

# Rapport de Tutorat :

## Mise en œuvre d'une carte radio logicielle pour l'amélioration de l'instrumentation en optique quantique

Alec Passolunghi

Encadrante : Virginia D'Auria

Année Universitaire 2025-2026

### Résumé

Ce rapport présente les travaux réalisés au sein de l'Institut de Physique de Nice (INPHYNI) dans le cadre de mon tutorat de première année de Master ESTel à l'Université Côte d'Azur. L'étude porte sur l'intégration d'une carte de radio logicielle (LimeSDR USB) dans un montage d'optique quantique. L'objectif principal est de substituer des instruments de Radiofréquence (RF) traditionnels, coûteux et volumineux, par une solution logicielle flexible capable de piloter un modulateur électro-optique (EOM) et de traiter des signaux d'asservissement selon la technique Pound-Drever-Hall(PDH)

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>État de l'art : La stabilisation laser par méthode PDH</b>	<b>3</b>
2.1	Principe théorique . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Dispositif Expérimental</b>	<b>4</b>
3.1	La carte LimeSDR USB . . . . .	4
3.2	Le modulateur électro-optique (EOM) . . . . .	6
3.3	Logiciels utilisés . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Mise en œuvre et méthodes</b>	<b>7</b>
4.1	Prise en main de GNU radio . . . . .	7
4.2	Prise en main de la carte . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Résultats et Analyse</b>	<b>8</b>
5.1	Premières émissions . . . . .	8
5.2	Modulation de phase . . . . .	9
5.3	Simulation du fonctionnement de l'EOM . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>11</b>

# 1 Introduction

Le choix de ce tutorat a été motivé par une curiosité croissante pour les technologies quantiques, domaine que j'ai choisi de suivre en mineure durant mon Master ESTel. L'opportunité de travailler à l'Institut de Physique de Nice (INPHYNI) sur un sujet mêlant électronique haute fréquence et optique quantique représentait un complément idéal à ma formation.

Le projet s'articule autour de la problématique suivante : comment simplifier et réduire les coûts des systèmes de contrôle laser nécessaire à la stabilisation des expériences d'optique quantique ? L'utilisation de la radio logicielle (SDR) apparaît comme une solution prometteuse. Ce rapport détaille les étapes de prise en main de la [LimeSDR-USB](#), une carte SDR ayant la caractéristique de pouvoir recevoir mais aussi émettre des signaux.

## 2 État de l'art : La stabilisation laser par méthode PDH

L'expérience sur laquelle j'ai travaillé porte sur la génération d'états quantiques de la lumière aussi appelé "chats de Schroedinger" [MELALKIA et al. 2022](#). États qui sont des ressources essentielles pour l'informatique quantique. L'expérience se centre autour d'un interféromètre à base de composant d'optique guidé. Ce montage nécessite un stabilisation due à la fluctuation de la température et des fibre optique utilisée. Cette stabilités est crucial afin de garantir le succès de l'expérience. Ainsi une méthode fut développé nommée Pound-Drever-Hall (PDH)

La technique PDH de stabilisation des système optique repose sur l'exploitation de la phase de la lumière plutôt que de son intensité. Cette technique a été inventée pour stabiliser la fréquence d'un laser en le verrouillant sur une cavité Fabry-Perot de référence, ce qui reste aujourd'hui son utilisation principale. Elle a été initiée par Ron Drever, sur la base d'une technique micro-ondes plus ancienne développée par R. V. Pound, et une grande partie de sa mise en œuvre a été élaborée au [JILA](#) par le groupe de Jan Hall. Bien que la stabilisation des lasers soit son usage principal, la technique peut aussi être utilisée de manière inverse : pour verrouiller une cavité sur un laser. Ce procédé permet de mesurer de très petites variations de la longueur de la cavité avec une précision extrêmement élevée.

### 2.1 Principe théorique

La méthode PDH consiste à moduler la phase du laser à une fréquence élevée(de l'ordre de plusieurs GHz). Lorsque le laser s'écarte de la résonance de la cavité, la lumière réfléchie subit un déphasage qui, une fois démodulé, fournit un *signal d'erreur*. Ici nous l'utilisons la PDH pour la stabilisation de l'interféromètre fibré.

L'avantage majeur de cette technique est son insensibilité aux fluctuations d'intensité du laser, se concentrant uniquement sur la phase. Pour le modèle quantitatif complet, je vous renvoie vers ma source principale [BLACK 1998](#).

