

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Par : HAMAMINE Manal

Sujet

Algorithme de détection de l'activité spectrale à l'aide d'un dispositif SDR

Soutenu publiquement, le 15 / 06 / 2023 , devant le jury composé de :

Mr BENYAROU M.	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mr MASSOUM N.E.	MCB	Université de Tlemcen	Examinateur
Mr BENAÏSSA M.	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr YAGOUB R.	MCB	Université Aïn Témouchent	Co-Encadreur

Année universitaire : 2022/2023

Résumé

La clé RTL-SDR est un dispositif économique utilisé pour la réception et l'analyse des signaux de la bande FM. En la combinant avec MATLAB, il est possible d'analyser l'activité spectrale FM sur différentes fréquences à l'aide d'algorithmes de traitement du signal. La clé RTL-SDR offre une solution abordable et polyvalente pour l'analyse fréquentielle des émissions FM, tout en permettant de localiser l'activité spectrale dans cette bande de fréquences.

Mots clés :

Radio logicielle, SDR, Analyse spectrale, Détection spectrale, RTL-SDR.

Abstract

The RTL-SDR key is an economical device used for the reception and analysis of FM band signals. By combining it with MATLAB, it is possible to analyze the FM spectral activity on different frequencies using signal processing algorithms. The RTL-SDR key offers an affordable and versatile solution for the frequency analysis of FM broadcasts, while making it possible to locate the spectral activity in this frequency band.

Keywords :

Software defined radio, SDR, Spectral analysis, Spectral detection, RTL-SDR.

ملخص

مفتاح رتل-سدر هو جهاز اقتصادي يستخدم لاستقبال وتحليل إشارات الفرقة فم. من خلال الجمع بين ذلك مع ماتلاب، فمن الممكن لتحليل النشاط الطيفي فم على ترددات مختلفة باستخدام خوارزميات معالجة الإشارات. يوفر مفتاح رتل-حقوق السحب الخاصة حلا ميسور التكلفة ومتعدد الاستخدامات لتحليل تردد البث فم، في حين يجعل من الممكن تحديد موقع النشاط الطيفي

في هذا النطاق الترددي .

الكلمات المفتاحية:

راديو البرمجيات، SDR، الكشف الطيفي، التحليل الطيفي، RTL-SDR.

DEDICACE

Je dédié ce modeste travail à :

À mon cher père,

À ma chère mère,

*Je vous exprime mes remerciements et ma gratitude pour tout le soutien et les
Conseils, et votre présence à mes côtés a toujours été ma force.*

*À mes chers frères, Abdou et Hakim, Pour leur soutien moral tout au long de mes
études.*

À ma chère belle-sœur Nawel,

À mes chers amis et collègues avec qui j'ai partagé des journées d'école.

À toute ma famille et à ceux qui m'aiment.

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier Allah Tout-Puissant qui m'a comblé de ses bénédictions et m'a donné assez de force pour terminer ce travail et atteindre la Fin de cette formation

Je voudrais remercier la personne sans qui ce travail ne serait pas : **Mr. BENAISSA Mohamed** qui a accepté de me superviser et qui était disponible pour me guider et terminer ce travail.

Je tiens également à remercier **Mr. BENYAROU Mohamed**, qui m'a fait l'honneur de présider le jury, et **Mr. MASSOUM Nour El Din**, pour avoir accepté d'être l'examineur de mon travail.

Je remercie également ma famille, en particulier mes parents, pour leur tendresse et leur amour qui me guident au quotidien.

Table des Matières

Résumé	
Liste des Figures.....	i
Liste des Tableaux.....	ii
Acronymes et Abréviations.....	ii
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : La radio logicielle

1.1	Introduction :.....	2
1.2	Historique :.....	2
1.3	De la radio matérielle à la radio logicielle.....	3
1.4	Objectifs et classification de la radio logicielle.....	6
1.5	Avantage de la radio logicielle.....	7
1.6	Architectures de la radio logicielle.....	8
1.6.1	La radio logicielle idéale.....	8
1.6.2	Radio logicielle restreinte (SDR).....	10
1.7	Conclusion.....	12

Chapitre2 : Récepteur SDR à faible coût RTL-SDR

2.1	Introduction.....	13
2.2	La clé RTL-SDR.....	13
2.3	Applications de la clé RTL-SDR.....	15
2.4	Différentes clés RTL-SDR.....	16
2.5	Eléments internes de la clé RTL-SDR (R820T2-RTL2832U).....	19
2.6	Architecture de la clé RTL-SDR.....	21
2.7	Exemple d'utilisation de la clé RTL-SDR pour la réception de données.....	23
2.8	Conclusion.....	25

Chapitre3 : Résultats et interprétations

3.1 Introduction.....	26
3.2 Acquisition des données de la clé RTL-SDR avec MATLAB	26
3.3 Largeur de bande de la clé RTL-SDR NESDR Mini	29
3.4 Analyse spectrale d'une station radio FM	33
3.5 Spectre des maximums d'une station radio FM	36
3.6 Spectre des maximums et spectrogramme d'une station radio FM	37
3.7 Conclusion.....	39
Conclusion générale	40
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	41

