

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 . . . . .	6
2.4	Conclusion . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Séance 2 - Fréquence de résonance et fonction de transfert</b>	<b>7</b>
3.1	Objectifs . . . . .	7
3.2	Méthode . . . . .	7
3.3	Résultats . . . . .	7
3.4	Analyse . . . . .	7
3.5	Conclusion . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Séance 3 - Caractérisation du démodulateur seul</b>	<b>7</b>
4.1	Objectifs . . . . .	7
4.2	Théorie . . . . .	8
4.2.1	Le multiplicateur . . . . .	8
4.2.2	Le filtre . . . . .	8
4.3	Méthode . . . . .	8
4.4	Multiplicateur . . . . .	9
4.4.1	Fréquence de 100 kHz . . . . .	9
4.4.2	Fréquence de 300 kHz . . . . .	9
4.4.3	Analyse . . . . .	10
4.5	Filtrage . . . . .	10
4.6	Conclusion . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>11</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	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 avec multiplicateur et filtre . . . . .	7
13	Schéma du multiplicateur . . . . .	8
14	Montage réalisé . . . . .	8
15	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $0^\circ$ à 100 kHz . . . . .	9
16	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $60^\circ$ à 100 kHz . . . . .	9
17	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $120^\circ$ à 100 kHz . . . . .	9
18	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $180^\circ$ à 100 kHz . . . . .	9
19	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $0^\circ$ à 300 kHz . . . . .	9
20	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $60^\circ$ à 300 kHz . . . . .	9
21	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $120^\circ$ à 300 kHz . . . . .	10
22	$U_p$ , $U'_{mod}$ et $U_{mult}$ avec un déphasage de $180^\circ$ à 300 kHz . . . . .	10

## 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.

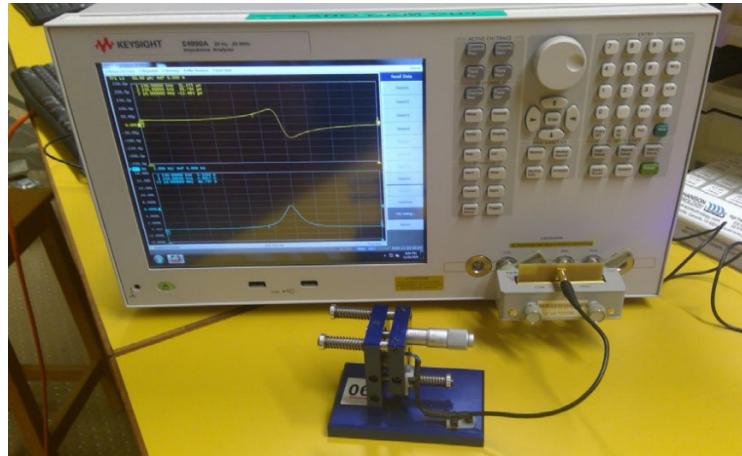


FIGURE 1 – analyseur d’impédance

## 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 [ $\Omega$ ] ;  
 $R_b$ , 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 :

