



# RAPPORT DE TRANSMISSION

UF Systèmes de transmission

Yacine BENCHEHIDA et Alexandre Al ajroudi  
*4<sup>ème</sup> année IR-SC Promotion 55*

## Table des matières

Introduction .....	3
Modulation d'amplitude (AM) .....	3
Modulation d'amplitude (AM, AM-SSB, ASK) .....	8
Modulation de fréquence (FM) .....	9
Modulation de fréquence (FM et FSK) .....	12
Modulations numériques de phase (PSK) .....	13
Modulations numériques d'amplitude et de fréquence (ASK et FSK) .....	18
Modulations d'amplitude en quadrature (QAM) et modulations de phase et d'amplitude (APSK) .....	19
Préparation d'une campagne de test et méthodes de Multiplexage et d'étalement spectral	24
Comparaison expérimentale des différentes modulations étudiées .....	24
Conclusion .....	26

## Introduction

Ce bureau d'études nous a permis de nous approprier les concepts liés aux télécommunications et en particulier aux transmissions radiofréquences, consolidant ainsi les bases acquises lors de nos cours de 3<sup>ème</sup> année MIC-IR, UF Systèmes de télécommunications. Nous avons également pu nous réapproprier les notions pratiques de modulations analogiques, introduites lors d'un bureau d'études en 3<sup>ème</sup> année MIC-IR sur la réalisation d'un récepteur à changement de fréquence en modulation AM. Ce BE permet également de comprendre et mettre en œuvre les concepts et techniques de modulations et démodulations analogiques (AM, FM) et numériques (ASF, FSK, PSK, QAM)

*Note aux lecteurs :* Le lecteur intéressé pourra retrouver en fin de rapport l'ensemble de la documentation technique qui nous a servi à réaliser ce rapport en particulier nos cours de 4<sup>ème</sup> année introductifs à ce bureau d'études, mais également nos cours de 3<sup>ème</sup> année portant sur les systèmes de télécommunications ainsi que notre rapport du bureau d'études de télécommunications effectués en 3<sup>ème</sup> année.

## Modulation d'amplitude (AM)

### 1. Analyseur de spectre

Commençons ce BE par utiliser l'USRP comme analyseur de spectre (*Voir Annexe 1. AMgrc.grc*)

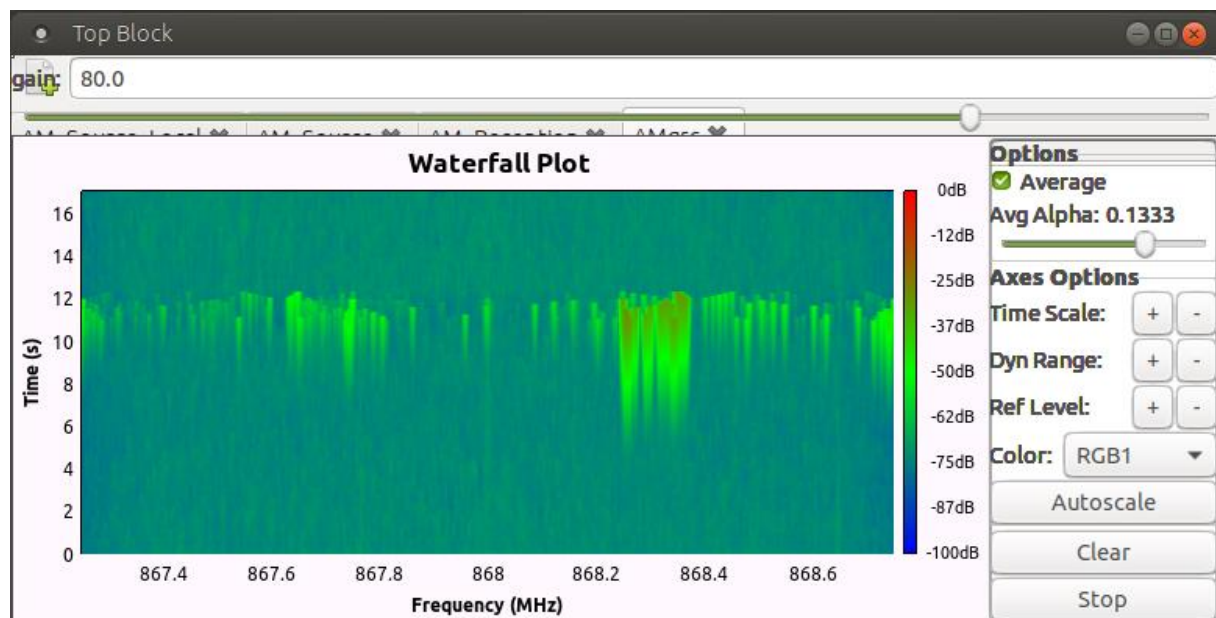


Figure 1. Analyseur de spectre à 868 MHz

Sur la bande de fréquence ISM à 868 MHz, on observe un étalement large bande des fréquences d'utilisation de type Sigfox et/ou Lora.

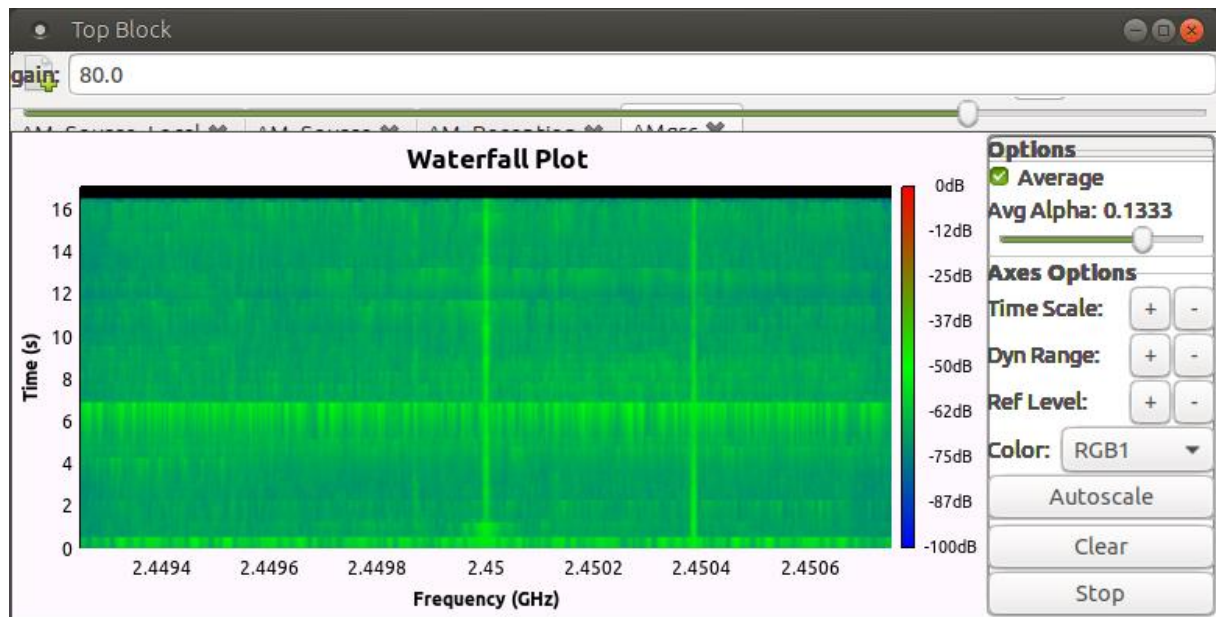


Figure 2. Analyseur de spectre à 2.45 GHz

Sur la bande de fréquence ISM à 2,45GHz, on voit que la bande de fréquences est très utilisée pour le wifi. On aurait certainement eu la même conclusion à 5GHz (bande UNII) car cette bande est également utilisée par les stations souhaitant se connecter à des points d'accès WIFI.

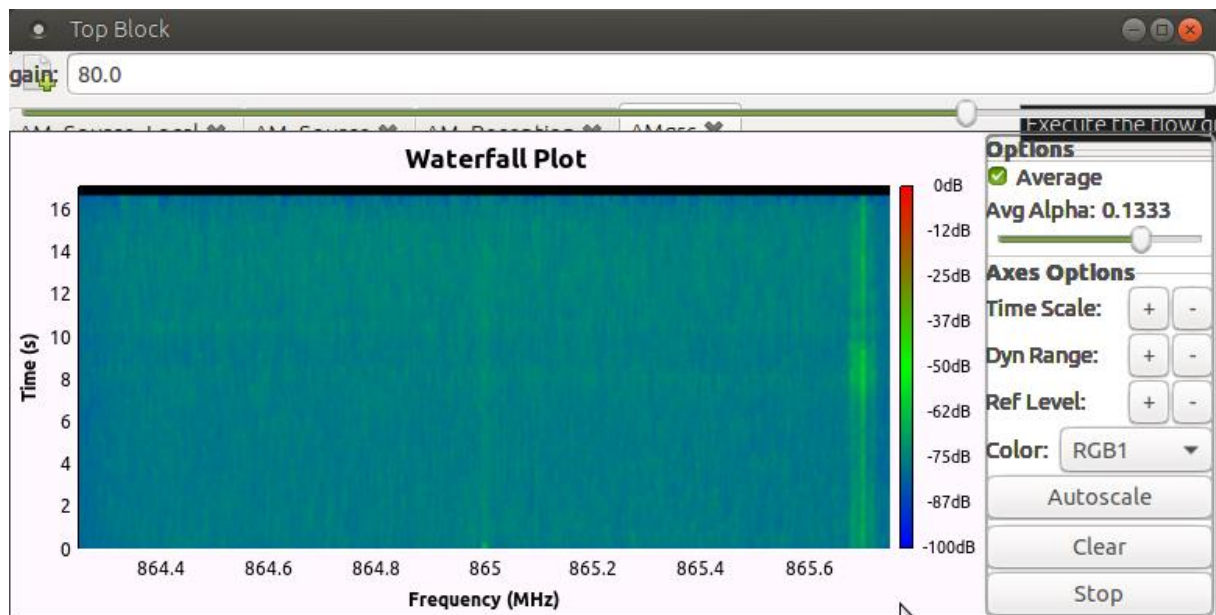


Figure 3. Analyseur de spectre à 865 MHz

A 865 Mhz, on voit que la grue émet sa position pour qu'elle ne se heurte pas avec d'autres grues.

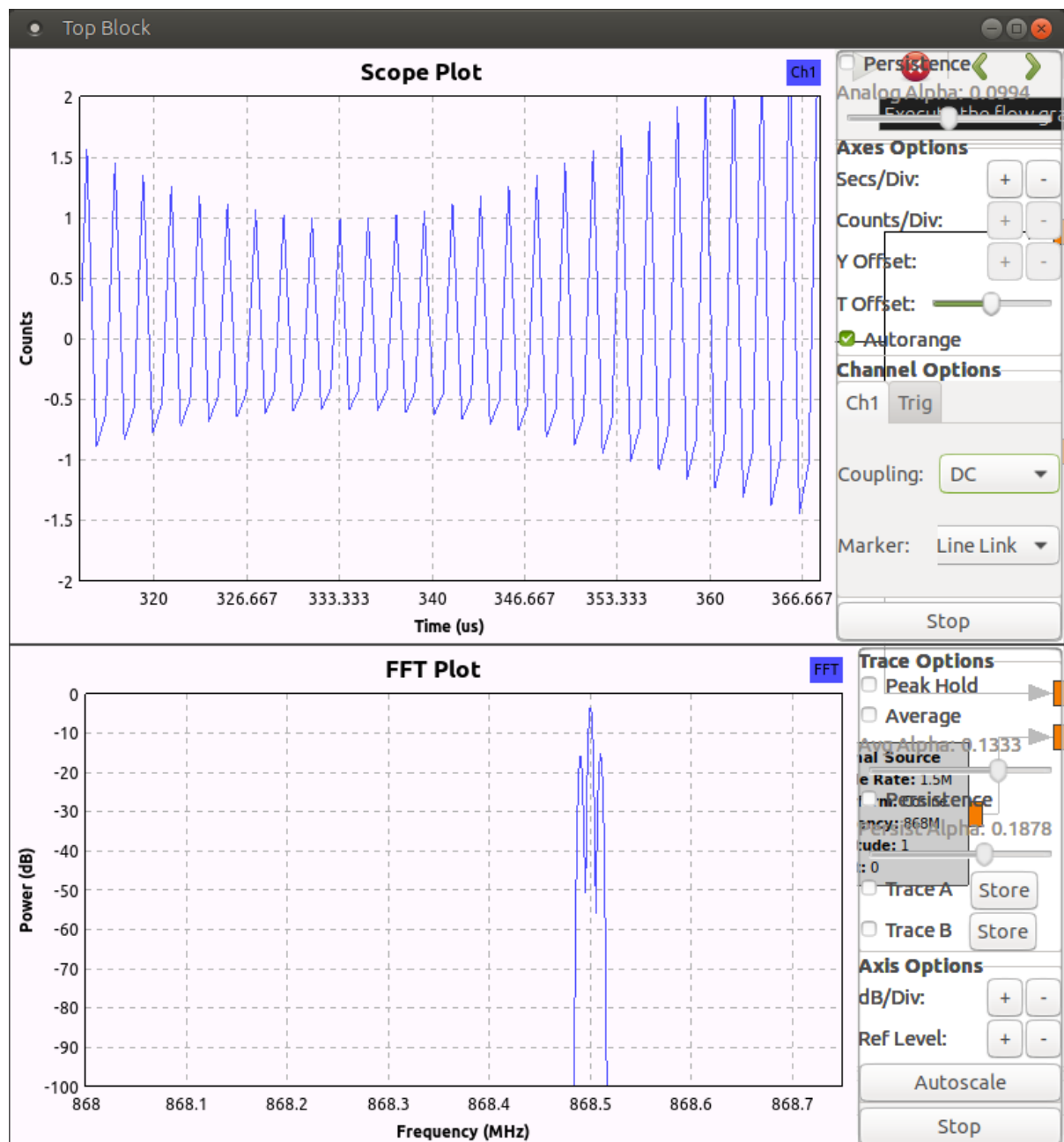
De manière générale, en améliorant le gain d'antenne (ici on l'a gardé avec une valeur fixe à 80dB), on pourrait observer que certaines bandes de fréquences sont beaucoup plus utilisées que d'autres.

