

## Rapport

# Introduction to Software-Defined Radio: Analog demodulation of signals using GNURadio

31 décembre 2019

---

### Students :

Emmanuel FERRANDI ferrandi@etud.insa-toulouse.fr  
Théo Zanchi zanchi@etud.insa-toulouse.fr

### Mentors :

Gaël Loubet

## Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1 Transmission data over frequency</b>	<b>2</b>
1.1 In-phase/Quadrature demodulation . . . . .	2
1.1.1 Question 1 . . . . .	2
1.1.2 Question 2 . . . . .	3
1.1.3 Question 3 . . . . .	4
1.1.4 Question 4 . . . . .	5
1.1.5 Question 5 . . . . .	5
1.1.6 Question 6 . . . . .	6
<b>2 FM broadcasting demodulation</b>	<b>6</b>
2.1 Frequency analysis of the recording . . . . .	6
2.1.1 Question 7 . . . . .	6
2.1.2 Question 8 . . . . .	8
2.1.3 Question 9 . . . . .	8
2.1.4 Question 10 . . . . .	8
2.1.5 Question 11 . . . . .	9
2.2 Channel extraction by frequency transposition and low-pass filtering . . . . .	9
2.2.1 Question 12 . . . . .	9
2.2.2 Question 13 . . . . .	9
2.2.3 Question 14 . . . . .	10
2.3 Frequency demodulation and restitution . . . . .	11
2.3.1 Question 15 . . . . .	12
2.3.2 Question 16 . . . . .	13
2.4 Ecoute de la radio sur une carte son . . . . .	13
2.5 Real time implementation with an USRP receiver . . . . .	15
<b>3 VOLMET AM broadcasting treating</b>	<b>16</b>
3.1 Analyse fréquentielle de l'enregistrement . . . . .	16
3.1.1 Question 19 . . . . .	16
3.2 Transposition fréquentielle . . . . .	17
3.2.1 Question 20 . . . . .	17
3.3 Démodulation d'amplitude bande latérale unique . . . . .	17
3.3.1 Question 21 . . . . .	17
3.3.2 Question 22 . . . . .	18
3.3.3 Question 23 . . . . .	18
3.3.4 Question 24 . . . . .	19
3.3.5 Question 25 . . . . .	20
<b>Conclusion</b>	<b>20</b>

# Introduction

Durant trois séances de travaux pratiques, nous avons pu aborder différents aspects de la modulation et démodulation radio. Ce rapport est un compte-rendu étape par étape du travail que nous avons réalisé durant ces trois séances de TP en binôme. Il est divisé en trois parties, la première étant une approche mathématique de la démodulation fréquentielle d'un signal, la deuxième est une approche logicielle (avec gnu radio) de la démodulation fréquentielle d'un signal et finalement la dernière est une approche logicielle (avec gnu radio) de la démodulation d'amplitude d'un signal en temps réel.

## 1 Transmission data over frequency

### 1.1 In-phase/Quadrature demodulation

Durant toutes cette section, nous allons utiliser plusieurs noms de variables. Vous pourrez trouver dans l'annexe les correspondances.

Le contenu de la première partie de ce rapport est purement mathématique. Elle a pour but de nous montrer d'un point de vue mathématique, comment à l'aide de l'expression d'un signal reçu et quelques formules mathématiques nous pouvons retrouver le signal émit. On cherche à démontrer qu'il est possible d'utiliser un USRP (Universal Software Radio Peripheral) pour récupérer n'importe quel type de signal (dans la plage de fonctionnement de l'appareil) et pouvoir le traiter dans les parties suivantes.

#### 1.1.1 Question 1

Voici le chemin de ce que fait un USRP pour récupérer un signal :

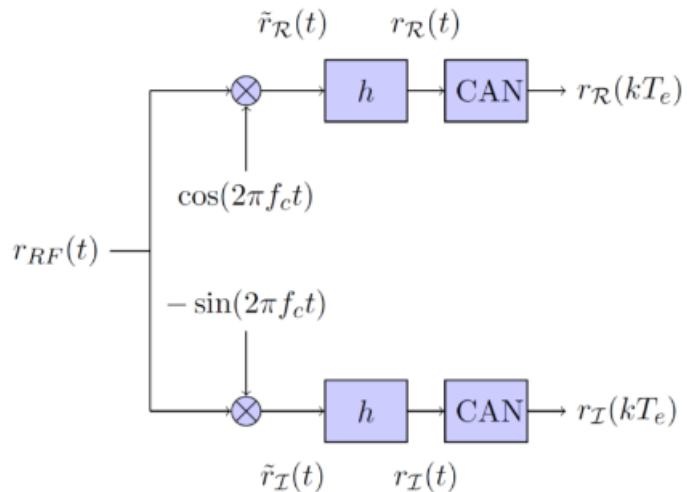


FIGURE 1 – Diagramme en bloc pour modéliser un USRP

On va donc commencer par isoler la partie réel et imaginaire du signal reçu pour faciliter les calculs après.

$$\tilde{r}_R(t) = [S_R(t) * \cos(2\pi f_0 t) - S_I(t) * \sin(2\pi f_0 t)] * \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

En utilisant les formules de trigonométrie

$$= \frac{S_r(t)}{2} * [\cos 2\pi t(f_0 - f_c) + \cos 2\pi t(f_c + f_0)] - \frac{S_I(t)}{2} * [\sin 2\pi t(f_0 + f_c) + \sin 2\pi t(f_0 - f_c)] \quad (2)$$

$$\tilde{r}_I(t) = [S_R(t) * \cos(2\pi f_0 t) - S_I(t) * \sin(2\pi f_0 t)] * \sin(2\pi f_0 t) \quad (3)$$

En utilisant les formules de trigonométrie

$$= \frac{-S_r(t)}{2} * [\sin 2\pi t(f_0 + f_c) - \sin 2\pi t(f_0 - f_c)] + \frac{S_I(t)}{2} * [\sin 2\pi t(f_0 - f_c) + \cos 2\pi t(f_0 + f_c)] \quad (4)$$

### 1.1.2 Question 2

On passe ensuite à l'étape filtrage du signal qui correspond au bloc h de la figure 1. Cette étape permet de garder la partie de notre signal qui nous intéresse. Pour savoir ce que l'on doit garder, on utilise la transformation de Fourier (passage du signal de temporel à fréquentiel). Ainsi, on va pouvoir représenter le signal sur un graphique (par exemple) et isoler la partie nécessaire du signal.

Si  $f_c = f_0$

$$\tilde{r}_R(t) = \frac{S_r(t)}{2} * [\cos 0 + \cos 4\pi t f_c] - \frac{S_I(t)}{2} * [\sin 4\pi t f_c + \sin 0] \quad (5)$$

$$= \frac{S_r(t)}{2} * [1 + \cos 4\pi t f_c] - \frac{S_I(t)}{2} * [\sin 4\pi t f_c] \quad (6)$$

$$\tilde{r}_I(t) = \frac{-S_r(t)}{2} * [\sin 4\pi t f_0] + \frac{S_I(t)}{2} * [1 - \cos 4\pi t f_0] \quad (7)$$

On passe les deux derniers signaux sous forme fréquentielle grâce à la transformation de Fourier :

$$\tilde{R}_R(f) = \frac{S_r(f)}{2} * [\delta(f) + \frac{1}{2}(\delta(f + 2f_0) + \delta(f - 2f_0)) - \frac{S_I(f)}{4} * j[\delta(f + 2f_0) - \delta(f - 2f_0)] \quad (8)$$

En développant

$$= \frac{S_r(f)}{2}\delta(f) + \frac{S_I(f)}{4}[\delta(f + 2f_0) + \delta(f - 2f_0)] - \frac{S_I(f)}{4}j[\delta(f + 2f_0) - \delta(f - 2f_0)] \quad (9)$$

Or  $\delta(f_0) + S(f) = S(f_0)$ , on obtient

$$= \frac{1}{4}[2S_R(f) + S_R(f + 2f_0) + S_R(f - 2f_0) + jS_I(f - 2f_0) - jS_I(f + f_0)] \quad (10)$$

