

¹ Enseignant-chercheur à l'ENS Paris-Saclay, DER SIEN et au laboratoire SATIE (UMR 8029 CNRS / ENS Paris-Saclay)

Cette ressource fait partie du N° 120 de La Revue 3EI du 3^{ème} trimestre 2026.

La radio-logicielle (SDR en anglais pour Software Defined Radio) est un système de transmission de l'information utilisant une onde radioélectrique comme support de transmission. Du point de vue des signaux échangés entre les antennes d'émission et de réception, rien ne distingue les signaux issus d'un système SDR de ceux d'un système radio « conventionnel », ce sont les mêmes signaux répondant aux mêmes normes. La différence fondamentale réside dans leur élaboration et dans leur traitement. Si pour les systèmes de radio usuels, ces opérations sont réalisées avec des composants analogiques : amplificateur, multiplieur, additionneur, soustracteur, filtre, boucle à verrouillage de phase, oscillateur..., elles sont effectuées numériquement dans les systèmes SDR.

Pour cela, les systèmes SDR sont composés d'une chaîne d'acquisition numérique, d'une bibliothèque de programmes de traitement numérique du signal et de quelques composants analogiques permettant la réception et/ou l'émission physique de signaux hautes fréquences.

Cet article, qui vise à présenter et illustrer les principes de fonctionnement de la radio-logicielle, est organisé en quatre parties. La première partie s'attachera à présenter l'architecture matérielle permettant la réalisation physique d'un système SDR. Dans une deuxième partie, nous présenterons les composants logiciels nécessaires à sa mise en œuvre et en particulier la suite logicielle GNU Radio. Enfin, en section trois et quatre, et puisque de radio il s'agit, nous présenterons deux exemples de réalisation : l'un relatif à la radio FM stéréo, le second portant sur la radio DAB+.

1 - Radio-logicielle : les équipements

1.1 - Présentation

Les premières manifestations d'intérêt pour la radio-logicielle datent des années 1970, mais les équipements disponibles ne permettaient pas de les mettre en œuvre. Il aura fallu attendre pour cela le début des années 80 et la commercialisation des premiers DSP (DSP pour Digital Signal Processor) : le TMS320C10 de Texas Instrument n'est sorti qu'en avril 1983, approximativement en même temps que les premiers FPGA.

C'est en 1990 que le terme « software radio » apparaît pour la première fois dans une publication scientifique [1]. En 1992, suite au lancement du programme de recherche européen RACE pour la définition du système de téléphonie UMTS (3G), des travaux de recherche portant explicitement sur la radio-logicielle sont menés. En effet, sachant que les normes 2G et 3G allaient coexister, l'objectif était de déterminer s'il fallait concevoir des téléphones intégrant deux équipements distincts, l'un pour la 2G et le second pour la 3G, ou si une plateforme matérielle commune,

reconfigurable et reprogrammable, pouvait s'envisager. Malheureusement, la complexité numérique requise est telle que même actuellement, cette solution reste matériellement impossible.

Toutefois, les progrès réalisés en matière de DSP, FPGA, Convertisseur Analogique-Numérique (CAN) et Numérique-Analogique (CNA) sont tels que beaucoup des systèmes de radio peuvent être réalisés à partir d'une solution radio-logicielle, et non plus seulement avec un équipement totalement analogique.

1.2 - Acquisition, traitement du signal et restitution numérique du signal

Avant d'envisager un traitement numérique, il est impératif de transformer le signal en une suite d'échantillons numériques, c'est-à-dire une suite de nombres. Pour cela on met en œuvre une chaîne d'acquisition numérique du signal dont le principe est présenté figure 1.

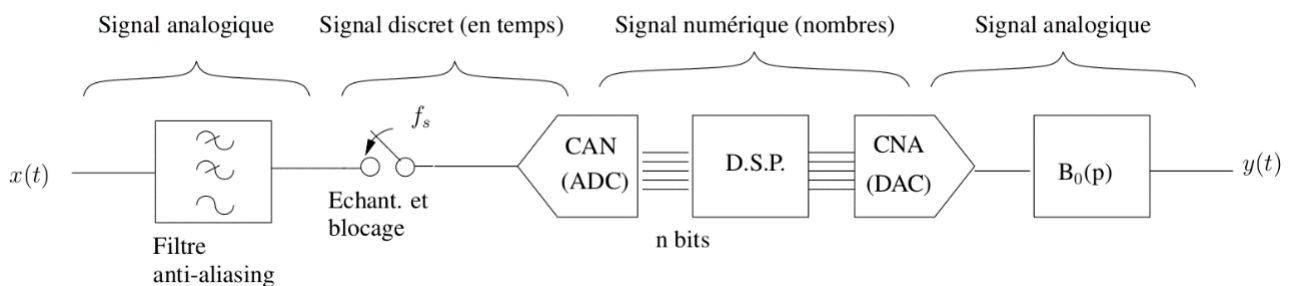


Figure 1 : Schéma d'une chaîne d'acquisition numérique de l'information

Le signal d'entrée, $x(t)$, passe au préalable à travers un filtre passe-bas, garantissant que le spectre de $x(t)$ est de type passe-bas. Le signal filtré est ensuite échantillonné temporellement à la fréquence f_s , puis ces échantillons sont convertis en nombres codés sur n bits par un CAN (pour Convertisseur Analogique-Numérique). Cette série de nombres est ensuite traitée par un processeur dédié : un DSP. Dans le cas où la carte d'acquisition permet également la restitution d'un signal analogique, le DSP est suivi d'un CNA (pour Convertisseur Numérique-Analogique) et d'un bloqueur (ou interpolateur) d'ordre zéro. Le schéma de principe représenté figure 1 est typiquement celui de la carte son de la plupart des ordinateurs.

Les deux paramètres permettant de choisir une carte d'acquisition sont la fréquence d'échantillonnage, f_s , et le nombre de bits, n .

Si l'on suppose que le spectre de $x(t)$ est de type passe-bas, strictement borné par une fréquence maximale f_{max} , la fréquence d'échantillonnage, établie d'après le théorème de Shannon-Nyquist [2][3] est $f_s \geq 2f_{max}$.

Le nombre de bits n est quant à lui déterminé par le rapport signal sur bruit de quantification : $RSB_q = 6n + 1,8 [dB]$.

Des fréquences d'échantillonnage allant jusqu'à 10 GHz sont maintenant possibles, de même qu'un nombre de bits allant jusqu'à $n = 32$ possible (typiquement $n \leq 16$).

1.3 - Modulateur et démodulateur

Afin de pouvoir émettre une onde radioélectrique, les systèmes radio utilisent une tension de forme sinusoïdale, appelée porteuse. Appelons $e(t)$ cette porteuse avec :

$$\begin{aligned}
 e(t) &= a(t) \cos(\underbrace{2\pi f_c t + \phi(t)}_{\phi_i(t)}) \quad (1) \\
 &= \underbrace{a(t) \cos(\phi(t))}_{I(t)} \cos(2\pi f_c t) - \underbrace{a(t) \sin(\phi(t))}_{Q(t)} \sin(2\pi f_c t)
 \end{aligned}$$

La porteuse $e(t)$ peut également s'écrire sous forme complexe [3]:

$$\begin{aligned}
 e(t) &= \text{Re}(a(t) \cdot \exp(j\phi(t)) \cdot \exp(j2\pi f_c t)) \\
 &= \text{Re}((a(t) \cos(\phi(t)) + ja(t) \sin(\phi(t))) \cdot \exp(j2\pi f_c t)) \\
 &= \text{Re}((I(t) + jQ(t)) \cdot \exp(j2\pi f_c t)) \quad (2)
 \end{aligned}$$

avec :

- $a(t)$ l'amplitude instantanée de la porteuse,
- $\phi_i(t)$ la phase instantanée de la porteuse,
- f_c la fréquence de la porteuse,
- $\phi(t)$ le terme de modulation angulaire,
- $I(t)$ le signal en phase avec la porteuse (porté par $\cos(2\pi f_c t)$),
- $Q(t)$ le signal en quadrature avec la porteuse (et porté par $\sin(2\pi f_c t)$)

Suivant l'équation (2), Les composantes en phase et en quadrature, $I(t)$ et $Q(t)$, peuvent se représenter dans le plan complexe, voir figure 2.