## 2. Implémentation en local d'un modulateur et d'un démodulateur AM

Réalisons maintenant une modulation et démodulation AM en local (Voir [Annexe 2. AM Source Local.grc](#)).

a. Implémentation locale d'un modulateur AM

Le signal initial sera un cosinus de fréquence à 10 kHz. La porteuse aura les propriétés suivantes : cosinus de fréquence centrale à 868 MHz. On fixe la fréquence d'échantillonnage à 1.5 Megasympoles par seconde.



**Figure 4. Implémentation locale d'un modulateur AM**

En modifiant l'amplitude du signal et l'offset (correspondant à la composante continue de notre porteuse nécessaire pour ne pas faire que du déphasage et faire de la modulation), on peut ainsi jouer sur l'indice de modulation.

b. Implémentation locale de démodulateurs AM

- *Démodulateur AM hétérodyne*

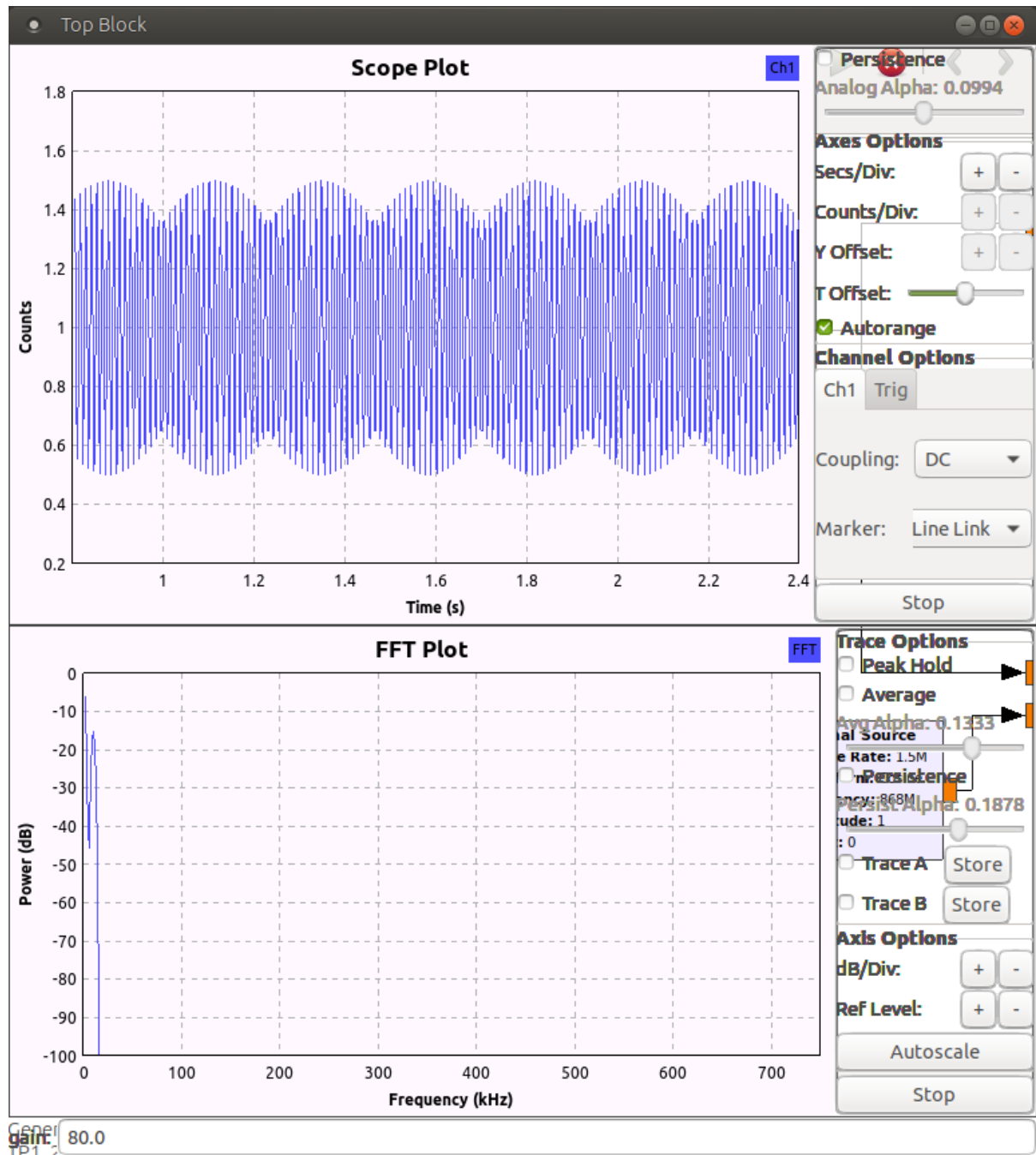


Figure 5. Démodulateur AM hétérodyne

En multipliant à nouveau le signal modulé par la porteuse, on obtient bien le signal modulant en bande de base.



- *Démodulateur par approximation de la détection d'enveloppe*

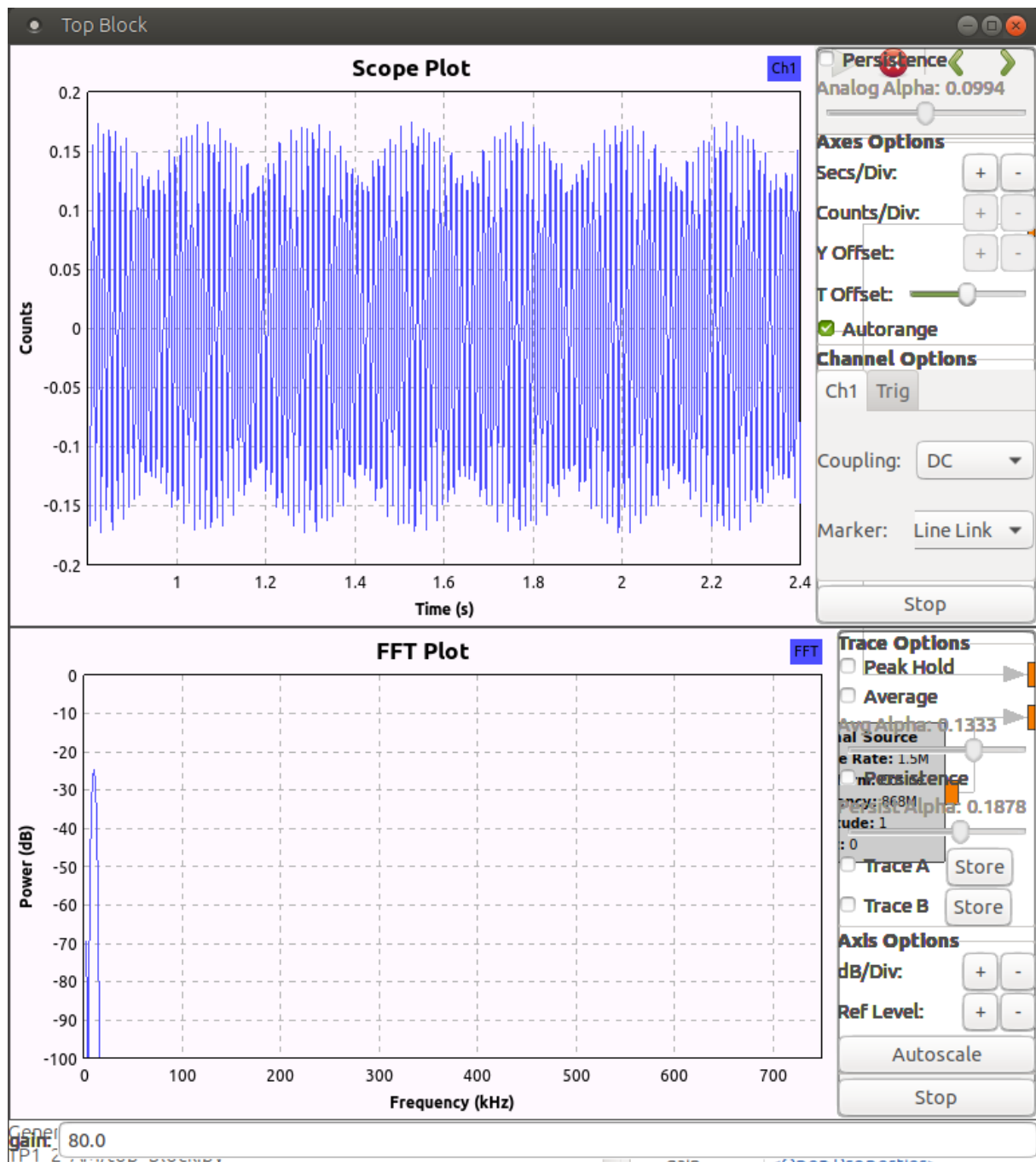


Figure 6. Démodulation AM par détection d'enveloppe

En comparant les deux solutions, on obtient des résultats similaires mais sachant que la démodulation par détection d'enveloppe est basée sur l'amplitude, en cas de bruit (qui agit souvent sur la composante d'amplitude), cette démodulation risque de ne pas marcher. Cela affectera moins la démodulation hétérodyne.

### 3. Implémentation d'un émetteur et d'un récepteur AM de signaux simples

(Voir [Annexe 3. AM Source.grc](#) et [Annexe 4. AM Reception.grc](#)).

- *Implémentation d'un émetteur AM de signaux simples*

On fixe la fréquence d'échantillonnage de la carte son à 44,1 kHz en entrée.

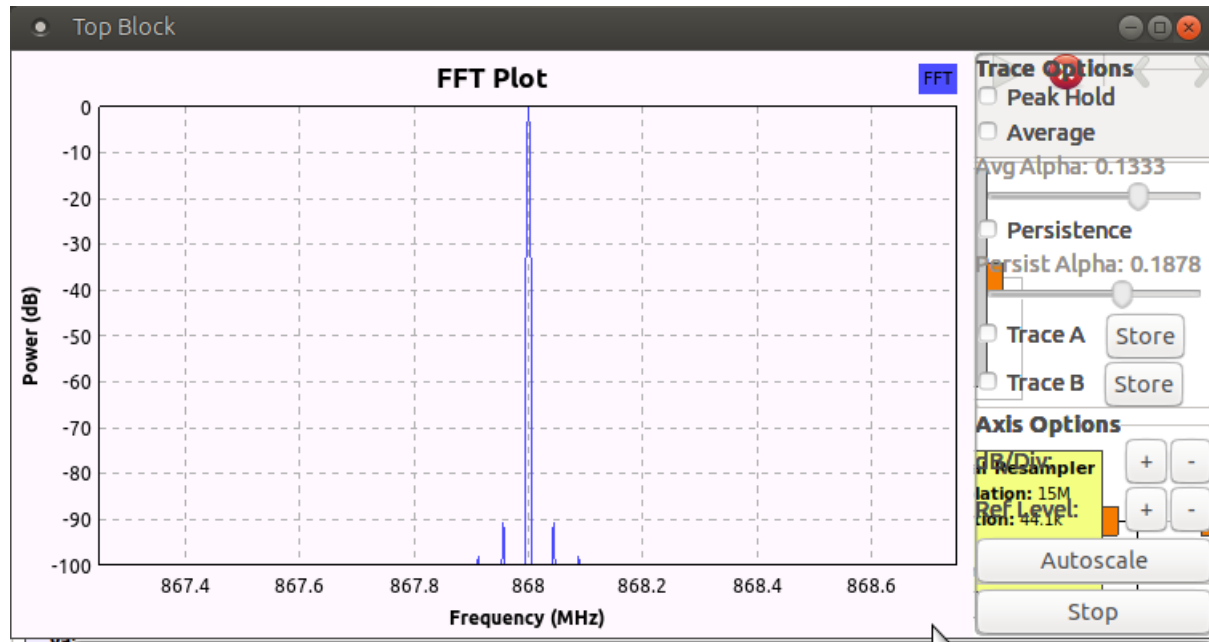


Figure 7. Implémentation d'un émetteur AM pour signaux simples

- *Implémentation d'un récepteur AM de signaux simples*

On fixe la fréquence d'échantillonnage du système à 15 megasymboles par seconde.