Liste des Figures

Figure 1.1 : Architecture simplifiée d'une radio logicielle	5
Figure 1.2 : Radio matérielle à Radio logicielle	5
Figure 1.3 : Architecture d'une radio logicielle idéale	10
Figure 1.4 : Architecture d'une radio logicielle restreinte	12
Figure 2.1 : La clé RTL-SDR & antenne omnidirectionnelle.....	15
Figure 2.2 : Connecteurs d'antennes	17
Figure 2.3 : Eléments internes de la clé RTL-SDR (R820T2-RTL2832U)	21
Figure 2.4 : Schéma bloc de la clé RTL-SDR.....	22
Figure 2.5 : L'architecture interne de la clé RTL-SDR (R820T/RTL2832U).	23
Figure 2.5 : L'architecture interne de la clé RTL-SDR (R820T/RTL2832U).	23
Figure 3.1 : Exemple de Spectre de données de la clé RTL-SDR NESDR Mini	29
Figure 3.2 : Spectre de données Largeur de bande = 3.2 MHz	31
Figure 3.3 : Spectre de données Largeur de bande = 300 KHz.....	32
Figure 3.4 : Spectre de données Largeur de bande = 2 MHz.....	33
Figure 3.5 : Spectre d'une station radio FM de largeur de 200 kHz.....	35
Figure 3.6 : Spectre de deux stations radios distinctes 98 et 99.2 MHz.	35
Figure 3.7 : Spectre instantané et spectre des maximums.....	36
Figure 3.8 : Spectre et spectrogramme.....	38

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 : Les différents tuners de la clé RTL-SDR.....	17
---	----

ADC	Analog Digital Converter
ADS-B	Automatic dependent surveillance broadcast
AM	Amplitude Modulation
CAN	Convertisseur Analogique-Numérique
CNA	Convertisseur Numérique-Analogique
DAB	Digital Audio Broadcasting
DRM	Digital Radio Mondiale
DSP	Digital Signal Processor
DVB	Digital Video Broadcast
DVB-T	Digital Video Broadcast Terrestrial
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FFT	Fast Fourier Transform
FI	Fréquence Intermédiaire
FM	Frequency Modulation
FT8	Franke & Taylor 8
GOES	Geostationary
GPS	Global Positioning System
GSM	Globale System for Mobile Communication
HC-QUAM	Compatible QUadrature Amplitude Modulation
HSDR	Un logiciel freeware Radio (SDR)
HF	Haute fréquenc

I/Q	In-Pahse/Quadrature
IR	Infrarouge
JT65	Joe Taylor 65
LED	Light-emitting diode
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
LTE	Long Term Evolution
MCX	Micro Coaxial Connector
MPEG	Moving Picture Experts Group
NCO	Numerically Controlled Oscillator
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NTIA	National telecommunications information Agency
NXDN	Next Generation Digital Narrowband
P25	Project 25
PAL	Belling-Lee Connector
PC	Personal Computer
PSK31	Phase Shift Keying 31
RF	Radio Fréquence
R-SDR	Restricted Software-Defined Radio
RSPdx	Récepteur SDR Play
RTL-SDR	Realtek Software Defined Radio
RTL-SDR	Realtek Software Defined Radio
RTTY	Radiotélétype
SDR	Software Defined Radio
SMA	Sub Miniature version A

SW	Short wave
TCXO	Temperature compensated crystal oscillator
TETRA	Terrestrial Trunked <i>Radio</i>
TIC	Technologies l'information communication
TNT	Télévision numérique terrestre
TV	Télévision
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
USB	Universal Serial Bus
VCO	Voltage-Controlled Oscillator
VGA	Video Graphics Array
VHF	Very High Frequency
WIF	Wireless Innovation Forum
Wi-Fi	Wireless fidelity
TNT	Télévision numérique terrestre
TV	Télévision
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
USB	Universal Serial Bus
VCO	Voltage-Controlled Oscillator
VGA	Video Graphics Array
VHF	Very High Frequency
WIF	Wireless Innovation Forum
Wi-Fi	Wireless fidelity

Introduction générale

La clé RTL-SDR (Software Defined Radio) est devenue un outil essentiel dans le domaine de l'analyse spectrale. Cette clé abordable et polyvalente permet de recevoir et de traiter les signaux radio à l'aide d'un ordinateur. Son histoire remonte aux tuners TV USB, qui ont été modifiés pour fonctionner comme des récepteurs radio large bande. Depuis lors, la clé RTL-SDR a connu une popularité croissante en raison de son accessibilité et de sa flexibilité.

Dans le domaine de l'analyse spectrale, la clé RTL-SDR joue un rôle crucial. Elle permet aux utilisateurs d'explorer et de surveiller les signaux radio sur une large gamme de fréquences. En combinant la clé RTL-SDR avec des logiciels tels que MATLAB, il est possible d'effectuer des analyses avancées des signaux capturés. Cela inclut la démodulation, la détection de signaux faibles, la séparation de canaux, la détection d'interférences, la mesure de la puissance du signal, etc. dans ce mémoire on se focalisera uniquement sur l'analyse spectrale de la bande FM

Le mémoire est divisé en trois chapitres principaux pour aborder différents aspects de la clé RTL-SDR et de l'analyse spectrale de la bande FM. Le premier chapitre se concentre sur la radio logicielle, sa classification et ses avantages. Il offre une vue d'ensemble des concepts clés liés à la radio logicielle et de son importance dans le domaine de l'analyse spectrale.

