

Software Defined Radio

Ting Chen, Tehema Teiti

December 23, 2018

1 Introduction

Dans le domaine des télécommunications sans fil, les chaînes de transmission classiques présentent l'avantage d'être peu cher, mais il est difficile de faire évoluer le système à cause de contraintes matérielles. De nos jours, les smartphones intègrent des émetteurs-récepteurs conçus pour une technologie spécifique (3G, 4G, GSM, ...). Faire évoluer ces systèmes pour intégrer une nouvelle technologie impliquerait de revoir toute la partie matérielle, ce qui est compliqué. La radio logicielle, ou SDR (Software Defined Radio) permet d'utiliser du matériel générique avec une partie logicielle spécifique à une technologie. Ainsi, il est plus facile de faire évoluer le système en ne changeant uniquement le code.

Trois séances de travaux pratiques ont été mises en place afin de travailler sur l'extraction d'un signal spécifique dans une gamme de fréquences radios parmi plusieurs autres signaux afin de la traiter numériquement avec GNURadio. La première partie consiste à montrer par la théorie qu'il est possible de transmettre un signal en bande étroite sans la modifier avec un émetteur-récepteur IQ (In-phase/Quadrature). Dans la deuxième partie, nous travaillons sur la démodulation de signaux enregistrés d'une radio FM à partir d'un fichier source à l'aide de l'outil GNURadio. Enfin, la troisième partie se concentre sur la réception de messages VOLMET.

2 Présentation de l'appareil d'acquisition

Durant les travaux pratiques, un émetteur-récepteur USRP (Universal Software Radio Peripheral), l'USRP-2900, a été utilisé pour enregistrer des signaux radios sur lesquelles nous allons travailler en vue de les traiter numériquement. Avant de les traiter, nous allons nous assurer par la théorie que ces signaux n'ont pas été altérés et sont bien exploitables.

L'USRP-2900 présente deux étages :

1. le premier étage consiste à la transposition du signal reçu à la fréquence zéro afin de la traiter plus facilement
2. le deuxième étage consiste à la conversion du signal analogique en signal numérique via un ADC afin de pouvoir traiter le signal numériquement

La figure 1 présente ces étages pour la réception de signal.

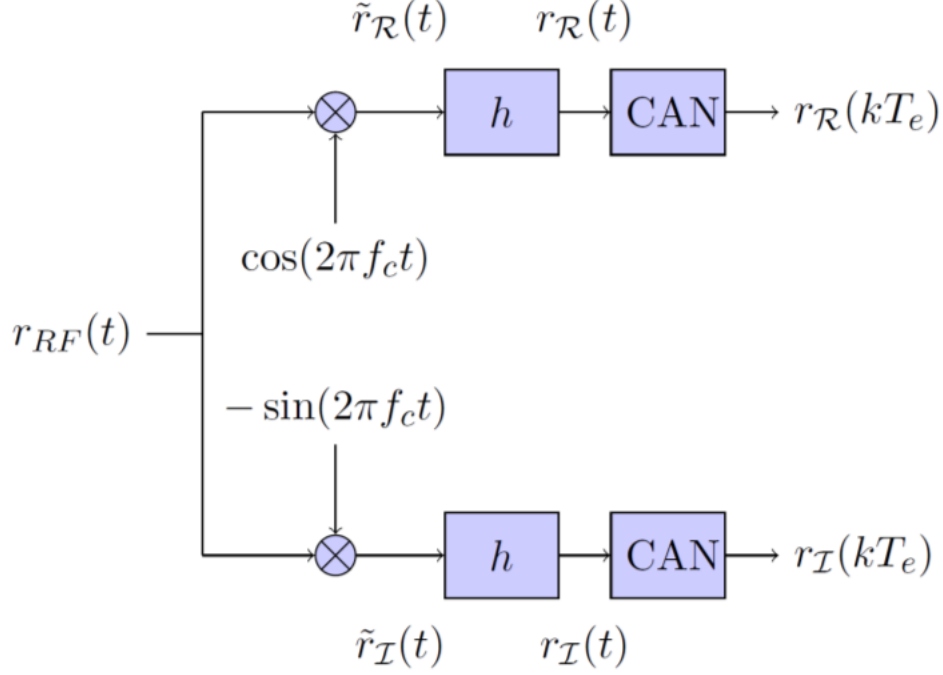


Figure 1: Etages de l'USRP-2900

Nous définissons la nomenclature suivante :