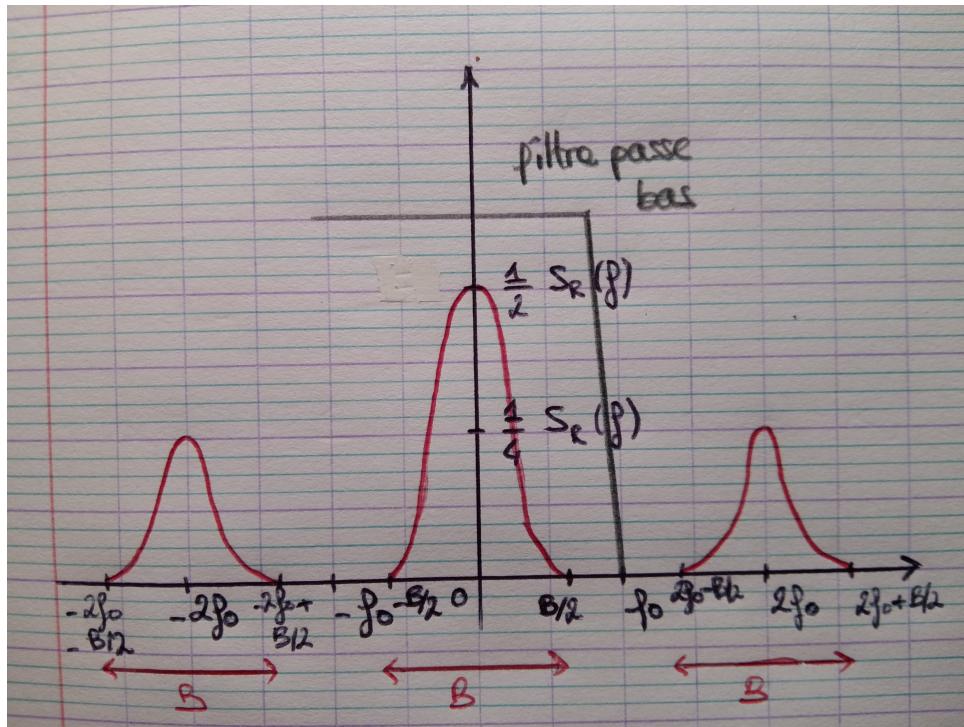


FIGURE 2 – Représentation du spectre fréquentiel

### 1.1.3 Question 3

Pour filtrer notre signal, nous devons utiliser un filtre passe bas. Ce filtre doit avoir une fréquence de coupure telle que :  $\frac{B}{2} < f_c < 2f_0 - \frac{B}{2}$  pour s'assurer que nous filtrerons notre signal dans son intégralité sans être parasité par les autres signaux.

Si l'on suppose que le signal est un signal wide-band, on suppose que :  $\frac{B}{2} > f_0$ . On obtient donc une représentation spectrale comme celle de la figure suivante :

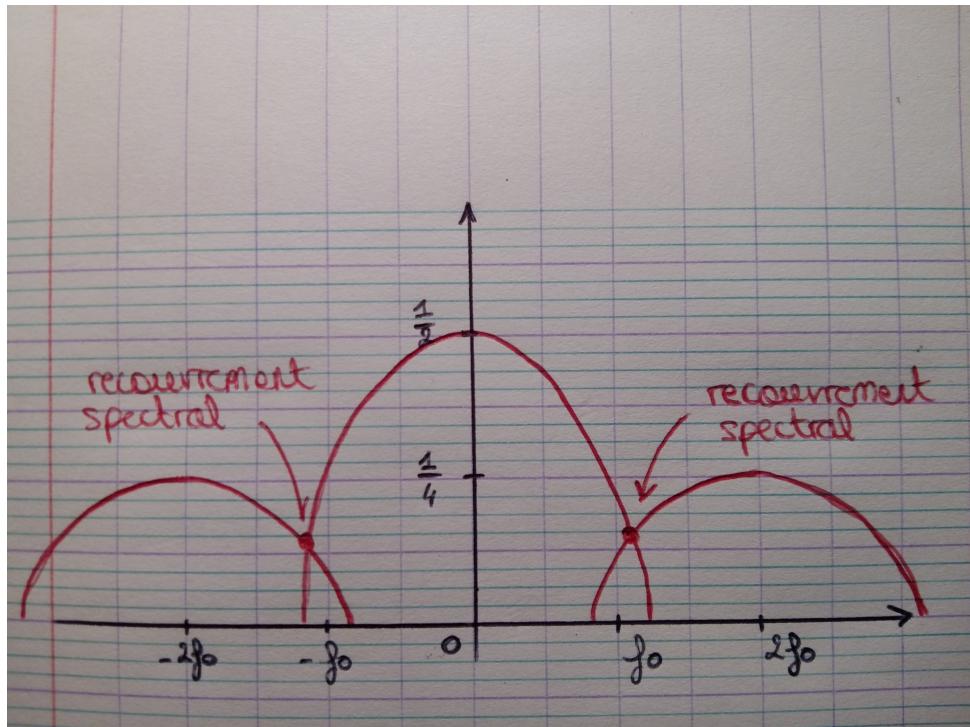


FIGURE 3 – Phénomène de recouvrement spectral

On remarque donc un phénomène de repliement spectral. Il n'est donc pas possible de filtrer le signal comme vu dans les questions précédentes sans perdre des parties du signal.

#### 1.1.4 Question 4

Une fois le signal isoler et récupérer, on le passe sous forme numérique en utilisant un CAN (Convertisseur Analogique Numérique). Néanmoins un théorème doit être respecté pour cette étape, le théorème de Shannon :  $f_e > 2f_{max}$ .

Pour respecter ce théorème et que la conversion analogique numérique se fasse sans perte,  $T_e < \frac{1}{B}$  où  $B$  est la largeur de bande du signal démodulé.

*Démonstration :*

$$f_e > 2f_{max} \quad (11)$$

$$> \frac{2B}{2} \quad (12)$$

$$> B \quad (13)$$

$$T_e < \frac{1}{B} \quad (14)$$

#### 1.1.5 Question 5

Il est possible d'intervenir l'étage des transpositions de fréquences et celui de la conversion analogique / numérique. Cependant pour respecter le théorème de Shannon, il est nécessaire d'avoir un ADC avec une très haute fréquence ce qui est très cher et énergivore. Il est donc impossible d'implémenter ce type de procédé dans un dispositif sur batterie ou peu cher. Si on prend le système LoRa avec une fréquence de base à 860 MHz, il faut un ADC avec une fréquence de conversion de 2 GHz (trouvé à plus de 1000€)

### 1.1.6 Question 6

Prenons un signal à bande étroite, pour voir si nos différentes étapes sont fonctionnelles :

$$S_{RF}(t) = S_R(t) \cos 2\pi f_0 t - S_I(t) \sin 2\pi f_0 t \quad (15)$$

Transformée de Fourier :

$$= \frac{S_R(f)}{2} [\delta(f + f_0) + \delta(f - f_0)] - S_I(f) [\delta(f + f_0) - \delta(f - f_0)] \quad (16)$$

$$= \frac{1}{2} [S_R(f + f_0) + S_R(f - f_0)] - jS_I(f + f_0) - S_I(f - f_0) \quad (17)$$

On suppose que les fréquences  $f$  et  $f_0$  sont positives

$$S_a(f) = S_{RF}(f) + j[-j sgn(f).S_{RF}(f)] \quad (18)$$

$$= S_{RF}(f) + sgn(f).S_{RF}(f) \quad (19)$$

$$= S_R(f - f_0) + jS_I(f - f_0) \quad (20)$$

Passage en temporel

$$s_a(t) = [s_R(t) + j.S_I(t)].\exp j2\pi f_0 t \quad (21)$$

Dernière étape :

$$S(f) = S_a(f + f_0) = S_R(f) + jS_I(f)s(t) = s_R(t) + jS_I(t) \quad (22)$$

On retombe bien sur le même signal de réception. Nous avons donc bien prouvé qu'il est possible de filtrer et convertir le signal sans presque aucune perte de donnée grâce aux étapes expliquées précédemment.

e

## 2 FM broadcasting demodulation

L'objectif de cette partie est de démoduler un signal radio fréquentielle préalablement enregistré afin d'écouter ce qui est diffusé. Pour cela, nous avons utilisé un logiciel qui permet de réaliser du traitement de signal sous forme d'un flow réalisé avec des blocs et un mécanisme de drag and drop.