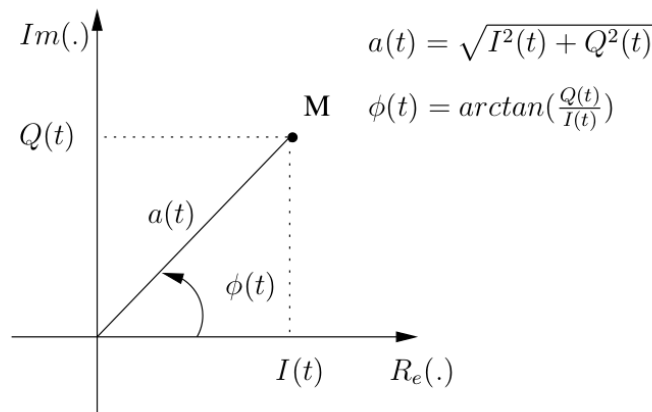


Figure 2 : Représentation dans un plan complexe des voies $I(t)$ et $Q(t)$

Il est à noter que, d'après l'équation (1), $I(t)$ est portée par la porteuse $\cos(2\pi f_c t)$, alors que $Q(t)$ est portée par $-\sin(2\pi f_c t)$, la « porteuse en quadrature », du fait de son déphasage de $\pi/2$ avec $\cos(2\pi f_c t)$. Cette remarque est importante car d'un point de vue réalisation, les Oscillateurs Locaux (OL) savent produire des tensions sinusoïdales telles que $\cos(2\pi f_c t)$ et/ou $\sin(2\pi f_c t)$, mais en aucun cas la tension complexe $\exp(j2\pi f_c t)$ de l'équation (2).

La figure 3 présente un exemple de réalisation de modulateur IQ.

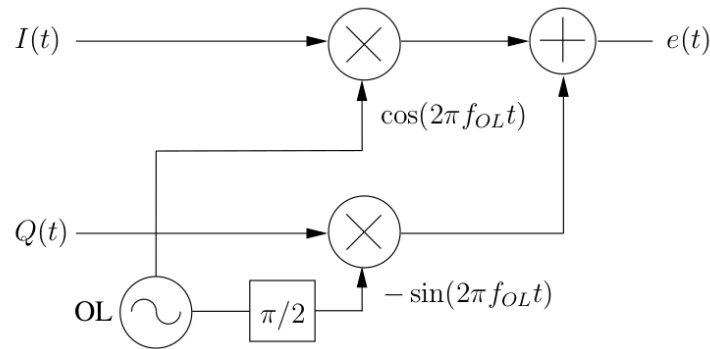


Figure 3 : Principe d'un modulateur I Q

Moduler la sinusoïde porteuse consiste à modifier son amplitude et/ou sa phase instantanée au rythme du message à transmettre. Quand ce message, dont les variations sont lentes devant f_c , modifie légèrement la porteuse, on dit qu'il module la porteuse et on l'appelle modulant [4].

Dans le cas où c'est l'amplitude instantanée $a(t)$ qui est modulée et que $\phi(t) = \phi_0$ reste constante, on parle d'une modulation d'amplitude (AM). Dans le cas où le modulant fait évoluer $\phi(t)$ et que $a(t) = a$ reste constante, on parle de modulation angulaire, modulation dont font partie la modulation de fréquence (FM) et la modulation de phase. Dans le cas des modulations MAQ, le modulant agit à la fois sur $a(t)$ et sur $\phi(t)$ [5].

La tension $e(t)$ issue de cette modulation (1) et appliquée à l'antenne d'émission, produit une onde électromagnétique de fréquence f_c dont la propagation permet le transport l'information. Cette fréquence porteuse f_c prend typiquement des valeurs comprises entre 87.5 MHz et 108 MHz pour un signal de norme FM (en France), 199.36 MHz pour un signal DAB+ (canal 8C) et au-delà de 1 GHz pour un signal de norme WiFi, 3G, 4G, 5G.

Bien qu'il soit devenu possible de générer directement $e(t)$ à partir d'un signal échantillonné et d'une conversion numérique-analogique, procéder ainsi serait inutilement coûteux. Emettre ainsi un signal WiFi dans la bande des 5 GHz nécessiterait des équipements fonctionnant à $f_s \geq 10$ GHz, ce qui du point de vue du coût n'est pas envisageable.

En revanche, les signaux $I(t)$ et $Q(t)$ de la figure 3, qui permettent de produire n'importe quel type de modulation, occupent une bande de fréquence raisonnable. Ce sont eux qui seront générés par un CAN. Par exemple, la fréquence maximale du modulant d'une modulation de fréquence avoisine $f_{max} \approx 150$ kHz, une fréquence d'échantillonnage $f_s \geq 2f_{max} = 300$ kHz conviendrait pour produire $I(t)$ et $Q(t)$. La transposition en fréquence autour de la fréquence porteuse est réalisée par un multiplieur (appelé mélangeur ou mixer en anglais) et un oscillateur local (OL), comme l'illustre la figure 3.

Inversement, le signal capté par l'antenne de réception, $r(t)$, voir figure 4, pourrait être directement échantillonné et numérisé après amplification par un LNA (Low Noise Amplifier), comme proposé dans [1].

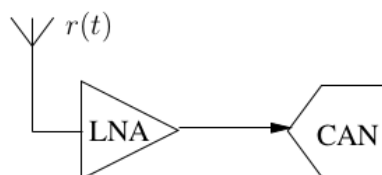


Figure 4 : Récepteur SDR théorique selon [1]

Pour les mêmes raisons et bien que technologiquement réalisable, la solution proposée figure 4 serait trop coûteuse. De fait, ce sont les signaux $I(t)$ et $Q(t)$ de la figure 5 qui seront numérisés.

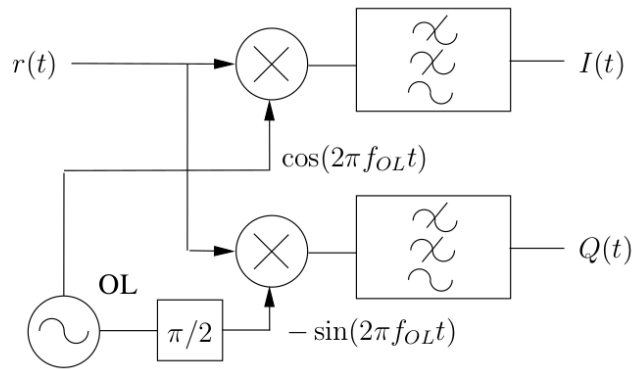


Figure 5 : Principe d'un démodulateur IQ

Les fabricants d'équipements destinés à la radio-logicielle ont adopté cette stratégie : dans le cas d'un récepteur, la carte d'acquisition numérique sera précédée par un démodulateur IQ (figure 5) et suivie d'un modulateur IQ dans le cas d'un émetteur. On notera enfin que l'oscillateur local présent dans ces équipements est un synthétiseur de fréquence ce qui permet de faire varier f_{OL} dans des plages de fréquences parfois importantes. Cette architecture est représentée figure 6.

A ce stade, il est important de souligner le caractère universel de l'architecture matérielle et logicielle adoptée par la radio-logicielle. En effet, dans un équipement analogique, les caractéristiques du modulateur comme celles du démodulateur sont figées de par leur réalisation matérielle. Dans le cas de la radio-logicielle, si la fréquence de l'oscillateur local f_{OL} est modifiable, l'équipement pourra émettre et recevoir tous types de signaux. Par exemple, le même équipement, un dongle RTL-SDR (figure 7), a permis, dans la partie 3 de cet article, de recevoir et de démoduler des signaux dans la bande FM, et des signaux de norme DAB+ dans la partie 4.

Ainsi la radio-logicielle procure une grande agilité tant à la réception qu'à l'émission. Avec des équipements adaptés et si les cartes d'acquisition de I et Q le permettent, il devient possible de tout recevoir mais également de tout émettre, pour peu que les normes en vigueur le permettent.