- $r_{RF}(t)$ le signal reçu dans le domaine temporel
- $\tilde{r}_R(t)$ la partie réelle du signal reçu dans le domaine temporel
- $r_R(t)$ la partie réelle du signal reçu dans le domaine temporel après filtrage
- $r_R(kT_e)$ la partie réelle du signal reçu dans le domaine temporel après filtrage et échantillonnage
- $\tilde{r}_I(t)$ la partie imaginaire du signal reçu dans le domaine temporel
- $r_I(t)$ la partie imaginaire du signal reçu dans le domaine temporel après filtrage
- $r_I(kT_e)$ la partie imaginaire du signal reçu dans le domaine temporel après filtrage et échantillonnage

Dans un premier temps, nous allons considérer que $r_{RF}(t) = s_{RF}(t)$ avec $s_{RF}(t)$ le signal transmis et nous allons exprimer $\tilde{r}_R(t)$ et $\tilde{r}_I(t)$ en fonction de

$s_{RF}(t)$, f_0 (fréquence de la porteuse du signal transmis) et f_c (fréquence utilisée pour la transposition du signal reçu). Nous avons :

$$\begin{aligned}\tilde{r}_R(t) = & \frac{1}{2}s_R(t) [\cos(2\pi(f_0 - f_c)t) + \cos(2\pi(f_0 + f_c)t)] \\ & - \frac{1}{2}s_I(t) [\sin(2\pi(f_0 - f_c)t) + \sin(2\pi(f_0 + f_c)t)] \quad (1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{r}_I(t) = & -\frac{1}{2}s_R(t) [\sin(2\pi(f_0 + f_c)t) + \sin(2\pi(f_0 - f_c)t)] \\ & + \frac{1}{2}s_I(t) [\cos(2\pi(f_0 - f_c)t) - \cos(2\pi(f_0 + f_c)t)] \quad (2)\end{aligned}$$

Ensuite, nous allons tenter d'identifier les caractéristiques du filtre h afin d'avoir $r_R(t) = s_R(t)$ et $r_I(t) = s_I(t)$. Pour cela, nous posons $f_0 = f_c$ puis nous passons dans le domaine fréquentiel par la transformée de Fourier afin d'étudier le signal reçu. Nous calculons $\tilde{R}_R(f)$ et $\tilde{R}_I(f)$ respectivement les transformées de Fourier de la partie réelle et de la partie imaginaire du signal reçu. Nous obtenons alors :

$$\tilde{R}_R(f) = \frac{1}{4} [2S_R(f) + S_R(f + 2f_0) + S_R(f - 2f_0)] - \frac{j}{4} [S_I(f + 2f_0) - S_I(f - 2f_0)] \quad (3)$$

$$\tilde{R}_I(f) = \frac{1}{4} [2S_I(f) + S_I(f + 2f_0) + S_I(f - 2f_0)] - \frac{j}{4} [S_R(f + 2f_0) - S_R(f - 2f_0)] \quad (4)$$