### 2.1 Frequency analysis of the recording

#### 2.1.1 Question 7

Dans un premier temps, nous avons réalisé le flow suivant :

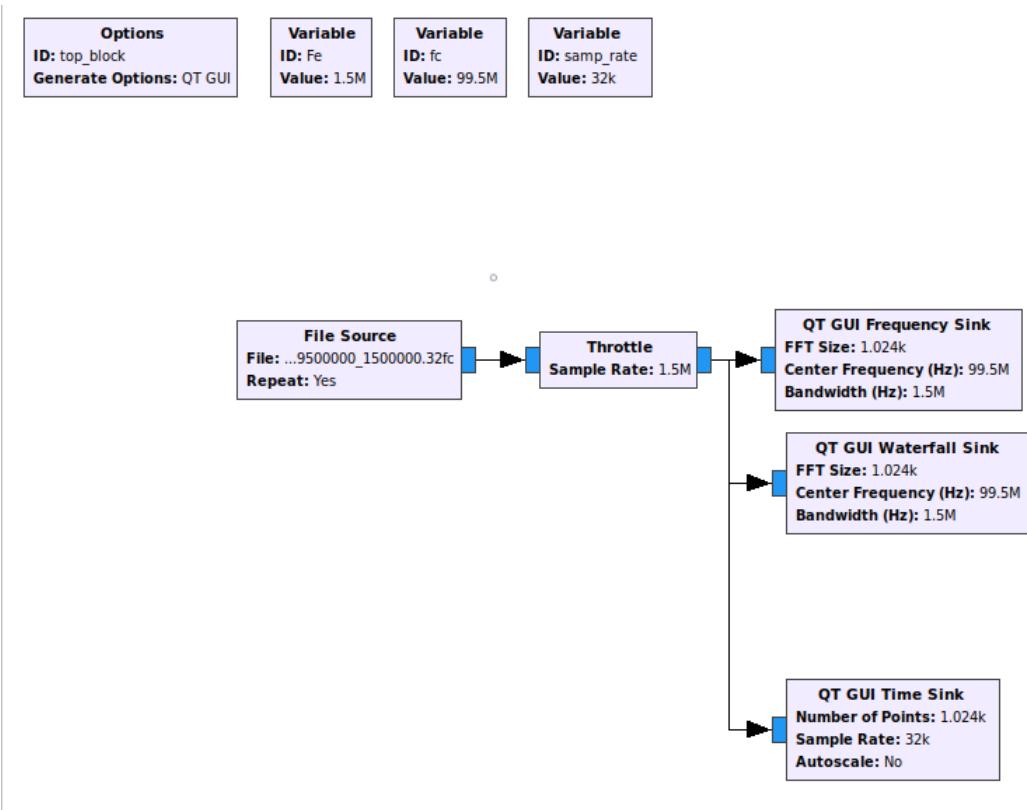


FIGURE 4 – Chaîne initiale de traitement

Cette chaîne est composé de plusieurs blocs :

- Variable : blocs qui permettent de stocker des valeurs.
- File source : bloc qui permet de charger le fichier qui correspond au signal enregistré.
- Throttle : bloc qui permet de définir une fréquence d'échantillonnage pour traiter le signal enregistré et que l'on a chargé dans gnuradio via le bloc File source.
- QT GUI : blocs qui permettent de rajouter des affichages représentant le signal d'entrée.

Sur la figure 4, nous avons ajouté principalement deux blocs d'affichages. Un affichage Frequency Sink qui permet d'avoir une représentation fréquentielle, un affichage Waterfall qui permet d'ajouter une composante temporelle.

On se retrouve avec les blocs précédent avec les graphiques ci-de :

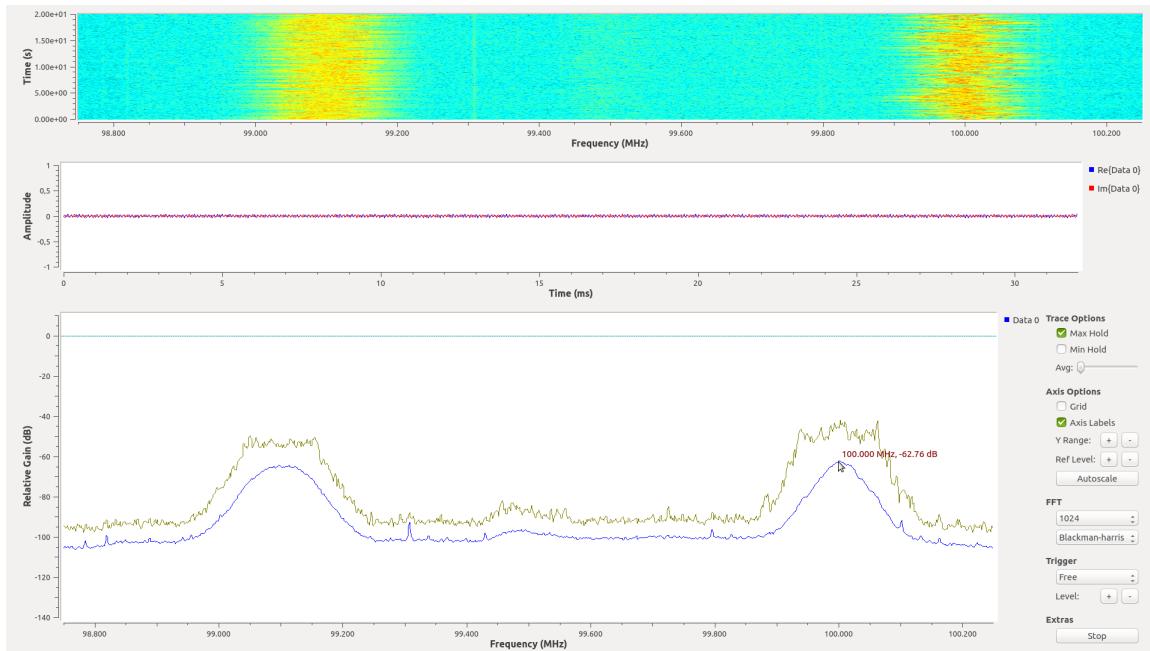


FIGURE 5 – Visualisation du signal FM

### 2.1.2 Question 8

Nous avons utiliser deux variables  $Fe = 1.5MHz$  (fréquence d'échantillonage) et  $fc = 99.5MHz$  (fréquence du milieu). Nous avons comme fichier source, plusieurs radio et selon les spécifications de la radio françaises, la ...

### 2.1.3 Question 9

On distingue bien l'apparition de deux radios l'une à  $100MHz$  qui correspond à Skyrock et l'autre à  $99.1MHz$  qui correspond à RFM Toulouse. Lorsque l'on regarde le site qui référence les différentes radios existantes en France, nous confirmons bien ces fréquences (Annuaire Radio). Néanmoins, une autre est visible mais beaucoup moins distincte à cause de sa faible amplitude qui correspond à Nostalgie Toulouse. Il sera possible d'écouter cette radio mais avec plus de bruit, en effet, lorsque l'on calcule son SNR (Signal Noise Ratio), on constate qu'il est  $4dB$ .

### 2.1.4 Question 10

Le rapport signal / bruit (SNR) est une mesure de la force du signal par rapport au bruit. Pour calculer le SNR, il suffit d'abord de soustraire le chiffre de bruit du signal principal. Pour démoduler un signal, le niveau de SNR nécessaire dépend du type de modulation, de la conception, de la démodulation et des exigences de précision du système. Mais, normalement, dans les systèmes FM pour éviter l'effet de seuil, le RSN devrait être supérieur à  $10$  dB. Dans ce cas, nous ne devrions pas avoir de problèmes pour démoduler le signal pour les stations RFM et Skyrock, mais pour Nostalgie le signal n'est pas assez fort. Nous avons également mesuré la bande passante pour les trois signaux. Pour RFM et Skyrock, nous avons mesuré les points d'intérêt : à la base du signal et également à  $-3$  dB (le demi-point de puissance) du haut du signal. Nous avons trouvé les rapport signal / bruit (SNR) suivants :

- Skyrock :  $42dB$
- RFM :  $42dB$
- Nostalgie :  $4dB$

### 2.1.5 Question 11

Sur la figure 5, on peut constater la bande de garde de  $100\text{kHz}$  qui correspond à l'intervalle entre les deux radios au niveau soit de la pente du signal ou à la moitié de la pente. Cela va dépendre de la plage de fréquence que l'on veut prendre et si l'on se permet de "tasser" les signaux. Au niveau de la largeur de bande, on se retrouve avec :

- Skyrock :  $200\text{kHz}$
- RFM :  $250\text{kHz}$
- Nostalgie :  $180\text{kHz}$

## 2.2 Channel extraction by frequency transposition and low-pass filtering

### 2.2.1 Question 12

On a donc un signal en bande de base que l'on va le multiplier par un cosinus afin de centrer le signal souhaité. Si l'on fait cette étape c'est pour permettre de garder le même filtre pour chaque radio et que cette étape est plus facile à réaliser à ce moment là qu'après. On va utiliser une nouvelle variable  $\text{Fl}$  qui va pouvoir être modifiée afin de sélectionner la bonne radio. Ainsi avec le décalage, on se retrouve avec les radios qui ont ces fréquences et voir 6 :

- Skyrock :  $-500\text{kHz}$
- RFM :  $400\text{kHz}$
- Nostalgie :  $0\text{kHz}$