#### 4. Implémentation d'un émetteur et d'un récepteur AM de signaux monophoniques

(Voir Annexe 3. AM Source.grc et Annexe 4. AM Reception.grc).

## Modulation d'amplitude (AM, AM-SSB, ASK)

1. Recherches documentaires sur les modulations d'amplitude à bande latérale unique (*Une Introduction aux Télécommunications, Jean-Marie Dilhac*)

« Les deux bandes latérales en modulation AM et AM-P portent tous deux, à l'intérieur d'une bande *double* de largeur  $2w_{\max}$ , une information identique à celle que le signal primaire informatif  $m(t)$  véhiculait en bande de base à l'intérieur d'un intervalle de largeur  $w_{\max}$ . L'idée employée en BLU est de ne transmettre qu'une seule des deux bandes jumelles existant en AM et AM-P, au prix d'une plus grande complexité des circuits de modulation et de réception.



Le principe est d'effectuer une modulation AM-P, puis de supprimer par filtrage passe-bande une des deux bandes : on parlera suivant le cas de BLU supérieure ou inférieure.

Outre le gain en largeur de bande, la BLU permet d'optimiser l'utilisation de la puissance de l'émetteur.

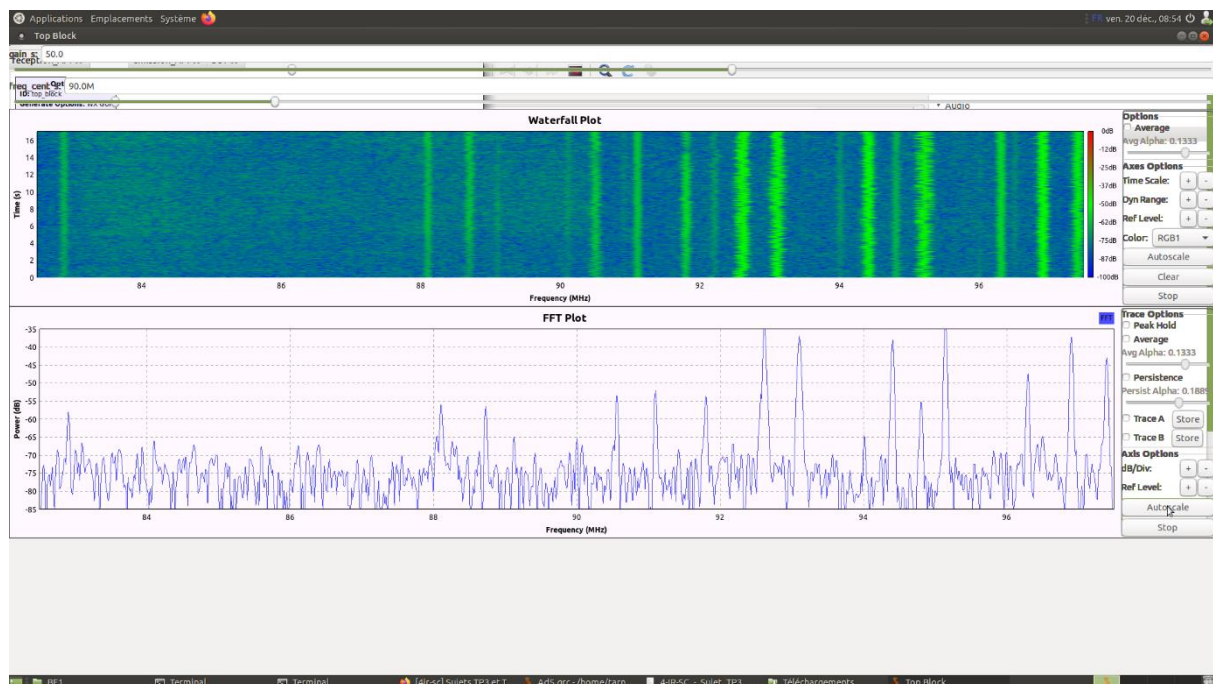
La BLU n'est pas à proprement parler une modulation, c'est une transposition de fréquence (translation de spectre) ; l'enveloppe du signal secondaire n'a aucune ressemblance avec celle du signal primaire.

Notions enfin qu'il existe une BLU à porteuse résiduelle dans laquelle la raie de la porteuse est transmise pour faciliter la synchronisation du récepteur, ainsi qu'une BLU à bande latérale résiduelle en télédiffusion analogique ».

## Modulation de fréquence (FM)

### 2. Observation de la bande d'intérêt

(Voir Annexe 5. FM WBFM.grc)

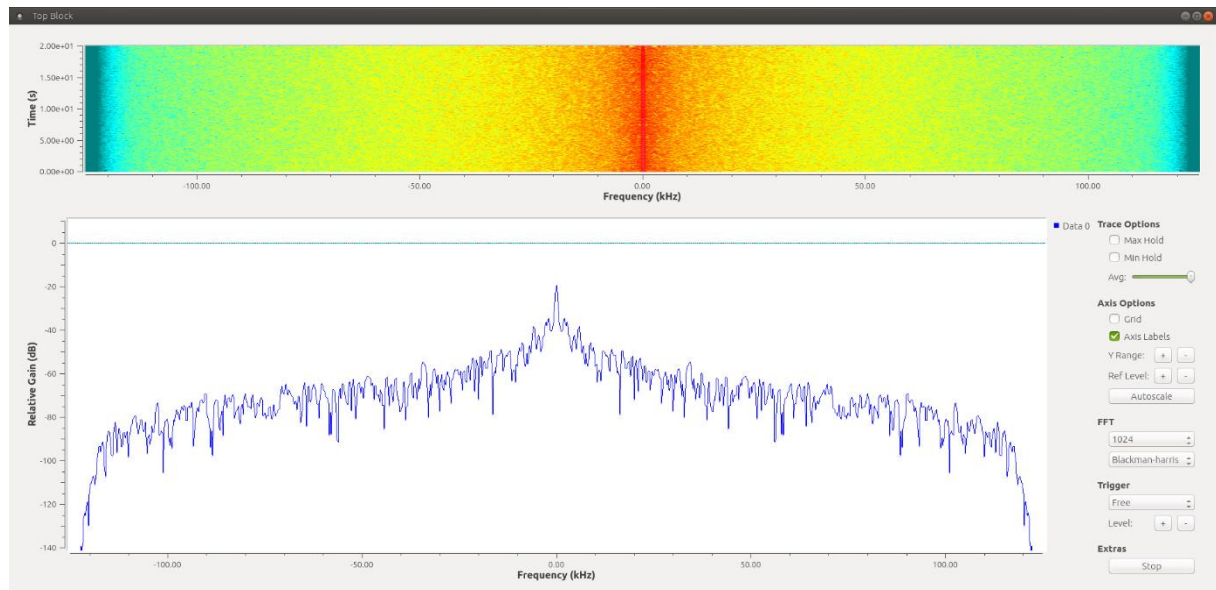


**Figure 8. Observation de la bande d'intérêt par analyseur de spectre**

On observe que la plupart des canaux de cette bande sont utilisés. Par rapport à la modulation AM, l'amplitude joue peu et la fréquence joue beaucoup. On observe environ 19 canaux. En comparant avec le nombre de canaux que l'on devrait observer (nombre de stations émettrices dans la bande 87,5-108 MHz, ce nombre est relativement faible. Cependant, ce n'est pas parce qu'on ne voit pas un canal qu'on ne peut pas le démoduler. C'est la raison pour laquelle, en réalité, beaucoup plus de canaux démodulables sont présents sur cette bande.

### 3. Traitement d'un canal de radiodiffusion FM

(Voir Annexe 5. FM WBFM.grc)



**Figure 9. Choix d'un canal de radiodiffusion FM**

En prenant le pic maximum par rapport au pic secondaire (bruit de fond), on peut estimer un rapport Signal sur bruit égal à 40 dB. Cela semble suffisant pour démoduler les signaux observés puisque nous arrivons à écouter sans problème le son sur le canal choisi. Le SNR minimum pour une démodulation correcte semble être à -60dB.

On estime la largeur de bande du canal à 200kHz (largeur entre deux pics secondaires). Si l'on veut isoler le canal choisi, on choisit une fréquence de coupure à 100kHz.

En décimant par un facteur 6, la fréquence d'échantillonnage est elle-même divisée par 6 ce qui économise de la ressource et du temps de calcul. En décimant par 6, le bruit fait seulement quelques kHz, il est donc très peu visible.

Comme le montre la figure 9, en utilisant le bloc WBFM Receiver, on retrouve le signal composition stéréophonique avant modulation de fréquence (signal initial comme le montre la figure 1 de l'énoncé). Pour 1 mW de bruit, j'ai 1W de signal utile (Rapport 1000).

La règle de Carson permet d'évaluer la largeur de bande passante d'un signal modulé en fréquence. Elle s'exprime par  $B = 2(\Delta f + b)$  où  $\Delta f$  est la déviation maximale de la fréquence instantanée et  $b$ , la largeur de bande du signal modulant.

Dans notre cas,  $B = 2(\Delta f + b) = 2(75 \cdot 10^3 + 200 \cdot 10^3) = 550 \cdot 10^3$  Hz ce qui est cohérent avec l'estimation faite plus tôt.

#### 4. Restitution du signal monophonique

(Voir Annexe 5. FM WBFM.grc)

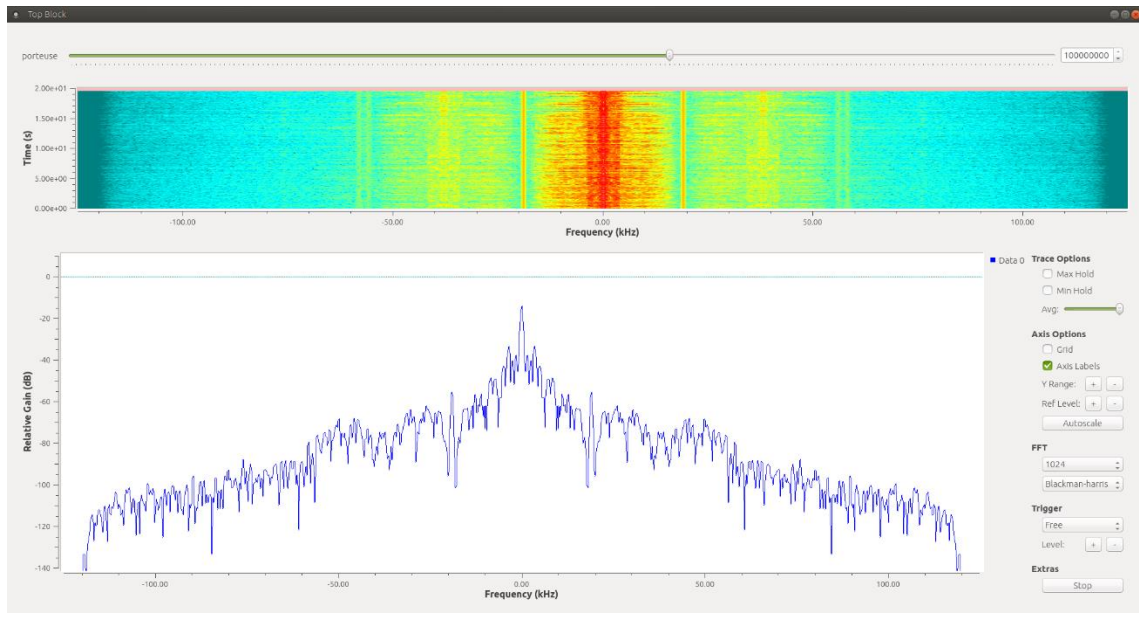


Figure 10. Observation spectrale d'un canal choisi

En reprenant ce qui a été fait dans la partie 2, on récupère le signal monophonique uniquement (partie comprise entre 0 et 15 kHz dans la figure 1), et on rajoute un slider « porteuse » pour faire en sorte que notre démodulateur FM puisse aisément fonctionner à n'importe quelle fréquence et que nous puissions modifier dynamiquement le volume depuis gnuradio.

## 5. Restitution du signal stéréophonique

Pour le signal stéréophonique, il faut récupérer soit  $G(f)$ , soit  $D(f)$ , d'où la nécessité de diviser par deux et de sommer pour obtenir le signal stéréo souhaité (voir blocs enable et disable dans la figure 10). Cependant, au niveau du GUI, on obtiendra des graphiques similaires à la restitution du signal monophonique.