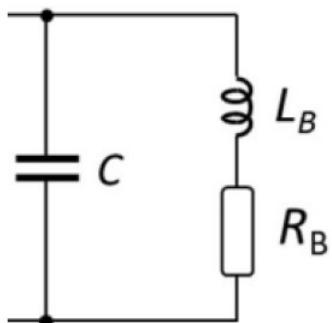


FIGURE 2 – Schéma électrique en série

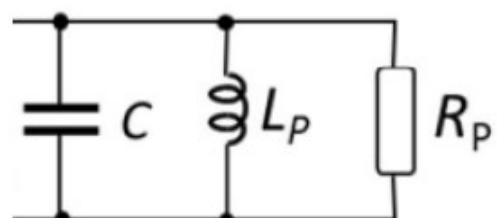


FIGURE 3 – Schéma électrique en parallèle

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

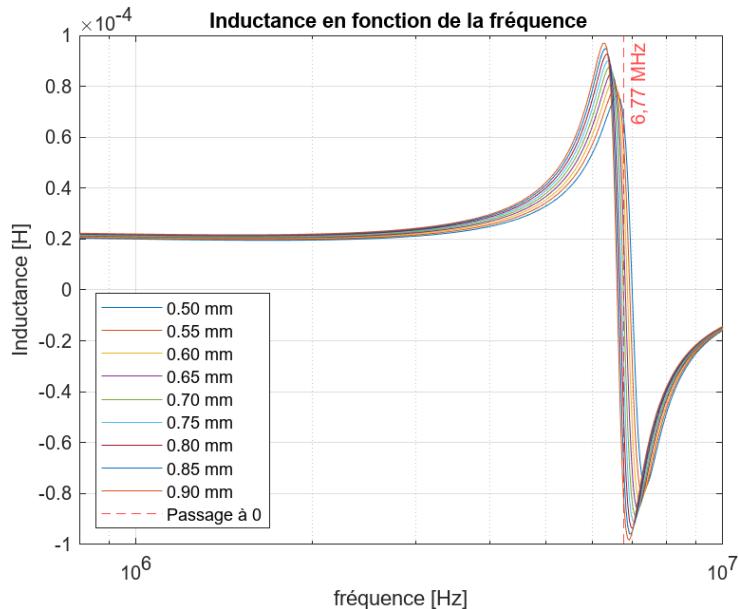


FIGURE 4 – Inductance en fonction de la fréquence

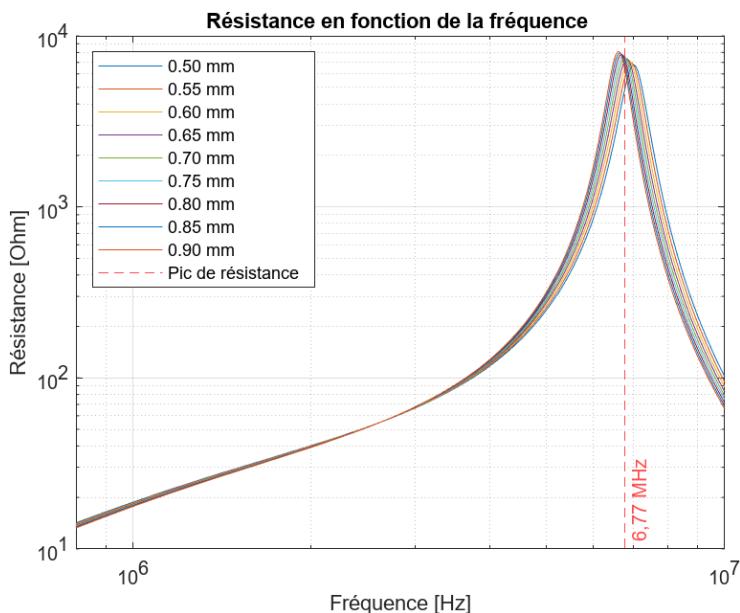


FIGURE 5 – Résistances en fonction de la fréquence

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** 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.

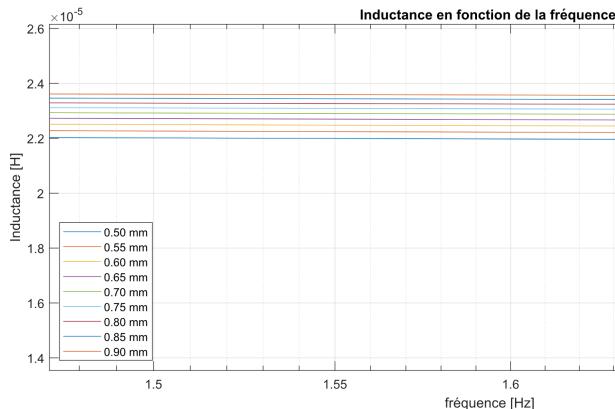


FIGURE 6 – Zoom sur la figure 4

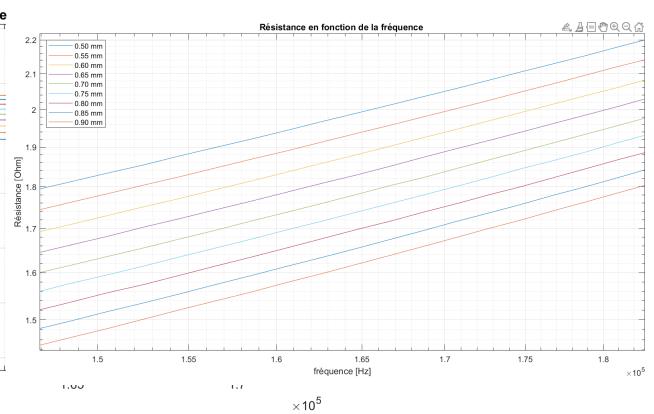


FIGURE 7 – Zoom sur la figure 5

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 :