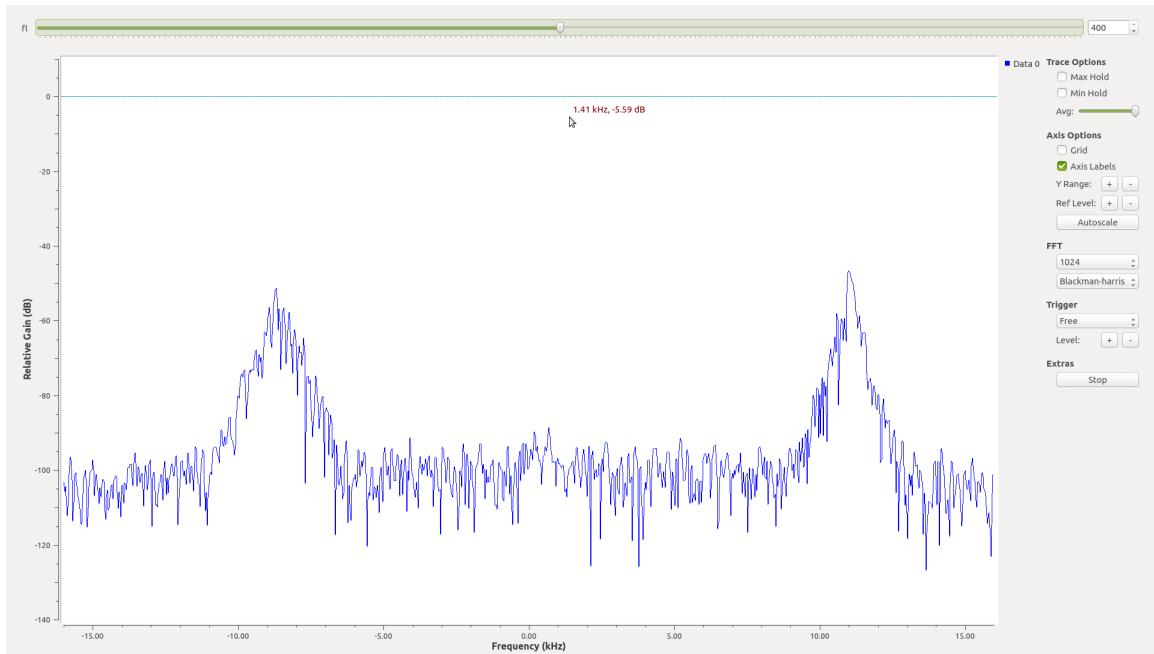


FIGURE 6 – Visualisation du signal FM centré

### 2.2.2 Question 13

En revanche, on fait apparaître une permutation circulaire des signaux, qui peut se révéler problématique lors de du changement de radio. On peut voir cette spécificité en utilisant le bloc QT GUI Waterfall Sink de GNU-radio, figure 7.

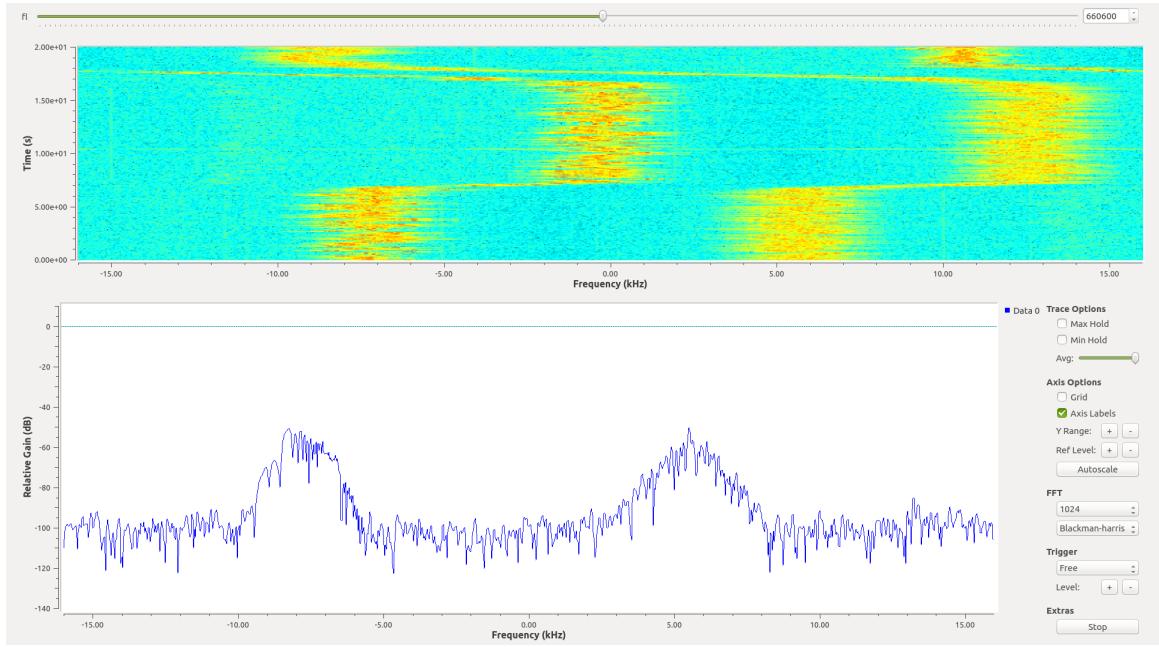


FIGURE 7 – Visualisation de l’effet de permutation circulaire

### 2.2.3 Question 14

Par la suite, nous allons paramétriser un filtre passe-bas afin d’atténuer le bruit hors bande. On se retrouve avec le schéma de la figure 8.

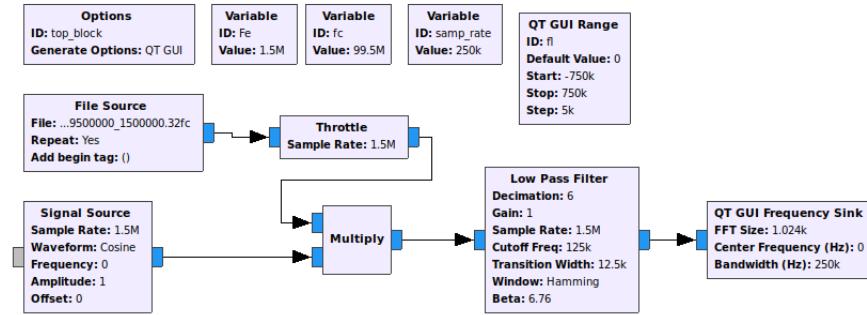


FIGURE 8 – FlowGraph pour décaler horizontallement la fréquence et sélectionner une fréquence

- Signal Source permet de générer un signal de différents types : cosinus, sinus, carré, triangulaire...
- QT GUI Range permet d’avoir une variable que l’on modifier au cours de la simulation. Elle va nous être utile pour choisir la radio.
- Multiply block permet de multiplier deux signaux entre eux.
- Low Pass Filter permet de simuler un filtre passe-bas en fréquentiel où l’on peut régler la pente du filtre mais aussi sa fréquence de coupure.

Nous avons considéré la bande passante du signal Skyrock (car elle est la plus grande) pour calculer la fréquence de coupure qui est la moitié de cette valeur. Pour la largeur de transition, nous avons considéré 10% de la fréquence de coupure. La bande de transition est une plage de fréquences qui permet une transition entre une bande passante et une bande d’arrêt d’un filtre de traitement

du signal. C'est pourquoi nous avons considéré une petite partie de la bande passante. Le spectre résultant de ce filtrage est représenté sur la figure 9 pour le canal RFM.

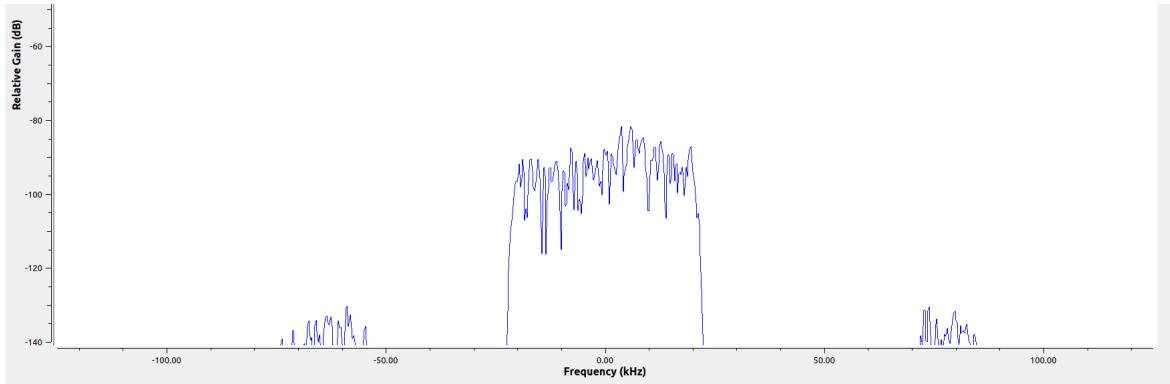


FIGURE 9 – Affichage du signal après atténuation du bruit hors bande avec decimation de 1

Afin d'alléger la charge de calcul, nous pouvons traiter une décimation avec un facteur 6. La décimation est le processus de réduction de la fréquence d'échantillonnage d'un signal. Faire une décimation avec un facteur 6 signifie que nous ne procédons à un entretien que tous les 6 échantillons. Nous avons recentré le signal et cela signifie qu'après le filtre avec décimation, le nouveau  $F_e$  est égal à  $F_e / 6$ .