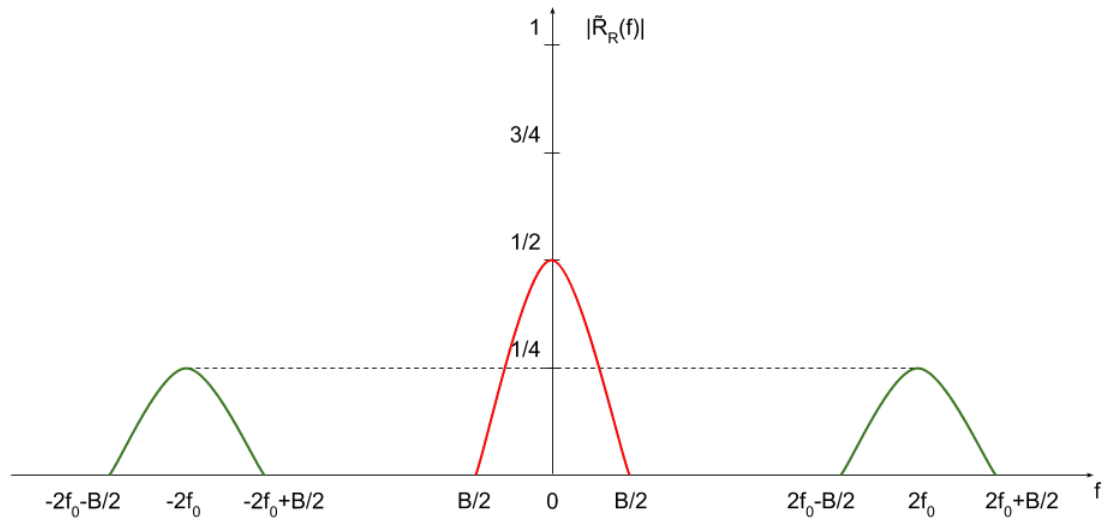


Figure 2: Analyse de Fourier du signal émis en bande étroite

A partir de la figure 2, on souhaite uniquement garder la partie centrale du spectre représentée en rouge. On peut alors définir les caractéristiques du filtre h que nous devons utiliser :

- utilisation d'un filtre pass-bas
- la fréquence de coupure : $\frac{B}{2} < f_{coup} < 2f_0 - \frac{B}{2}$ pour garder la partie rouge et éliminer la partie verte
- le gain : 2

L'utilisation d'un tel filtre ne marche que dans le cas où l'on se place en bande étroite, c'est-à-dire que $f_0 > \frac{B}{2}$. Si nous travaillions en large bande, il y aurait un dédoublement du bruitage (voir figure 3 en hachure bleue)

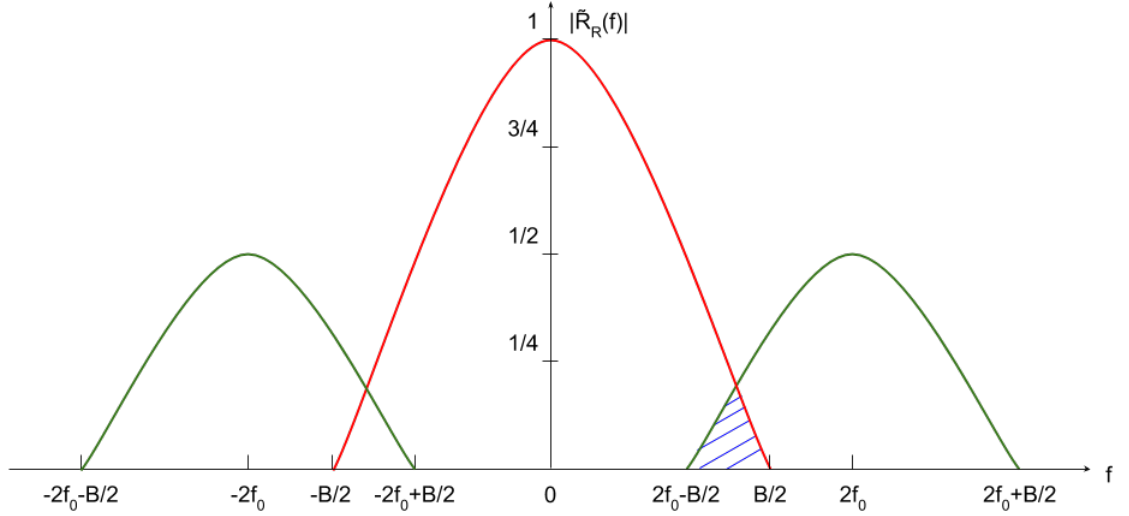


Figure 3: Analyse de Fourier du signal émis en large bande

Après le filtrage, il est nécessaire d'échantillonner le signal afin de pouvoir la traiter numériquement. En théorie, on pourrait échantillonner le signal avant le filtrage, mais cela impliquerait d'échantillonner à une fréquence très élevée, ce qui poserait des problèmes au niveau matériel et coûterait cher. Le choix de la fréquence d'échantillonnage F_e doit respecter le théorème de Shannon :

$$F_e > 2f_{max} \text{ avec } f_{max} = \frac{B}{2}$$

On a donc $F_e > B$ et $T_e < \frac{1}{B}$.