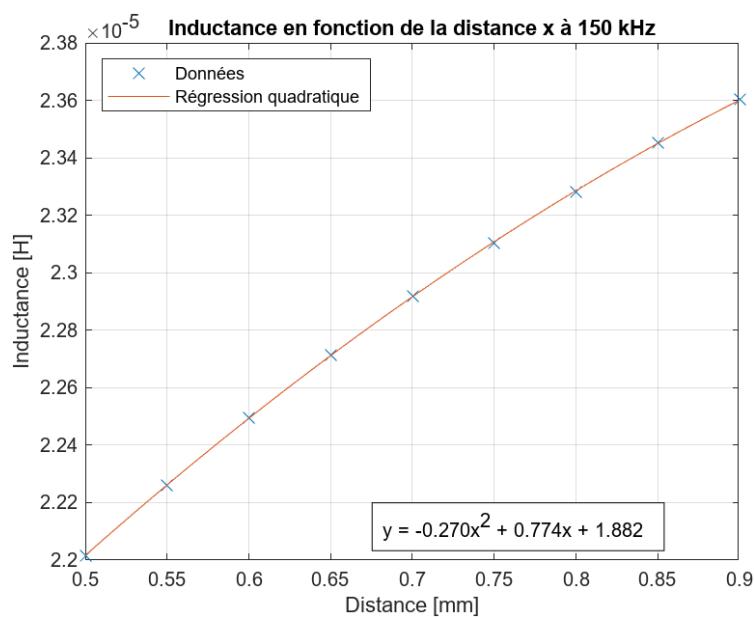


FIGURE 8 – Inductance en fonction de la distance

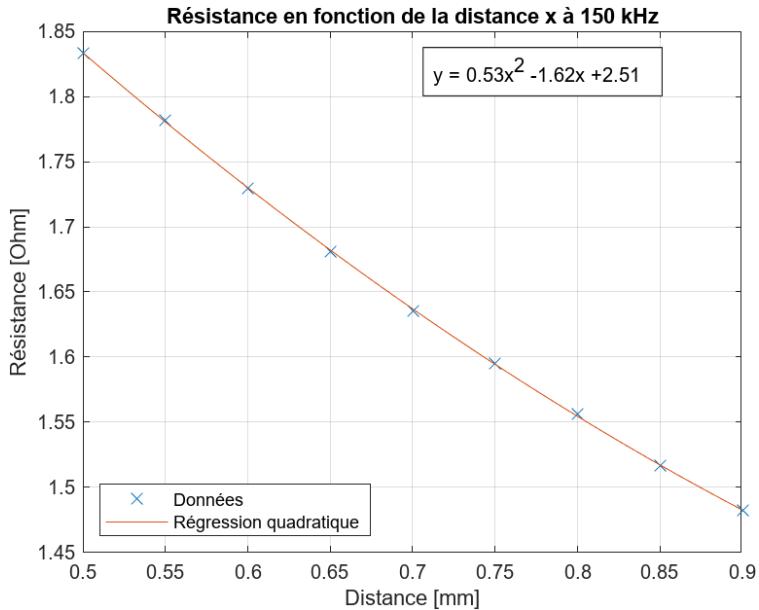


FIGURE 9 – Résistances en fonction de la distance

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 :

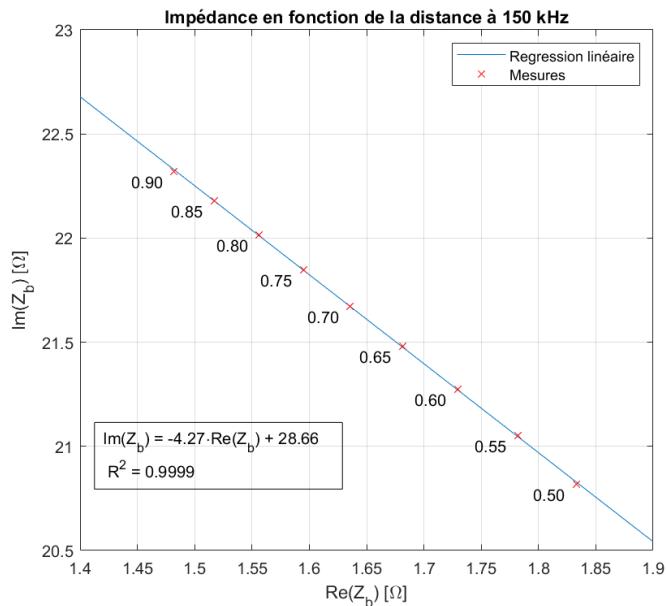


FIGURE 10 – Impédance de la bobine aux distances

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 [ $\Omega/mm$ ] ;