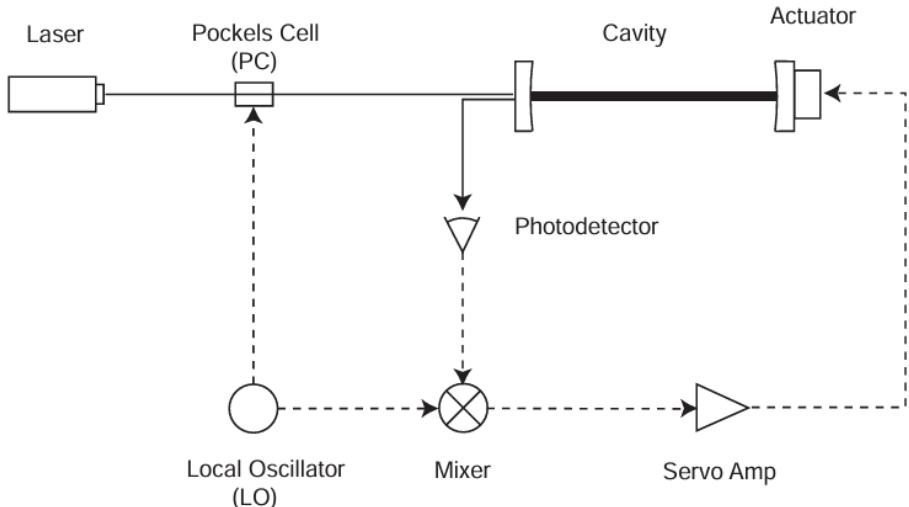


FIGURE 1 – schéma représentant La PDH. L'ont peut voir la Pocket celle(pour nous le modulateur électro-optique),la cavités(notre interféromètre), les composants qui seront remplacé par la carte(l'oscillateur et le mixer), la source laser,le photodetector(pour nous une photodiode) et enfin le servoAmp(soit un correcteur PID)

### 3 Dispositif Expérimental

Ce qui nous distingue d'une PDH classique c'est l'utilisation de la carte limeSDR-USB. En effet la carte remplace l'oscillateur et le mixer vue dans le schéma de la PDH (fig. 1). Ainsi elle émet le signal modulé, reçoit le signal en sortie de l'interféromètre et contrôle le correcteur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé). Pour le reste les composants restent les mêmes(source laser,photodiode,interféromètre et correcteur PID). Le but est ainsi à terme de réduire la charge de travail et le coup d'un tel montage. On peut alors s'intéresser au matériel nécessaire à l'expérience.

#### 3.1 La carte LimeSDR USB

La LimeSDR-USB (fig. 2) est une plateforme radio logicielle de haute performance conçue pour transformer n'importe quel ordinateur en un émetteur-récepteur multi-standard. Contrairement aux solutions SDR basiques, elle repose sur l'émetteur-récepteur [RF LMS7002M](#) qui lui permet de couvrir un spectre très large allant de 100 kHz à 3,8 GHz. Sa caractéristique majeure réside dans son architecture full-duplex associée à la technologie MIMO(Multiple-Input Multiple-Output), offrant deux canaux d'émission et deux canaux de réception simultanés.

Le flux de données est géré par un FPGA(field-programmable gate array) Altera Cyclone IV qui assure la liaison entre la puce RF et l'interface USB 3.0. Cette connectivité rapide permet de supporter une bande passante instantanée allant jusqu'à 61,44 MHz, suffisante pour manipuler des protocoles exigeants comme la 4G ou le Wi-Fi. La précision du signal est garantie par un échantillonnage sur 12 bits, offrant une dynamique de signal robuste.

On note que pour le montage final, cette carte pourrait être limitée. En effet, l'idéal serait d'atteindre des fréquences autour de 8 à 10 GHz, ce qui est impossible avec le matériel actuel., elle remplace :

1. Le générateur de fonctions RF (modulation locale).
2. Le mélangeur analogique (démodulation).
3. Le contrôleur PID(Proportionnel, Intégral, Dérivé).

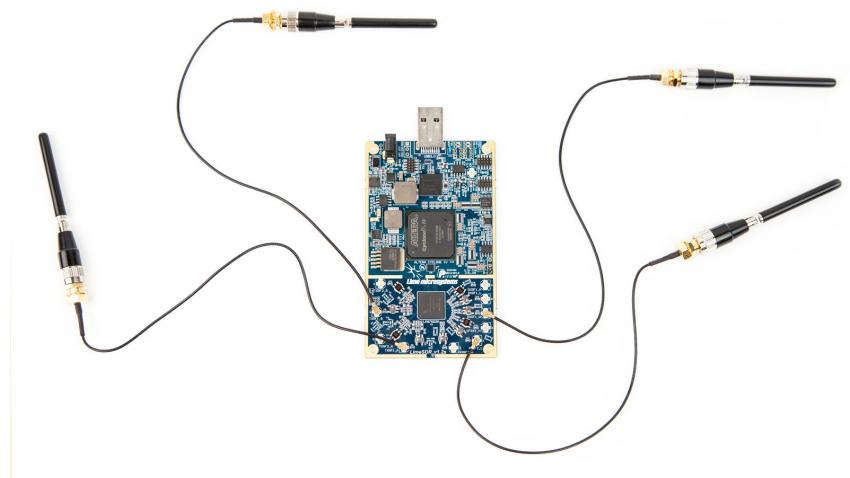


FIGURE 2 – Carte LimeSDR-USB.