Le deuxième chapitre approfondit la clé RTL-SDR en détail, en explorant son architecture et les éléments techniques associés. Ce chapitre offre un aperçu complet de la clé RTL-SDR, de son fonctionnement et de ses capacités, permettant ainsi aux lecteurs de comprendre les spécificités techniques de cet outil.

Enfin, le dernier chapitre se concentre sur l'analyse spectrale de la bande FM en utilisant la clé RTL-SDR et des algorithmes de traitement de signal sous MATLAB. Il présente les résultats des simulations effectuées avec cette combinaison d'outils et propose des discussions sur les observations et les conclusions tirées de ces analyses.

Une conclusion générale est présentée en fin du mémoire

Chapitre 1
La radio logicielle

1.1 Introduction :

La radio logicielle (SDR) est une technologie qui permet de concevoir et de mettre en œuvre des systèmes de radio à l'aide de logiciels et d'ordinateurs, plutôt que d'utiliser des composants électroniques dédiés. Cela offre des avantages en termes de flexibilité, de coût et de capacités de traitement du signal. Les systèmes SDR peuvent être utilisés dans de nombreux domaines, notamment les communications militaires, les radiocommunications civiles, l'astronomie radio, la radioamateur et la surveillance du spectre radioélectrique.

La clé RTL-SDR est une clé USB peu coûteuse qui permet de recevoir et de démoduler une large gamme de signaux radio. Elle est basée sur le tuner TV numérique RTL2832U et peut être utilisée avec de nombreux logiciels SDR tels que SDR#, Gqrx et GNU Radio. La clé RTL-SDR est devenue très populaire parmi les amateurs de radio logicielle en raison de son faible coût et de sa grande polyvalence. Elle peut être utilisée pour recevoir des signaux tels que la télévision numérique terrestre, la radio FM, les signaux GPS, les communications sans fil, les signaux de radiodiffusion numérique, les signaux météorologiques et bien d'autres encore. La clé RTL-SDR est un excellent choix pour ceux qui souhaitent commencer à explorer la radio logicielle sans investir une somme importante dans l'équipement [2].

1.2 Historique :

La radio logicielle est une technologie qui a évolué au fil du temps, avec des contributions importantes de plusieurs pionniers. Voici un aperçu de l'histoire de la radio logicielle depuis les années 1960 jusqu'à aujourd'hui, avec des noms de pionniers importants :

- ✓ Années 1960 : La radio logicielle trouve ses racines dans les travaux de Joseph Mitola, un chercheur de la Naval Postgraduate School, qui a commencé à explorer les possibilités de la radio logicielle à cette époque.
- ✓ Années 1970 : Des progrès sont réalisés dans la conception de composants électroniques, ce qui permet de créer des systèmes de traitement du signal numérique plus avancés. Cette évolution est menée par des chercheurs tels que James Martin et Peter Moo.

- ✓ Années 1980 : Paul Dietz, un ingénieur de l'Université de Californie à Berkeley, construit le premier récepteur de radio logicielle en utilisant des cartes d'interface de traitement du signal numérique. Dietz est considéré comme l'un des pionniers de la radio logicielle.
- ✓ Années 1990 : Joseph Mitola publie plusieurs articles sur la radio logicielle et organise des conférences pour promouvoir cette technologie. Il est souvent considéré comme l'un des fondateurs de la radio logicielle.
- ✓ Années 2000 : La radio logicielle connaît une adoption plus large dans l'industrie de la communication, grâce à des progrès tels que l'utilisation de processeurs multi-cœurs et de logiciels de traitement du signal plus sophistiqués. Des entreprises telles que FlexRadio et Ettus Research commencent à commercialiser des équipements de radio logicielle.
- ✓ Années 2010 : La radio logicielle continue de se développer, avec une adoption croissante dans les domaines de la radio amateur, de la radio commerciale, de la communication militaire et de la surveillance. Les avancées technologiques telles que les algorithmes de traitement du signal en temps réel et les interfaces utilisateur plus conviviales ont permis de rendre la radio logicielle plus accessible et plus facile à utiliser.
- ✓ Années 2020 : Aujourd'hui, la radio logicielle est devenue une technologie mature et largement utilisée, offrant des avantages significatifs en termes de flexibilité, de réutilisabilité et de coût. De nombreux nouveaux projets de recherche et de développement sont en cours

En plus des noms mentionnés ci-dessus, il y a eu de nombreux autres chercheurs, ingénieurs et innovateurs qui ont contribué à l'évolution de la radio logicielle au fil des ans. Parmi eux, on peut citer Gerald Hopkins, Mark Jeffrey, Johnathan Corgan, Eric Blossom, Martin Braun, et bien d'autres encore [3, 4].