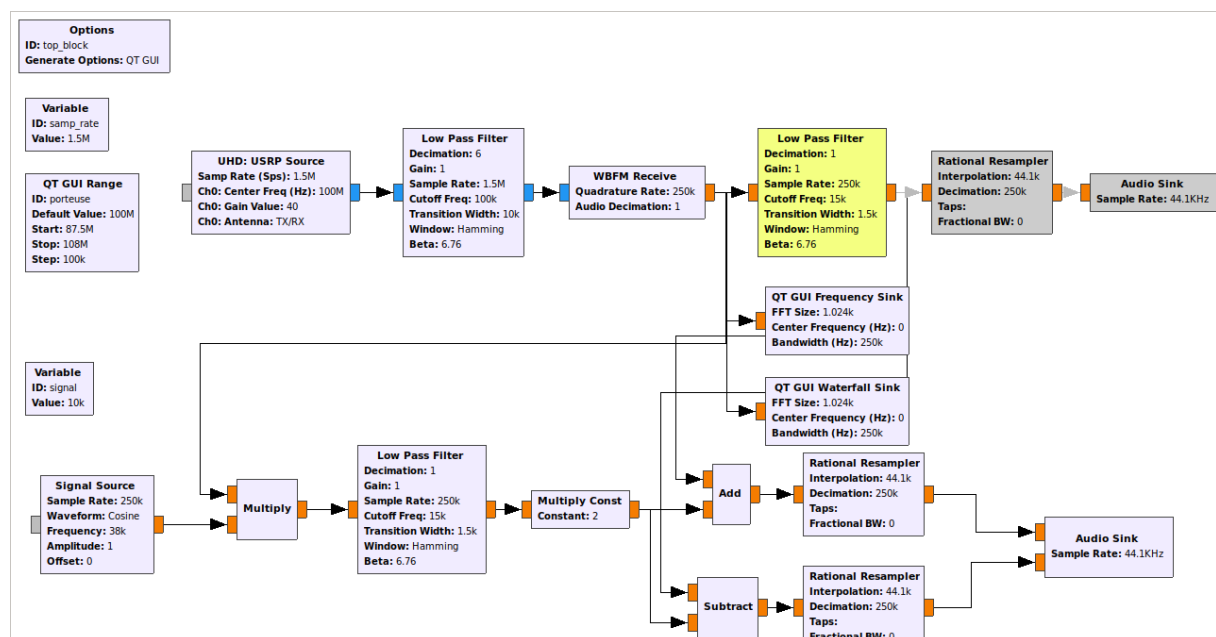


Figure 11. Restitution du signal stéréophonique via gnuradio-companion

## Modulation de fréquence (FM et FSK)

### 1. Implémentation d'autres solutions de démodulation de signaux de radiodiffusion modulés en fréquence

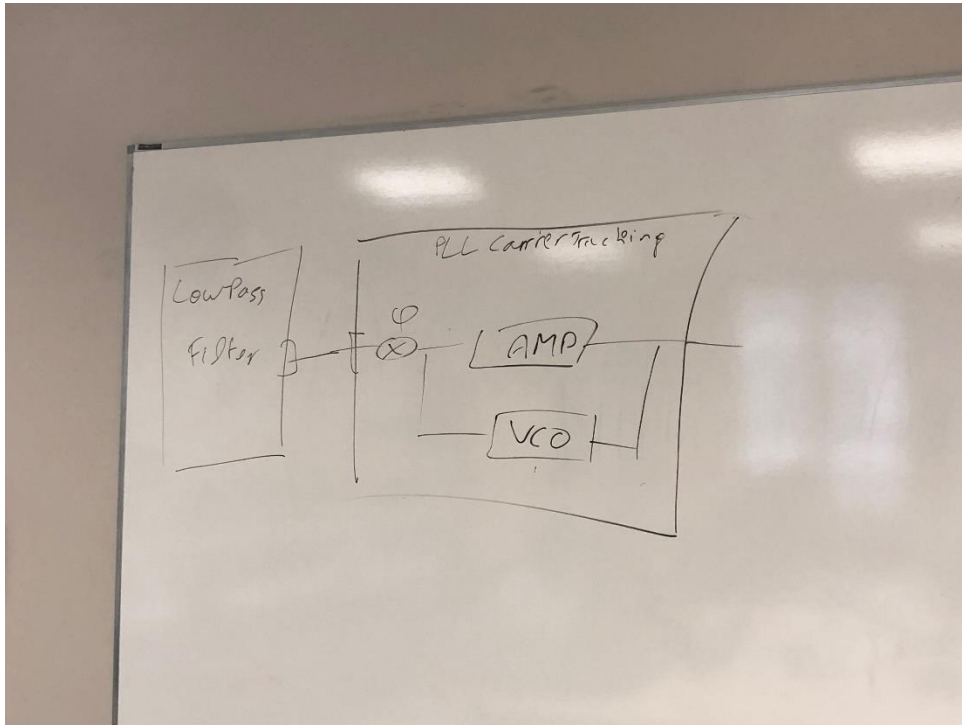


Figure 12. Objectif théorique d'implémentation d'autres solutions de démodulation de signaux de radiodiffusion modulés en fréquence

(Voir [Annexe 6. FM FM :Demod.grc](#)) / (Voir [Annexe 7. FM NBFM.grc](#)) / (Voir [Annexe 8. FM PLL.grc](#))

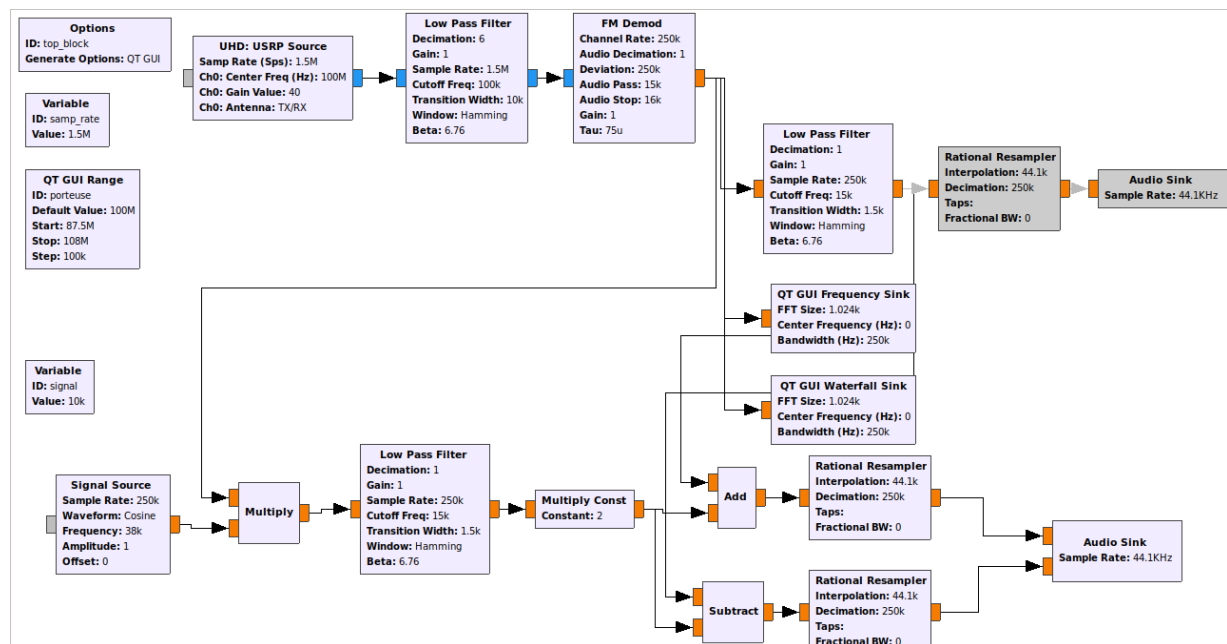


Figure 13. FM Demod

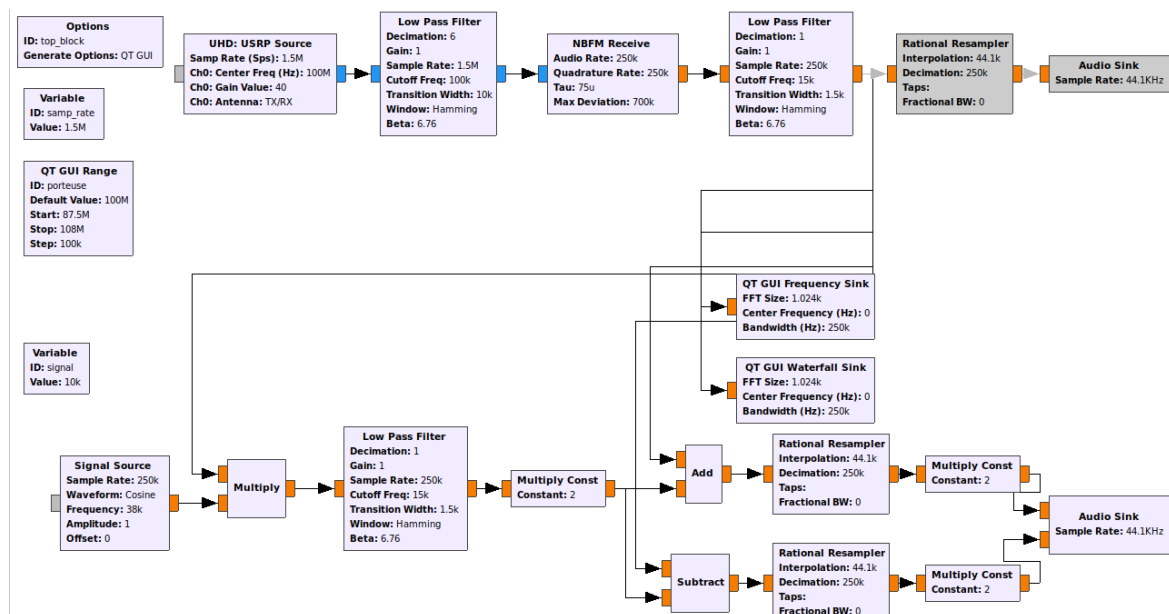


Figure 14. NBFM Receive

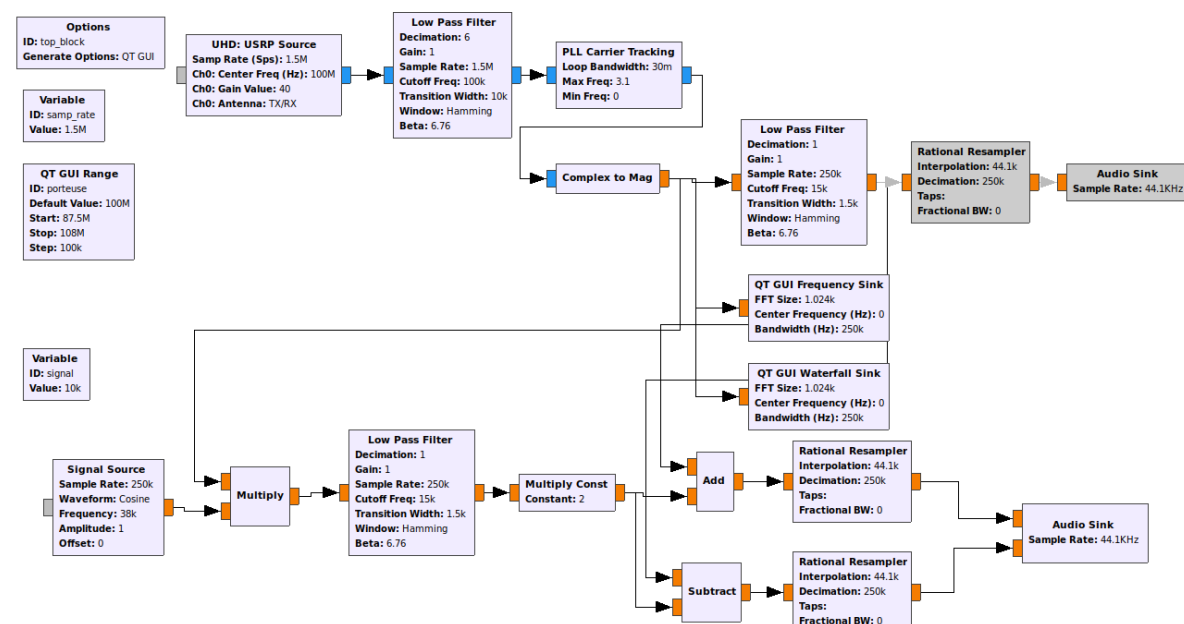


Figure 15. PLL Carrier Tracking

## Modulations numériques de phase (PSK)

### 1. Conversion analogique – numérique d'un flux audio

(Voir Annexe 9. BPSK.grc)

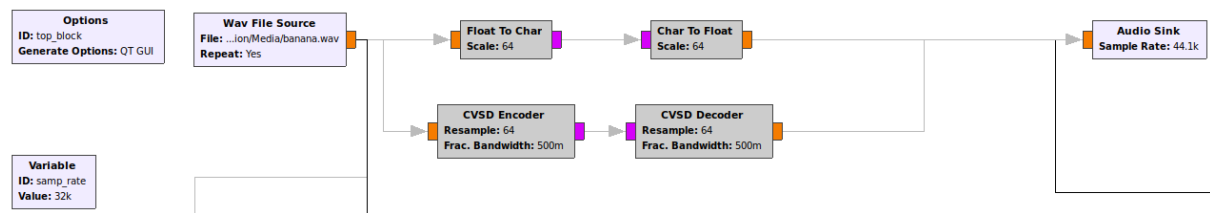


Figure 16. Conversion analogique - numérique d'un flux audio

Pour le champ scale, il faut faire une mise à l'échelle du float pour qu'il soit entre -1 et 1. Pour se faire, nous allons mettre scale à 64.