Maintenant que nous venons de montrer que les deux signaux $s_R(t)$ et $s_I(t)$ peuvent être transmis à la fréquence porteuse f_0 et peuvent être parfaitement récupérer par un émetteur-récepteur IQ, nous allons ignorer la phase de transposition du signal pour nous concentrer sur le système de transmission.

Tout signal réel possède une transformée de Fourier avec une symétrie Hermitienne. La figure 4 représente notre signal en bande étroite avec une fréquence positive et une négative symétriques par rapport à l'axe des ordonnées.

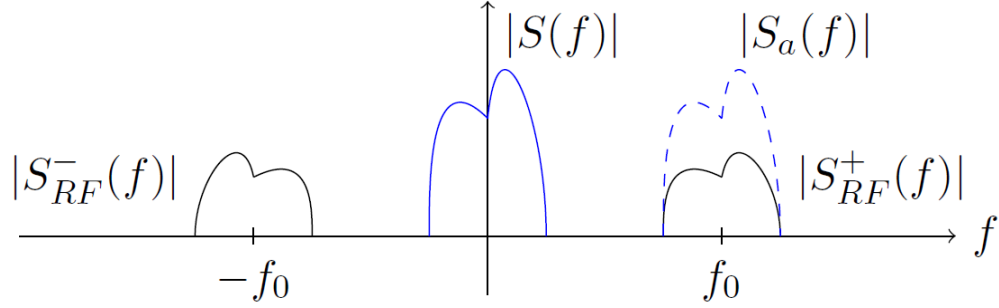


Figure 4: Représentation spectrale du signal analytique et de l'enveloppe complexe du signal émis en bande étroite

Afin de garder la partie purement positive du signal analytique associée au signal de bande étroite, nous avons besoin de doubler l'amplitude de ce signal analytique et de la recentrer sur l'axe des ordonnées afin d'obtenir l'enveloppe complexe.

Nous avons :

$$\begin{aligned} S_a(f) &= [S_R(f) + jS_I(f)] * \delta(f - f_0) \\ S_a(t) &= [S_R(t) + jS_I(t)] e^{-j2\pi f_0 t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S(f) &= S_a(f + f_0) = S_R(f) + jS_I(f) \\ S(t) &= S_I(t) + jS_I(t) \end{aligned}$$

3 Réception d'une radio FM

Dans cette deuxième partie du TP, nous devons analyser un fichier contenant l'enregistrement de signaux radios FM acquis à Toulouse en 2015 par l'USRP-2900 présenté dans la partie précédente. La bande VHF (Very High Frequency) comprend les fréquences allant de 30MHz à 300 MHz. Nous nous focalisons uniquement sur la bande de fréquence allant de 87.5MHz à 108MHz qui est dédiée aux radios FM. Afin d'analyser cet enregistrement, nous utilisons l'outil GNURadio afin d'implémenter des chaînes de blocs de façon logicielle pour traiter le signal enregistré.

Les caractéristiques de l'enregistrement sont les suivantes :

- fréquence d'échantillonnage F_e : 1.5MHz
- fréquence centrale f_0 : 99.5MHz

3.1 Analyse fréquentielle de l'enregistrement

Nous implémentons sur GNURadio une première chaîne de traitement représentée par la figure 5.