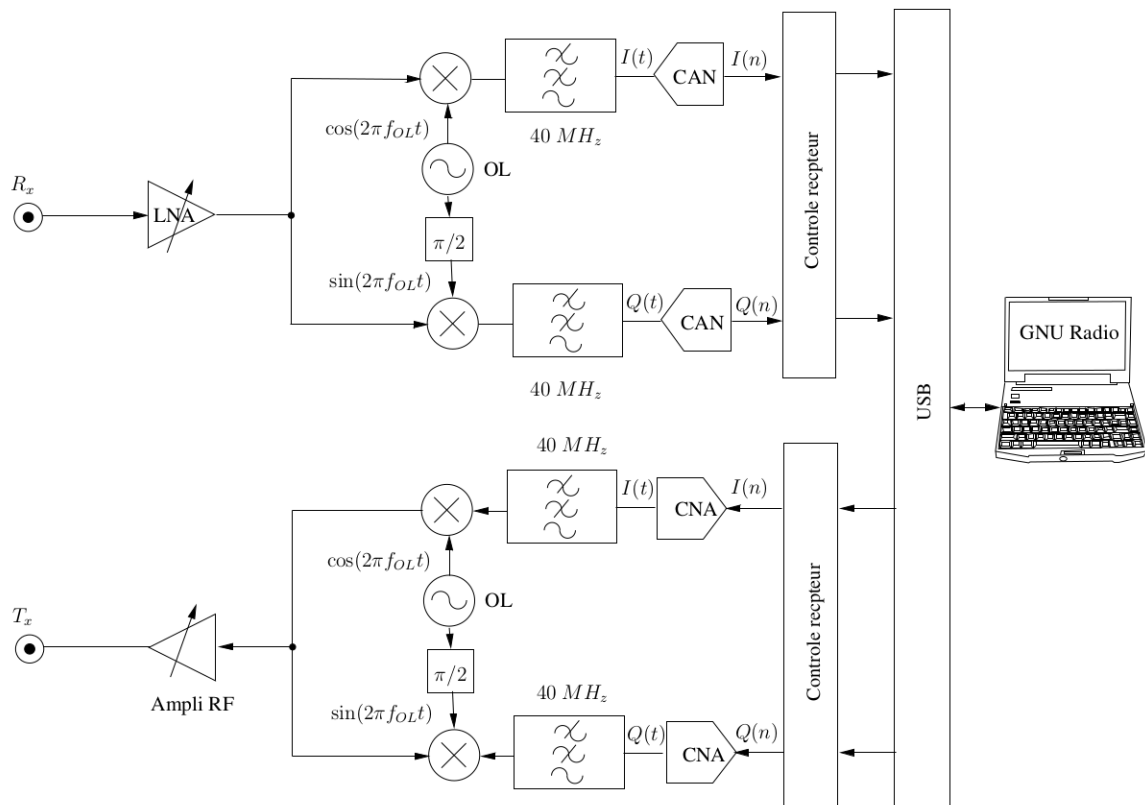


Figure 6 : Principe d'un émetteur/récepteur SDR (USRP B210, ADALM-PLUTO)

1.4 - Exemples de réalisations industrielles

Les équipements de téléphonie mobile moderne fonctionnent suivant les principes de la radio-logicielle, mais leurs paramètres de réglage ne sont ni accessibles ni modifiables. En revanche, certains équipements possèdent un bus d'échange de données (généralement de type USB ou ethernet) qui permet à la fois de les paramétrer : fréquence porteuse f_c , gain des amplificateurs, fréquence d'échantillonnage f_{es} , ainsi que d'échanger des signaux numériques vers des CAN, dans le cas d'un équipement récepteur, ou des CNA dans le cas d'un dispositif émetteur.

La figure 6 schématise l'architecture d'un équipement émetteur/récepteur de type radio-logicielle, il s'agit de l'association des dispositifs représentés dans les figure 1, figure 3 et figure 5.

Très loin d'être représentative de toutes les réalisations matérielles compatibles avec la radio-logicielle, la figure 7 présente plusieurs équipements utilisés à l'ENS Paris-Saclay dans le cadre de travaux pratiques et de montages sur la radio-logicielle.

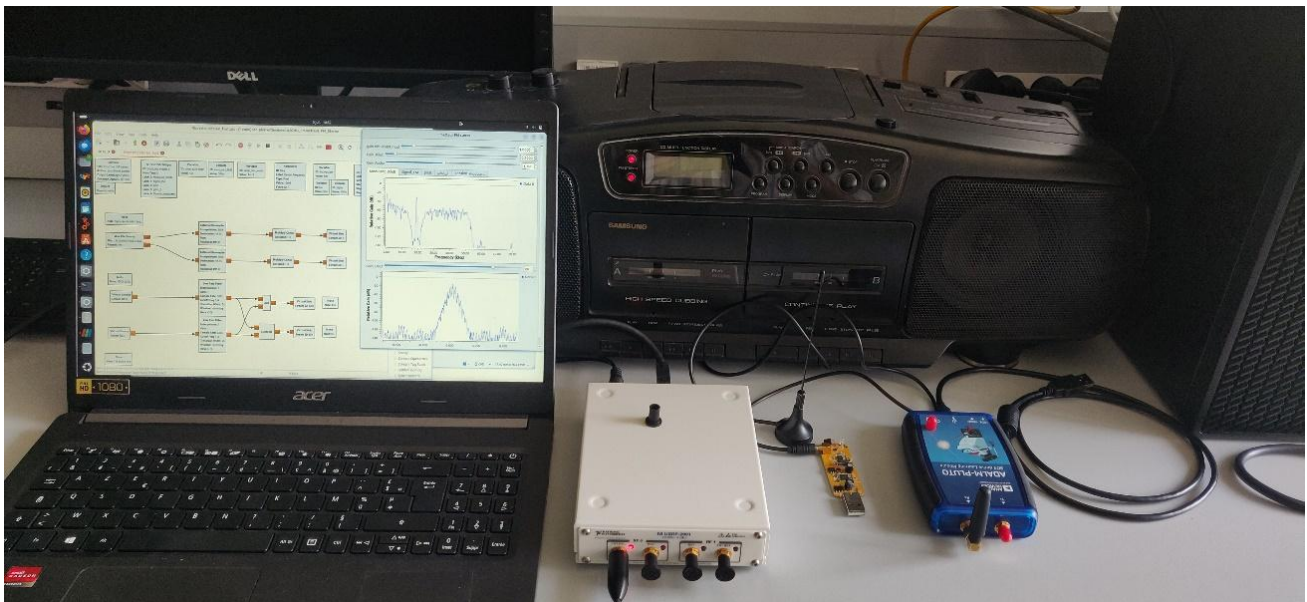


Figure 7 : Quelques équipements de type radio-logicielle utilisables en émission-réception (USRP-B210, ADALM-PLUTO) ou en réception uniquement (dongle RTL-SDR)

Le boîtier USRP B210, fabriqué par ETTUS Research (National Instruments), est un émetteur-récepteur. Celui présent sur la figure 7 peut émettre et recevoir dans la bande de fréquences $f_c \in [70 \text{ MHz} ; 6 \text{ GHz}]$. Il est relié à l'unité de contrôle, dans le cas de la figure 6 à un ordinateur PC, par un câble USB.

Le dongle RTL-SDR est un récepteur fonctionnant dans la bande de fréquences $24 \text{ MHz} - 1766 \text{ MHz}$, ce qui est remarquable compte tenu de son faible prix (approximativement 20 Euros). Il se connecte également à un ordinateur PC grâce à un connecteur USB.

Enfin, le boîtier émetteur-récepteur ADAL-PLUTO Rev C, d'Analog-Devices, permet d'émettre et de recevoir un signal dans la bande $345 \text{ MHz} - 3,8 \text{ GHz}$. Il est relié à un ordinateur PC à l'aide d'un câble USB.

Les caractéristiques principales de ces 3 équipements sont résumées dans le tableau 1.

		f_c	Bp (MHz)	f_s (MS/s)	CAN	CNA	Ps (dBm)
USRP-B210	Rx	70 MHz ; 6 GHz	56	61,44	12 bits	12 bits	
	Tx	70 MHz ; 6 GHz	56	61,44	12 bits	12 bits	> 10 dBm
RTL-SDR	Rx	24 MHz ; 1,766 GHz	2,4	3,2	8 bits		
ADALM-PLUTO	Rx	345 MHz ; 3,8 GHz	20	61,44	12 bits	12 bits	
	Tx	345 MHz ; 3,8 GHz	20	61,44	12 bits	12 bits	7 dBm

Tableau 1 : Caractéristiques des équipements USRP-B210, RTL-SDR et ADALM-PLUTO (Rx pour Receiver, Tx pour Transmetteur)

Il est à noter que ces 3 équipements, d'architectures voisines, réalisent en réception une transposition en Fréquence Intermédiaire (FI) de valeur nulle. Ainsi, le signal capté est directement transposé en bande de base, c'est-à-dire autour de $f = 0$ Hz, sans passage en FI.

2 - Radio-logicielle : la programmation

2.1 - Principes

Les avancées technologiques en matière d'électronique numérique sont telles que remplacer les composants analogiques des équipements radio par des fonctions numériques est devenu possible, tout du moins en grande partie. Mais cette apparente simplicité de mise en œuvre ne doit pas masquer la réelle difficulté qu'impose un tel changement de paradigme : il faut exécuter un programme animant tout cet ensemble, et donc, en premier lieu, il faut l'écrire.

Dans le cas d'un récepteur de type radio-logicielle, il faut configurer les équipements analogiques de réception (amplificateurs, oscillateurs local) à l'aide d'un bus informatique, fixer la fréquence d'échantillonnage, acheminer les flux de données échantillonnées vers des fonctions de traitement numérique du signal et enfin transférer leurs résultats vers des cartes dédiées, telle qu'une carte son d'ordinateur par exemple. De tels programmes sont souvent écrits en langage C/C++, en Python, voire en assembleur pour certains DSP. Ils intègrent les drivers des différents équipements matériels ainsi que des bibliothèques de programmes mettant en œuvre des algorithmes de traitement numérique du signal. Il y a peu, l'écriture et la mise au point de tels exécutables étaient réservées à des spécialistes en informatique et en électronique numérique.