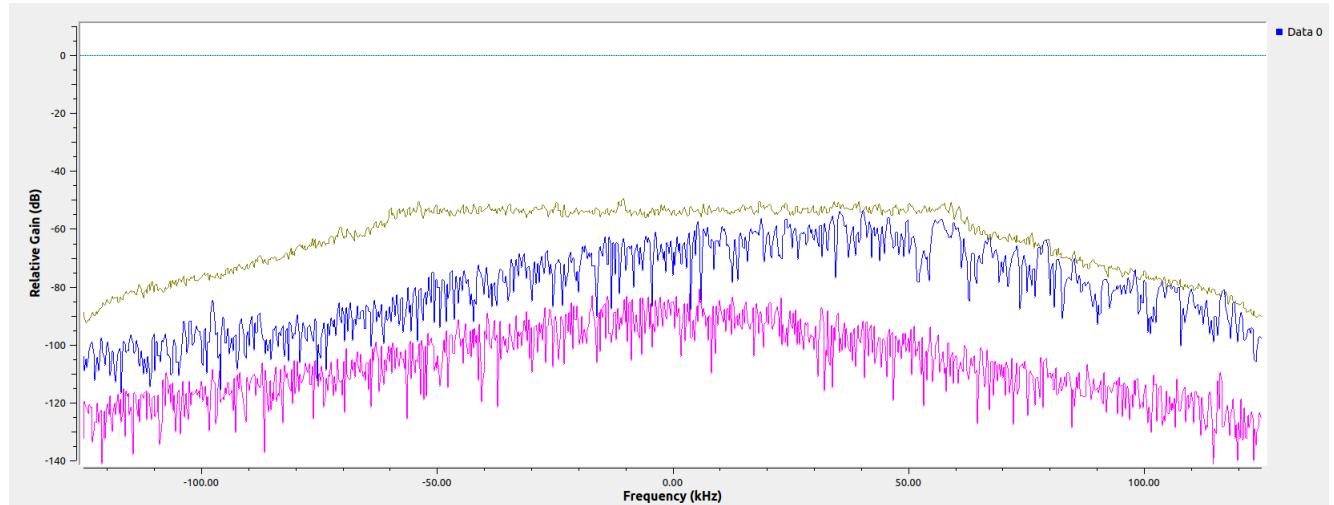


FIGURE 10 – Affichage du signal après atténuation du bruit hors bande avec decimation de 6

### 2.3 Frequency demodulation and restitution

Le son stéréophonique est une méthode de reproduction sonore qui crée une illusion de perspective audible multidirectionnelle. Ceci est généralement réalisé en utilisant deux ou plusieurs canaux audio indépendants. Dans notre cas, le signal est composé de deux canaux stéréophoniques, ils sont centrés en fréquence et ont une fréquence maximale de 15kHz (ou bande mono-latérale). Nous allons utiliser un récepteur monophonique pour acquérir les ondes radio et convertir les informations transportées par eux sous une forme utilisable à utiliser dans une carte son. Pour assurer la com-

patibilité entre les récepteurs monophoniques et stéréophoniques, ces deux canaux sont multiplexés pour former le message :

$$m(t) = g(t) + d(t) + A_{sp} \cos 2\pi f_{sp} t + [g(t) - d(t)] \cos 2\pi f_{sp} t \quad (23)$$

avec  $f_{sp} = 19\text{kHz}$  a fréquence porteuse pilote avec une amplitude d'Asp = 2.

$$(24)$$

Selon le spectre du signal présenté sur la figure 11 on note que le récepteur monophonique consiste à mettre en œuvre un filtre passe-bas à 15kHz. C'est exactement ce que nous allons faire pour implémenter notre récepteur monophonique dans cette section. En pratique, le signal composite peut comprendre des fréquences supérieures à 53 kHz. C'est notamment le cas pour le système de données radio (RDS) positionné autour de 57kHz, qui permet la transmission d'informations numériques relatives au programme (par exemple le nom de la station de radio, le titre et le nom de l'artiste de la musique jouée, etc.) . Ce service n'est pas pris en compte dans le reste du travail

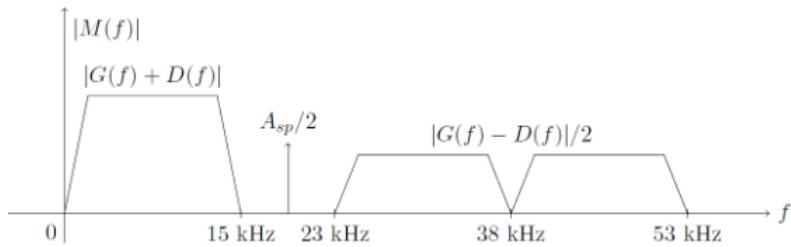


FIGURE 11 – Signal envoyé par une radio en stéréo avec RDS

### 2.3.1 Question 15

La règle de Carson est une méthode empirique (et approximative) permettant de déterminer facilement la largeur de bande effective de transmission BT d'un signal modulé en fréquence ou en phase. Tout signal modulé en fréquence aura un nombre infini de bandes latérales et donc une bande passante infinie mais, en pratique, toute l'énergie de bande latérale significative (98% ou plus de la puissance totale d'un signal FM) est concentrée dans la bande passante définie par la règle de Carson. Tous les autres côtés du spectre des fréquences ne contiennent que 2% de la puissance totale. Cette règle est une approximation utile et est couramment utilisée car la distorsion produite dans le signal de bande de base récupéré au niveau du récepteur est négligeable et la qualité du signal de récupération n'est pas gravement dégradée.

Règle de Carson :

$$B_{FM} = 2(\Delta f + f_m) \quad (25)$$

Où  $B_{FM}$  est une bande passante requise,  $\Delta f$  qui correspond à l'excursion de fréquence maximale de la modulation, dans notre cas  $\Delta f = 75\text{kHz}$ . Et  $f_m$  est la fréquence la plus haute de notre signal modulant,  $f_m = 53\text{kHz}$ .

On obtient donc :

$$B_{FM} = 2(\Delta f + f_m) = 2(75k + 53k) = 256\text{kHz} \quad (26)$$

### 2.3.2 Question 16

On cherche à montrer que :

$$S[k] = A(k)e^{j \cdot k f \cdot \sum_{i=0}^k m[i]} + b[k] \quad (27)$$

Soit :

$$S_{RF}(t) = S_R(t) \cos(2\pi f_0 t) - S_I(t) \sin(2\pi f_0 t) \quad (28)$$

$$= A \cos(2\pi f_0 t + \frac{\Delta f}{\max(\ln t)} \int_{-\infty}^t f(x), dv) \quad (29)$$

$$= A \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)) \quad (30)$$

En utilisant les résultats de la question 6, on a :

$$S(t) = S_R(t) + jS_I(t) \quad (31)$$

$$= A(t) \cos(\varphi(t)) + jA(t) \sin(\varphi(t)) \quad (32)$$

$$= A(t) \cdot e^{j\varphi(t)} \quad (33)$$

Si l'on discrétise ce résultat, on obtient :

$$S[k] = A[\frac{k}{F_e}]e^{j \cdot k f \cdot \sum_{i=0}^k m[i]} + b[k] \quad (34)$$

### 2.4 Ecoute de la radio sur une carte son

Grâce aux précédentes questions, on peut désormais faire les dernières étapes pour pouvoir écouter la radio FM sur une carte son. Pour réaliser cette étape, nous allons avoir besoin de ces blocs dans GNU-Radio :

- WBFM (WideBand Frequency Modulation) Receive démodule le signal d'entrée en fréquence à large bande
- Low Pass Filter le même bloc que le précédent utilisé
- Rational Resampler permet d'adapter la fréquence du signal à la fréquence de lecture de la carte son.
- Audio sink permet d'utiliser la carte son de l'ordinateur avec le logiciel. Il est important de régler

On obtient donc la figure 12.