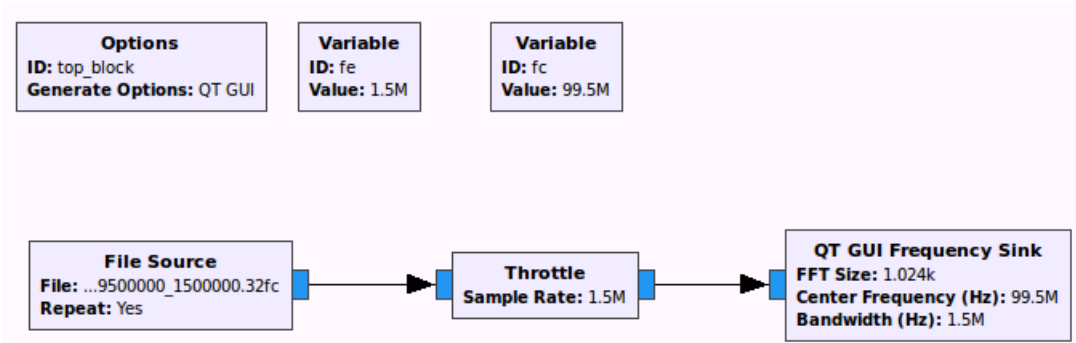


Figure 5: Chaîne de traitement d'analyse fréquentiel

Les blocs utilisés sont les suivants :

- **Varibale fe** : variable représentant la fréquence d'échantillonnage à 1.5MHz
- **Varibale fc** : variable représentant la fréquence porteuse à 99.5MHz
- **File Source** : fichier enregistré par l'USRP-2900
- **Throttle** : permet de limiter la sortie des données à la fréquence d'échantillonnage choisie afin de limiter l'utilisation du CPU
- **QT GUI Frequency Sink** : affiche l'analyse fréquentielle du signal d'entrée. Nous définissons une fréquence centrale à 99.5MHz et un bande à 1.5MHz (qui correspond à F_e)

Ce premier traitement nous permet d'obtenir l'analyse fréquentielle suivante

:



Figure 6: Analyse fréquentielle du signal d'entrée

On distingue sur la figure 6 deux fréquences se rapprochant des canaux de stations proches de Toulouse :

- **RFM Toulouse** à la fréquence 99.1MHz
- **Skyrock** à la fréquence 100MHz

La SNR (Signal-to-Noise Ratio) permet d'indiquer la qualité du signal. Le signal étant composé de bruits, nous devons nous assurer qu'il soit tout de même possible de le démoduler. Plusieurs méthodes permettent de calculer le SNR, nous avons choisi une méthode simple qui consiste à faire la différence des puissances entre la base et le sommet d'une des deux fréquences.

Nous obtenons :

$$SNR = 89 - 48.86 = 40.14dB$$

Il existe aussi plusieurs méthodes pour calculer la bande passante d'un canal. Nous avons choisi de la mesurer à partir de la base et nous obtenons une bande à 230MHz.

3.2 Chaîne d'extraction avec transposition en fréquence et filtre passe-bas

Nous avons pu observer dans la partie précédente que le signal enregistré était composé de deux canaux appartenant chacune à une station proche de Toulouse. Le but de cette partie est de sélectionner un des deux canaux en passant par la transposition en fréquence et le filtrage passe-bas.

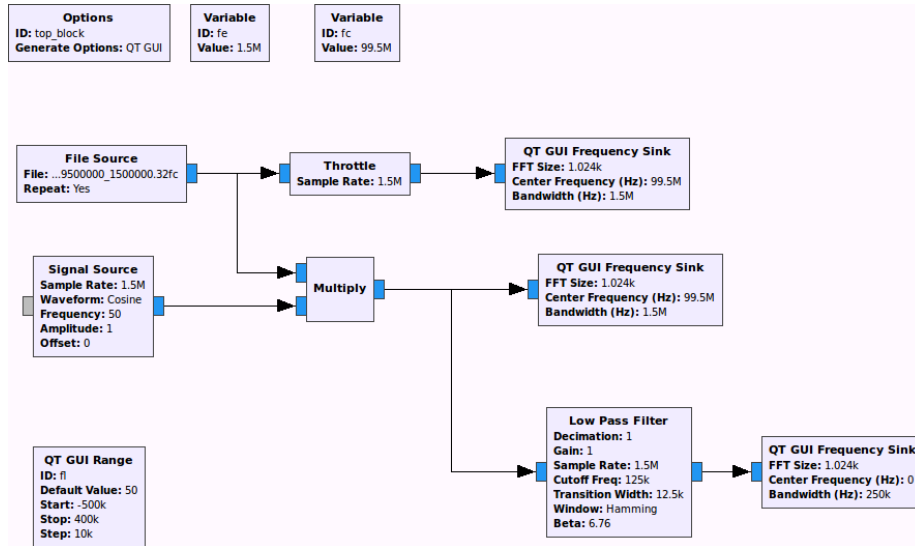


Figure 7: Chaîne de traitement de la transposition en fréquence et du filtrage passe-bas