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

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

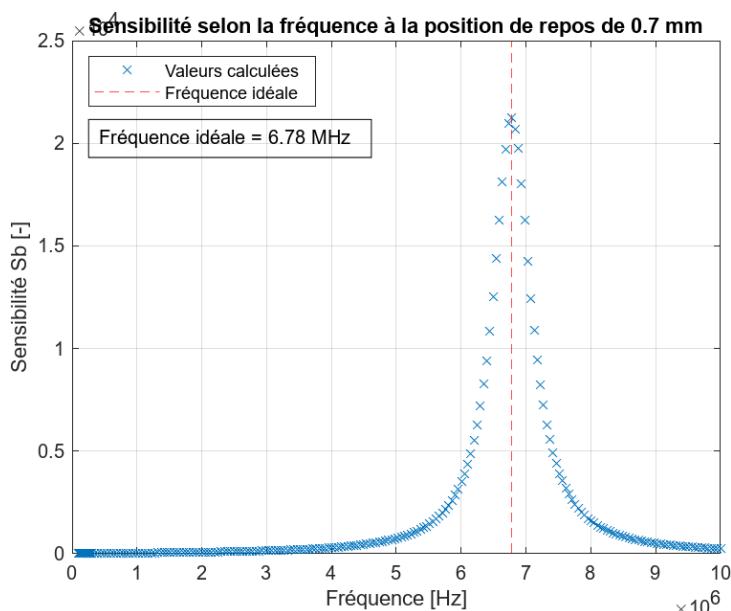


FIGURE 11 – Sensibilité en fonction de la fréquence

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 [ $\Omega/mm$ ] 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

#### 3.2 Méthode

#### 3.3 Résultats

#### 3.4 Analyse

#### 3.5 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 ;

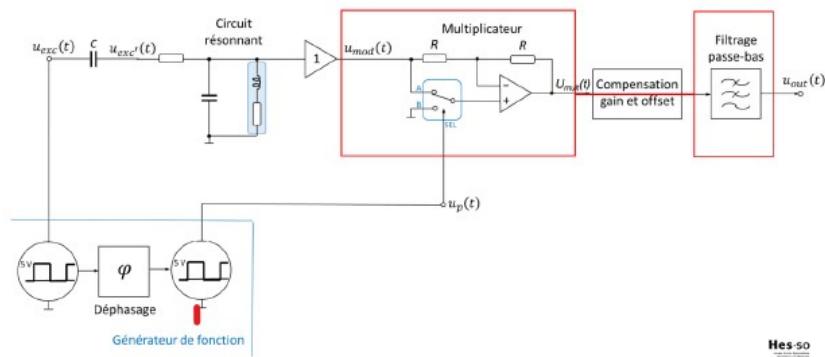


FIGURE 12 – Schéma avec multiplicateur et filtre

## 4.2 Théorie

### 4.2.1 Le multiplicateur

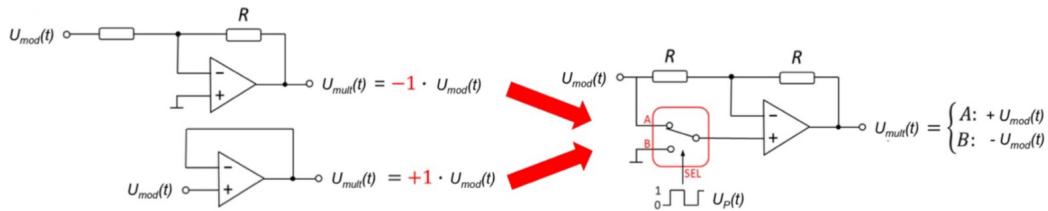


FIGURE 13 – Schéma du multiplicateur

Comme montré sur le schéma ci-dessus (cf. fig. 13), le rôle du multiplicateur est de multiplier le signal  $U_{\text{mod}}$  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

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

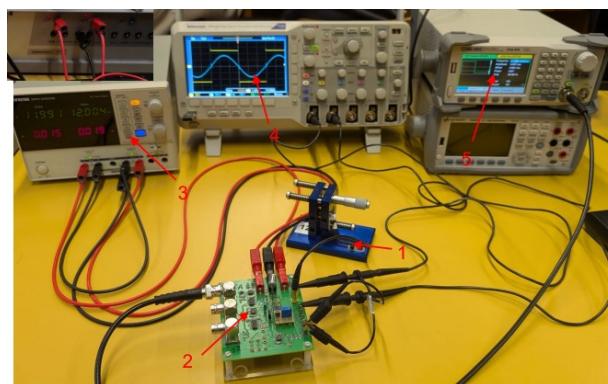


FIGURE 14 – Montage réalisé

- Mesures (Multiplicateur) ;
  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.

## 4.4 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

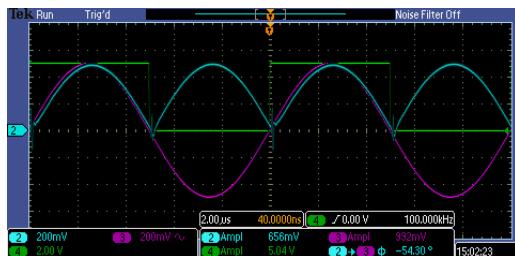


FIGURE 15 –  $U_p$ ,  $U'_{mod}$  et  $U_{mult}$  avec un déphasage de 0° à 100 kHz

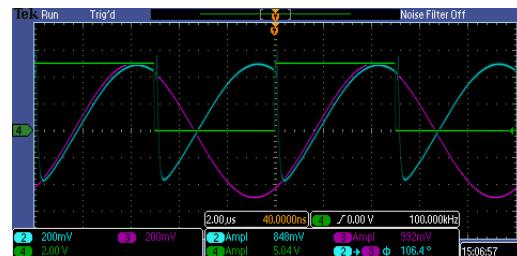


FIGURE 16 –  $U_p$ ,  $U'_{mod}$  et  $U_{mult}$  avec un déphasage de 60° à 100 kHz

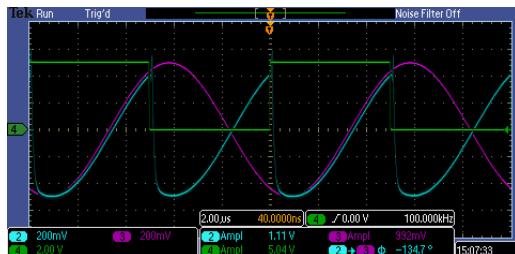


FIGURE 17 –  $U_p$ ,  $U'_{mod}$  et  $U_{mult}$  avec un déphasage de 120° à 100 kHz

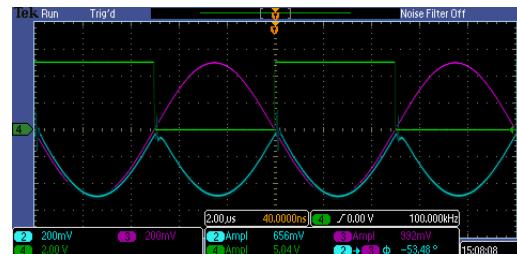


FIGURE 18 –  $U_p$ ,  $U'_{mod}$  et  $U_{mult}$  avec un déphasage de 180° à 100 kHz

### 4.4.2 Fréquence de 300 kHz



FIGURE 19 –  $U_p$ ,  $U'_{mod}$  et  $U_{mult}$  avec un déphasage de 0° à 300 kHz

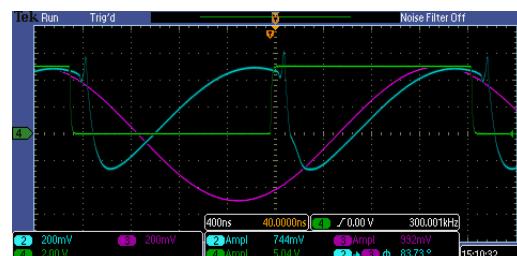


FIGURE 20 –  $U_p$ ,  $U'_{mod}$  et  $U_{mult}$  avec un déphasage de 60° à 300 kHz

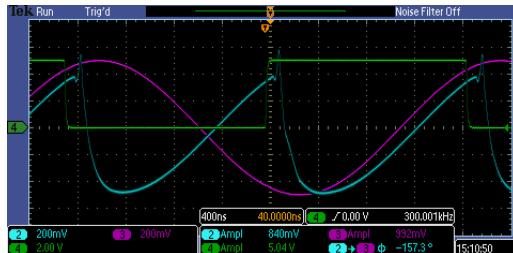


FIGURE 21 –  $U_p$ ,  $U'_{mod}$  et  $U_{mult}$  avec un déphasage de  $120^\circ$  à 300 kHz

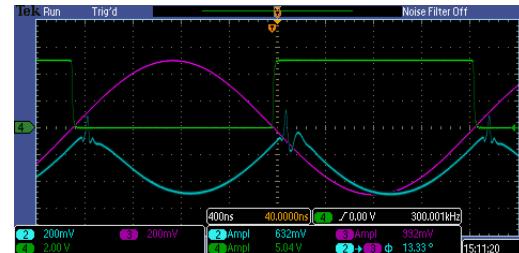


FIGURE 22 –  $U_p$ ,  $U'_{mod}$  et  $U_{mult}$  avec un déphasage de  $180^\circ$  à 300 kHz

#### 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

### 4.6 Conclusion

## 5 Conclusion

Yverdon, 28 décembre 2024

Bianchi Romain



Larghi Andrea