On peut ainsi voir sur le schéma ci dessous (fig. 3) que la carte limesdr-usb est à la fois à l'entrée de L'EOM et reçoit aussi un signal de la photodiode pour ensuite envoyer des instructions au PID. On note la présence d'un autre signal optique qui n'est rien d'autre qu'un signal expérimental d'un autre montage. En effet notre expérience n'a en définitif pour but non pas d'être indépendante mais d'agir en parallèle d'une autre qui elle, a besoin de la stabilité apporté par notre montage. Pour distinguer les deux signaux optiques on les envoie donc à deux différentes longueurs d'onde puis on les discrimine à l'aide des filtres présents en sortie d'interféromètre. On notera que le filtre présent en sortie D'EOM sert à sélectionner uniquement la longueur d'onde que l'on souhaite utiliser pour notre opération.

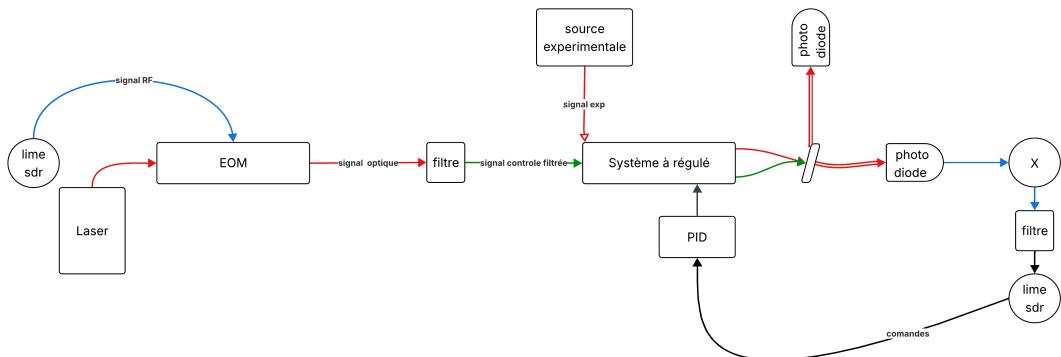


FIGURE 3 – Architecture globale du système d'asservissement utilisant la LimeSDR.

## 3.2 Le modulateur électro-optique (EOM)

Pour appliquer la modulation de phase à la lumière issue du laser , nous utilisons un modulateur au Niobate de Lithium ( $LiNbO_3$ ) **Thorlabs LN65S-FC**. Or son utilisation doit se faire avec les contrainte suivante :

- **Bande passante** : Jusqu'à 10 GHz.
- **Tension demi-onde ( $V_\pi$ )** : Environ 7 V. Cela signifie que pour obtenir une modulation efficace, le signal RF issu de la LimeSDR doit avoir une amplitude suffisante. Si l'on à une amplitude inférieure à 7V nous ne pourrons pas exploité toutes la plage de modulation (nous ne pourrons pas dépassé un certain déphasage).

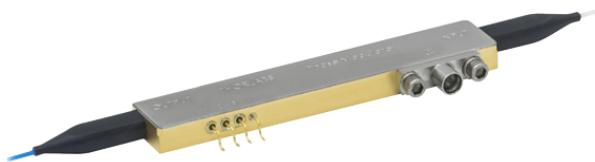


FIGURE 4 – Thorlabs LN65S-FC.

## 3.3 Logiciels utilisés

On utilise pour contrôler la carte le logiciel **GNU Radio**. Celui-ci s'avère très pratique car il ne nécessite pas l'utilisation directe d'un langage de programmation. En effet, la « programmation » de la carte se fait à travers un « flow graph », un ensemble de blocs ayant chacun une fonction précise. On peut en voir un exemple sur la Figure 11.

Un autre logiciel, **Zadig**, est utilisé pour mettre à jour les pilotes de la carte. Son rôle peut sembler anecdotique car il n'est en théorie utilisé qu'une seule fois, mais il faut noter que d'autres logiciels, comme SDRangel, utilisent des pilotes incompatibles avec GNU Radio. Il faut donc s'assurer avant l'utilisation que les pilotes installés sont les bons, et c'est là que Zadig intervient.

## 4 Mise en œuvre et méthodes

Cette partie se concentrera sur la création du signal modulé. En effet, faute de temps, je n'ai pas eu l'occasion de rassembler tout le matériel nécessaire pour réaliser la manipulation complète. Nous nous focaliserons donc sur la prise en main de la carte ainsi que des différents logiciels. On pourra souligner que le travail effectué pourrais être complété par l'équipe et utilisé dans différentes expériences.

### 4.1 Prise en main de GNU radio

C'est la toute première tâche que je me suis assignée : comprendre le logiciel afin d'être le plus efficace possible lors du futur maniement de la carte. Heureusement, le logiciel GNU Radio étant open source, la documentation le concernant est assez conséquente. Je recommande d'ailleurs les tutoriels proposés sur le [wiki](#) qui sont de très bon conseil.