Fort heureusement, des environnements de développement graphiques ont permis d'alléger la programmation de tels systèmes. Les équipements matériels d'entrée sortie, les fonctions mathématiques, les outils de visualisation (oscilloscope, analyseurs de spectres, ...) se transforment en composants logiciels faciles à paramétrer et à associer. Ainsi, la connectivité entre équipements devient intuitive et la programmation informatique quasi-transparente.

Parmi ces outils de développement graphique et permettant de réaliser une « radio-logicielle », nous pouvons citer Simulink, fonctionnant avec MATLAB, LabVIEW de National Instruments et GRC (pour GNU Radio Companion) fonctionnant avec GNU Radio. C'est l'outil GRC (et GNU Radio) que nous présenterons et utiliserons dans la sous-section suivante.

2.2 - GNU Radio

Le projet GNU est un projet informatique dont les premiers travaux ont été réalisés en janvier 1984 par Richard Stallman afin de développer le système d'exploitation GNU. Le projet GNU perdure et développe maintenant des logiciels libres, en plus de systèmes d'exploitation tel que GNU/Linux.

Dédié à la radio-logicielle, GNU Radio est une boîte à outils de développement regroupant des logiciels libres. Cette boîte à outils contient des blocs logiciels de traitement du signal destinés à la réalisation de système radio. GNU Radio peut être utilisé avec du matériel radiofréquence (RF) externe afin de créer des radios logicielles, ou sans matériel afin de réaliser des simulations.

A cette boîte à outils est associée l'environnement de développement graphique GNU Radio Companion (GRC), permettant d'assembler simplement ces blocs. L'éditeur graphique GRC est écrit en Python. Les blocs de calcul de GNU Radio sont en revanche majoritairement écrits en C/C++, ce qui leur confère une plus grande rapidité de calcul. Lorsque le flowgraph (voir figure 12) est exécuté, GRC génère automatiquement un script Python : *top_block.py*, sauvegardé dans le répertoire de travail, qui instancie les blocs et lance le traitement. Il est à noter qu'il est possible d'exécuter directement *top_block.py* avec Python sans avoir à réouvrir GRC.

L'étape préliminaire à toute mise en œuvre pratique est bien évidemment l'installation de GNU Radio et de GRC. Le site <https://www.gnuradio.org> détaille comment procéder. Un tutoriel, dédiée à l'apprentissage de GRC est accessible sur le site [wiki.gnuradio.org](https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided_Tutorial_GRC) https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided_Tutorial_GRC. Il est à signaler que l'utilisation de GRC est très intuitive et les paramétrages qu'il permet simples à effectuer.

A l'ouverture de du logiciel GRC apparait l'environnement de développement graphique affiché figure 8.

Un premier bloc, en haut à gauche, appelé « Options » permet de fixer les options et les informations générales relatives au projet : titre, auteur, interface graphique utilisateur (ici QT). Le second bloc : « Variable », permet de fixer la variable dont l'identifiant (ID) est *samp_rate*. Cette variable est la fréquence d'échantillonnage à laquelle seront cadencés, par défaut, l'ensemble des blocs du projet. A l'ouverture de tout nouveau projet, *samp_rate* vaut 32 kHz, mais cette variable est bien sur modifiable. La variable *samp_rate* apparait comme paramètre par défaut dans chacun des composants logiciels. Suivant la fréquence à laquelle doit être cadencée ce composant, si nécessaire le paramètre correspondant peut-être modifié en imposant une valeur numérique ou par le biais d'une opération du type *samp_rate/4*, par exemple. Le bandeau vertical situé à droite regroupe l'ensemble des composants logiciels utilisables dans le projet. Ces composants logiciels sont regroupés par thématique : *Instrumentation*, *IQ Correction*, *Coding*, *Filters*, etc. Il est à noter qu'il est possible d'ajouter de nouveaux composants aux composants présents lors de l'installation de GNU Radio. Par exemple, dans la quatrième partie de cet article, nous avons importé le package *gr_dab* afin de réaliser un récepteur radio-logicielle DAB+.

Comme nous l'avons mentionné auparavant, deux types de projets peuvent être mis en œuvre. Dans un premier cas, il peut s'agir d'une simulation pure : les signaux d'entrée sont générés numériquement puis sont traités par de outils de traitement du signal et/ou affichés, avec les composants logiciels de QT GUI du framework GNU QT, par exemple. Une seconde possibilité, la plus motivante, consiste à utiliser des équipements matériels externes tels que, pour les applications radio, les matériels radiofréquence (RF) apparaissant figure 7.

Commençons par un projet de simulation. L'objectif de ce projet est a priori simple : relier un générateur de signaux à un oscilloscope et un analyseur de spectre. Pour cela il faut sélectionner

le générateur de signaux parmi tous les composants logiciels présents (voir tutoriel GRC sur la page wiki de GNU Radio : ce générateur s'appelle *Signal Source*. Une fois positionné dans l'espace de travail la page de projet, il faut sélectionner puis positionner l'oscilloscope : *QT GUI Time Sink* et l'analyseur de spectre *QT GUI Frequency Sink*.

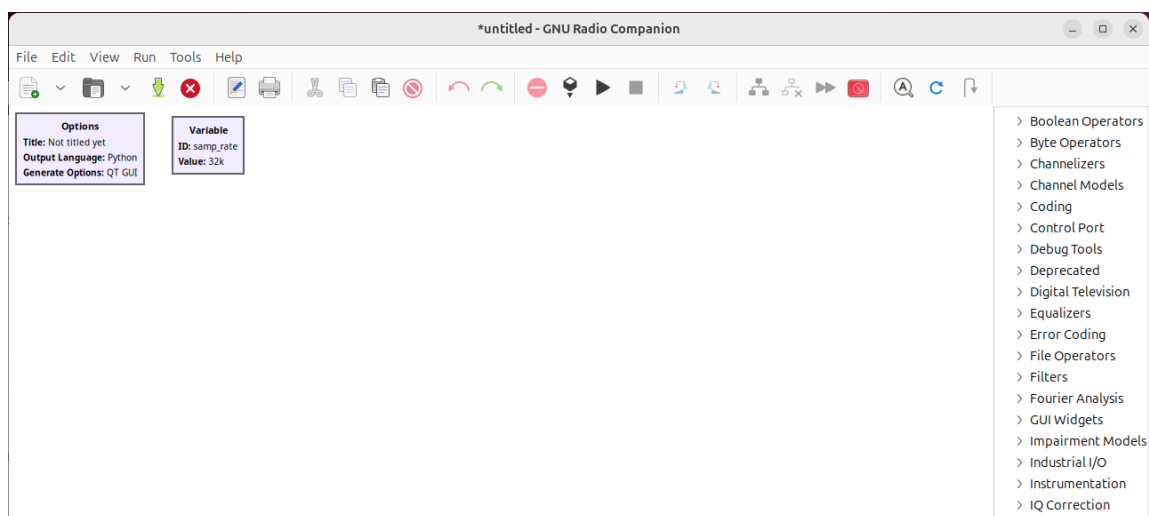


Figure 8 : Principe d'un modulateur IQ et d'un démodulateur IQ

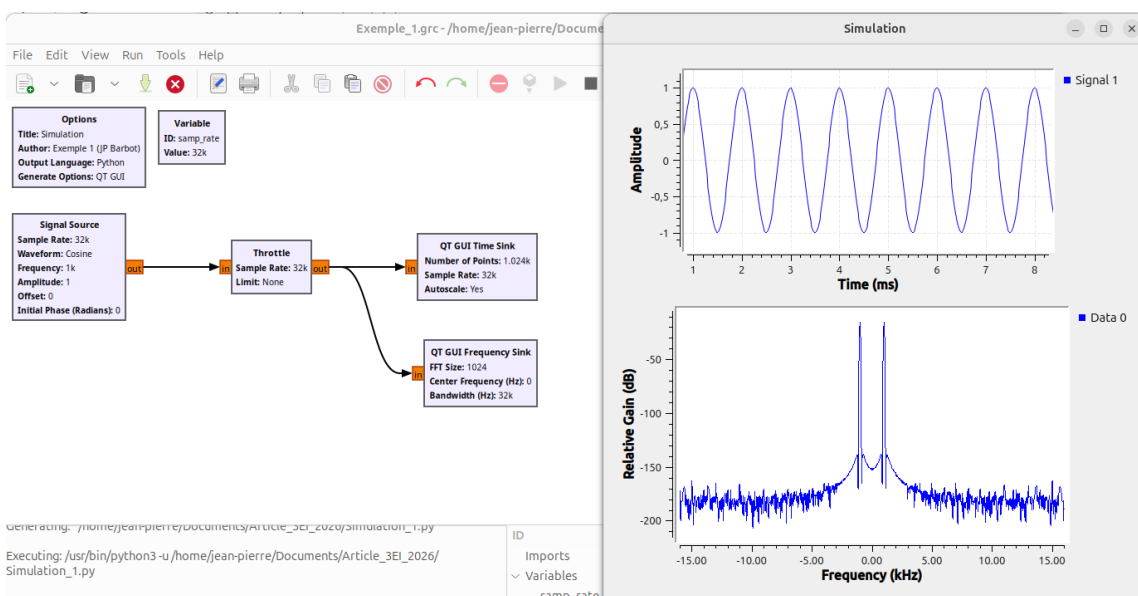


Figure 9 : Simulation d'un générateur de fonction relié à un oscilloscope et un analyseur de spectre à FFT (cas d'une sinusoïde réelle)