La figure 7 représente la nouvelle chaîne de traitement implémentant la transposition en fréquence et le filtrage passe-bas. Nous nous retrouvons avec les blocs suivants :

- **QT GUI Range** : permet d'associer à une variable **f1** une plage de fréquences. Cela va nous permettre de faire varier la fréquence centrale entre deux fréquences à un certain pas.
- **Signal source** : génère un signal sinusoïdal auquel nous définissons la fréquence d'échantillonnage 1.5MHz et la fréquence à **f1**. Ce signal sera utilisé pour effectuer la transposition en fréquence.
- **Multiply** : multiplie deux signaux en entrée et retourne le résultat en sortie. Ce bloc permet ainsi de transposer le signal du fichier source par un autre signal.
- **Low Pass Filter** : applique un filtre passe-bas sur le signal d'entrée. Nous définissons la fréquence d'échantillonnage à 1.5MHz, la fréquence de coupure à 125kHz et la largeur de transition à 10% de la fréquence de coupure (soit 10kHz)

La fréquence centrale du signal dans le fichier d'enregistrement étant de 99.5MHz, et les deux canaux ayant leur fréquence centrale à 99.1MHz et 100MHz, nous devons faire varier la fréquence centrale de -500kHz pour atteindre le canal de droite, et de +400kHz pour atteindre le canal de gauche. La transposition en fréquence s'effectuera alors dans cette plage de fréquences.

Une fois le signal transposé, il est centré à la fréquence centrale du fichier. Afin de ne garder uniquement que la partie du signal correspondant au canal que l'on souhaite avoir, il faut appliquer un filtre passe-bas. Il faut noter que le paramètre de décimation correspond au nombre d'échantillons que l'on souhaite garder parmi tous les échantillons. Ainsi, une décimation de 6 revient à ne garder qu'un échantillon sur 6. La fréquence F_e est alors divisé par cette décimation.

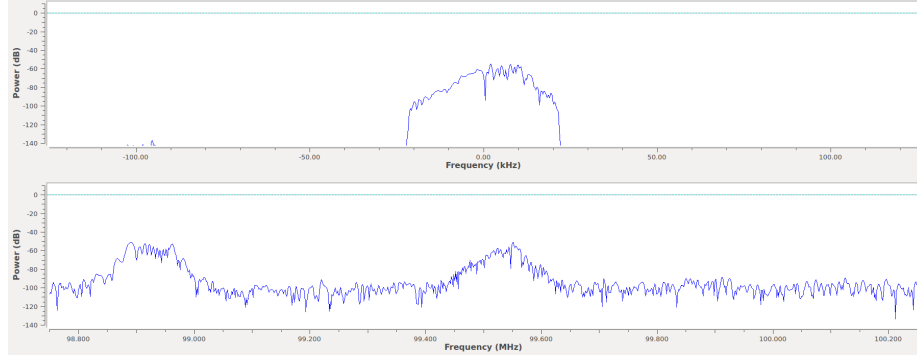


Figure 8: Centrage et filtrage du signal

La figure 8 représente, sur le spectre du bas, le signal transposée pour récupérer le signal de droite, et sur le spectre du haut, le signal filtré pour ne garder que le canal voulu.

3.3 Démodulation en fréquence et acquisition

Afin de restaurer le contenu de chaque station de radio à l'aide d'une carte son, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de la méthode de modulation utilisée. Le signal transmis est composé de deux canaux stéréophoniques notés $g(t)$ et $d(t)$ et sont centrés en fréquence avec une fréquence maximale de 15kHz. Afin de s'assurer de la compatibilité de ce signal avec les récepteurs monophoniques, ces deux canaux sont multiplexés de la forme suivante :

$$m(t) = g(t) + d(t) + A_{sp} \cos(2\pi f_{sp} t) + [g(t) - d(t)] \cos(2\pi 2f_{sp} t)$$

avec $f_{sp} = 19kHz$ et $A_{sp} = 2$. La figure 9 représente le signal composé avant la modulation en fréquence.

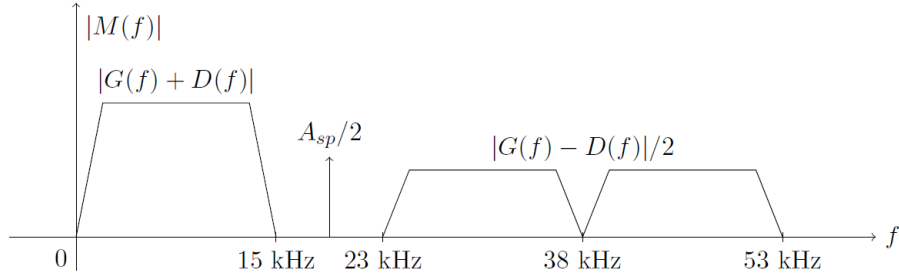


Figure 9: Centrage et filtrage du signal

Le signal composé $m(t)$ est alors modulé en fréquence et le signal centré en f_0 à la sortie de l'émetteur est noté :

$$s_{RF}(t) = A \cos(2\pi f_0 t) + \frac{\Delta f}{\max|m(t)|} \int_{-\infty}^t m(u).du$$

avec Δf la fréquence maximale d'excursion fixée à 75kHz. Le signal ainsi modulé en fréquence occupe une bande infinie mais qui décroît rapidement et peut être approchée par la règle de Carson :

$$B_{FM} \approx 2(\Delta f + f_m)$$

avec f_m la fréquence maximale de signal composé $m(t)$ qui est de 53kHz. En appliquant la règle de Carson, on obtient $B_{FM} = 256\text{kHz}$, ce qui est assez proche de la largeur de bande que nous avons approximée à 230kHz.

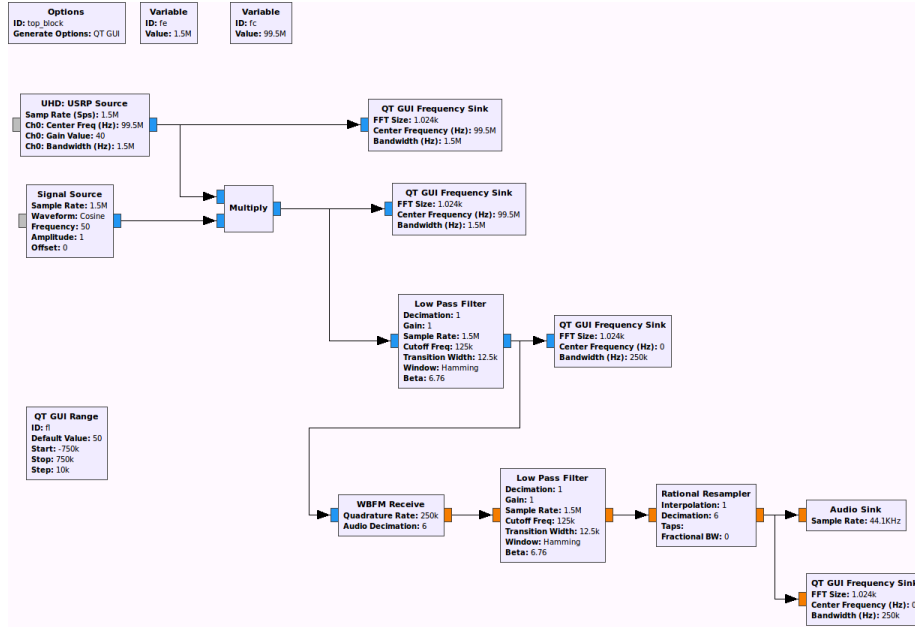


Figure 10: Chaîne de traitement pour la démodulation de fréquence

Nous implémentons la chaîne de traitement pour la démodulation de fréquence représentée par la figure 10. Nous avons les blocs suivants :

- **WBFM Receive** : permet de démoduler le signal
- **Low Pass Filter** : pour ne garder que la partie mono du signal
- **Rational Resampler** : permet d'adapter la fréquence d'échantillonnage entre le filtre passe-bas et le bloc **Audio Sink**
- **Audio Sink** : permet de jouer un son à partir d'un signal en entrée

Grâce à cette chaîne de traitement, nous avons pu démoduler le signal que nous avons centré sur la fréquence centrale de chaque station et nous avons pu écouter leur contenu.