Dans un premier temps je me suis alors lancé dans le projet de réalisé une autre modulation que la modulation de phase la modulation AM. Elle à le mérite d'être plus simple à mettre en place et donc un étape parfaite avant de commencé la modulation final que elle sera en phase. On obtiens alors le flow graph ci dessous (fig. 11). Dans ce lequel, on peut observer les manipulations du signal de base (addition, multiplication, etc.), ainsi que les différents blocs de mesure comme *GUI Time Sink*, semblable à un oscilloscope. On note aussi le bloc *GUI Frequency Sink* qui effectue une transformée de Fourier rapide (FFT) du signal reçu. On obtient ainsi pour une porteuse à 100MHz les résultats présent sur la (fig.5) où l'on voit bien à gauche le signal modulé ayant le signal modulant comme enveloppe et à droite La FFT avec les pics à 100MHZ et -100MHz.

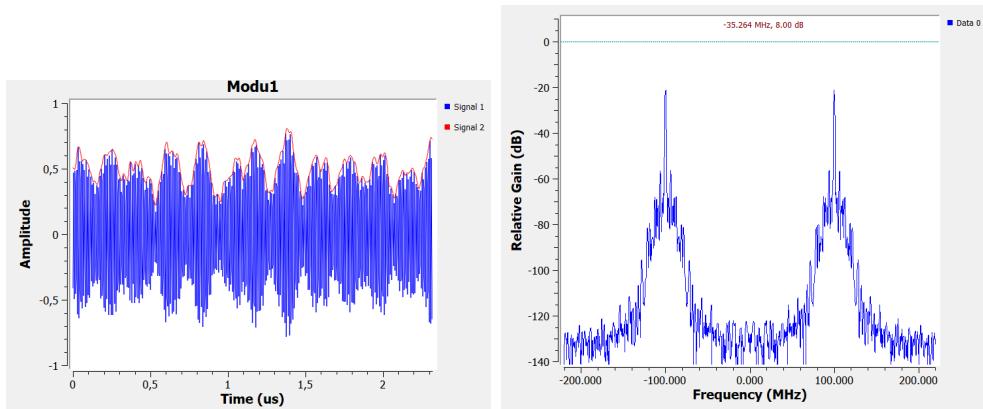


FIGURE 5 – Résultats de la modulation AM temporel à gauche et fréquentiel à droite.

Après avoir réussi à réalisé la modulation AM et à travers compris les grand principe de GNU radio,J'ai put passé à la modulation de phase qui sera celle utilisée pour le signal envoyé à l'EOM. Cette modulation est crée sur GNU radio à l'aide du bloc [phase mod](#) qui traite le signal modulant avant que l'on ne le multiplie avec la porteuse pour obtenir le signal modulé. Le flow graph correspondant est présenté en (fig.12).

## 4.2 Prise en main de la carte

Concernant la prise en main, quelques problèmes de pilotes ont été rapidement résolus grâce à Zadig. Pour communiquer avec la carte depuis GNU Radio, on utilise le bloc *Soapy LimeSDR Sink* qui récupère un signal complexe pour l'envoyer à la carte via le port TX1\_1. On peut alors émettre des signaux vers un oscilloscope (fig. 6).

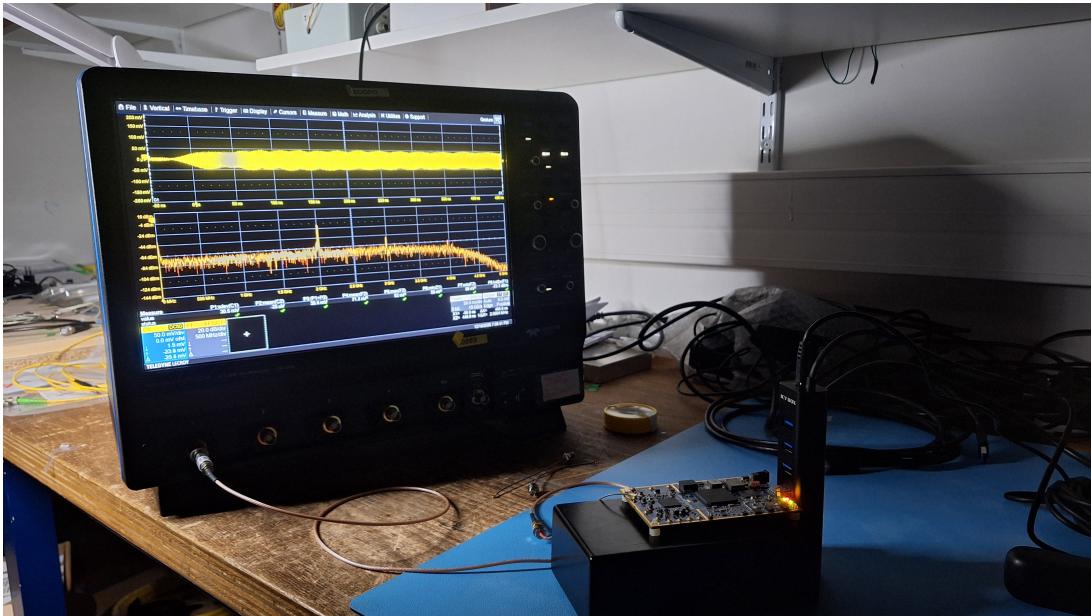


FIGURE 6 – Montage de test avec Oscilloscope ayant une bande passante d’1GHz

## 5 Résultats et Analyse

### 5.1 Premières émissions

Les premiers tests portent sur la capacité de la carte à émettre les signaux voulus. C'est à dire un amplitude d'au moins 7V le tous au fréquences voulu (autour d'1GHZ ou au moins plus que 200MHz affins de pouvoir récupéré des résultats convenable lors de la futur expérience). On envoie dans un premier temps un simple signal sinusoïdal sans modulation (fig. 7).