Le type des données par défaut de ces 3 blocs est « complex ». Pour obtenir le même résultat de simulation que figure 7, il convient de modifier les types de ces 3 blocs, en remplaçant « complex » par « float ». L'exécution du flowgraph fait apparaître deux fenêtres de visualisations : l'une correspondant à l'oscilloscope et la seconde à l'analyseur de spectre. Ces affichages sont cohérents avec les paramètres du générateur de signal « signal source », à savoir une fonction cosinus de fréquence 32 kHz, d'amplitude 1 Volt échantillonnée à $f_e = 32 \text{ kHz}$.

A noter sur la figure 9 la présence du bloc « throttle ». S'agissant d'une simulation, l'utilisation de ce bloc est nécessaire afin de préserver la puissance de calcul du processeur de votre ordinateur, voir la documentation de GRC pour plus de détail.

On constate figure 9 que le signal est bien de forme sinusoïdale, de fréquence à $f_0 = 1 \text{ kHz}$ comme en attestent l'oscilloscope et l'analyseur de spectre. On illustre ainsi la propriété des signaux réels d'avoir un spectre symétrique en fréquence par rapport $f = 0 \text{ Hz}$.

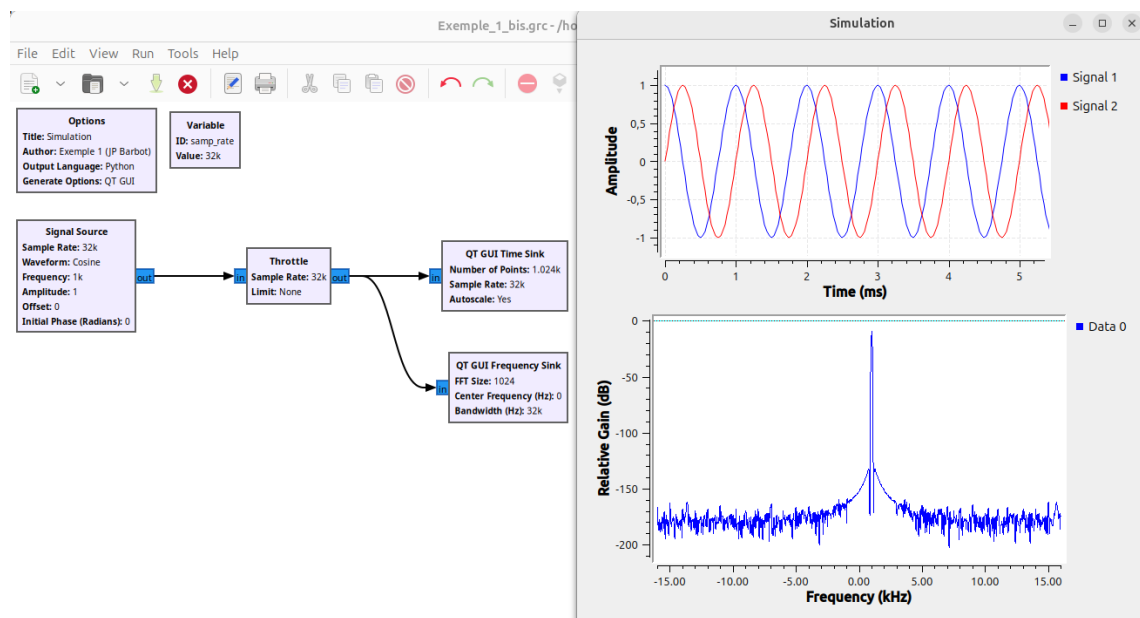


Figure 10 : Simulation d'un générateur de fonction relié à un oscilloscope et un analyseur de spectre à FFT (cas d'une sinusoïde complexe)

Toujours dans le cadre d'une simulation, le signal généré figure 10 est maintenant de type complexe. C'est donc un signal de la forme $\exp(j2\pi f_0 t) = \cos(2\pi f_0 t) + j\sin(2\pi f_0 t)$ avec $f_0 = 1 \text{ kHz}$ qui est simulé, d'où l'apparition de 2 sinusoïdes sur l'oscilloscope et d'une raie unique à $f_0 = 1 \text{ kHz}$ sur l'analyseur de spectre [3].

Le second projet met en œuvre un dongle RTL-SDR (voir sous-section 1.4), c'est à dire un récepteur RF externe. Pour cela, ce dongle, muni de son antenne, est connecté à un des ports USB de l'ordinateur. Dans GRC, ce composant apparaît sous 2 formes : « RTL SDR Source » et « Soappy RTLSDR Source ». Nous avons sélectionné la seconde et nous l'avons reliée à un analyseur de spectre *QT GUI Frequency Sink*. Le paramètre « Center Freq » du dongle a été paramétré à $f_{OL} = 199.36 \text{ MHz}$, fréquence centrale du canal 8C de la radio DAB+. Afin de pouvoir visualiser entièrement de la densité spectrale du signal DAB+, qui occupe une bande de fréquence de 1536 kHz , la variable « samp_rate » a été fixée à 2 MHz , ce qui est possible avec ce composant (voir tableau 1).

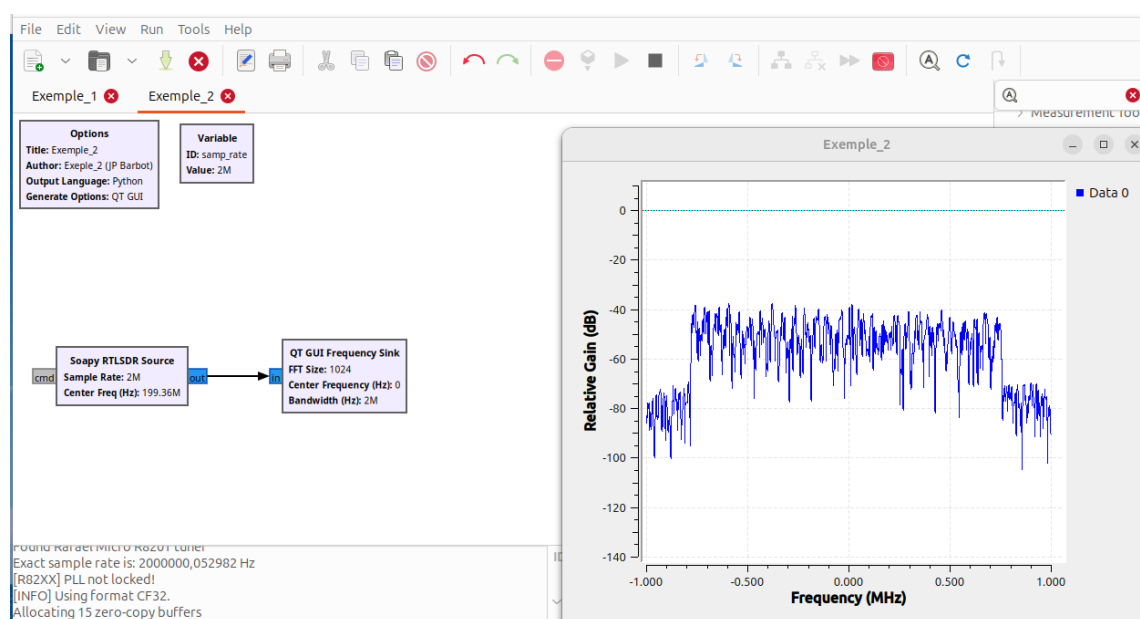


Figure 11 : Principe d'un modulateur IQ et d'un démodulateur IQ

Le flowgraph et le résultat de son exécution apparaissent figure 11. On observe un spectre de forme rectangulaire, typique des modulations numériques OFDM [9] et occupant une largeur de bande de 1536 kHz [10]. Ce spectre est de plus centré sur $f = 0\text{ Hz}$ car $f_{OL} = 199.36\text{ MHz}$.