La modulation CVSD correspond à une compression adaptative. Si la différence entre les deux échantillons est codée, le pas va évoluer en fonction de la différence. Cela permet d'envoyer beaucoup plus de données.

## 2. Implémentation en local d'un modulateur et d'un démodulateur BPSK

(Voir Annexe 9. BPSK.grc)

### a. Modulation et démodulation BPSK idéales

Quelle est la meilleure des deux méthodes entre float to char et modulation cvsd ?

- On entend un grésillement dû à la compression.
- Le CVSD est plus performant car une erreur sur un bit est moins grave sur un traitement différentielle. Par exemple, le changement du bit de poids fort sur le non-différentiel.
- Le principal avantage est que si on a une erreur bit sur un octet elle sera plus flagrante qu'un changement d'amplitude.
- Si on avait déjà de la redondance et du CRC, on opterait plus du char to float (plus intéressant comme dans la partie I) car données encapsulés.

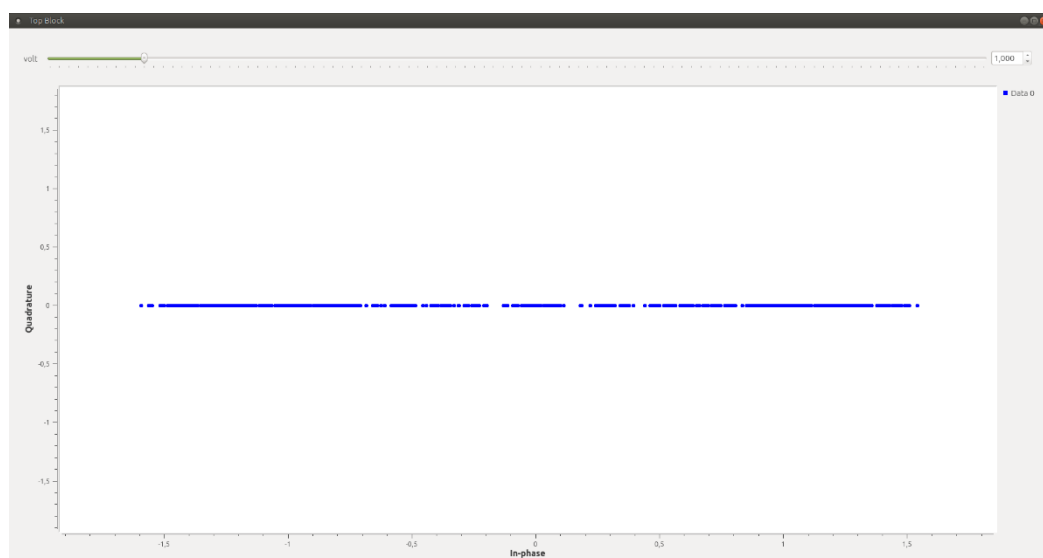


Figure 17. Affichage du diagramme de constellation à l'aide du bloc GUI Constellation Sink (idéal)

### b. Modulation et démodulation BPSK avec ajout de bruit



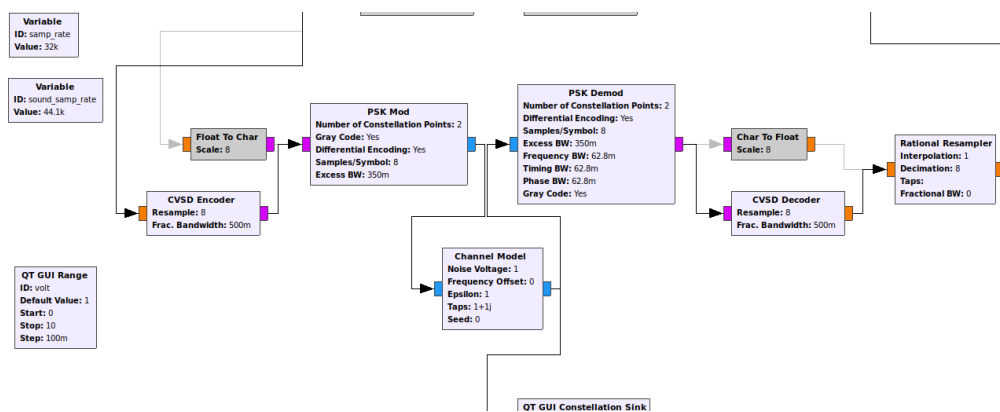


Figure 18. Implémentation sous gnuradio-companion d'un modulateur et d'un démodulateur BPSK avec bruit

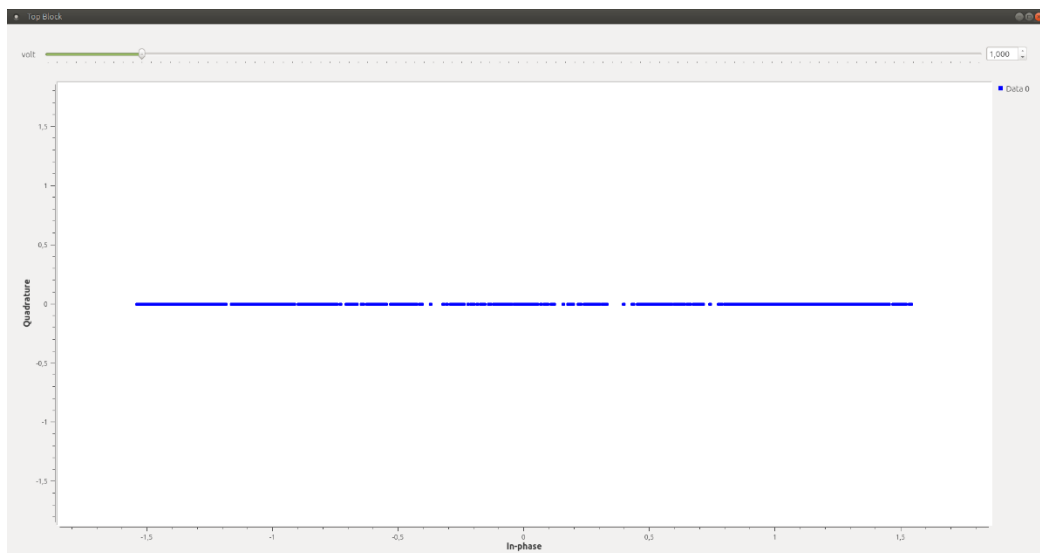


Figure 19. Affichage du diagramme de constellation à l'aide du bloc GUI Constellation Sink avec bruit

On observe bien un diagramme de constellation BPSK avec des points légèrement déphasés à cause du bruit.

En modifiant samples/symbol, on observe qu'il existe des optimums pour les différents types de modulation se déroulent correctement.

En rendant la modulation et la démodulation différentielles, on obtient le diagramme de constellation suivant :

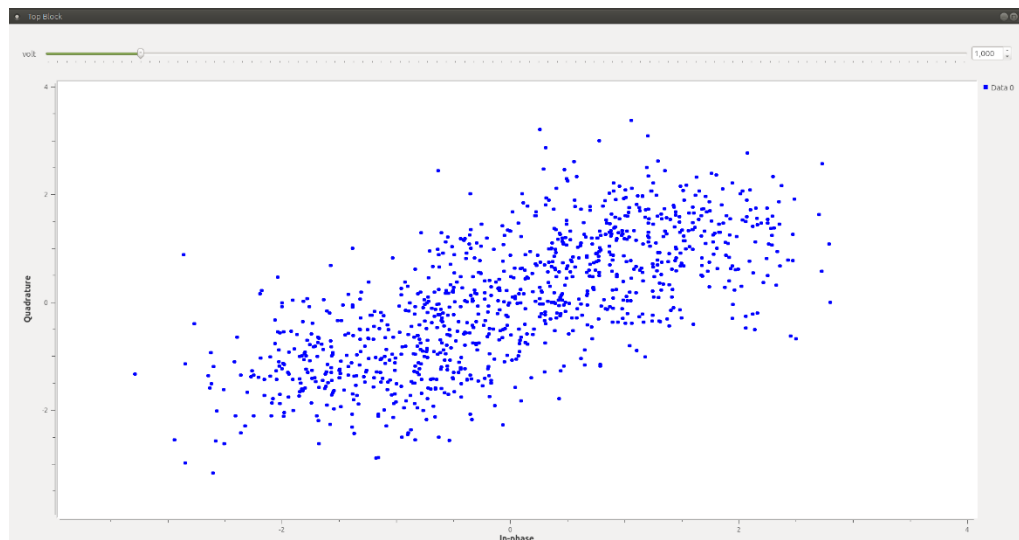


Figure 20. Affichage du diagramme de constellation à l'aide du bloc GUI Constellation Sink avec bruit

### 3. Implémentation en local d'un modulateur et d'un démodulation $(D)2^n$ PSK

(Voir Annexe 9. BPSK.grc)

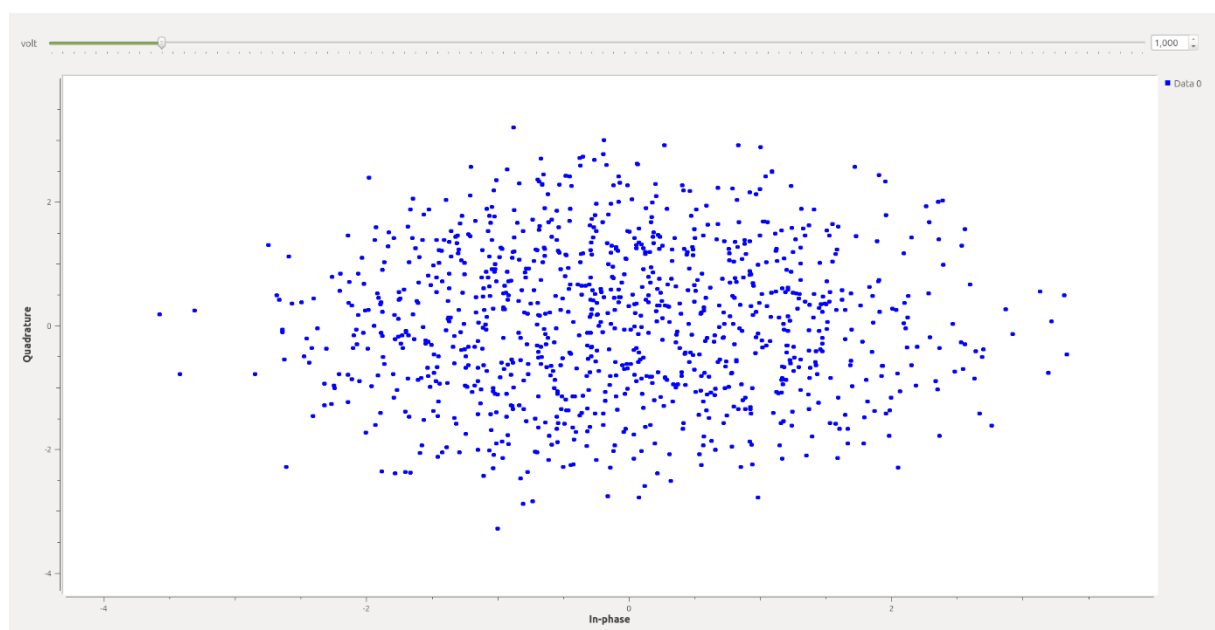
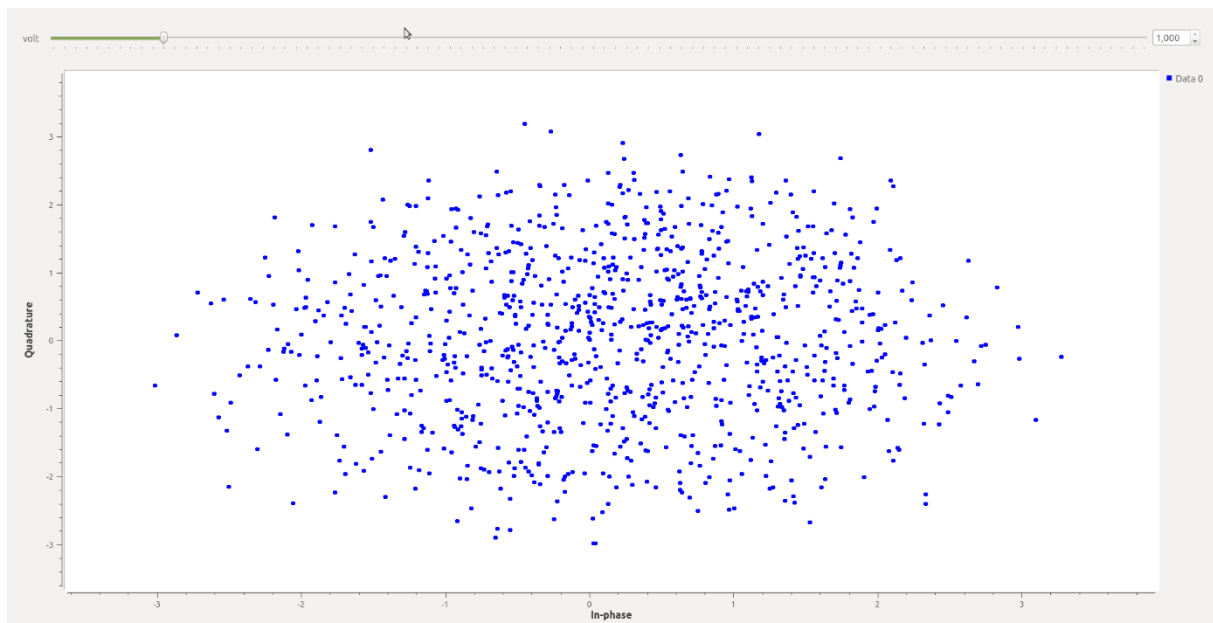
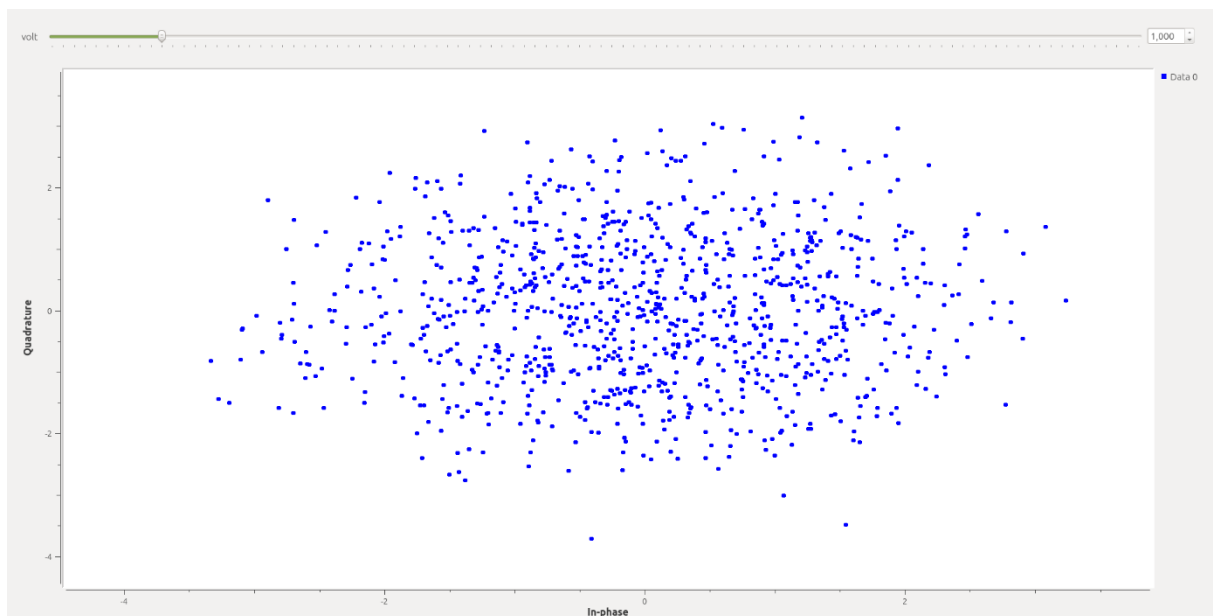