À partir de cette manipulation, on peut mesurer l'amplitude du signal délivré en fonction de la fréquence émise. Cette mesure est cruciale car l'EOM nécessite une amplitude suffisante pour fonctionner. Pour cette mesure l'on parcours les fréquences par pas de 10MHz puis l'on prends l'amplitude donné pas l'oscilloscope. Le tout est fait en ayant dans le bloc *Soapy LimeSDR Sink* la valeur de gain à 60 dB. On obtient le graphe suivant (fig. 8) où l'on observe une tendance à la baisse avec l'augmentation de la fréquence, mais aussi des pics correspondant aux fréquences optimales de fonctionnement du montage. On remarque qu'après 300 MHz, l'amplitude chute drastiquement. Cependant le signal est toujours présent seulement son amplitude n'est plus que de quelque  $\mu$ V ce qui est dans notre contexte négligeable. Il est aussi à souligné qu'en dessous de 40MHz le signal est trop distordu afin d'être utilisé dans notre montage. Pour une expérimentation réelle, il serait alors nécessaire d'ajouter un amplificateur de tension en sortie de carte avant

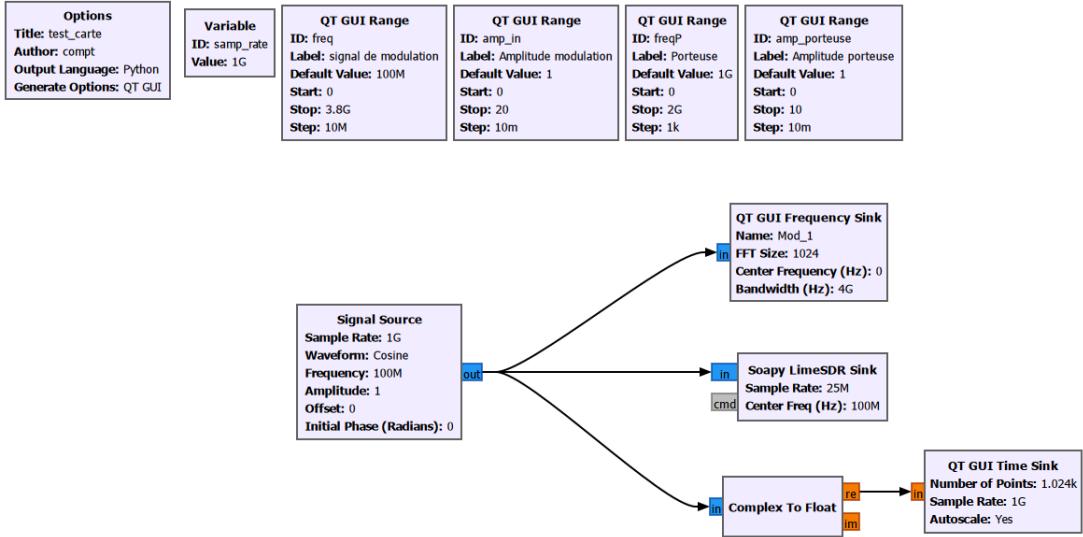


FIGURE 7 – Flow graph de test de la carte(simple émission d'un cosinus).

l'EOM afin de pourvoir atteindre de plus grande fréquence sans perdre trop de potentiel de déphasage.