Ces deux exemples de mise en œuvre de GRC démontrent l'intérêt pédagogique de la radio-logicielle. Il devient en effet simple et quasi-immédiat d'illustrer par des simulations et des mesures sur signaux réels des concepts théoriques compliqués tels que la représentation en enveloppe complexe, le filtrage numérique, la modulation numérique.

Pour approfondir plus avant le concept de radio-logicielle, les références [6], [7], [8] sont d'une grande aide.

3 - Récepteur radio-logicielle FM stéréo

C'est avant tout pour réaliser des radios que la radio-logicielle a été conçue. Nous allons donc dans cette partie mettre en œuvre un récepteur de radio FM.

Pour ce faire nous utiliserons un dongle RTL-SDR comme récepteur et GNU Radio pour opérer les actions de démodulation, de filtrage pour sélectionner la bande de fréquence contenant le signal audio mono (figure 14) et la restitution sonore du signal par la carte audio de l'ordinateur.

Analysons le flowgraph GRC apparaissant figure 12. La variable « samp_rate » a été fixée à $f_s = 1\text{ MHz}$. Le dongle RTL-SDR est paramétré par le bloc « Soapy RTLSDR Source » et le paramètre « Center Freq » du dongle a été fixé à $f_{OL} = 87.8\text{ MHz}$. La sortie du dongle est de type « complex ». En effet, c'est par le traitement du signal $\phi(t)$ apparaissant dans (1) que la démodulation est effectuée. Ainsi ce signal est représenté numériquement sous la forme d'un nombre complexe : $(I(t) + jQ(t))$, voir équation (2).

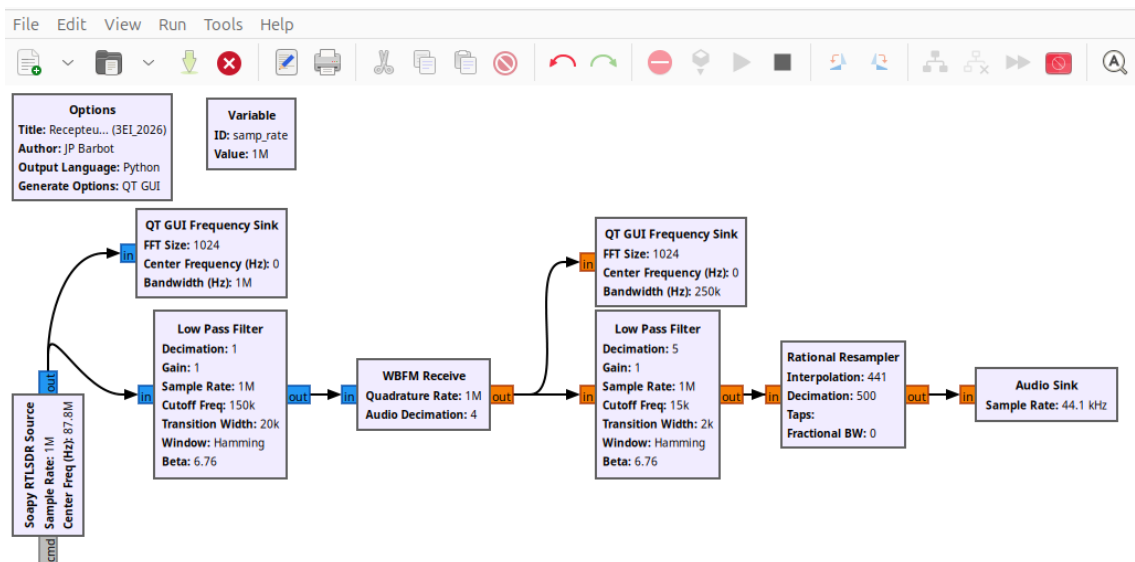


Figure 12 : Flowgraph d'un récepteur FM mono de type radio-logicielle

Ce signal est visualisé avec analyseur de spectre *QT GUI Frequency Sink* et appliqué à l'entrée d'un filtre passe-bas. La fréquence de coupure de ce filtre numérique de type FIR est réglée par « Cutoff Freq » à 150 kHz et sa bande de transition par « Transition Width » à 20 kHz . Après ce filtrage, le signal est appliqué à l'entrée du bloc démodulateur « WBFM Receive » qui réalise la démodulation en fréquence. Ce démodulateur est un démodulateur en quadrature dont le principe de son algorithme sera décrit ci-après. Il est à noter qu'après démodulation, le signal de sortie de ce bloc est de type « float » et qu'une décimation « audio decimation » d'un facteur 4 est effectuée. Cette

décimation consiste à ne conserver qu'un échantillon temporel sur 4, faisant ainsi passer la fréquence d'échantillonnage « Samp_Rate » de 1 MHz à $f_s = 250\text{ kHz}$. La bande de fréquence contenant le signal audio mono étant de 15 kHz , voir figure 14, il suffit de sélectionner cette bande de fréquence avec un filtre FIR de type passe-bas dont la fréquence de coupure « Cutoff Freq » est paramétrée à 15 kHz et la « Transition Width » à 2 kHz . Enfin, il suffit de connecter ce signal filtré à la carte son de l'ordinateur. Cette opération est réalisée par le bloc « Audio Sink » dont le paramètre « Samp_Rate » est fixé à 44.1 kHz .

Les paramétrages de ce flowgraph effectués, il ne reste plus qu'à l'exécuter.

Le résultat obtenu suite à l'exécution du flowgraph figure 12 est tracé figure 13. Le graphique du bas représente le spectre du signal modulé en fréquence présent à 87.8 MHz et le graphe du haut ce même signal démodulé. Il est intéressant de constater que l'on peut clairement identifier dans ce « Signal FM démodulé » le pilote en fréquence à 19 kHz , ainsi que les composantes spectrales du signal RDS, tels que les décrivent la page [Radio FM](#) de wikipedia dont la figure 14 est extraite.