1.3 De la radio matérielle à la radio logicielle

La radio a évolué de la radio matérielle à la radio logicielle en raison des avancées technologiques en matière de traitement du signal numérique et de l'essor des technologies

de l'information et de la communication (TIC). La radio matérielle utilise des composants électroniques dédiés, tels que des filtres, des amplificateurs, des modulateurs et des démodulateurs, pour manipuler les signaux radio. Ces composants sont généralement optimisés pour un seul type de signal ou une gamme de fréquences spécifique, ce qui limite la flexibilité de la conception de la radio.

La radio logicielle, en revanche, utilise des logiciels et des ordinateurs pour effectuer la plupart des fonctions de traitement du signal. Les signaux radio sont numérisés par un convertisseur analogique-numérique (CAN) et traités par des logiciels de traitement du signal numérique (DSP) pour effectuer des opérations telles que la modulation, la démodulation, le filtrage et la correction d'erreur. Cette approche permet une grande flexibilité dans la conception de la radio, car les logiciels peuvent être modifiés pour s'adapter à différents types de signaux et de fréquences.

L'essor des TIC a également joué un rôle important dans la transition de la radio matérielle à la radio logicielle. Les ordinateurs sont devenus plus puissants et moins coûteux, ce qui a permis de concevoir des systèmes de traitement du signal numérique plus complexes. Les communications sans fil sont également devenues plus répandues, créant une demande pour des radios plus polyvalentes et évolutives.

Ainsi, la radio logicielle a apporté une grande flexibilité dans la conception de la radio en utilisant des logiciels et des ordinateurs pour effectuer la plupart des fonctions de traitement du signal comme la sélection des canaux, la syntonisation, la modulation et de la démodulation dans le domaine numérique, tandis que la radio matérielle utilise des composants électroniques dédiés pour manipuler les signaux radio. La transition vers la radio logicielle a été stimulée par les avancées technologiques en matière de traitement du signal numérique [5].

La SDR cherche à ranger le Convertisseur Analogique-Numérique (CAN)/Convertisseur Numérique-Analogique (CNA) le plus près possible de l'antenne et de réaliser tout le traitement du signal numériquement en utilisant des logiciels [2].

La figure 1.1 représente l'architecture générique d'un émetteur-récepteur radio logicielle.

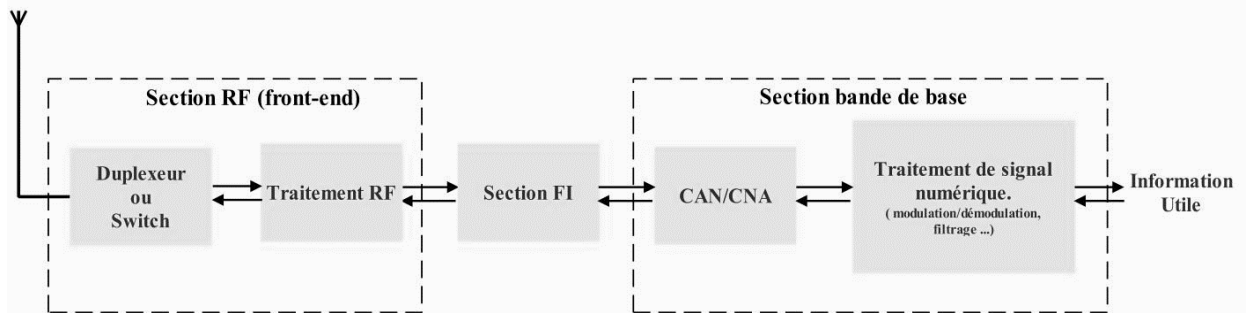


Figure 1.1 : Architecture simplifiée d'une radio logicielle

Un système radio logicielle est divisé en deux parties : une partie analogique et une partie numérique. La figure 1.2 représente la répartition des opérations réalisées dans la partie analogique et la partie numérique. [2]

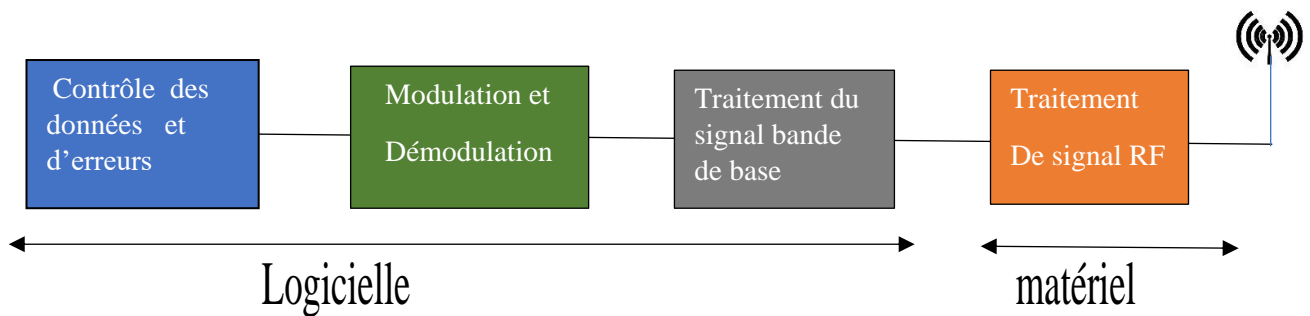


Figure 1.2: Radio matérielle à Radio logicielle

1.4 Objectifs et classification de la radio logicielle

L'objectif de la radio logicielle est de fournir une approche plus flexible et plus évolutive pour la conception et la mise en œuvre des systèmes de communication sans fil. En utilisant des logiciels et des ordinateurs pour effectuer la plupart des fonctions de traitement du signal, la radio logicielle peut être facilement reconfigurée pour s'adapter à différents types de signaux, de fréquences et de normes de communication.