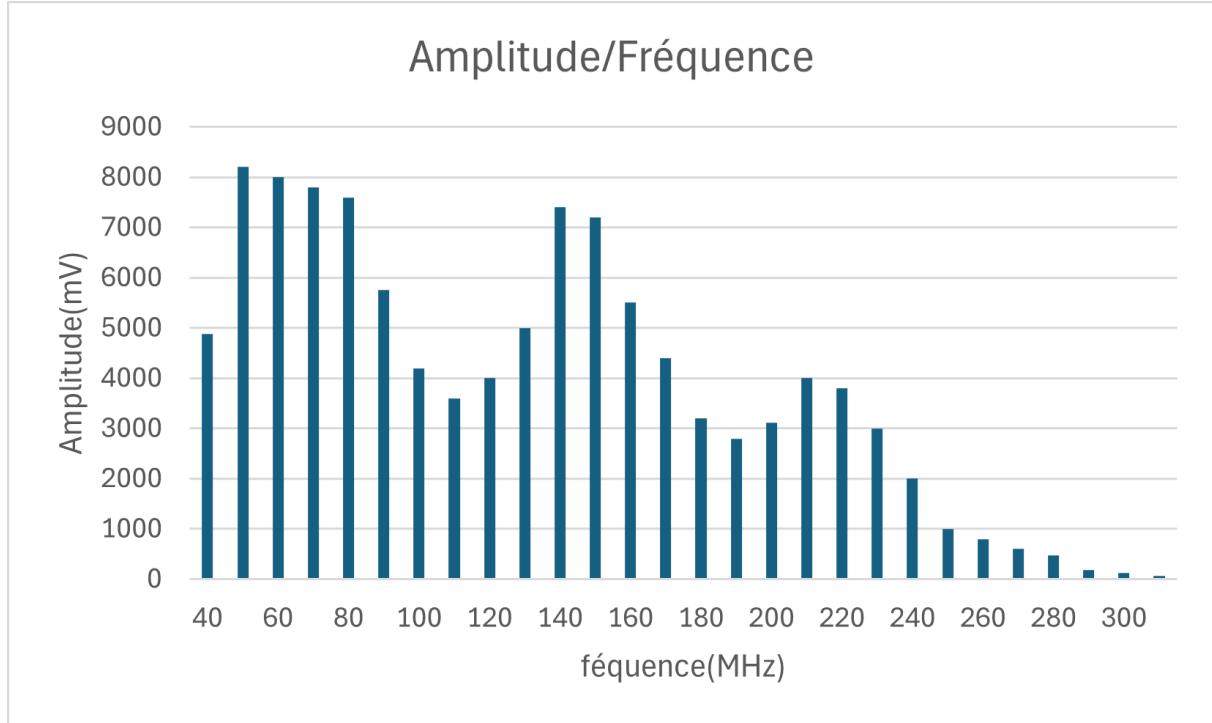


FIGURE 8 – Amplitude du signal émis en fonction de sa fréquence.

## 5.2 Modulation de phase

On passe désormais à l'émission d'un signal modulé en phase(PM)(fig. 12), On à alors résultats suivant (fig. 9). On note cependant que c'est résultats sont issue d'une modulation à basse fréquence(1 voir 2MHz), car pour une modulation dans les centaine de MHz le signal n'est illisible dans le domaine temporel. On distingue alors nettement la modulation

dans le domaine temporelle et les bandes latérales (*sidebands*) sur le spectre (notons la présence d'harmonique venant en partie "caché nos sidebands").

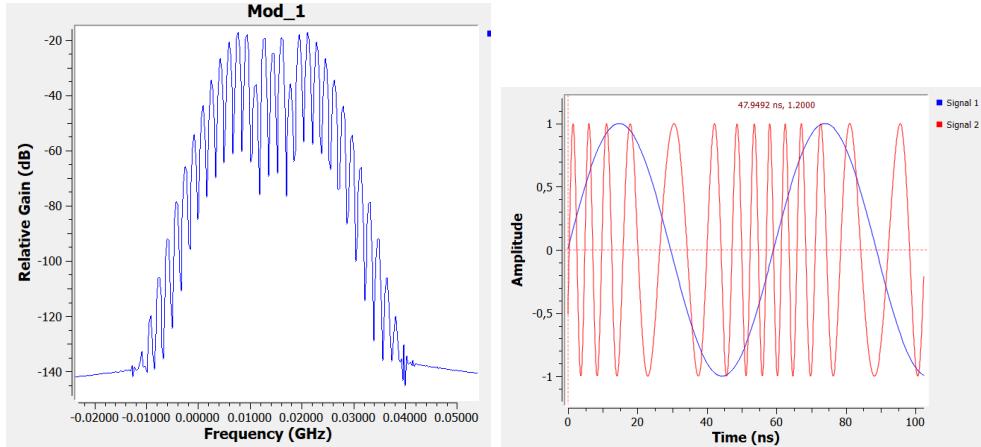


FIGURE 9 – Résultats de la modulation de phase à gauche dans le domaine fréquentiel et temporel à droite.

### 5.3 Simulation du fonctionnement de l'EOM

N'ayant pu expérimenter directement sur l'EOM, j'ai simulé son fonctionnement via un flow graph réalisant une double modulation de phase. Entre les deux, j'ai placé un filtre passe-bande pour ne conserver qu'une seule bande latérale de la première modulation (fig. 13). On distingue les deux étages de modulation et le filtre intermédiaire. L'usage de blocs *Rational Resampler* est ici nécessaire : le filtre passe-bande étant très gourmand en ressources, son taux d'échantillonnage doit être réduit (ici d'un facteur 10) pour permettre le traitement en temps réel.

On obtient la représentation fréquentielle suivante (fig. 10), montrant la porteuse à 3 GHz et ses bandes latérales associées aux fréquences de 2.9GHz et 3.1GHz.