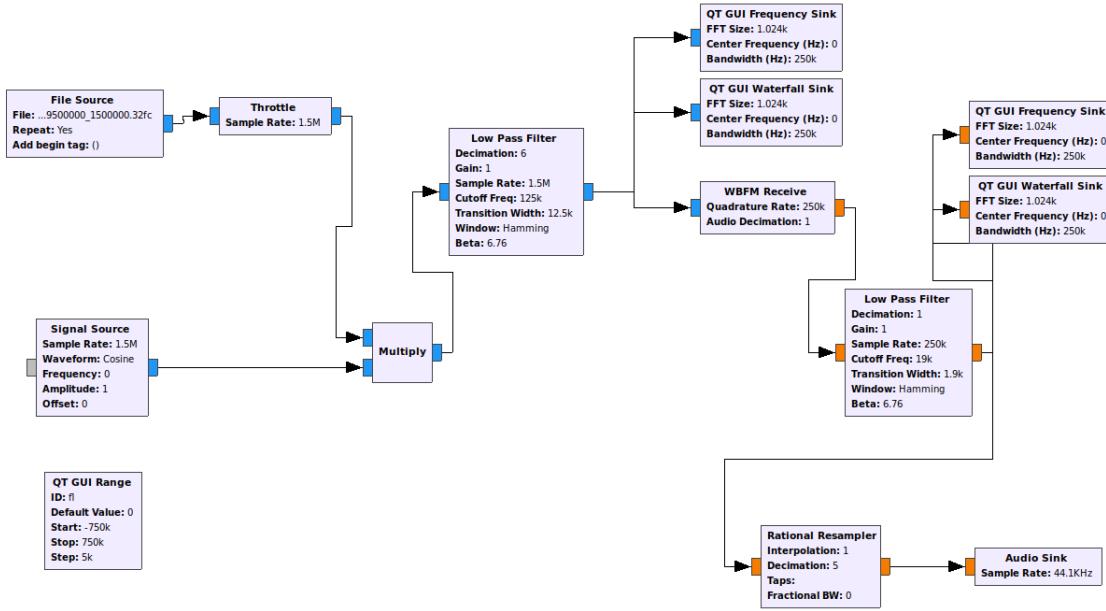


FIGURE 12 – Schéma GNU Radio pour l’écoute de radio

Ainsi, on démodule bien le signal en baissant le sample rate à  $250\text{kHz}$  afin de réduire le nombre de point à traiter pour la carte son, plus de points au niveau des courbes n’auraient pas été pertinents. On applique ensuite le filtre passa-bas pour isoler les fréquences en dessous de  $19\text{kHz}$  comme vu à la section 2.2.3. Ensuite, on adapte la fréquence du signal audio à celui de la carte son. Dans notre cas, nous avons fait ce calcul car notre carte son était de  $44.1\text{kHz}$  :

$$Decimation = \frac{250000}{44100} = 6 \quad (35)$$

On se retrouve avec ces signaux :

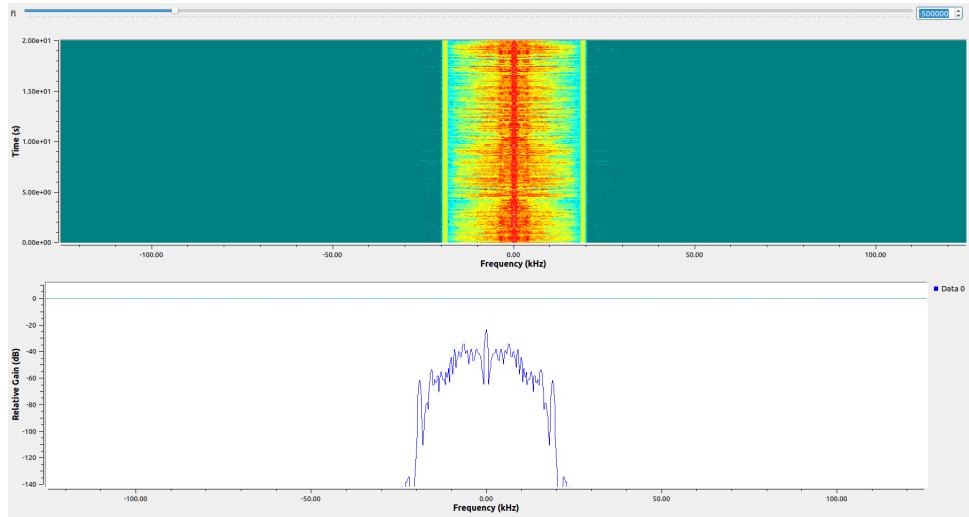


FIGURE 13 – Signal de Skyrock après démodulation et filtrage

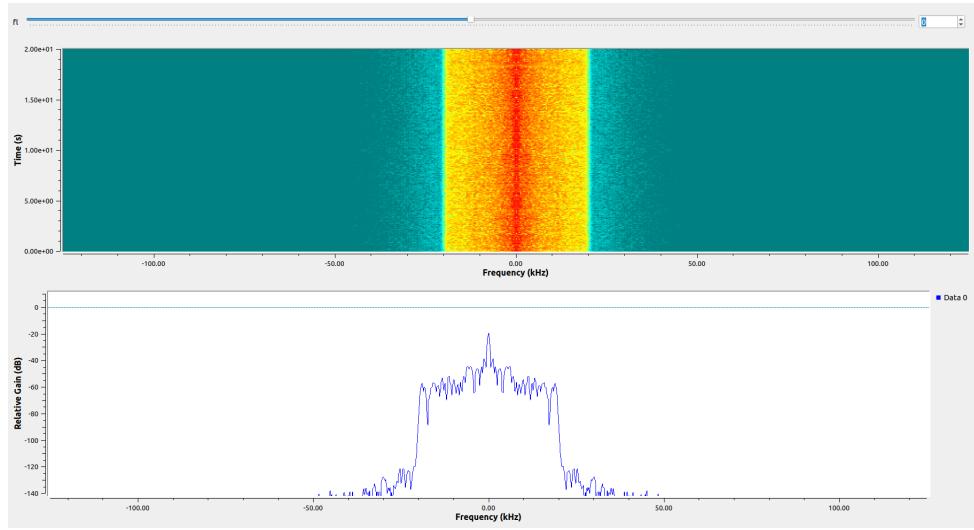


FIGURE 14 – Signal de Nostalgie après démodulation et filtrage

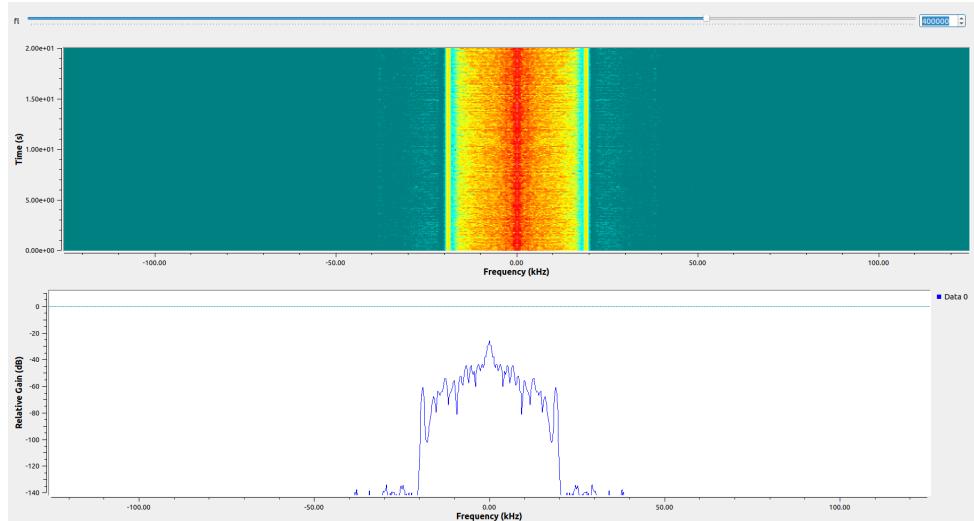


FIGURE 15 – Signal de RFM après démodulation et filtrage

On distingue bien la différence de qualité au niveau des différents signaux en regardant le schéma Waterfall (celui du dessus). En effet, on a plus de bruit résiduel sur cette radio dégradant nettement la qualité du signal. On avait déjà détecté au début du processus un SNR faible.

On peut ainsi en déduire que sur Skyrock un auditeur a l'immense honneur de gagner un album de Sam Smith et 50€ alors qu'ils étaient deux mais aussi d'écouter la musique (trop écouter) de ... (dont je ne me rappelle plus le nom...) sur RFM et la musique de Village People de YMCA (et non Why aime scier) sur Nostalgie.