Un exemple de l'application précoce de la radio logicielle est le logiciel FlexRadio Systems, lancé en 2003. Cette radio permet aux utilisateurs de sélectionner la fréquence, la bande passante et le mode de modulation via un ordinateur, offrant ainsi une grande flexibilité pour les communications à large bande et les communications vocales.

En 2004, l'Agence nationale des télécommunications et de l'information (NTIA) des États-Unis a publié un rapport intitulé "The Benefits of a Software Defined Radio Future", soulignant les avantages de la radio logicielle en termes de flexibilité, d'interopérabilité et d'efficacité spectrale.

Depuis lors, la radio logicielle est devenue une tendance importante dans l'industrie des communications sans fil, avec des applications allant des radios personnelles aux réseaux de communication de grande envergure tels que la 5G. Les clés de réception SDR (Software Defined Radio), telles que la clé RTL-SDR lancée en 2012, ont également contribué à populariser la radio logicielle en la rendant plus accessible et plus abordable pour les amateurs de radio.

La Wireless Innovation Forum (WIF) a proposé une classification des systèmes de radio logicielle en fonction de leur niveau de programmabilité. Cette classification comporte quatre catégories :

1. **Radio matérielle** : Radio qui ne peut être modifiée par logiciel, reconfiguration par échange de composant
2. **Radio contrôlée par logiciel** : il s'agit d'un système radio dans lequel une grande partie du traitement du signal est effectuée par des algorithmes logiciels plutôt que par du matériel électronique dédié. Les SDR offrent une grande flexibilité et peuvent être reprogrammés pour différentes fréquences, modulations et protocoles de communication.

3. **Radio définie par logiciel** : ce terme est souvent utilisé de manière interchangeable avec SDR. Cependant, certaines personnes utilisent ce terme pour faire référence à des SDR qui sont entièrement implémentés en logiciel, sans aucune composante matérielle dédiée.
4. **Radio logicielle idéale** : il s'agit d'un concept théorique qui représente une radio logicielle capable de traiter tous les signaux électromagnétiques dans toutes les fréquences simultanément. Cela permettrait à une telle radio de capter tous les signaux radio dans l'environnement sans avoir besoin de réglages ou de connaissances préalables sur la fréquence ou le protocole utilisé.
5. **Radio logicielle ultime** : ce terme est souvent utilisé de manière interchangeable avec la radio logicielle idéale. Cependant, certaines personnes utilisent ce terme pour décrire une radio logicielle qui est capable de modifier son propre comportement pour maximiser les performances et minimiser les interférences, en utilisant des techniques d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle.

En résumé, SDR et radio définie par logiciel sont des termes couramment utilisés pour décrire des systèmes radio flexibles et programmables. La radio logicielle idéale et ultime sont des concepts théoriques qui représentent des radios logicielles capables de fonctionnalités avancées, mais qui ne sont pas encore réalisables avec la technologie actuelle.[6]

1.5 Avantage de la radio logicielle

La radio logicielle (SDR) présente plusieurs avantages par rapport aux radios traditionnelles basées sur du matériel électronique dédié. Voici quelques-uns des avantages les plus importants :[7]

- ✓ **Flexibilité** : les radios logicielles peuvent être reprogrammées pour fonctionner avec différents protocoles, modulations et fréquences, ce qui les rend beaucoup plus flexibles que les radios traditionnelles.
- ✓ **Coût** : les radios logicielles peuvent être implémentées sur des plateformes matérielles peu coûteuses, telles que des ordinateurs monocarte et des clés RTL-SDR, ce qui les rend beaucoup moins coûteuses que les radios traditionnelles.

- ✓ **Évolutivité** : étant donné que la plupart du traitement du signal est effectué en logiciel, les radios logicielles peuvent être facilement mises à jour et améliorées avec de nouveaux algorithmes et fonctionnalités.
- ✓ **Interopérabilité** : les radios logicielles peuvent être conçues pour être compatibles avec différents systèmes de communication, ce qui facilite l'interopérabilité entre différents réseaux de communication.
- ✓ **Recherche** : les radios logicielles offrent une grande flexibilité pour les chercheurs et les ingénieurs, ce qui permet de tester rapidement de nouveaux algorithmes de traitement du signal et de concevoir de nouvelles fonctionnalités pour les radios.

1.6 Architectures de la radio logicielle

1.6.1 La radio logicielle idéale

La radio logicielle idéale est une vision théorique de ce que pourrait être une radio logicielle sans aucune limitation technique ou économique. Voici quelques caractéristiques de la radio logicielle idéale [8] :

- ✓ **Couverture de fréquence** : la radio logicielle idéale pourrait couvrir l'ensemble du spectre radioélectrique, de quelques kilohertz à plusieurs gigahertz, sans limitation de fréquence ou de bande passante.
- ✓ **Flexibilité** : la radio logicielle idéale serait capable de gérer tout type de modulation et de codage, ainsi que tout protocole de communication, sans limitation de logiciel ou de matériel.
- ✓ **Évolutivité** : la radio logicielle idéale serait capable d'ajouter de nouvelles fonctionnalités et de nouvelles capacités au fur et à mesure que les technologies évoluent, sans aucune limitation technique.
- ✓ **Hautes performances** : la radio logicielle idéale serait capable de traiter les signaux avec une grande précision et une grande résolution, offrant ainsi des performances supérieures à celles des radios traditionnelles.

- ✓ Faible consommation d'énergie : la radio logicielle idéale consommerait très peu d'énergie, ce qui permettrait de l'utiliser dans des applications portables et à batterie.
- ✓ Sécurité : la radio logicielle idéale serait équipée de mécanismes de sécurité avancés pour protéger les données et les communications contre les intrusions.

L'architecture d'une radio logicielle idéale est basée sur plusieurs éléments clés qui permettent une grande flexibilité et évolutivité. Voici les principaux éléments de l'architecture d'une radio logicielle idéale :

- ✓ Convertisseur analogique-numérique (CAN) : l'entrée de la radio logicielle est un signal RF analogique qui doit être converti en un signal numérique pour être traité par le système. Le CAN doit être capable de numériser un large spectre de fréquences avec une grande résolution et une grande précision.
- ✓ Traitement du signal numérique (DSP) : le DSP est le cœur de la radio logicielle, où le signal numérique est traité pour effectuer des opérations de traitement du signal telles que la modulation, la démodulation, le filtrage, la détection, la correction d'erreur, etc. Le DSP doit être capable de traiter un large spectre de fréquences avec une grande précision et une grande vitesse de traitement.
- ✓ Interfaces RF : les interfaces RF doivent être conçues pour couvrir un large spectre de fréquences avec une grande flexibilité en termes de bande passante et de types de modulation.
- ✓ Logiciel d'application : le logiciel d'application permet à l'utilisateur final d'accéder aux fonctionnalités de la radio logicielle et de configurer et contrôler le système. Le logiciel d'application doit être flexible et évolutif pour permettre l'ajout de nouvelles fonctionnalités et capacités.
- ✓ Plateforme matérielle : la plateforme matérielle doit être conçue pour offrir une grande flexibilité et évolutivité en termes de capacités de traitement, de stockage, d'interface et d'alimentation.

- ✓ Interfaces de communication : les interfaces de communication doivent être conçues pour permettre une grande flexibilité en termes de protocoles de communication et de types de connexion, afin de permettre une intégration facile avec d'autres systèmes et réseaux.

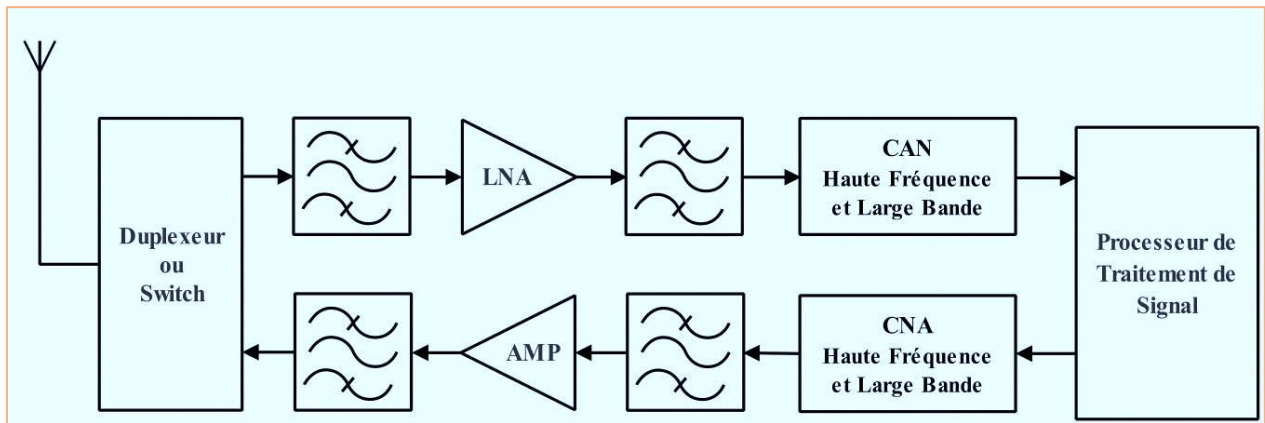


Figure 1.3 : Architecture d'une radio logicielle idéale

1.6.2 Radio logicielle restreinte (SDR)

Une radio logicielle restreinte (en anglais : Restricted Software-Defined Radio ou R-SDR) est un type de SDR qui impose des restrictions sur les capacités de l'utilisateur en matière de modification et de reconfiguration du logiciel de la radio. Ces restrictions sont généralement mises en place pour des raisons de sécurité ou de conformité réglementaire.