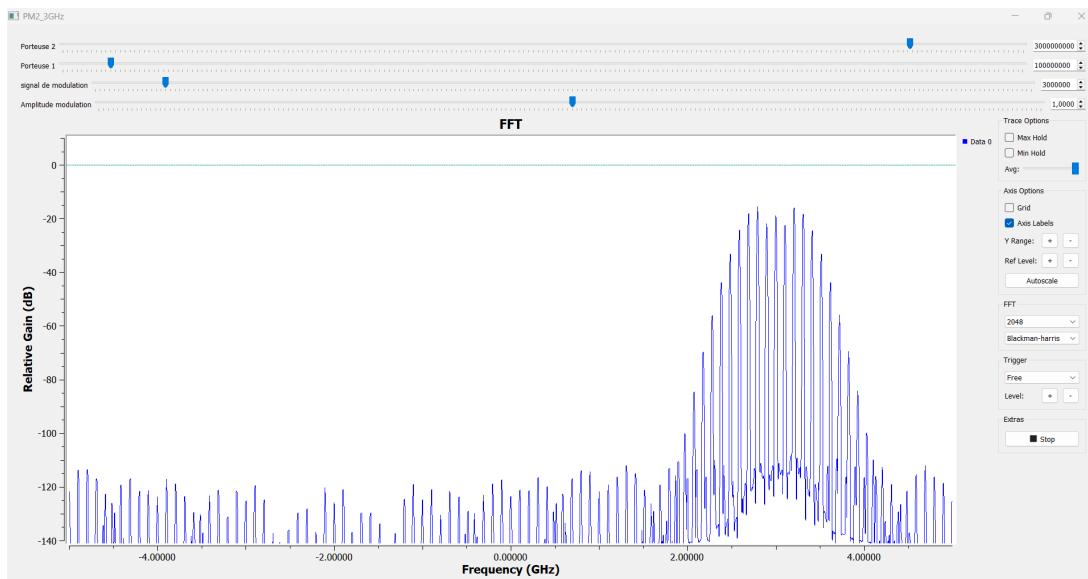


FIGURE 10 – FFT du signal modulé 2 fois en phase.

## 6 Conclusion

Ce tutorat à l'INPHYNI a démontré qu'une solution de radio logicielle performante pourrait constituer une alternative viable pour l'instrumentation de laboratoire. Les cartes SDR offrent une flexibilité avancée pour tester diverses configurations d'émission à moindre coût. On notera toutefois l'absence d'application réelle sur le montage optique par manque de temps, ainsi que les limitations matérielles de la LimeSDR. La faible amplitude en haute fréquence est un obstacle qui pourrait être contourné par l'utilisation de cartes plus spécialisées ([ici](#)) ou par une amplification externe.

## Références

- BLACK, Eric (1998). *Notes on the Pound–Drever–Hall Technique*. Rapp. tech. LIGO-T980045-00-D. Internal working note. Pasadena, CA : LIGO Project, California Institute of Technology.
- MELALKIA, Mohamed F. et al. (déc. 2022). « Plug-and-play generation of non-Gaussian states of light at a telecom wavelength ». In : *Opt. Express* 30.25, p. 45195-45201. DOI : [10.1364/OE.465980](https://doi.org/10.1364/OE.465980). URL : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-30-25-45195>.

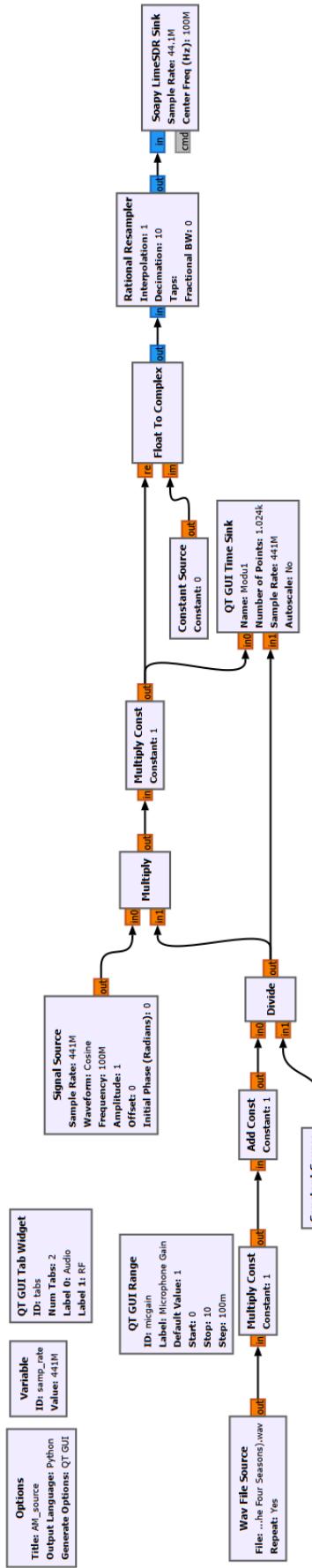


FIGURE 11 – Exemple de flow graph (ici une modulation AM).