Figure 21. 8-PSK



**Figure 22. 32-PSK**



**Figure 23. 128-PSK**

Plus on augmente le nombre de points sur le diagramme de constellation, le canal se détériore et il devient plus difficile de discerner un point parmi les autres.

Les solutions envisageables pour la transmission sans-fil sont l'implémentation de codes correcteurs qui augmenteront la robustesse du signal. Pour cela à l'information transmise, il faudrait ajouter du codage redondant.

#### 4. Implémentation d'un émetteur et d'un récepteur de signaux monophoniques modulés en $(D)2^n$ PSK

(Voir Annexe 10. BPSK Emetteur.grc) / (Voir Annexe 11. BPSK Receiver.grc)

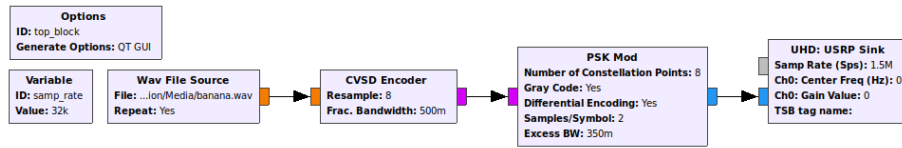


Figure 24. Emetteur 8-PSK

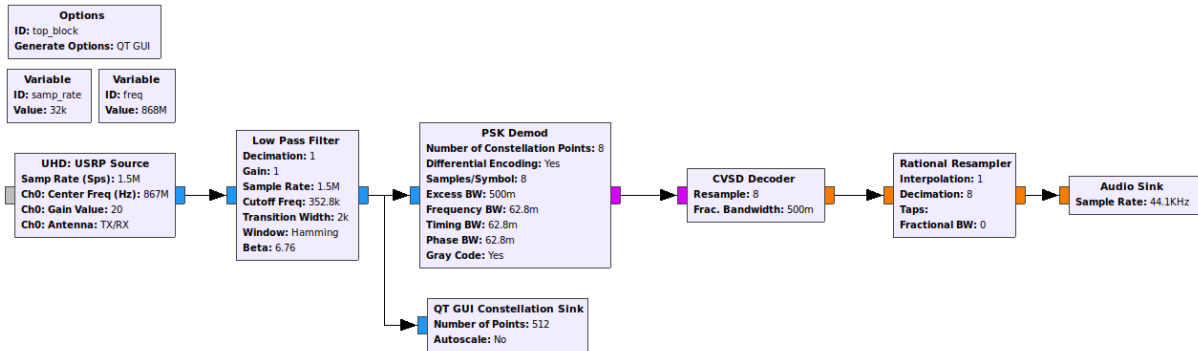


Figure 25. Recepteur 8-PSK

Après plusieurs essais, en comparant les performances, nous pensons que la meilleure solution est : B-PSK avec samples/symboles à 8.

## 5. Amélioration de la réception de signaux monophoniques modulés en (D)2nPSK

Non implémenté.

## Modulations numériques d'amplitude et de fréquence (ASK et FSK)

1. Implémentation d'émetteur et récepteur OOK
2. Implémentation d'émetteur et récepteur ASK (en local)

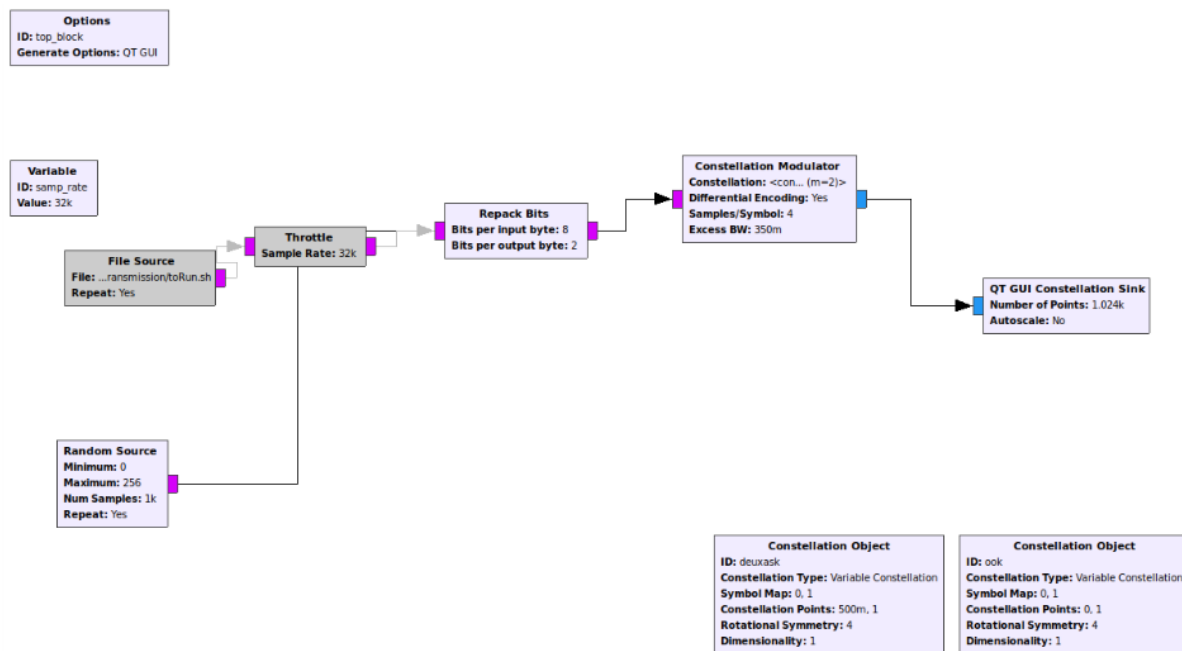


Figure 26. Implémentation d'émetteur ASK en local

## Modulations d'amplitude en quadrature (QAM) et modulations de phase et d'amplitude (APSK)

### 1. Implémentation en local d'un modulateur et d'un démodulateur 4<sup>n</sup>QAM

#### a. *Modulation et démodulation idéales*

(Voir Annexe 12. QAM.grc)

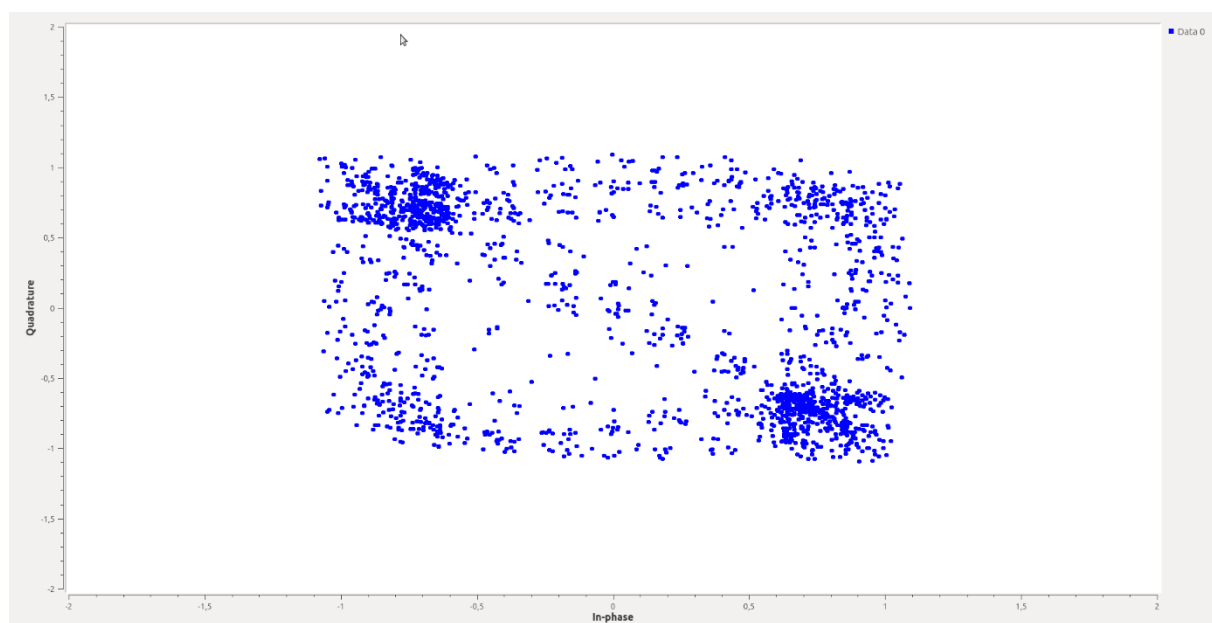
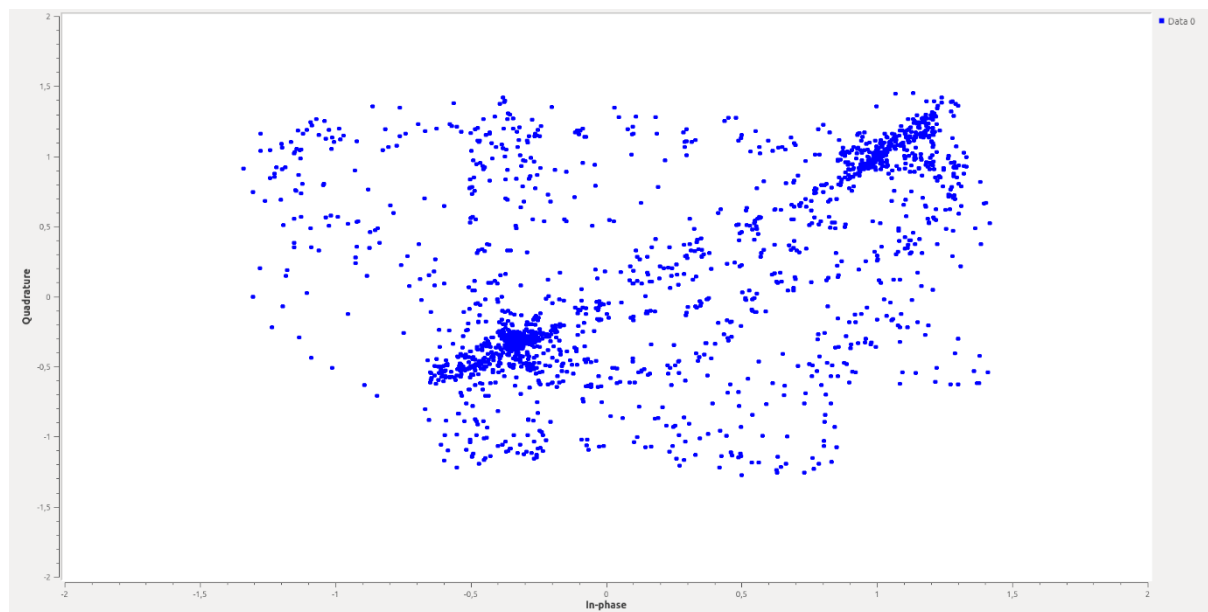
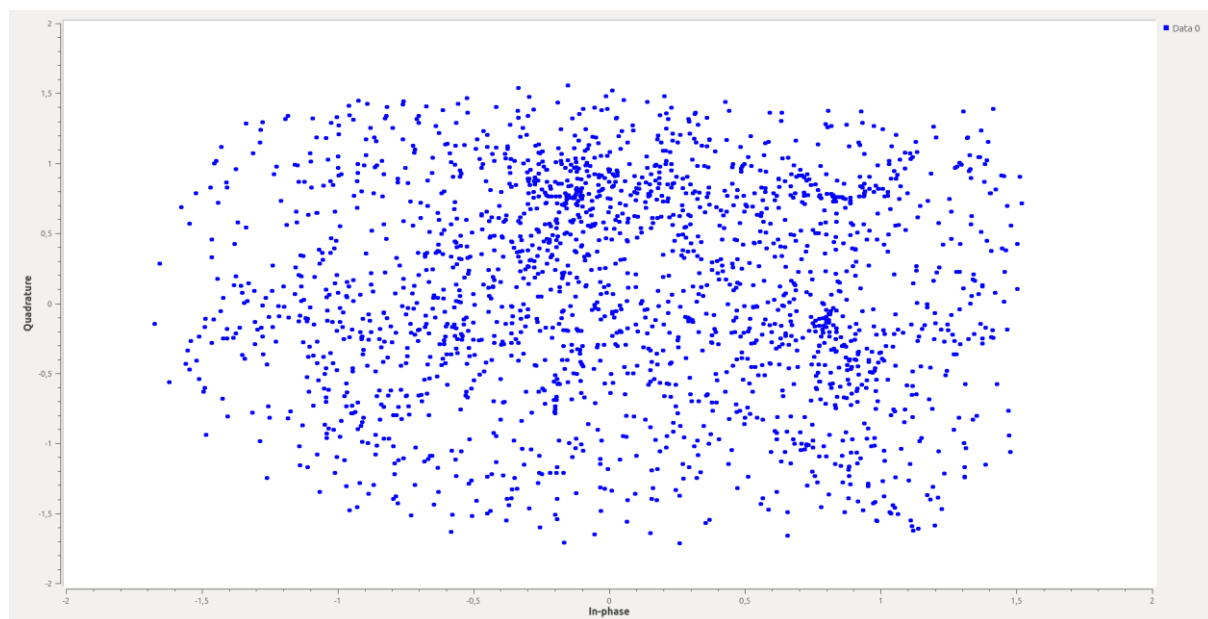