Les R-SDR sont souvent utilisées dans des applications professionnelles ou gouvernementales où la sécurité des transmissions est primordiale, telles que les communications militaires ou les systèmes de contrôle de trafic aérien. Dans ces cas, les R-SDR sont conçues pour garantir la conformité avec les réglementations de sécurité strictes.

Cependant, les R-SDR sont souvent moins flexibles que les SDR standards, car elles ne permettent pas à l'utilisateur de modifier le logiciel de la radio ou de reconfigurer les composants matériels de la radio. Cela peut rendre les R-SDR moins adaptées à des applications de recherche ou de développement où la flexibilité est un critère important. [2]

Les éléments clés de l'architecture figure 1.4 comprennent :

- ✓ L'antenne, qui est utilisée pour recevoir et transmettre les signaux radio.
- ✓ Le convertisseur analogique-numérique (CAN), qui convertit le signal analogique de l'antenne en signal numérique pour le traitement par le logiciel de la radio.
- ✓ Le processeur, qui exécute les algorithmes de traitement numérique du signal pour démoduler, filtrer et amplifier le signal.
- ✓ La mémoire, qui stocke le logiciel de la radio, les paramètres de configuration et les données du signal.
- ✓ Les interfaces de communication, qui connectent la radio à d'autres systèmes, tels que des ordinateurs, des réseaux ou d'autres radios.
- ✓ Les composants de sécurité, tels que des mécanismes de verrouillage et des puces de sécurité, pour empêcher toute tentative de modification du logiciel de la radio.
- ✓ Les composants de conformité réglementaire, qui garantissent que la radio répond aux normes de sécurité et de conformité réglementaire spécifiques.

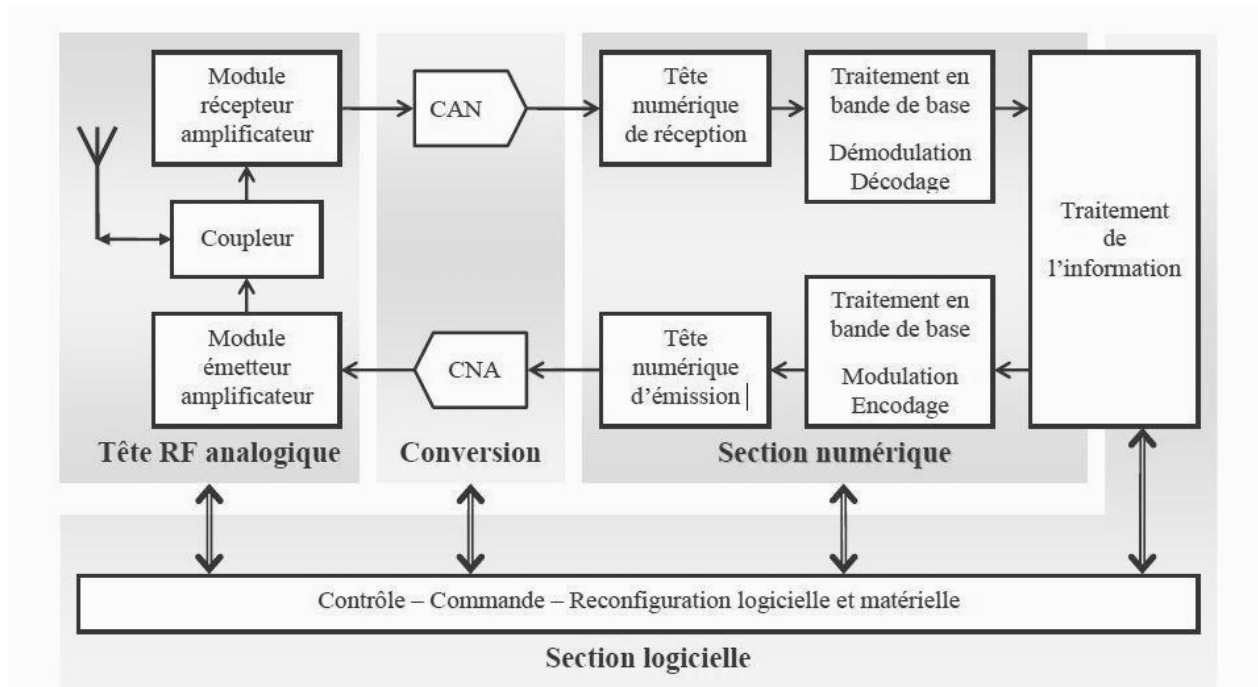


Figure 1.4 : Architecture d'une radio logicielle restreinte

1.7 Conclusion

La radio logicielle est une technologie en pleine croissance qui a révolutionné l'industrie de la radiocommunication en offrant des avantages considérables par rapport à la radio traditionnelle. Grâce à la flexibilité et à la reconfigurabilité offertes par la radio logicielle, les coûts de développement et de déploiement des systèmes radio ont été considérablement réduits, tandis que les performances ont été améliorées en termes de couverture, de capacité et de qualité de service. La disponibilité de clés RTL-SDR peu coûteuses et de logiciels open-source tels que GNU Radio permettent à quiconque d'explorer et de développer des applications radio logicielle à petite échelle. La radio logicielle continuera à jouer un rôle de plus en plus important dans les systèmes de communication modernes, offrant des capacités de traitement de signal avancées et une reconfigurabilité continue pour s'adapter aux évolutions des normes et des besoins des utilisateurs.