4 Réception de messages VOLMET

La troisième partie du TP consiste en la réception de messages VOLMET, ce dernier étant un service se situant dans la bande de fréquences allant de 11.175MHz et 11.4MHz. Les signaux transmis sont modulés en bande latéral unique. Pour cette partie du TP, un fichier contient un enregistrement pris par l'USRP-2900 à Toulouse en 2015 avec une fréquence centrale $f_0 = 11.2965\text{MHz}$

et une fréquence d'échantillonnage $F_e = 250\text{kHz}$. Seule une station a été enregistrée. L'objectif est alors de pouvoir lire le contenu de ce fichier.

La transmission de messages VOLMET utilise une modulation en bande latéral unique. Ces messages sont filtrés par un filtre passe-bas afin d'occuper une bande supérieure et une bande inférieure comme présenté à sur la figure 11

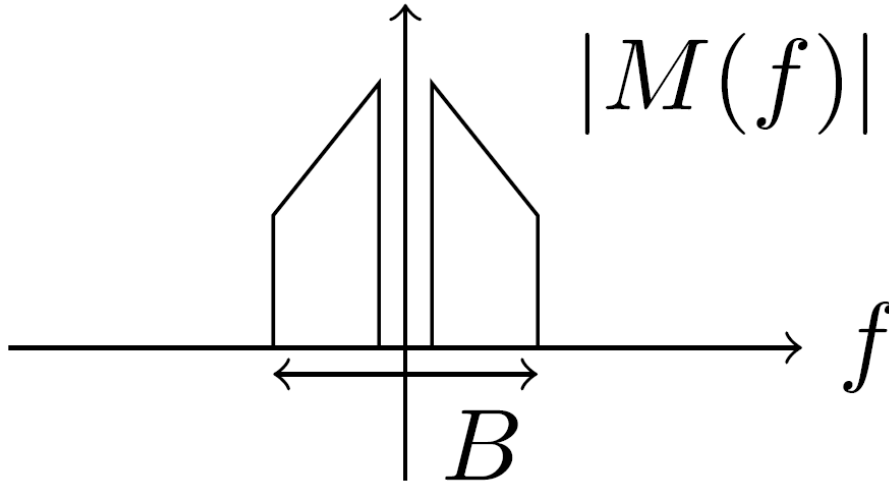


Figure 11: Représentation spectrale de l'amplitude du signal à transmettre

Le problème est que nous ne savons pas si le signal à transmettre était en bande inférieure ou en bande supérieure. En affichant sa représentation spectrale (voir figure 12, on observe que le signal se situe sur le côté droit de la fréquence nulle. On en déduit donc que l'on se trouve en bande supérieure.

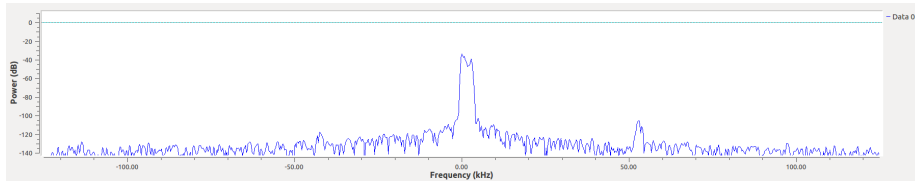


Figure 12: Analyse fréquentielle du signal à transmettre

5 Conclusion

Ces travaux pratiques nous ont permis de voir les concepts de la radio logicielle, en comprenant tout d'abord par la théorie que les signaux ne sont pas altérés entre un émetteur et un récepteur USRP. Nous avons pu implémenter des chaîne

de traitement de manière logicielle en vue de pouvoir traiter les signaux enregistrés par un USRP-2900 et de pouvoir lire le contenu. Nous avons pu voir qu'un seul récepteur était capable d'enregistrer des messages VOLMET ainsi que des signaux radios FM et que ces enregistrements ont pu être restaurés de manière logicielle, par des étapes de transposition du signal et de filtrage.