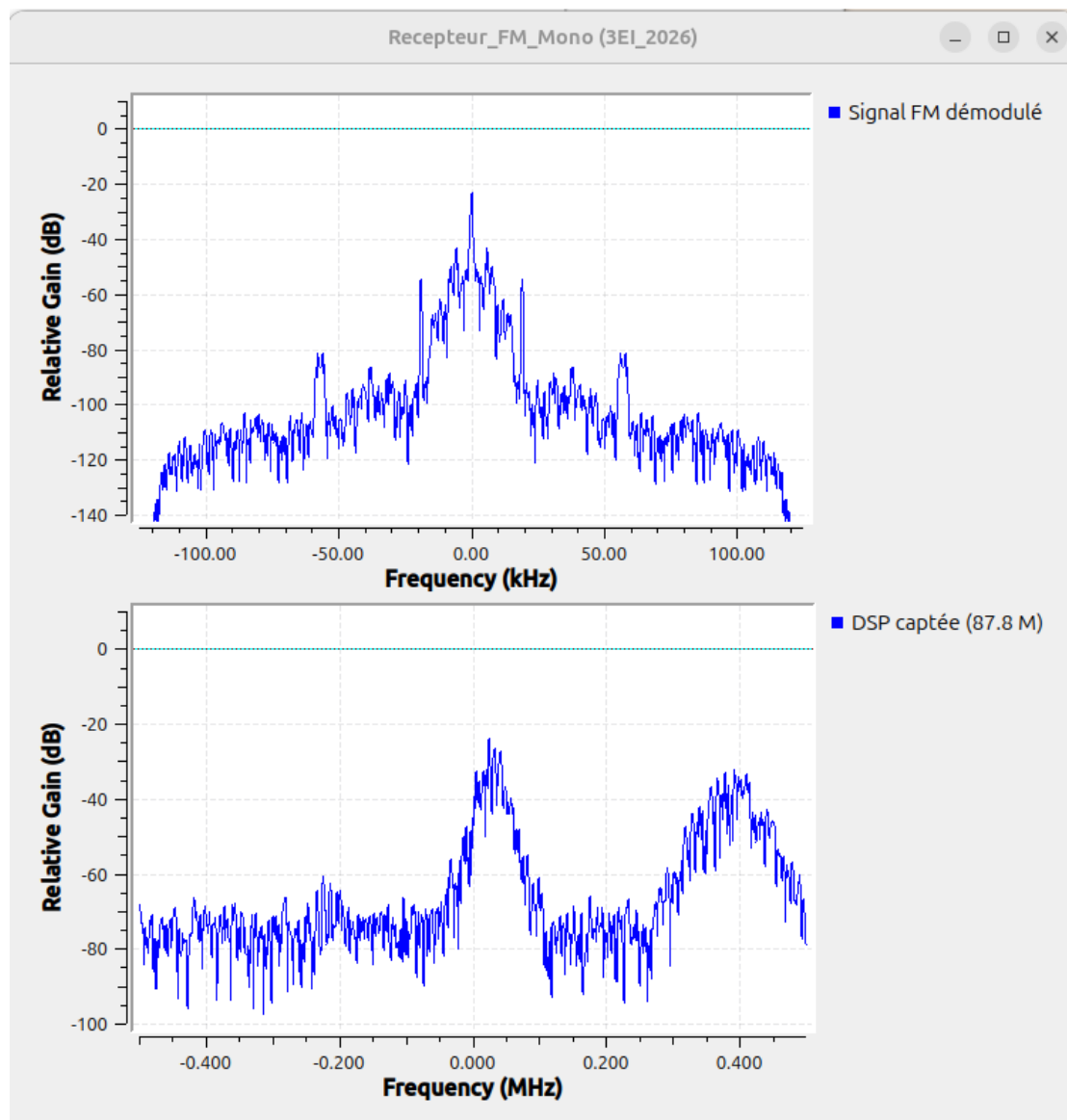


Figure 13 : Spectre d'un signal modulé en fréquence (FM stéréo) capté à 87.8 MHz , graphique du bas, et démodulé, graphique du haut

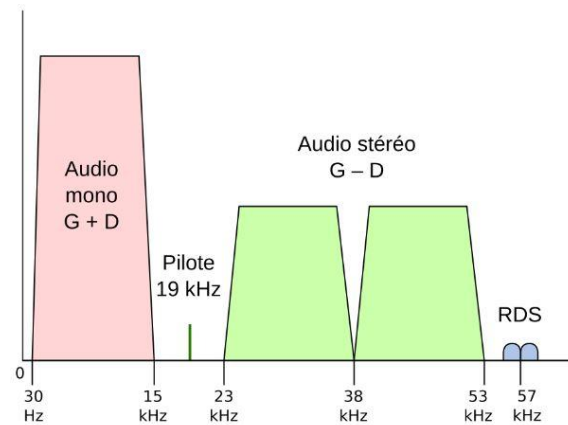


Figure 14 : Principe d'un modulateur IQ et d'un démodulateur IQ

Mais bien plus que la satisfaction de retrouver des signaux tels que prévus par la norme FM, ce qui, plus encore, est enthousiasmant pour les étudiants comme pour leurs enseignants, c'est de pouvoir entendre le résultat de ces traitements.

La simplicité de mise en œuvre du bloc « WBFM Receive » peut sembler déconcertante. L'algorithme utilisé dans ce bloc est codé en C/C++ et les équations du traitement du signal exploitées sont à retrouver dans les commentaires de l'entête du prototype « quadrature_demod_cf.h ». Un extrait de cette documentation est présenté ci-dessous, après une remise en forme car écrite avec le traitement de texte LaTeX.

(extrait de quadrature_demod_cf.h)

This can be used to demod FM, FSK, GMSK, etc. The input is complex baseband, output is the signal frequency in relation to the sample rate, multiplied with the gain.

Mathematically, this block calculates the product of the one-sample delayed input and the conjugate undelayed signal, and then calculates the argument of the resulting complex number: $y[n] = \arg(x[n] \bar{x}[n-1])$.

Let x be a complex sinusoid with amplitude $A > 0$, (absolute) frequency $f \in \mathbb{R}$ and phase $\phi_0 \in [0; 2\pi]$ sampled at

$f_s > 0$ so, without loss of generality, $x[n] = Ae^{j2\pi(\frac{f}{f_s}n + \phi_0)}$
then

$$\begin{aligned}
 y[n] &= \arg \left(Ae^{j2\pi(\frac{f}{f_s}n + \phi_0)} \overline{Ae^{j2\pi(\frac{f}{f_s}(n-1) + \phi_0)}} \right) \\
 &= \arg \left(A^2 e^{j2\pi(\frac{f}{f_s}n + \phi_0)} e^{-j2\pi(\frac{f}{f_s}(n-1) + \phi_0)} \right) \\
 &= \arg \left(A^2 e^{j2\pi(\frac{f}{f_s}n + \phi_0 - \frac{f}{f_s}(n-1) - \phi_0)} \right) \\
 &= \arg \left(A^2 e^{j2\pi(\frac{f}{f_s}n - \frac{f}{f_s}(n-1))} \right) \\
 &= \arg \left(A^2 e^{j2\pi(\frac{f}{f_s}(n - (n-1)))} \right) \\
 &= \arg \left(A^2 e^{j2\pi \frac{f}{f_s}} \right) \\
 &= \arg \left(e^{j2\pi \frac{f}{f_s}} \right) \text{ because } A \text{ is a real} \\
 &= \frac{f}{f_s}
 \end{aligned}$$

Signalons qu'il s'agit là d'un des blocs démodulateur fournis par GNU Radio pour la démodulation de signaux modulés en fréquence.

Afin de ne pas alourdir cette partie, nous avons volontairement limité cet exemple à celui d'une démodulation mono. Une démodulation stéréo est bien sûr possible et fait l'objet de travaux pratiques au DER SIEN (ex. département EEA) de l'ENS Paris-Saclay.

4 - Récepteur radio-logicielle DAB+

La norme DAB (pour Digital Audio Broadcasting) [10] a été déployée en France à partir de 2013 sous le nom initial RNT (Radio Numérique Terrestre).

Le principe de modulation mis en œuvre par ce système radio est de type OFDM, pour Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Il s'agit d'une technique de modulation numérique à haute efficacité spectrale exploitée par l'ensemble des systèmes de télécommunications numériques modernes : 4G, 5G, WiFi, DVB-T, DAB+. Les fondements théoriques de l'OFDM sont « fort élégamment » exposés dans [9].

Pour mettre en œuvre la réception et la démodulation de signaux DAB+, il conviendra d'adjoindre le package *gr-dab* à GNU-Radio, ce package n'en fait pas partie par défaut.

La construction du récepteur DAB+ avec GNU-Radio est représentée figure 15. Le flowgraph établi par GRC fait de nouveau appel au dongle SDR-RTL. La variable « *samp_rate* » a été fixée à $f_s = 2.048\text{ MHz}$ et la fréquence de réception du dongle RTL-SDR a été fixée par « Center Freq » à $f_{OL} = 199.36\text{ MHz}$.