Figure 27. Diagramme de constellation d'une 4-QAM idéal

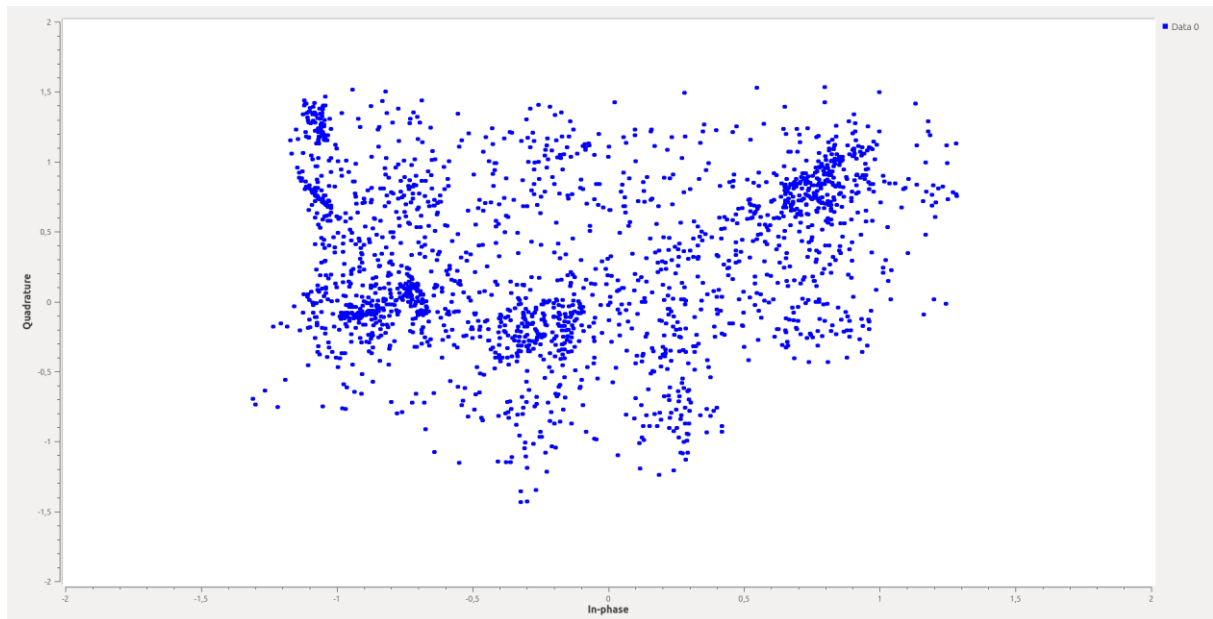


**Figure 28. Diagramme de constellation d'une 16-QAM idéal**



**Figure 29. Diagramme de constellation d'une 64 QAM idéale**



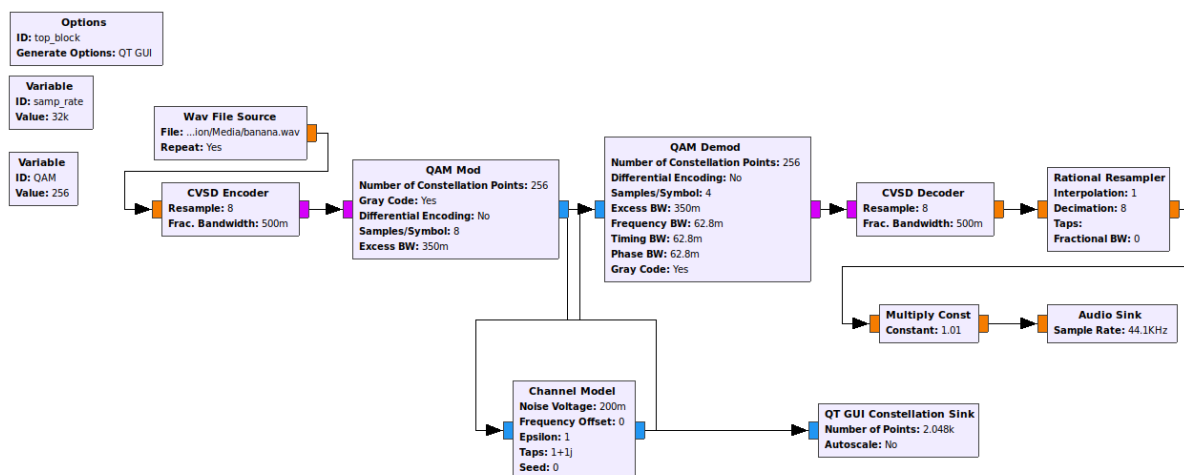


**Figure 30. Diagramme de constellation d'une 256 QAM idéal**

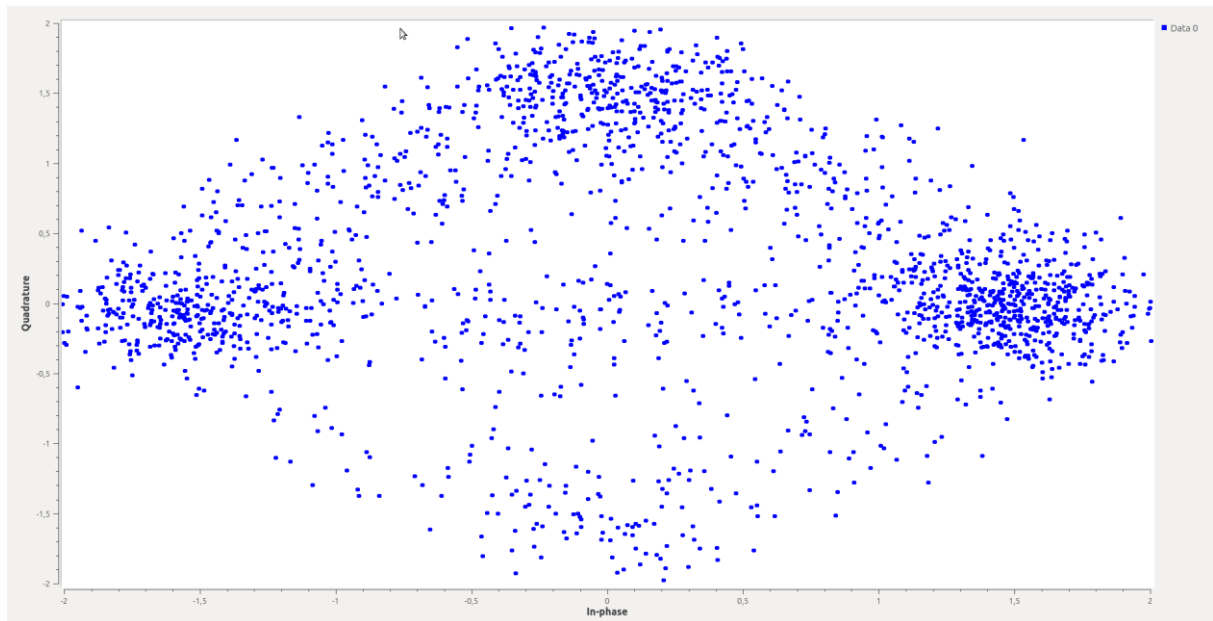
On observe qu'à partir d'un certain nombre de points, le diagramme de constellation devient indiscernable. C'est pour cela qu'à partir d'un moment, on n'entend plus le son. Une modulation trop peu robuste entraîne une dégradation du son obtenu.

Finalement, ça passe en 64 QAM mais en 256, les points sont trop proche et difficiles à décélérer donc mauvaise modulation et un son très haché. Avec le diagramme de constellation, on n'obtient pas seulement les 4 points de la 4-QAM mais aussi les états transitoires qui nous font croire que l'on obtient 9 états au lieu de 4.

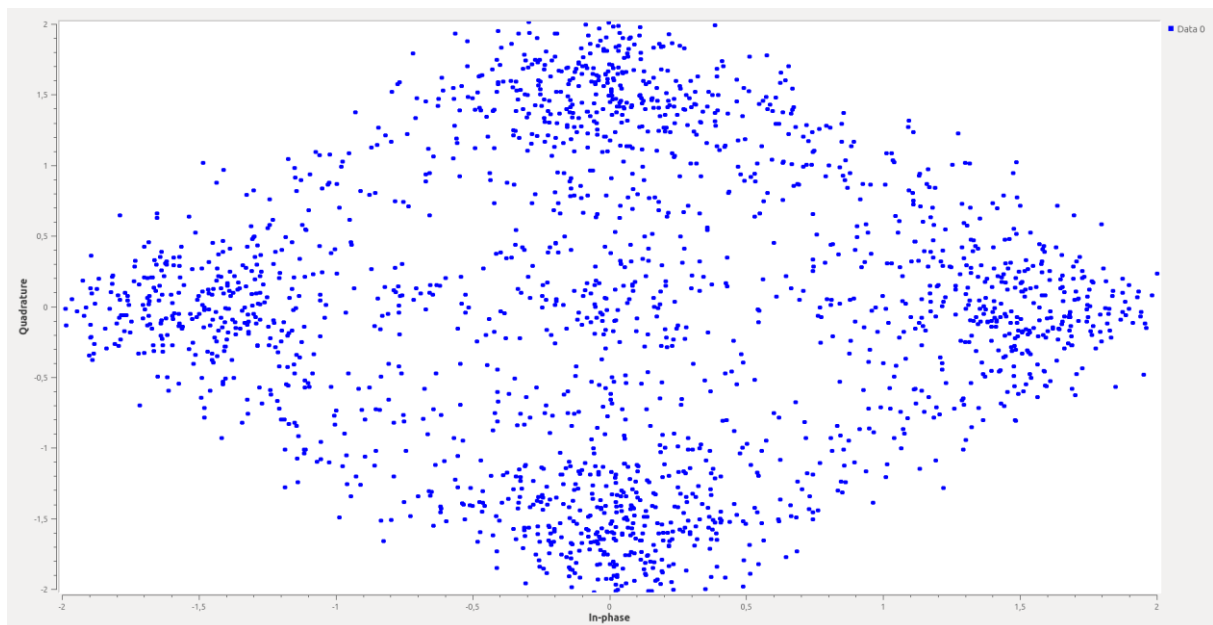
### *b. Modulation et démodulation avec ajout de bruit*



**Figure 31. Modulation et démodulation en local avec ajout de bruit**



**Figure 32. Modulation et démodulation 4-QAM en local avec ajout de bruit**



**Figure 33. Modulation et démodulation 4-QAM différentielles en local avec ajout de bruit**

Globalement avec une modulation différentielle, le passage entre les états basé sur leur différence rend le son moins bruité et de meilleure qualité.