## 2.5 Real time implementation with an USRP receiver

Dans cette partie, nous avons réalisé le flow de traitement de signal suivant :

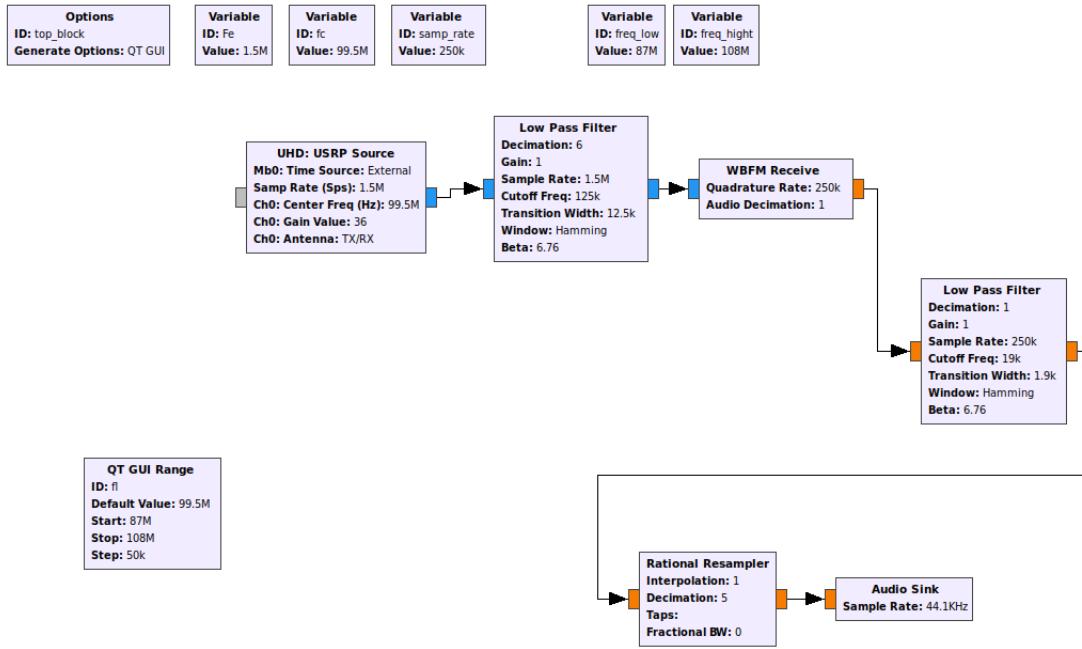


FIGURE 16 – Démodulation avec l’USRP

Nous avons réalisé plus ou moins le même schéma que pour la démodulation du fichier source vu précédemment mais nous avons ajouté un bloc USRP source et supprimé le bloc de multiplication car le signal est déjà centré en sortie de l’USRP. De cette manière, nous avons été capable d’écouter la radio démodulée directement en sortie de l’USRP et en temps réel.

### 3 VOLMET AM broadcasting treating

Cette partie nous a permis de manipuler un message haute fréquence (3 à 30 MHz) VOLMET (vol météo). Ce type de message est transmis via un signal à bande latérale unique modulé en amplitude. L’objectif de cette partie est donc de démoduler ce signal à l’aide de gnu-companion. Pour cela, nous avons utilisé un fichier contenant un signal VOLMET enregistré.

#### 3.1 Analyse fréquentielle de l’enregistrement

##### 3.1.1 Question 19

Une modulation à bande latérale unique est un type de modulation d’amplitude où l’on ne retrouve qu’une seule bande latérale. Ce choix de supprimer une des deux bandes latérales et la porteuse permet d’économiser environ 75% de l’énergie à la transmission. En effet, la porteuse consomme 50% de l’énergie à la transmission et les bandes latérales 25% chacune. Nous avons donc observé le signal à l’aide d’un bloc QT GUI Frequency Sink et voici le résultat que nous avons obtenu :

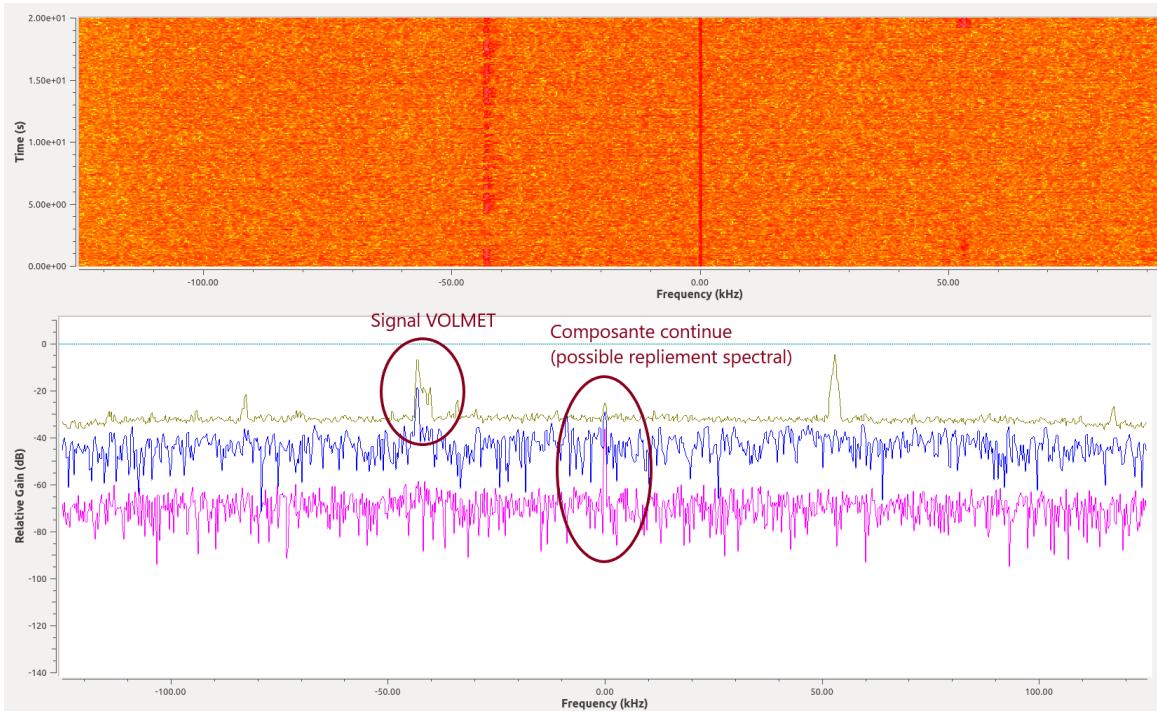


FIGURE 17 – Signal VOLMET

### 3.2 Transposition fréquentielle

#### 3.2.1 Question 20

Pour centrer notre signal, il nous faut un offset de 43.5kHz. Une fois cet offset pris en compte et le signal centré, nous obtenons résultat suivant :

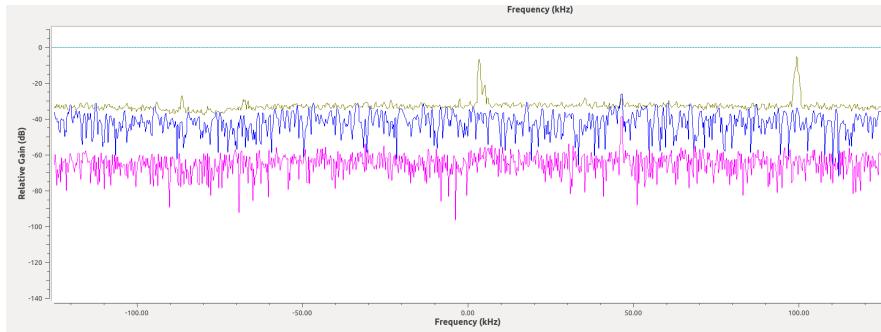


FIGURE 18 – Signal VOLMET avec offset

### 3.3 Démodulation d'amplitude bande latérale unique

#### 3.3.1 Question 21

$$S_{RF}(t) = R\{s(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t}\} = R\{m(t) \text{signe}(j) \text{Im}\{m(t)\} e^{j2\pi f_0 t}\} \quad (36)$$

Hypothèse 1, la fonction signe donne '+' :

$$S_a(f) = S_{RF}(f) + j \text{IM}\{S_{RF}(f)\} \quad (37)$$

$$= S_{RF}(f) + j[-j.signe(f).S_{RF}(f)] \quad (38)$$

$$= S_{RF}(f) + signe(f).S_{RF}(f) \quad (39)$$

Soit :

$$S_a(f) = n(f - f_0) + signe(f - f_0).n(f - f_0) \quad (40)$$

On a également :

$$S_{RF}(f) = \frac{1}{2}[S_a(f) + S_a * (f)] \quad (41)$$

Hypothèse 1, la fonction signe donne '+' :

$$S_{RF}(f) = \frac{1}{2}[n(f - f_0) + signe(f - f_0).n(f - f_0) + n(-f + f_0) + signe(-f - f_0).n(-f - f_0)] \quad (42)$$

Hypothèse 2, la fonction signe donne '-' :

$$S_{RF}(f) = \frac{1}{2}[n(f - f_0) + signe(f + f_0).n(f - f_0) + n(-f - f_0) + signe(-f + f_0).n(-f - f_0)] \quad (43)$$

Sur la figure suivante, l'hypothèse 1 représente les signaux à extérieur des bandes (ceux en rouge) et l'hypothèse 2 représente les signaux à intérieur des bandes (ceux en bleu) :

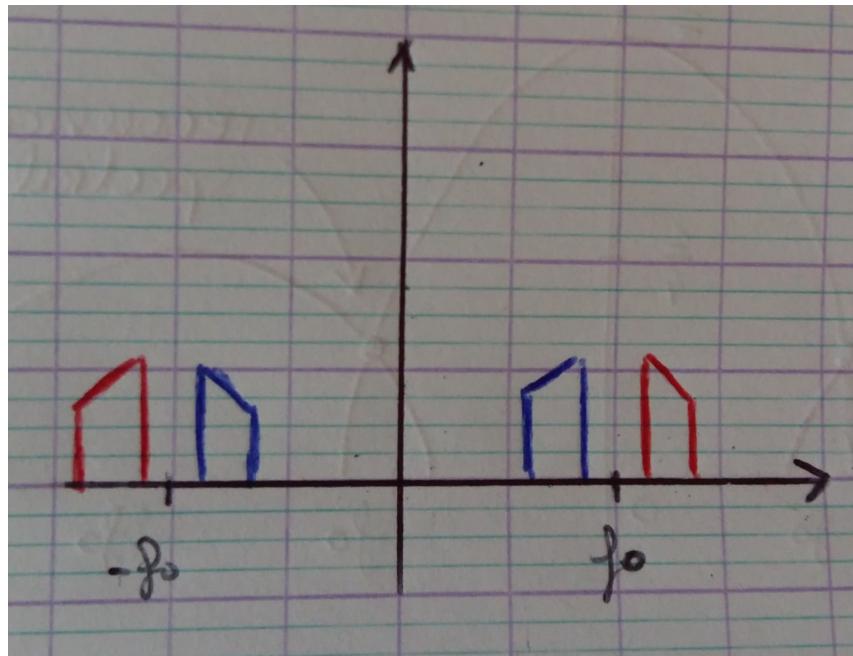


FIGURE 19 – Schématisation des deux hypothèses

### 3.3.2 Question 22

Comme on peut le remarquer en regardant la figure 18, nous avons conservé la bande latérale supérieure du signal (USB).

### 3.3.3 Question 23

En utilisant les spécifications données dans le sujet, nous avons pu réaliser un filtre passe bande complexe. La réponse de ce filtre est présentée sur la figure suivante :

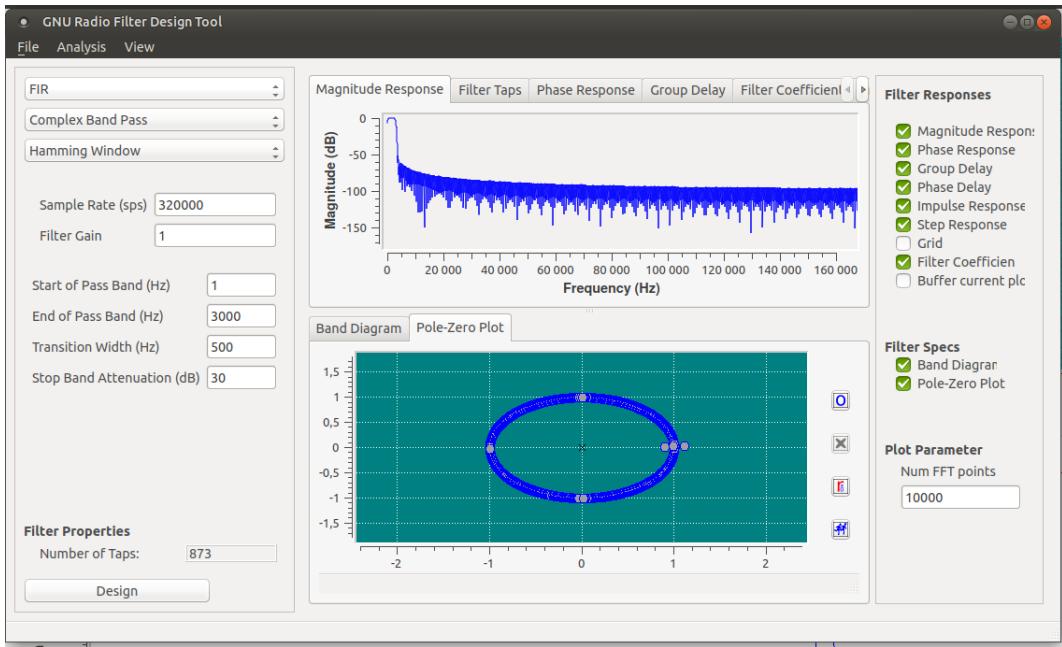


FIGURE 20 – Réponse du filtre passe bande

### 3.3.4 Question 24

Après avoir réalisé ce filtre, nous avons copié ses coefficients dans un FFT Filter Block. Le schéma final de notre flow de traitement de signal est présenté sur la figure suivante :

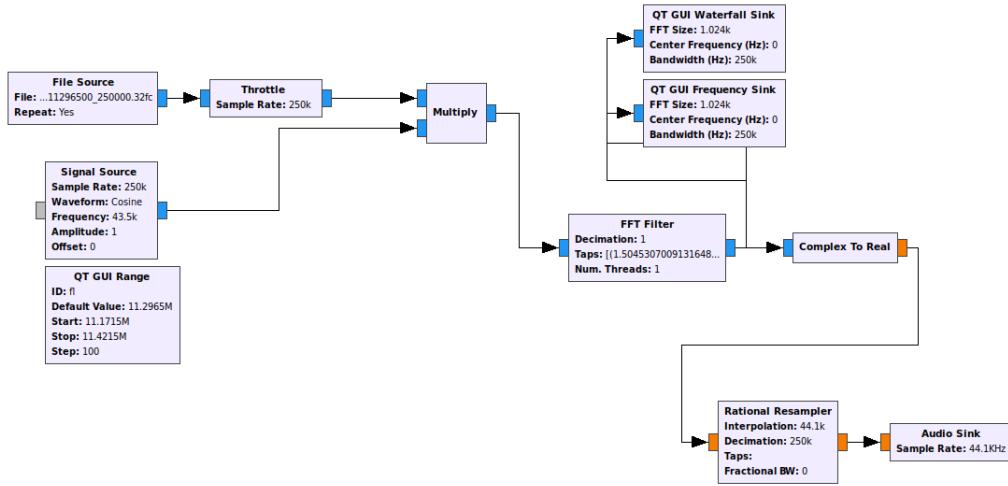


FIGURE 21 – Schéma GNU-Radio pour l'écoute d'un signal AM

### 3.3.5 Question 25

On peut remarquer que pour passer de l'équation (17) à l'équation (18) du sujet de TP, il suffit de supprimer la partie imaginaire de l'équation. Pour implémenter cette solution, on utilise le bloc complex to real que l'on peut retrouver sur la figure 21. Néanmoins, nous aurions pu également garder la partie imaginaire de l'équation en utilisant un bloc imag to real, le résultat aurait été le même.

## Conclusion

Durant les trois séances de travaux pratiques que nous avons eues, nous avons pu découvrir et approfondir des notions relatives aux transmissions radio. Egalement, nous avons pu nous rendre compte de certains aspects et enjeux de la transmission de signaux notamment dans le domaine des objets connectés. En effet, les questions de bruits, de puissance d'émissions et de modulation sont des questions centrales dans le domaine de l'IOT.

# Nomenclatures

$S_{RF}(t)$	Signal transmis en fonction du temps
$S_R(t)$	Partie réel du signal transmis en fonction du temps (en-phase)
$S_I(t)$	Partie imaginaire du signal transmis en fonction du temps (en quadrature de phase)
$r_{RF}(t)$	Signal reçu en fonction du temps
$\tilde{r}_R(t)$	Partie réel du signal reçu en fonction du temps
$\tilde{r}_I(t)$	Partie imaginaire du signal reçu en fonction du temps
$r_R(t)$	Partie réel du signal reçu en fonction du temps après filtrage
$r_I(t)$	Partie imaginaire du signal reçu en fonction du temps après filtrage
$r_R(k.Te)$	Partie réel du signal reçu en fonction du temps après filtrage et échantillonage
$r_R(k.Te)$	Partie imaginaire du signal reçu en fonction du temps après filtrage et échantillonage
$s_a(t)$	Signal analysé
$s(t)$	Enveloppe complexe
$S_R(f)$	Transformée de Fourier de la partie réel du signal reçu
$S_I(f)$	Transformée de Fourier de la partie imaginaire du signal reçu
$\tilde{R}_R(f)$	Transformée de Fourier de la partie réel du signal reçu après filtrage
$\tilde{R}_I(f)$	Transformée de Fourier de la partie imaginaire du signal reçu après filtrage