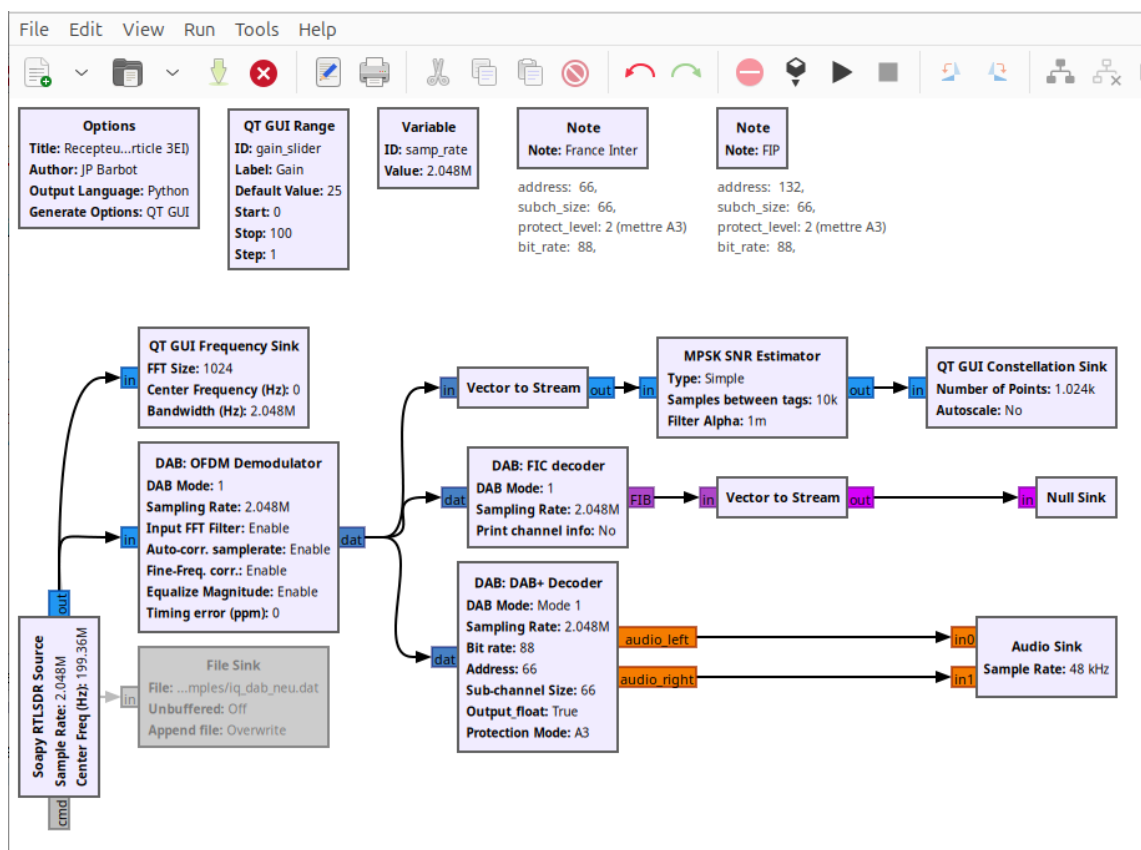


Figure 15 : Principe récepteur DAB+ implémenté avec GNU Radio

L'exécution de l'ensemble de ces blocs permet de visualiser le spectre d'un signal DAB+, voir figure 16, graphique du haut. Ce spectre est constitué de 1536 sous-porteuses, espacées de 1 kHz , le contenu spectral est donc de largeur 1.536 MHz , comme observé [10]. Chacune de ces sous-porteuses est modulée par une modulation de type MAQ-4 [5]. La constellation correspondante, pour une de ces 1536 sous-porteuses est tracée figure 16, graphique du bas. Le décodeur DAB+ « DAB : DAB+ Decoder » est relié figure 15 au bloc « Audio Sink ». L'exécution de ce flowgraph, en plus des tracés de la figure 16, permet une écoute en stéréo du programme radio diffusé.

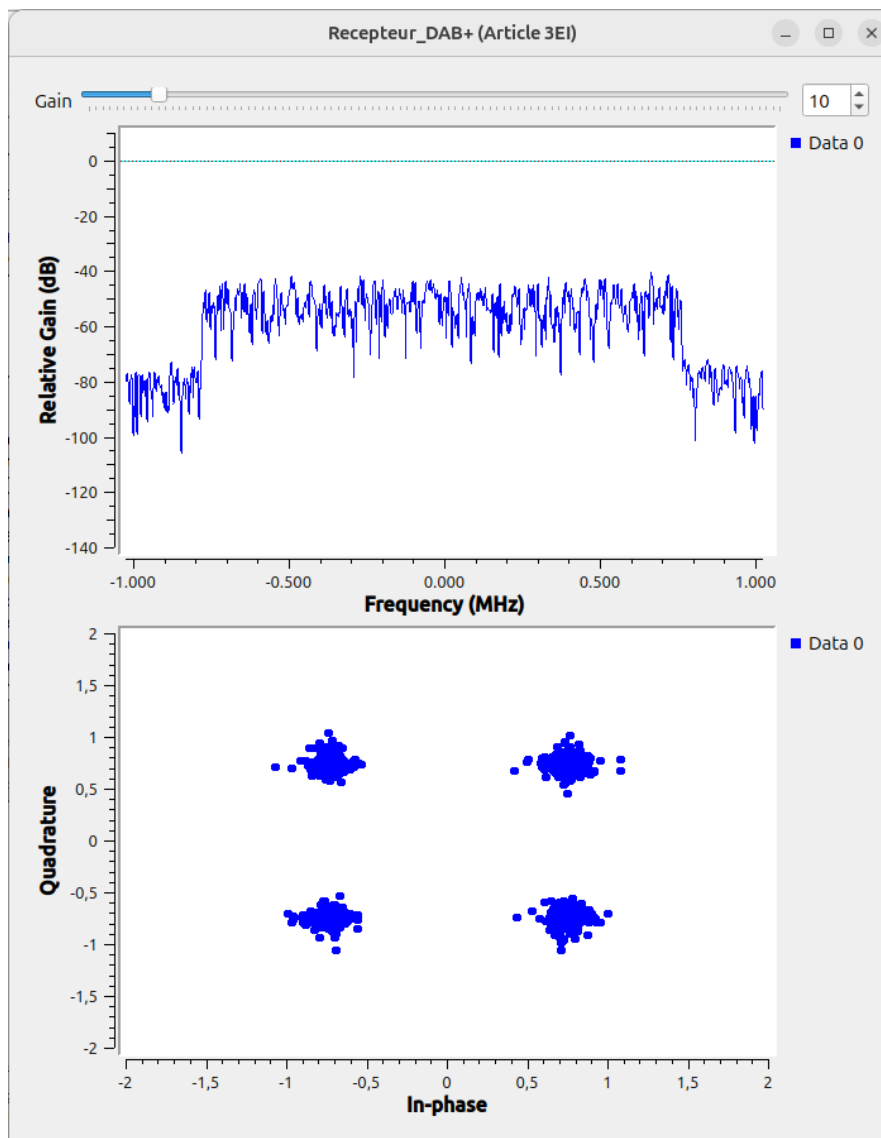


Figure 16 : Principe d'un modulateur IQ et d'un démodulateur IQ

5 - Conclusion

La radio-logicielle a bénéficié des avancées de l'électronique numérique, tant du point de vue matériel (DSP, FPGA, CAN, CNA), que logiciel. Dans un système radio, remplacer en grande partie les fonctions réalisées avec des composants analogiques par des fonctions numériques est devenu possible.

De plus, l'architecture matérielle et logicielle adoptée par la radio-logicielle lui confère un caractère universel. Un même équipement pourra permettre la réception (voire l'émission) de signaux FM et de signaux DAB+, comme l'illustrent les parties 3 et 4 de cet article. En cas d'émission, signalons que la simplicité de mise en œuvre ne doit pas occulter les réglementations en vigueur dans ce domaine.

Les exemples de réalisation basés sur la suite logicielle GNU Radio sont multiples et s'étendent bien au-delà de la radio FM et DAB+, citons par exemple la réception et le décodage de signaux radio ADS-B, émis par les transpondeurs des avions, et utilisés par exemple par le site internet flightradar24.com.

La communauté française a été pionnière dans le développement de la radio-logicielle et reste très active dans le domaine. Certains exemples de réalisation sont à retrouver dans [6], [7], [8], [11], [12], tant du point de vue théorique que pratique.

D'un point de vue pédagogique enfin, la radio-logicielle démontre que « rien n'est plus pratique qu'une belle théorie ». La mise en pratique de concepts parfois arides issus du traitement du signal, de la théorie du codage et des communications numériques pour réaliser un système de télécommunication aide à leur compréhension, et peut susciter l'envie de les explorer plus avant.

Références :

[1] J. Mitola, "Software radios-survey, critical evaluation and future directions," *[Proceedings] NTC-92: National Telesystems Conference*, Washington, DC, USA, 1992, pp. 13/15-13/23.

[2] Hélène Horsin Molinaro, Eric Vourc'h, Jean-Pierre Barbot, "Capteurs et chaîne d'acquisition", CultureSciences de l'ingénieur, 2015, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/capteurs-et-chaîne-dacquisition

[3] Frédéric de Coulon, "Théorie et traitement des signaux", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Traité d'électricité, Vol. VI, Dunod. ([téléchargeable](#)).

[4] Dominique Ventre, "Communications analogiques", Collection pédagogique des Télécommunications, Ellipses.

[5] Michel Joindot, Alain Glavieux, Introduction aux télécommunications numériques, Collection Sciences Sup, Ed. Dunod.

[6] J.-M. Friedt, Quelques fondements théoriques pour aborder le radio-logicielle, GNU/Linux Magazine, Numéro 224

[7] J.-M. Friedt, H. Boeglen, Communication Systems Engineering with GNU Radio: A Hands-on Approach, Wiley (2025)

[8] T. Collins & al., Software-Defined Radio for Engineers, (2018) at <https://www.analog.com/en/education/education-library/software-defined-radio-for-engineers.html>

[9] Xavier Lagrange, Principe de la transmission OFDM - Utilisation dans les systèmes cellulaires, Techniques de l'Ingénieur, TE 7372.

[10] Marian Oziwicz, Digital Radio DAB+, Broadcasting Multimedia System, Ed. Springer.

[11] Jacques Palicot, Christophe Moy, Sufi Tabassum Gul, Merouane Debbah, Romain Couillet, et al. Radio Engineering: From Software Radio to Cognitive Radio. Edited by Jacques Palicot. Wiley-ISTE, 378 p., 2011. ([hal-00657728](#))

[12] Raymond Knopp, Carina Schmidt-Knorreck, Renaud Pacalet. Hardware Optimized Sample Rate Conversion for Software Defined Radio. *Frequenz*, 2010. ([hal-02893096](#))