Les solutions envisageables pour la transmission sans-fil sont l'implémentation de codes correcteurs qui augmenteront la robustesse du signal. Pour cela à l'information transmise, il faudrait ajouter du codage redondant.

## 2. Implémentation d'une émetteur et d'un récepteur de signaux monophoniques modulés en 4<sup>n</sup>QAM

(Voir [Annexe 13. QAM Recepteur.grc](#)) / (Voir [Annexe 14. QAM Emetteur.grc](#))

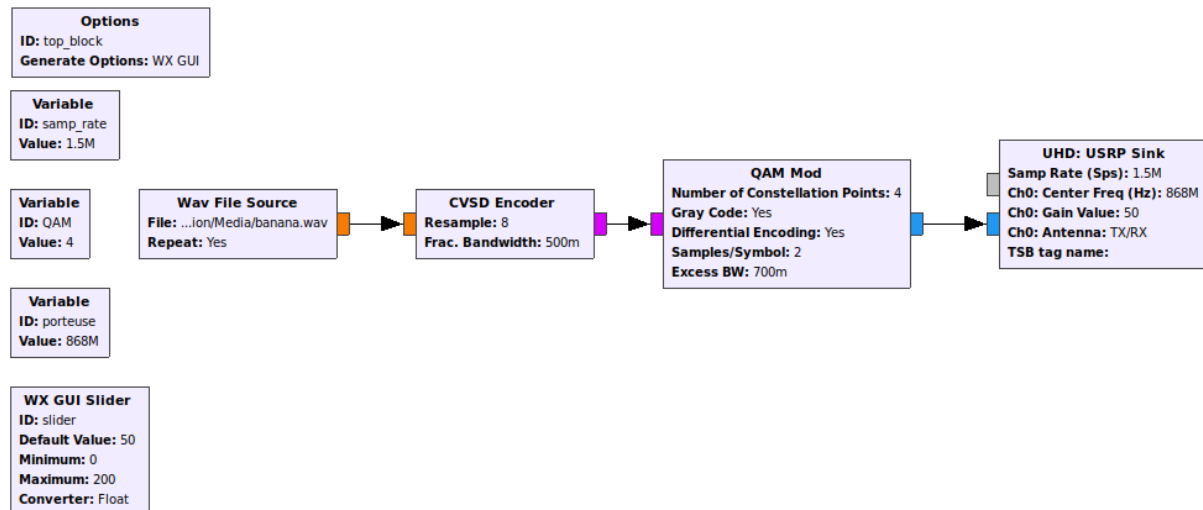


Figure 34. Emetteur 4-QAM

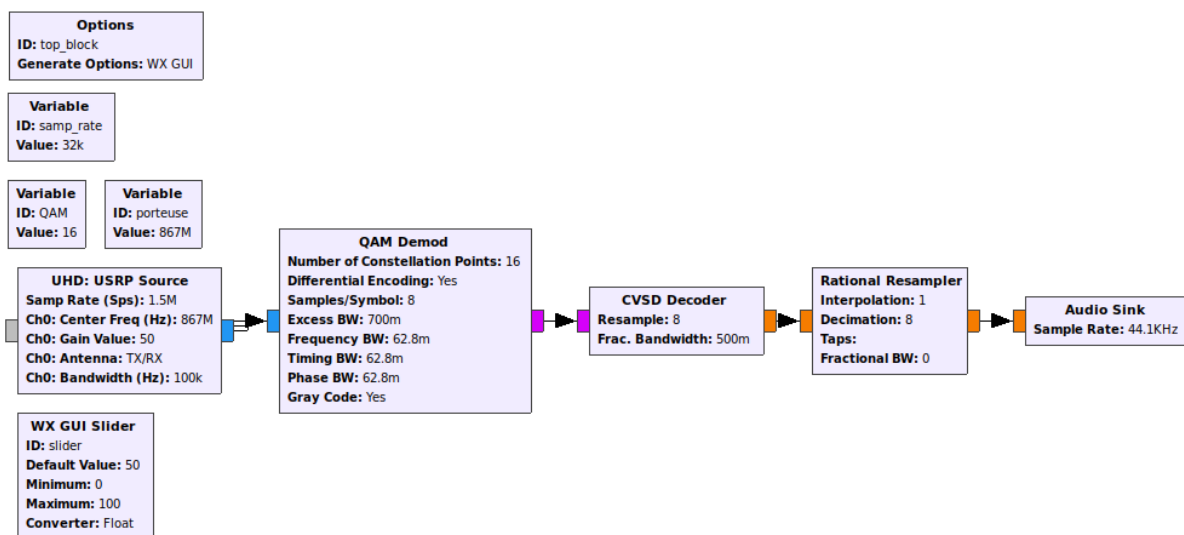


Figure 35. Récepteur 4-QAM

En testant plusieurs types de modulation, on se rend compte qu'à partir de 64-QAM on n'entend plus rien. Le mieux reste la 4-QAM avec samples/symbol égale à 8.

### 3. Amélioration de la réception de signaux monophoniques modulés en $4^n$ QAM

(Voir Annexe 13. QAM Récepteur.grc) / (Voir Annexe 14. QAM Emetteur.grc)

### 4. Modulation et démodulation de signaux APSK

(Voir Annexe 15. APSK)

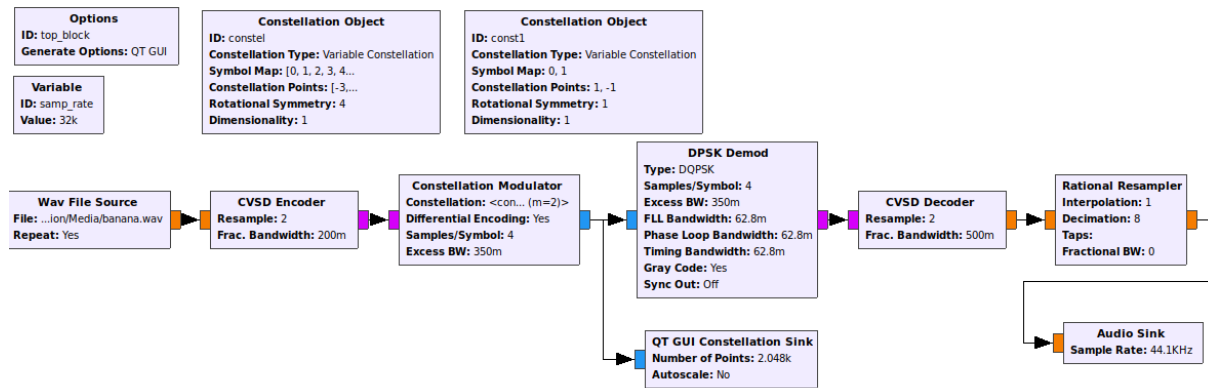


Figure 36. APSK

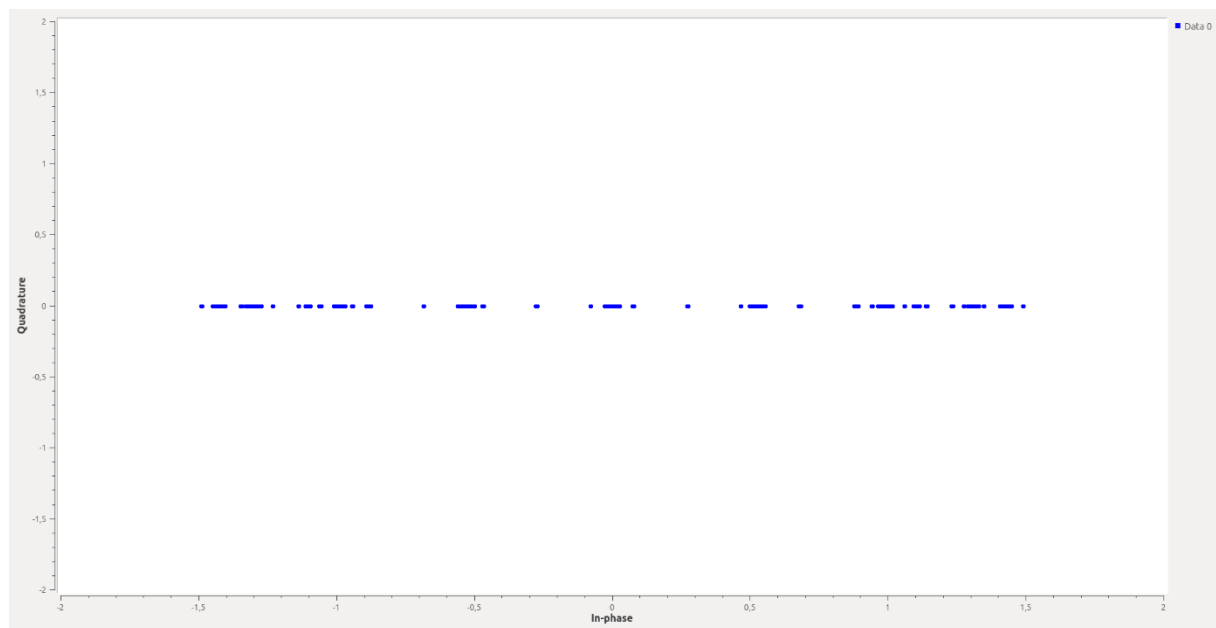


Figure 37. APSK Constellation diagram

## Préparation d'une campagne de test et méthodes de Multiplexage et d'étalement spectral

### 1. Préparation d'une campagne de test en chambre anéchoïque

Voir explication détaillée dans la partie suivante.

## Comparaison expérimentale des différentes modulations étudiées

### 1. Réalisation de la campagne de test en chambre anéchoïque

Profitons de cette dernière séance encadrée pour tester l'influence de la mise en chambre anéchoïque sur nos transmissions.

Pour cela, nous avons testé deux types de modulation, 4QAM et 8PSK.

L'objectif étant de déterminer les paramètres suivants : Packet Error Rate, Largeur de bande et Seuil de détection.

Les paramètres à prendre en compte sont :

- Une atténuation fixe de 84 dB
- Une atténuation due aux câbles de 2dB, 2 câbles de 1 mètre
- Une atténuation variable caractérisée par la transmission et la modulation

Commençons par la 4-QAM : Le récepteur se trouvant dans la chambre anéchoïque.

- Echantillonnage à 500 kHz
- Estimons le nombre de paquets perdus (en fonction de la puissance d'émission) sachant que chaque paquet envoyé faisait 512 octets.

Finalement, voici le tableau suivant qui retranscrit nos résultats

Gain	Octets reçus	PER(%)
100	508/512	
80	508/512	
70	508/512	
60	508/512	
50	445/512	
45	0	

Continuons avec la 8-PSK : Le récepteur se trouvant dans la chambre anéchoïque.

- Echantillonnage à 500 kHz
- Estimons le nombre de paquets perdus (en fonction de la puissance d'émission) sachant que chaque paquet envoyé faisait 512 octets.

Finalement, voici le tableau suivant qui retranscrit nos résultats

Gain	Octets reçus	PER(%)
100	268/512 (saturation)	
90	290/512 (saturation)	
80	512/512	
70	504/512	
60	411/512	
45	0/512	

Ces tests nous ont donc permis de comparer deux modulations, la 4-QAM et la 8-PSK et de remarquer qu'elles étaient à peu près aussi robustes l'une que l'autre (en fonction du gain en entrée). Il faudrait pouvoir comparer avec d'autres types de modulations pour voir de réelles différences.

## Conclusion

Un BE qui nous a permis d'illustrer les différentes modulations analogiques et numériques et de faire nos propres essais en chambre anéchoïque. La découverte de *gnuradio-companion* ainsi que des USRP nous permettra à coup sûr de réaliser nos propres modulations dans le futur. Un BE très formateur pour la suite, un certain avant-goût des objets connectés.



## **INSA Toulouse**

135, avenue de Rangueil  
31077 Toulouse Cedex 4 - France  
**[www.insa-toulouse.fr](http://www.insa-toulouse.fr)**



MINISTÈRE  
DE L'ÉDUCATION NATIONALE,  
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE