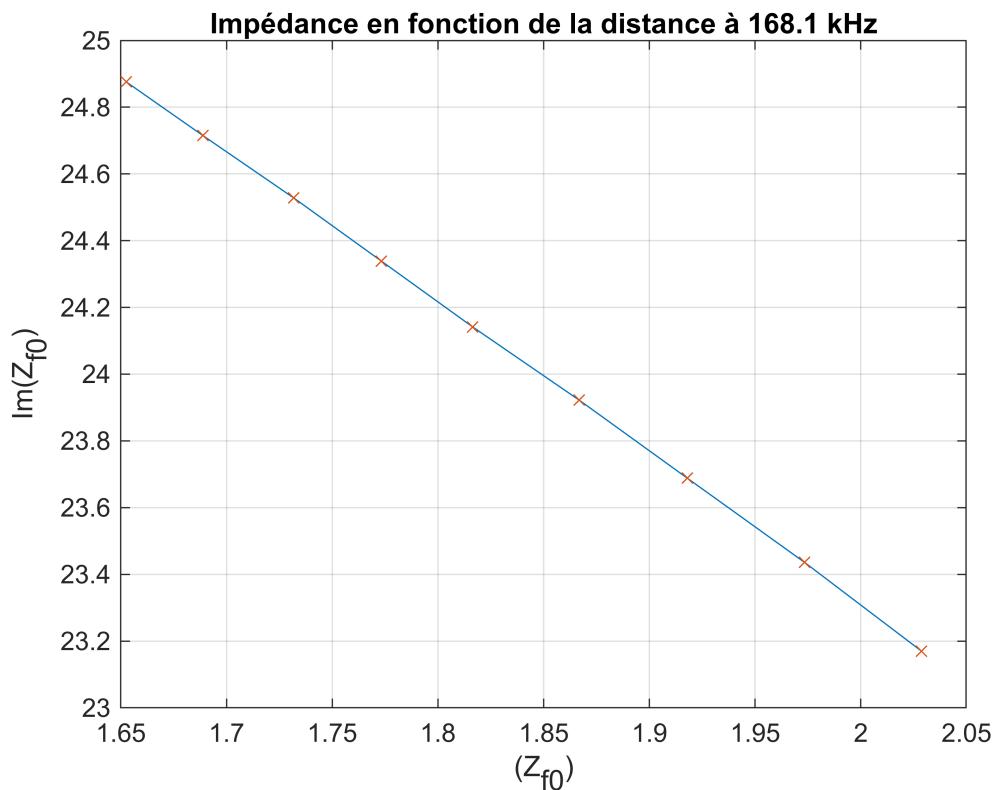
## Seance 2

```
f0_mes = 166.5; %170.8e3 ; %[Hz] (old)
Z(101, :) = [];
Z(300, :) = [];

% Calcul de la fréquence de résonnance théorique
f0 = 150.3 * 1e3; % [kHz] fréquence résonnance mesurée
C = 39 * 1e-9;
f(101,:) = [];
f(300, :) = [];

for aaaa = 1 : 20
z_f0_70 = interp1(f,Z(:,5), f0);
Lb = imag(z_f0_70)/(f0*2*pi);
Rb = real(z_f0_70);
omega0 = sqrt(1/(Lb*C) - Rb^2/Lb^2);
f0 = omega0/(2*pi);
% U excitation
end
z_f0 = interp1(f,Z,f0);
plot(real(z_f0),imag(z_f0),real(z_f0),imag(z_f0), 'x')
ylabel('Im(Z_{f0})')
xlabel('(Z_{f0})')
title('Impédance en fonction de la distance à 168.1 kHz')
```

```
grid;
```



```
Q = omega0*Lb/Rb;
Rp = Rb*(1+Q^2);

Rmes = 324; %[Ohm]

UmodRMS = 1.074;
Umod = 1.519;

H_z_f0 = z_f0./((1+1i.*C.*Rp.*omega0).*z_f0 + Rp);
% Calcul des coordonnées réelles et imaginaires
x = real(H_z_f0);
y = imag(H_z_f0);

% Calcul du cercle passant par ces points (utilisation des moindres carrés pour ajuster un cercle)
A = [2*x', 2*y', ones(length(H_z_f0), 1)];
B = x'.^2 + y'.^2;

% Résolution du système linéaire pour obtenir les paramètres du cercle (méthode des moindres carrés)
params = A \ B; % Résolution du système de manière optimale en termes de moindres carrés

% Paramètres du cercle
xc = params(1); % Centre du cercle en x
yc = params(2); % Centre du cercle en y
r = sqrt(params(3) + xc^2 + yc^2); % Rayon du cercle
```

```

% Affichage des points et du cercle
theta = linspace(0, 2*pi, 100); % Angles pour dessiner le cercle
x_circle = xc + r * cos(theta);
y_circle = yc + r * sin(theta);

labels = {'0.50', '0.55', '0.60', '0.65', '0.70', '0.75', '0.80', '0.85', '0.90'};

% Tracer
figure;
plot(x, y, 'ro'); % Points d'origine

for foo = 1:length(x)
    text(x(foo) + 0.035, y(foo), labels{foo}, 'VerticalAlignment', 'bottom', 'HorizontalAlignment', 'left');
end

hold on;
plot(x_circle, y_circle, 'k--'); % Cercle
axis equal;
xlabel('Re');
ylabel('Im');
title('Fonction de transfert du système à 168kHz');
grid on;
hold off;
xlim([0.265 0.714])
ylim([-0.191 0.163])

xlim([0.173 0.622])
ylim([-0.174 0.180])

```