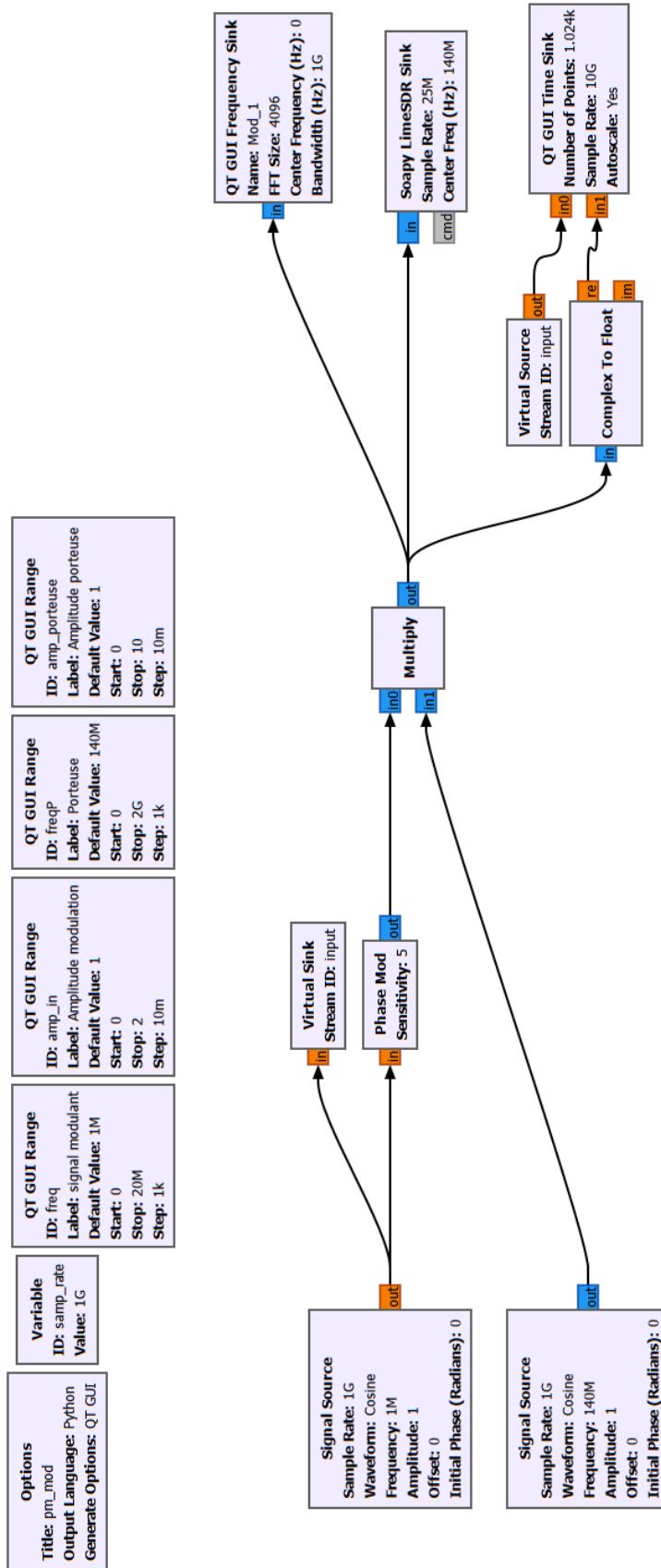


FIGURE 12 – Flow graph de la modulation en phase.

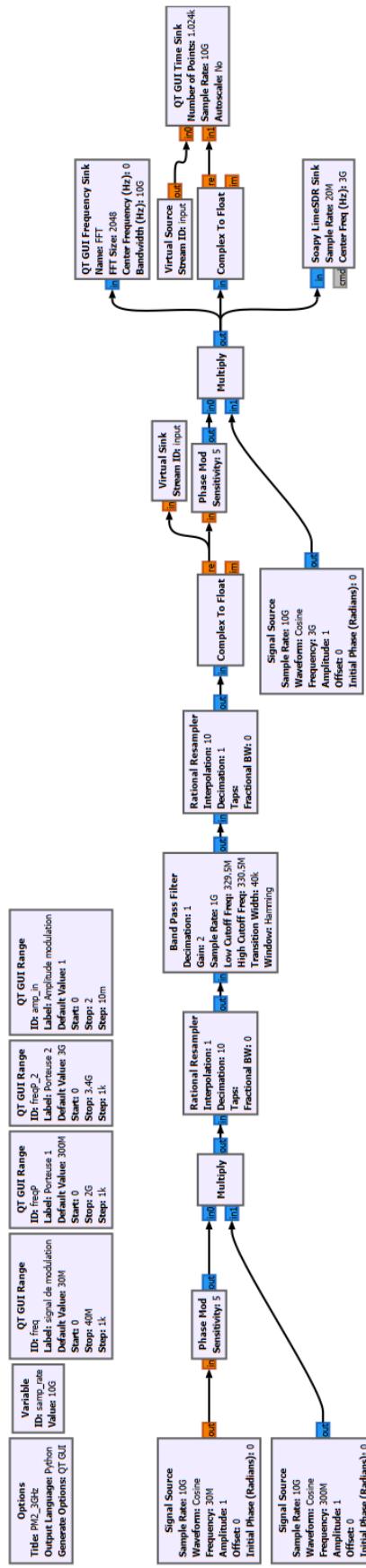


FIGURE 13 – Flow graph de double modulation de phase.