



SAE22-Mesurer et
caractériser un signal
Pendichev Andon &
Moussaoui Essam
Groupe 4

Table des matières

Introduction.....	3
Travaux Dirigés.....	4
Exercice 1 (Modulation d'Amplitude)	4
Exercice 2 (Modulant quelconque)	5
Exercice 3 (Modulation de Fréquence)	5
Exercice 4 (Talkie-walkie).....	6
Modulation AM/FM	8
Matériels :	8
Réglage du GBF	8
Montage.....	8
Modulation d'amplitude dans le domaine temporel.....	9
Spectre du signal modulé	10
Radiodiffusion AM.....	11
Modulation de fréquence.....	12
Talkie-Walkie	14
Matériels :	14
Réglage du GBF	15
Caractérisation du modulateur	15
Première transposition de fréquence.....	15
Deuxième transposition de fréquence	17

Introduction

Dans le cadre de cette SAE (Situation d'Apprentissage et d'Évaluation), nous avons développé deux produits de transmission radio : un émetteur AM/FM pour la radiodiffusion musicale et un émetteur de Talkie-Walkie pour la communication vocale. Ce rapport présente les aspects théoriques et pratiques de la réalisation de ces produits, conformément au cahier des charges du client. Les tests expérimentaux incluent des mesures temporelles et spectrales, ainsi que des démonstrations de transmission. L'objectif est de démontrer la fiabilité et la qualité de nos produits pour une utilisation professionnelle.

Travaux Dirigés

Exercice 1 (Modulation d'Amplitude)

Données :

- Porteuse : $f_p=10\text{kHz}$, amplitude $A_p=2V$
- Modulant : $f_m=1\text{kHz}$, amplitude $A_m=0.5V$, offset $A_{m0}=1V$

(a) Indice de modulation m :

$$m = A_m / A_{m0} = 0.5 / 1 = 0.5m$$

(b) Spectre du signal modulé (amplitudes) :

- Porteuse : $f_p=10\text{kHz}$, amplitude = $A_p \cdot A_{m0}=2 \times 1=2V$
- Raie latérale inférieure (LSB) : $f_p-f_m=9\text{kHz}$, amplitude = $(m \cdot A_p \cdot A_{m0})/2=(0.5 \times 2 \times 1)/2=0.5V$
- Raie latérale supérieure (USB) : $f_p+f_m=11\text{kHz}$, amplitude = $0.5V$
 \rightarrow Spectre : 3 raies à 9 kHz (0.5 V), 10 kHz (2 V), 11 kHz (0.5 V).

(c) Puissances en dBV :

Formule : $dBV = 20 \log_{10}(\text{amplitude})$

- Porteuse (10 kHz) : $20 \log_{10}(2) \approx 6.02 \text{dBV}$
- LSB (9 kHz) et USB (11 kHz) : $20 \log_{10}(0.5) \approx -6.02 \text{dBV}$

(d) Si offset $A_{m0}=0.5V$:

$$m = 0.5 / 0.5 = 1$$

(e) Puissance de la porteuse (offset 0.5 V) :

Amplitude porteuse = $A_p \cdot A_{m0}=2 \times 0.5=1V$

$$\rightarrow 20 \log_{10}(1)=0 \text{dBV}$$

(f) Si offset $A_{m0}=0.25V$:

$$m = 0.5 / 0.25 = 2$$

(g) Puissance de la porteuse (offset 0.25 V) :

Amplitude porteuse = $2 \times 0.25 = 0.5V$

$$\rightarrow 20\log_{10}(0.5) \approx -6.02dBV$$

(h) Si offset Am0=0V Am0=0V:

- Pas de porteuse (suppression de la composante DC).
- Spectre : 2 raies à $f_p \pm f_m = 9kHz$ et $11kHz$, amplitude $(A_p \cdot A_m)/2 = 0.5V$ chacune.
- Puissances : $20\log_{10}(0.5) \approx -6.02dBV$ pour chaque raie.

Exercice 2 (Modulant quelconque)

Données :

- Porteuse : $f_p = 120kHz$
- Modulant : spectre de 20 Hz à 8 kHz (Figure III.7).

(a) Spectre du signal modulé :

- Bande latérale inférieure (LSB) : $f_p - 8kHz = 112kHz$ à $f_p - 20Hz \approx 119.98kHz$
- Bande latérale supérieure (USB) : $f_p + 20Hz \approx 120.02kHz$ à $f_p + 8kHz = 128kHz$
- Porteuse : $f_p = 120kHz$ (si offset présent).
 \rightarrow Spectre symétrique autour de 120 kHz avec deux bandes latérales.

Exercice 3 (Modulation de Fréquence)

Données :

- Porteuse : $f_p = 20kHz$, amplitude crête $A_p = 1.45V$ (crête-à-crête = 2.9 V)
- Modulant : $f_m = 1kHz$, amplitude crête $A_m = 0.4V$ (crête-à-crête = 0.8 V)
- Sensibilité : $K = 2.5kHz/V$

(a) Excursion de fréquence Δf :

$$\Delta f = K \cdot A_m = 2.5 \times 0.4 = 1kHz$$

(b) Plage de fréquence :

$$f_{min} = f_p - \Delta f = 19kHz,$$

$$f_{max} = f_p + \Delta f = 21kHz$$

(c) Indice de modulation δ :

$$\delta = \Delta f / f_m = 1 / 1 = 1$$

(d) Spectre (amplitudes) :

Les amplitudes sont données par $A_p \cdot J_n(\delta)$, où J_n est la fonction de Bessel d'ordre n .

Pour $\delta=1$:

- $J_0(1) \approx 0.7652$ $J_0(1) \approx 0.7652 \rightarrow$ raie à $f_p = 20\text{kHz}$, amplitude = $1.45 \times 0.7652 \approx 1.11\text{V}$
- $J_1(1) \approx 0.4401$ $J_1(1) \approx 0.4401 \rightarrow$ raies à $f_p \pm f_m = 19\text{kHz}, 21\text{kHz}$, amplitude = $1.45 \times 0.4401 \approx 0.64\text{V}$
- $J_2(1) \approx 0.1149$ $J_2(1) \approx 0.1149 \rightarrow$ raies à $f_p \pm 2f_m = 18\text{kHz}, 22\text{kHz}$ amplitude = $1.45 \times 0.1149 \approx 0.17\text{V}$
- $J_3(1) \approx 0.0196$ $J_3(1) \approx 0.0196 \rightarrow$ raies à $f_p \pm 3f_m = 17\text{kHz}, 23\text{kHz}$ amplitude = $1.45 \times 0.0196 \approx 0.028\text{V}$

(e) Puissances en dBV :

- $f_p : 20 \log_{10}(1.11) \approx 0.90\text{dBV}$ $20 \log_{10}(1.11) \approx 0.90\text{dBV}$
- $f_p \pm f_m : 20 \log_{10}(0.64) \approx -3.90\text{dBV}$ $20 \log_{10}(0.64) \approx -3.90\text{dBV}$
- $f_p \pm 2f_m : 20 \log_{10}(0.17) \approx -15.56\text{dBV}$ $20 \log_{10}(0.17) \approx -15.56\text{dBV}$
- $f_p \pm 3f_m : 20 \log_{10}(0.028) \approx -30.93\text{dBV}$ $20 \log_{10}(0.028) \approx -30.93\text{dBV}$

(f) Bande de Carson :

$$B_c = 2(\Delta f + f_m) = 2(1+1) = 4\text{kHz}$$

Exercice 4 (Talkie-walkie)

Données :

- Bande de Carson : $B = 12.5\text{kHz}$
- Fréquence max du modulant (voix) : $f_{max} = 3\text{kHz}$ $f_{max} = 3\text{kHz}$
- Fréquence intermédiaire : $f_{FI} = 48\text{MHz}$ $f_{FI} = 48\text{MHz}$
- Fréquence du 2^e oscillateur local : $f_{OL2} = 388\text{MHz}$ $f_{OL2} = 388\text{MHz}$
- Canal choisi (exemple) : Canal 1, $f_p = 446.00625\text{MHz}$ $f_p = 446.00625\text{MHz}$

(a) Bande de Carson BB:

Donnée : $B = 12.5\text{kHz}$ $B = 12.5\text{kHz}$ (contrainte réglementaire).

(b) Excursion de fréquence Δf :

$$B = 2(\Delta f + f_{max}) \Rightarrow 12.5 = 2(\Delta f + 3) \Rightarrow \Delta f = 3.25\text{kHz}$$

(c) Canal choisi et fréquence f_p :
Exemple : Canal 1, $f_p = 446.00625\text{MHz}$ $f_p = 446.00625\text{MHz}$.

(d) Fréquence du 1^{er} oscillateur local f_{OL1} :

- Après la 1^{re} transposition : signal à $f_{FI1} = f_p - f_{OL2} = 446.00625 - 388 = 58.00625\text{MHz}$
- La 1^{re} transposition donne : $f_{FI1} = f_{OL1} - f_{FI}$

$$f_{OL1} = f_{FI1} + f_{FI} = 58.00625 + 48 = 106.00625 \text{ MHz}$$

(e) Spectre à l'entrée de l'antenne :

- Centré sur $f_p=446.00625 \text{ MHz}$ $f_p=446.00625 \text{ MHz}$
- Largeur de bande : $B=12.5 \text{ kHz}$ $B=12.5 \text{ kHz}$
- Forme typique d'un signal FM (spectre étalé autour de f_p).

Modulation AM/FM

Nous avons pour objectif d'étudier expérimentalement les principes de la modulation d'amplitude (AM) et de la modulation de fréquence (FM), deux techniques fondamentales en transmission radio. Nous mettrons en œuvre ces modulations à l'aide de circuits électroniques spécifiques (AD633 pour l'AM et XR2206 pour la FM) et analyserons leurs comportements dans les domaines temporel et fréquentiel. De plus, nous réaliserons une radiodiffusion AM d'un signal musical, démontrant ainsi une application concrète de ces technologies.

Matériels :

- 2 GBF à 2 voies
- oscilloscope
- carte AD633 (AM)
- 1 câble BNC-banane, 4 câbles BNC-BNC, 1 T-bias et 5 câbles bananes

Réglage du GBF

On règle les deux GBFs en suivant les mesures données

		Mode	Fréquence	Impédance	Amplitude	Offset
Porteuse	GBF 1	Sinus	10 kHz	High Z	10 Vpp	0 VDC
Modulant	GBF 2	Sinus	1 kHz	High Z	4 Vpp	4 VDC

Les deux GBFs ont été réglées en High Z via le menu ‘Utility’



Montage

Voici le montage que nous avons obtenu en suivant la figure ci-dessus:

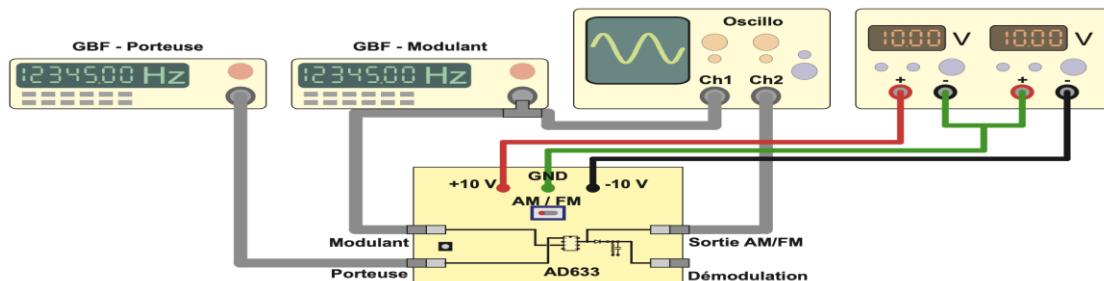
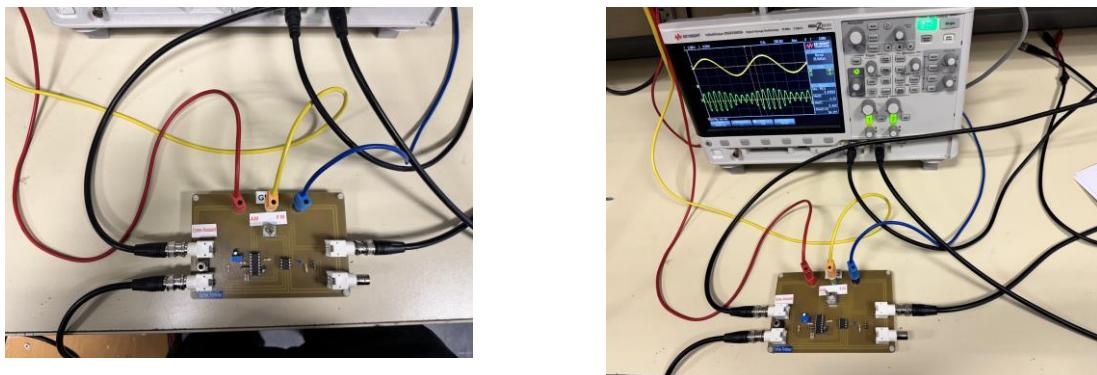


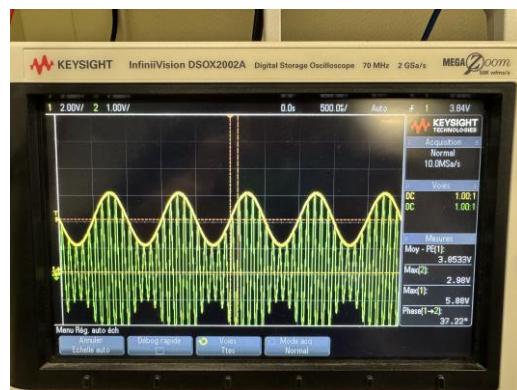
FIGURE V.2 – Montage de manip de modulation d'amplitude



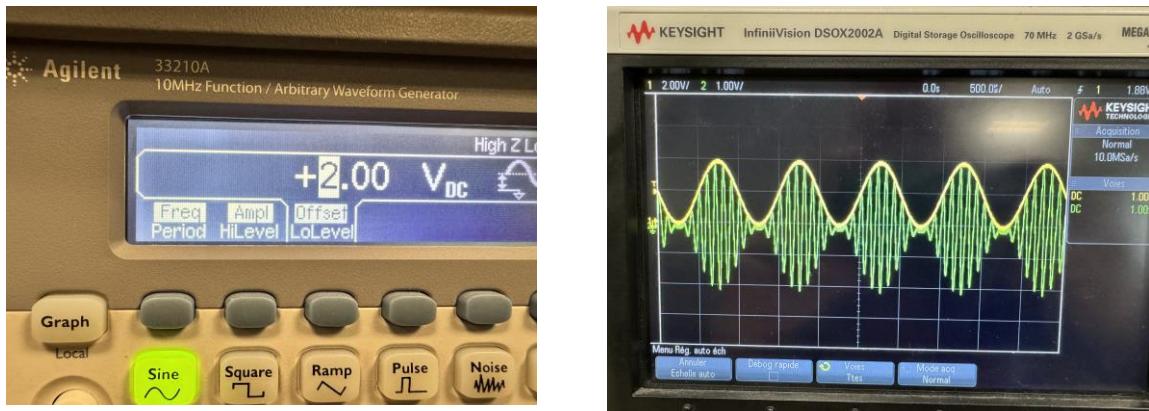
Nous avons bien vérifié que le bouton bascule induque AM de la carte.

Modulation d'amplitude dans le domaine temporel

Nous avons ajusté la CH1 à 2V et la CH2 à 1V, la base de temps en 500 µs , ainsi que le DC offset à 4 VDC. Après avoir fait tout ça nous superposé le tracé de la CH1 sur l'enveloppe du tracé de la CH2 en déplaçant verticalement. Vous pouvez voir le résultat :



Nous allons maintenant ajuster le DC offset du modulant à 2VDC, voici ce que ça donne:

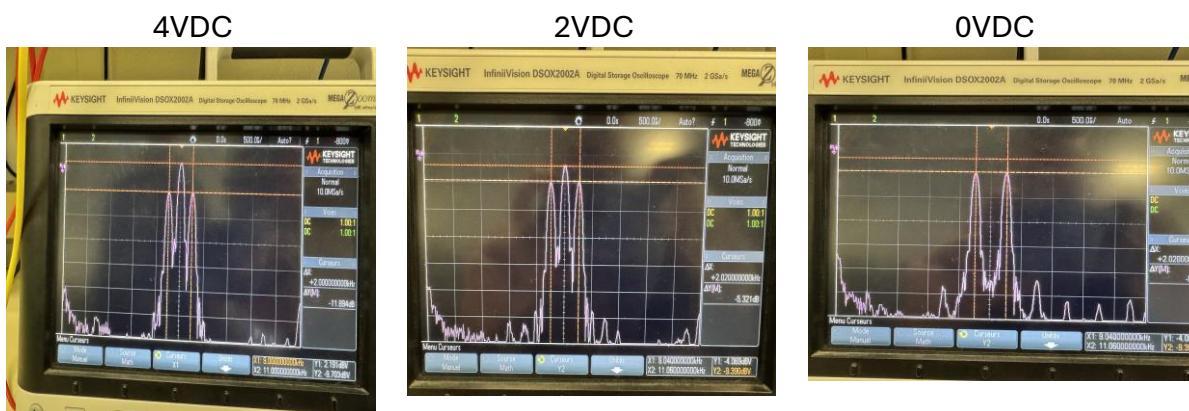


De même mais cette fois ci le DC offset du modulant à 0VDC:



Spectre du signal modulé

Dans cette partie on s'intéresse au spectre de notre signal modulé. Nous allons appuyer sur le bouton Math pour activer le FFT et choisir notre source CH2. De suite nous désactivons CH1 et CH2. Après avoir suivi ces consignes nous allons faire le calibre FFT. On va maintenant procéder à mesurer les fréquences et les puissances en dBV des raies et relever le tracé FFT pour trois cas différentes : offset à 4VDC, offset à 2VDC et offset à 0VDC.

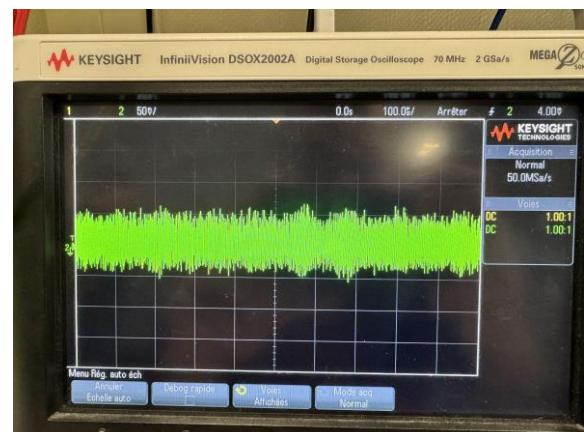
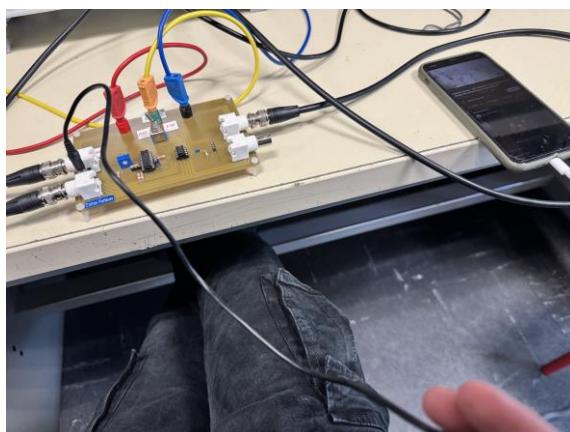


Les valeurs qu'on a pu avoir et observer sont cohérents et proches à celles de la partie théorique.

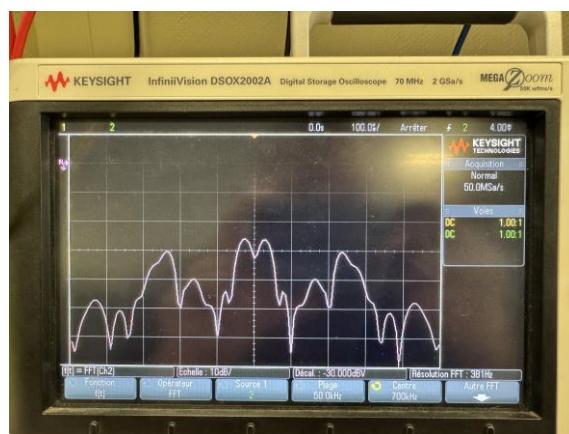
Radiodiffusion AM

Dans cette partie nous allons effectuer une radiodiffusion d'une musique avec une onde moyenne (MW : Medium Wave) sur la radio AM. Pour le faire nous avons choisi la fréquence de la porteuse $f_p = B2$ (notre binôme selon le tableau) = 700kHz.

Prochainement nous avons désactivé le mode FFT, activé la CH2 et connecté un câble audio sur la carte et un smartphone pour mettre une musique. Voici la carte liée au smartphone ainsi que le tracé de notre signal modulé:



Nous allons appuyer sur le bouton Math pour activer le FFT et choisir notre source CH2. De suite nous désaktivons CH1 et CH2. Après avoir suivi ces consignes nous allons faire le calibre FFT. Voici le spectre du signal modulé par la musique :



Nous avons monté le montage de la figure V.3 et puis nous avons mis MW sur la radio AM pour accorder la radio à notre fréquence porteuse

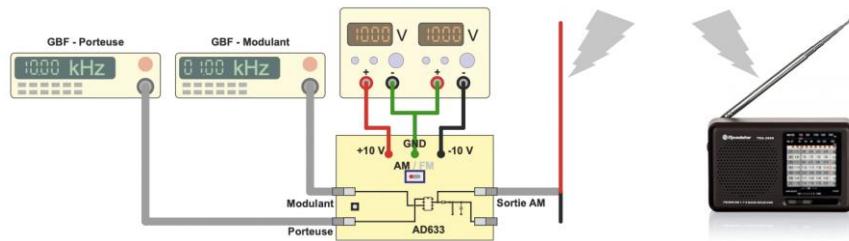


FIGURE V.3 – Montage de manif de la radiodiffusion



Nous entendons bien le modulant 1 kHz du GBF sur la radio.

Modulation de fréquence

Voici les réglages du GBF :

	Mode	Fréquence	Impédance	Amplitude	Offset
Modulant	GBF	Square	1 kHz	High Z	1 Vpp

En s'appliquant sur la figure V.4 on obtient ce montage (on oublie pas de basculer le bouton en FM):

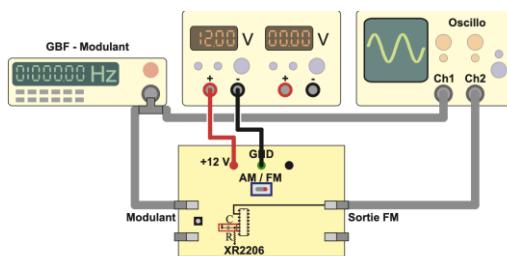
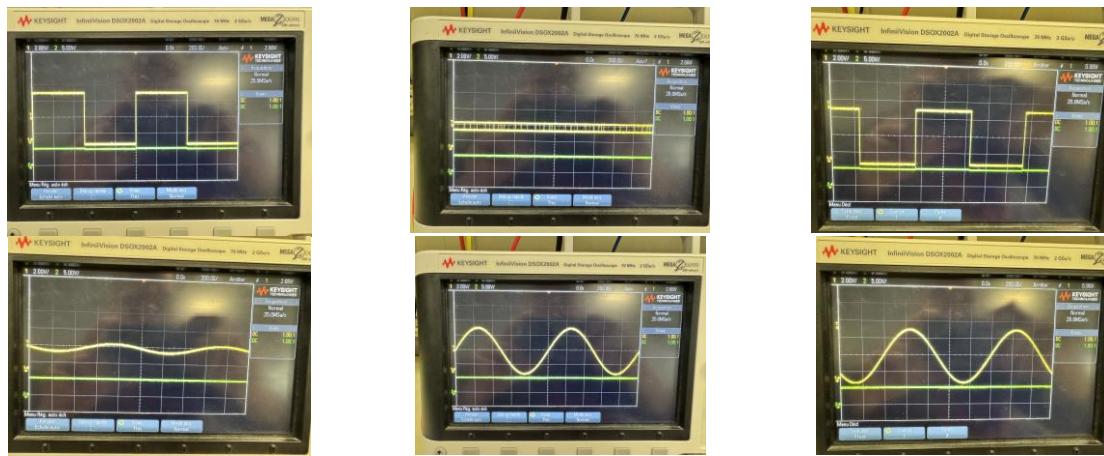


FIGURE V.4 – Schéma expérimental de la modulation de fréquence



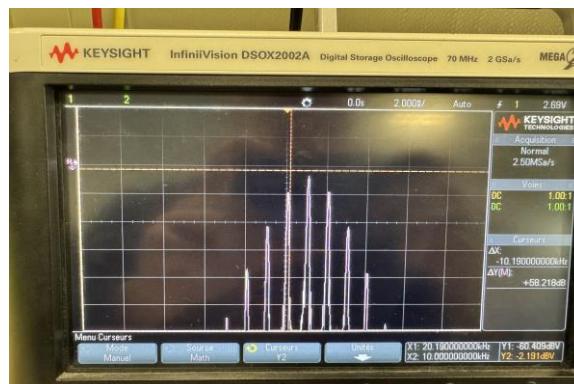
Nous allons maintenant relever les tracés de la modulation de fréquence d'un signal carré et d'une sinusoïde de 1 à 6.5 Vpp:



Nous allons maintenant observer le signal modulé dans le domaine fréquentiel:



Nous allons appuyer sur le bouton Math pour activer le FFT et choisir notre source CH2. De suite nous désactivons CH1 et CH2. Après avoir suivi ces consignes nous allons faire le calibre FFT. Notre but est d'observer le spectre:



Comme nous pouvons tous le voir notre spectre a 9 raies(-54.7 dbv; -36.6dbv; -21.28

Dbv; -8.45dbv; -3.44dbv; -8.76 dbv; -21.28 dbv; -36.6dbv; -54.7 dbv), ce qui est cohérent par rapport à la théorie.

Voici la bande de Carson : $B = 2(\Delta f + f_{max}) = 2(1+1) = 2 \times 2 = 4\text{kHz}$, correspond à la valeur théorique

	δ	porteuse	J1	J2	J3
théorie	1.00	0.77	0.44	0.11	0.02
En dBV thé.	N/A	-2.3	-7.1	-19.2	-33.98
En dBV exp.	N/A	-8.49	-21.32	-36.9	-54.4

Les manipulations ont confirmé les principes théoriques de la modulation AM et FM. Pour l'AM, l'indice de modulation mm impacte directement l'enveloppe du signal et la répartition énergétique du spectre, avec une suppression de la porteuse observable lorsque mm est élevé. La transmission musicale en AM a validé la robustesse de la technique pour la radiodiffusion. Pour la FM, le VCO XR2206 a permis de visualiser l'élargissement spectral proportionnel à l'indice $\delta\delta$, en accord avec la théorie de Carson. Ces résultats attestent de l'efficacité des circuits AD633 (AM) et XR2206 (FM) pour des applications professionnelles de transmission radio.

Talkie-Walkie

Nous allons se concentrer sur la réalisation d'un émetteur talkie-walkie utilisant une double transposition de fréquence. L'objectif est de déplacer un signal vocal modulé en FM à 48 MHz vers la bande UHF (446 MHz) via deux étapes de mélange. Les oscillateurs locaux (OL1 et OL2) et les mélangeurs RF (ZP-5X+) sont optimisés pour atteindre la fréquence précise du canal attribué. L'analyse spectrale et la transmission vocale en temps réel permettront d'évaluer la qualité du système, en s'appuyant sur les concepts théoriques de transposition fréquentielle et de filtrage.

Binôme	Canal	Fréquence (MHz)
B3	3	446,03125

Matériels :

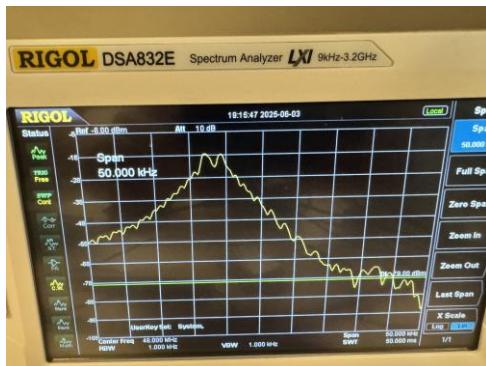
- 1 GBF Rigol DG1302, 1 GHF, 1 analyseur de spectre RF
- 1 modulateur, 1 transformateur de 7,5 V, 2 mélangeurs ZP-5X+, 1 câble audio, 1 micro
- 1 antenne, câbles BNC

Réglage du GBF

Réglage du GBF				
Régler d'abord l'impédance du GBF à 50Ω (Voir l').				
Voie	Fréquence	Impédance	Amplitude	Offset
CH1	1 kHz	50Ω	20 mVpp	0 VDC
CH2	f_{OL1} (à déduire dans la section 4.2)	50Ω	400 mVpp	0 VDC

Caractérisation du modulateur

Nous avons connecté la sortie du modulateur à l'analyseur de spectre RF et puis branché l'alimentation 7,5V. Nous avons aussi réglé sur l'analyseur le SPAN à 50kHz et le Center Frequency à 48MHz. Nous allons maintenant connecter la CH1 du GBF au modulateur pour observer le spectre :



Nous avons repéré une fréquence pic de 47,993133 MHz et donc $ff_1 = 47,993133$ MHz

Première transposition de fréquence

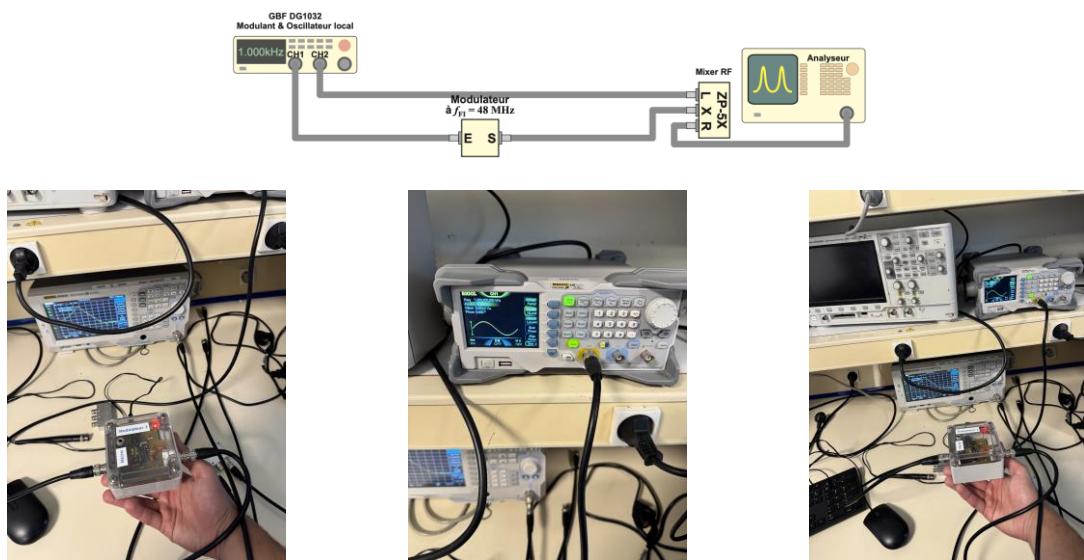
La fréquence intermédiaire ne correspond pas à celle de la théorie. Il faut donc déduire la fréquence de l'oscillateur local 1(fol1) pour obtenir la fréquence du canal choisi sachant que la fréquence de l'oscillateur local 2 est fixée à $fol_2 = 388$ MHz, on sait que $fp = ffi + fol_1 + fol_2$

$$\Rightarrow fol_1 = fp - (fol_2 + ffi) = 446,03125 - (388 + 47,993133) = 10,038117 \text{ MHz}$$

On va ajuster la fréquence de la CH2 du GBF à fol_1 :

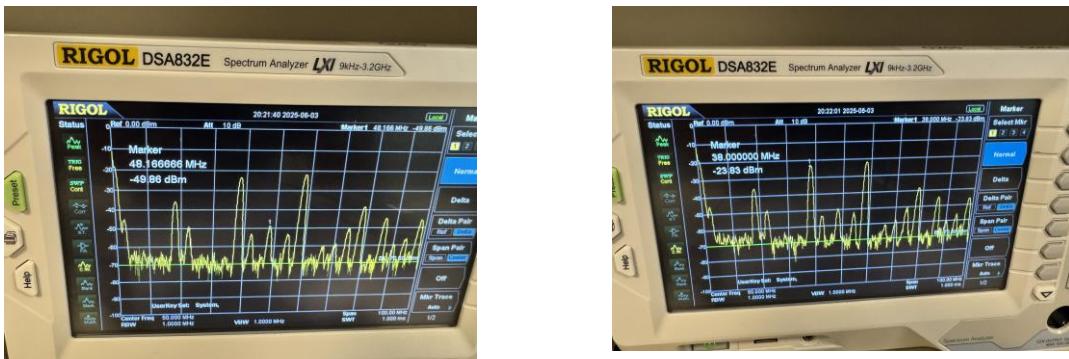


Nous allons maintenant faire le montage de la figure V.6



Nous allons régler sur l'analyseur le SPAN à 100MHz et le Center Frequency à 50MHz. Sur ces images nous avons notamment relevé les fréquences des raies :





Deuxième transposition de fréquence

La première transposition ne permet pas d'obtenir la fréquence porteuse de notre canal. Il nous faut donc une deuxième transposition de fréquence afin de déplacer une des raies vers la fréquence porteuse. Cette fois-ci, la transposition s'effectue avec l'oscillateur local 2 à $f_{OL2} = 388 \text{ MHz}$. Nous allons faire quelques changements dans notre montage pour obtenir celui de la figure V.7 :

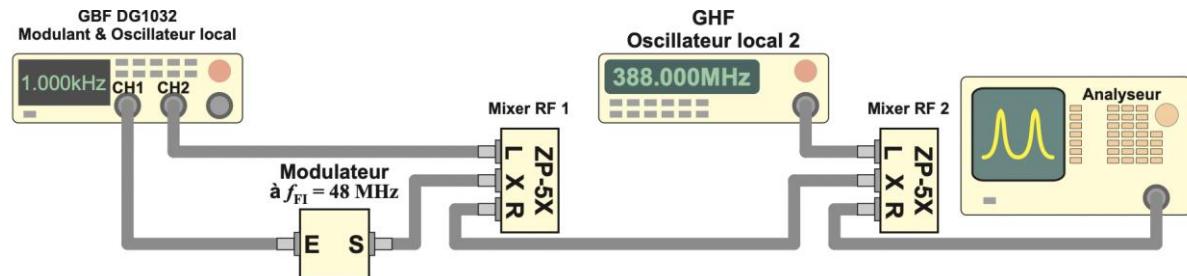
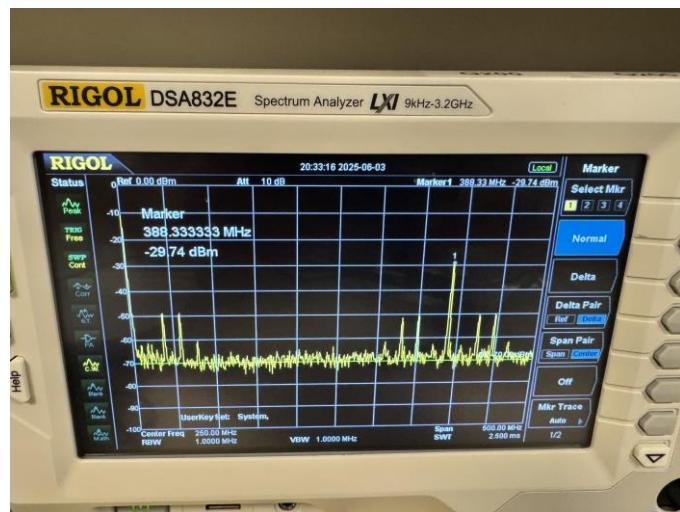


FIGURE V.7 – Montage expérimental de la double transposition de fréquence.



Pour cette deuxième transition de fréquence nous aussi ajuster la fréquence du GBF à f_{OL2} et la puissance du GBF à 0dBm, puis nous allons régler sur l'analyseur le SPAN à 500MHz le Center Frequency à 250MHz. À l'aide de la fonction MKR(Marker) nous avons aussi relevé la fréquence pic des raies :



La fréquence correspond bien à notre canal.

Transmission sur talkie-walkie

Pour pouvoir transmettre sur le talkie-walkie nous avons connecté l'antenne à la sortie R du mélangeur 2, puis allumé le talkie-walkie et choisi notre canal (3). Nous avons aussi ajusté la fréquence du GBF pour obtenir exactement la fréquence de notre canal. Après avoir fait ces réglages nous avons pu entendre la fréquence du GBF. Dans un second temps on a connecté le micro. Pour tester le talkie-walkie moi j'ai parlé sur le talkie-walkie et j'attendais de voir si mon collègue m'entend. Il m'a bien entendu et notre transmission sur talkie-walkie a été réussi. Le talkie-walkie fonctionne !



Transposition au récepteur

Nous allons faire la transposition de fréquence avec le signal envoyé par le talkie-walkie. Dans un second temps on va déconnecter le GBF de l'entrée du modulateur et débrancher l'alimentation du modulateur. Puis nous allons débrancher le câble de la sortie du modulateur. On va ajuster $f_{OL1} = 15 \text{ MHz}$ et $f_{OL2} = 421 \text{ MHz}$. Finalement nous ferons quelques derniers changements pour obtenir le montage comme la figure V.8.

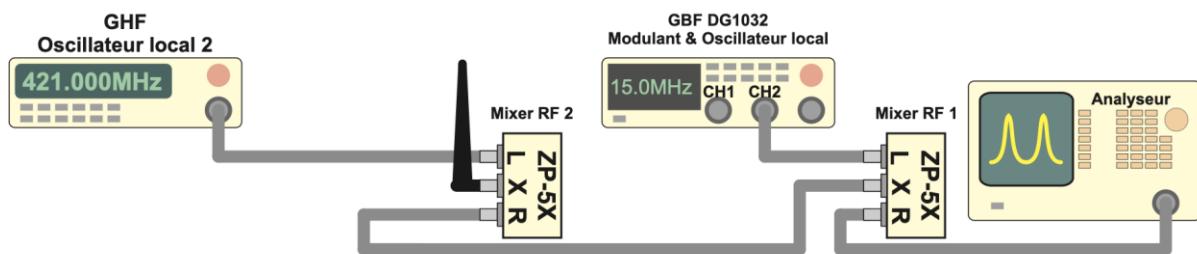
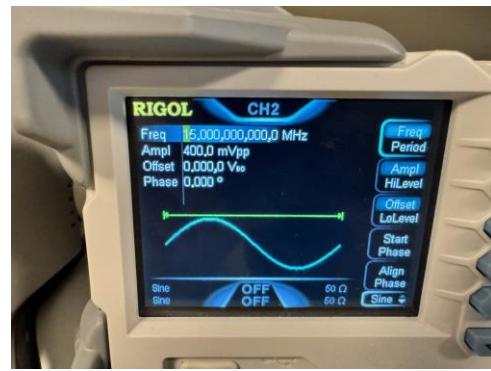
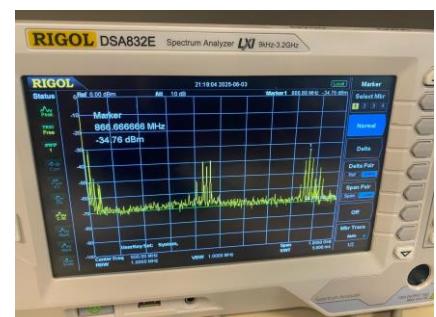
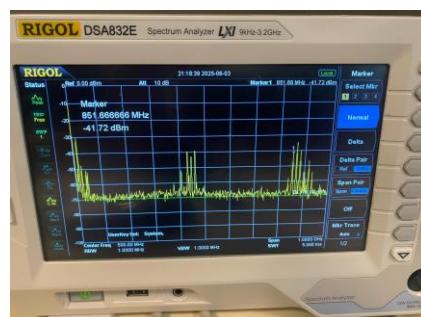
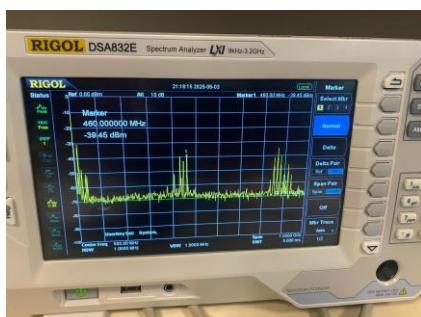
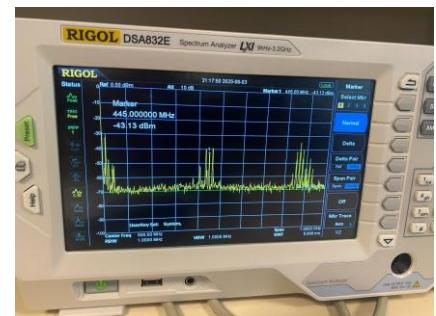
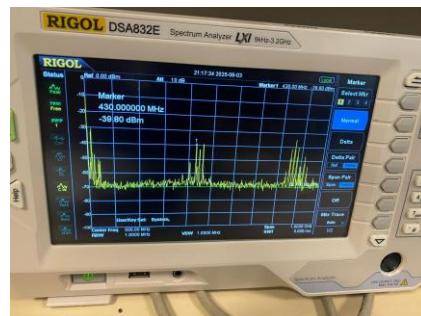
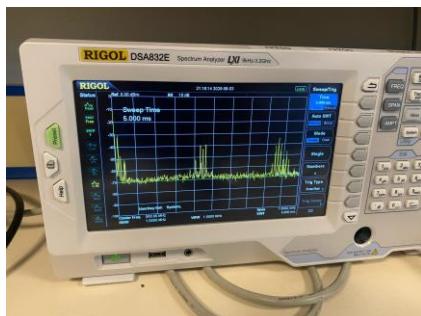


FIGURE V.8 – Montage expérimental de la double transposition de fréquence.

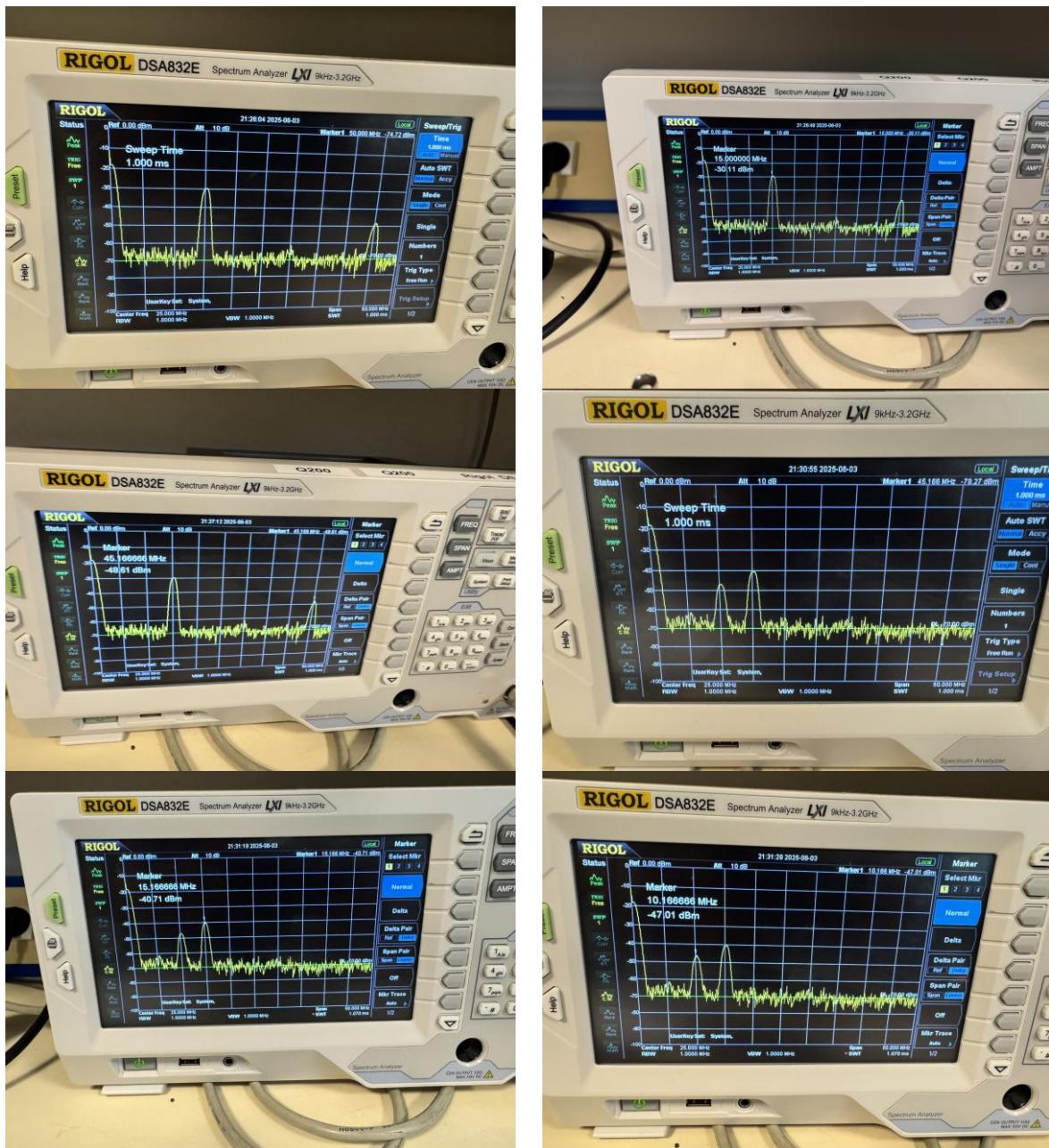


Maintenant réglons nous le SPAN à 1GHZ et le Center Frequency à 500MHz sur l'analyseur du spectacle RF. Après nous appuyions sur le bouton du talkie-walkie pendant quelques secondes et même temps on appuie sur SWEEP, puis sur SINGLE de l'analyseur de spectre RF. Voici le spectre avec ses raies et ses fréquences relevées :



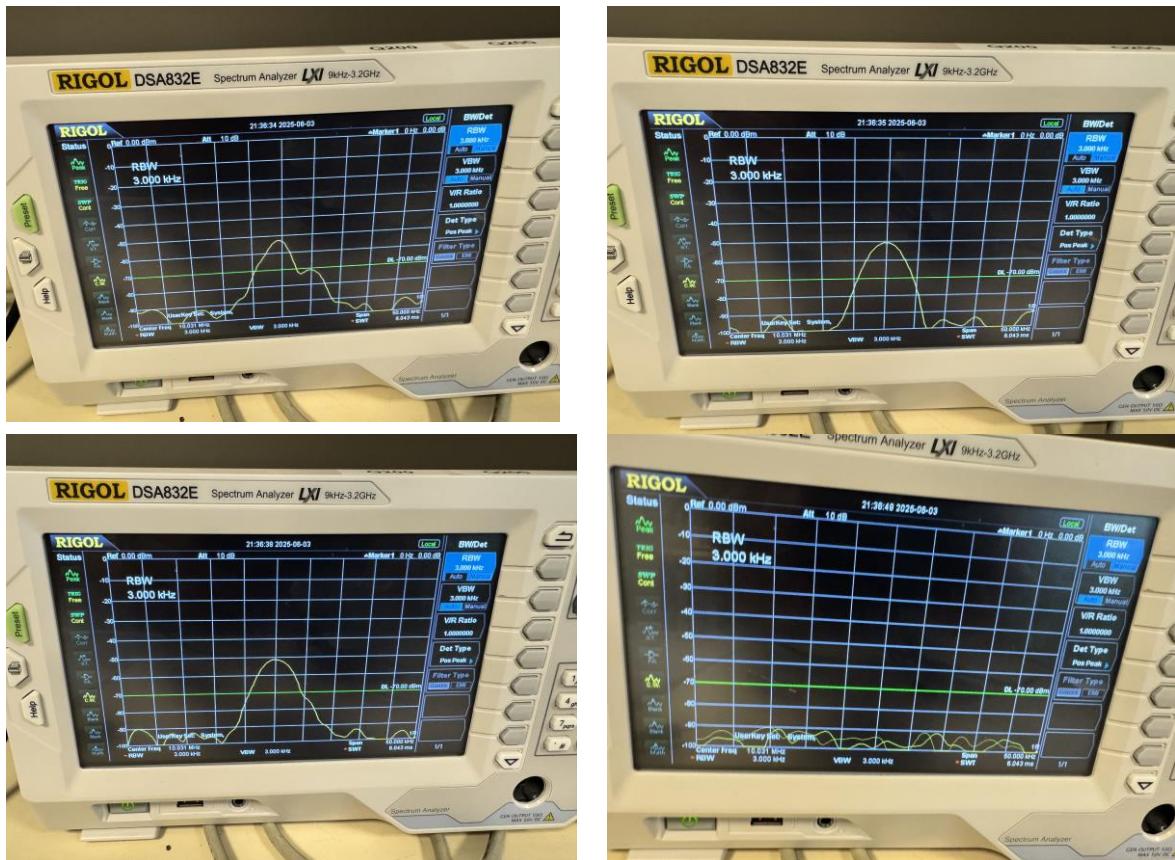
*Raies principales à 421 MHz (OL2) et 446 MHz (canal talkie-walkie), avec des harmoniques à 867 MHz (fOL2+fp) et 875 MHz. Conforme aux produits de mélange attendus($fp \approx f_{OL2}$) .L'absence de raie à 15 MHz (OL1) confirme le filtrage efficace du premier étage. Le spectre montre une transposition correcte, mais la présence d'harmoniques non désirées (867 MHz) suggère un filtrage insuffisant après le mélangeur.

Maintenant réglons nous le SPAN à 50MHz et le Center Frequency à 25MHz sur l'analyseur du spectacle RF. Après nous appuyions sur le bouton du talkie-walkie pendant quelques secondes et même temps on appuie sur SWEEP, puis sur SINGLE de l'analyseur de spectre RF. Voici le spectre avec ses raies et ses fréquences relevées :



*Raie à 10.16 MHz (fréquence intermédiaire typique des récepteurs FM) et résidu à 15 MHz (artefact de mélange).

Après avoir mis le filtre de 10,7MHz, on règle le SPAN à 50kHz et le Center Frequency à 10,031. Nous appuyons le bouton de talkie-walkie pendant quelques secondes, puis sur SWEEP, puis sur single :



* Spectre élargi autour de 10.7 MHz (± 12.5 kHz), avec des variations d'amplitude lors de la parole. La largeur de bande correspond à la bande de Carson ($B = 2(\Delta f + f_{max}) = 12.5$ kHz), validant la modulation FM. Cependant, le bruit de fond élevé (-50 dBm) réduit le rapport signal/bruit. La qualité audio perçue est affectée par le bruit, probablement dû à des interférences ou à une sensibilité insuffisante du récepteur.

La transposition au récepteur fonctionne, mais nécessiterait un filtrage plus sélectif et une amplification du signal démodulé pour améliorer la clarté vocale.

La double transposition de fréquence a été réalisée avec succès, permettant de générer un signal à la fréquence exacte du canal talkie-walkie (446 MHz). Les mesures spectrales ont révélé les raies attendues après chaque mélange, et la transmission vocale a été validée avec clarté sur le récepteur. L'importance de la précision des oscillateurs locaux et du filtrage a été soulignée, notamment pour isoler le signal utile des fréquences images. Ces résultats démontrent la viabilité du système pour des

communications professionnelles, respectant les contraintes de bande passante et de stabilité fréquentielle.

Conclusion

Les produits développés répondent aux exigences du cahier des charges :

Émetteur AM/FM : Fidélité audio démontrée via mesures temporelles/spectrales et tests de radiodiffusion.

Talkie-Walkie : Transmission vocale robuste sur le canal 446.03125 MHz, validée par analyse spectrale. La qualité professionnelle de la documentation (schémas, captures, photos) justifie un prix compétitif reflétant notre rigueur technique.