Chapitre 2

Récepteur SDR à faible coût RTL-SDR

2.1 Introduction

Dans ce chapitre une étude plus approfondit de la clé RTL-SDR est donnée en explorant son architecture et les éléments techniques associés. Un aperçu complet de la clé RTL-SDR, de son fonctionnement et de ses capacités y sont présentés pour permettre aux lecteurs de comprendre les spécificités techniques de cet outil.

2.2 La clé RTL-SDR

Les clés RTL-SDR, basés sur la puce Realtek RTL2832, ont été initialement conçues pour être utilisés comme récepteurs DVB-T (Digital Video Broadcast Terrestrial). Cela signifie qu'ils ont été développés pour la réception de signaux de télévision numérique terrestre. Cette technologie de diffusion a été introduite pour la première fois en Europe en 1998, mais son déploiement n'a commencé qu'au début des années 2000. La norme DVB-T a été adoptée dans de nombreux pays, notamment en Europe, en Asie et en Australie.

Les appareils basés sur la puce Realtek RTL2832 ont été conçus pour démoduler les signaux DVB et transmettre les trames vidéo MPEG via un simple connecteur USB. Les séquences ainsi construites peuvent être facilement visualisées sur un PC. Cependant, en 2012, grâce à la collaboration d'Antti Palosaari, d'Eric Fry et de l'équipe d'Osmocom, il a été découvert que RTL-SDR pouvait être utilisé comme solution SDR à usage général de réception uniquement.

Le principe est de basculer le fonctionnement de la puce Realtek RTL2832 vers un mode qui sort des échantillons I/Q sur le port USB. Cette découverte a été un véritable tournant dans le domaine de la radio logicielle (SDR), car elle a permis aux utilisateurs d'accéder à des capacités de réception à large bande à un coût très abordable. Depuis lors, l'utilisation de RTL-SDR s'est largement répandue dans la communauté des radioamateurs et des passionnés de radio en général.

Cela ouvre des possibilités de traitement numérique sur le ordinateur maître. Des commandes ont été ajoutées pour régler la fréquence centrale et le taux d'échantillonnage utilisé pour la réception. Par conséquent, ce type d'équipement doit être strictement contrôlé [9]. À partir de là, une communauté s'est formée pour développer une infrastructure logicielle SDR spécialement conçue, et les fabricants ont commencé à créer des clés (ou dongles) appelées RTL-SDR qui sont mieux adaptées aux applications SDR.

Ces dongles, tels que les clés RTL-SDR, sont des périphériques USB qui peuvent recevoir des signaux dans la gamme dans lequel fonctionne le tuner (RF front-end). À l'origine, ces clés ont été conçues pour la réception de signaux de télévision numérique terrestre, mais leur capacité dépasse maintenant la bande des signaux de télévision numérique. La gamme de fréquences ou la plage de ces dongles dépend des composants utilisés, mais se situe généralement entre 25 MHz et 1,75 GHz.

Les premiers tests ont montré que les clés RTL-SDR (figure 2.1) peuvent être utilisées pour la réception de signaux de diverses fréquences dans les bandes VHF et UHF, ainsi que pour la réception de signaux de radio FM, de signaux ADS-B, de signaux de surveillance de la sécurité, de signaux de contrôle de la circulation aérienne, et même pour la réception de signaux de satellites météorologiques [10]. Les utilisateurs ont également trouvé des applications dans la surveillance de l'environnement et la recherche scientifique, par exemple pour l'observation de la propagation des ondes radioélectriques à travers l'atmosphère.

Bien sûr, les performances de ces clés ne correspondent pas aux performances des SDR professionnels, mais compte tenu du prix, elles fonctionnent très bien. Ces dongles ont ouvert la voie à une nouvelle génération de récepteurs SDR à usage général, qui sont accessibles à tous, même à ceux qui n'ont pas les moyens de s'offrir un équipement professionnel. La popularité de ces clés a également conduit à la création d'une communauté active d'utilisateurs et de développeurs qui partagent des informations et des expériences en ligne.



Figure 2.1: La clé RTL-SDR & antenne omnidirectionnelle.

2.3 Applications de la clé RTL-SDR

Pour le mode SDR à large bande, cette clé USB offre de nombreuses possibilités de projets intéressantes [11] :

- ✓ Réception de signaux de radiodiffusion : recevoir et écouter les stations de radio FM, AM, SW et DAB. Avec un logiciel de décodage approprié, il est également possible de recevoir les transmissions de radio numériques telles que le HD Radio, le DRM, le TETRA, le P25, le NXDN et le DMR.
- ✓ Réception des signaux de la télévision numérique terrestre (TNT) : recevoir les signaux de télévision numérique terrestre (DVB-T) et les démoduler à l'aide d'un logiciel approprié.
- ✓ Surveillance des signaux de la radiofréquence : surveiller les signaux de la radiofréquence dans les bandes VHF et UHF, tels que les signaux de la police, des pompiers, des services de secours et des communications gouvernementales.
- ✓ Détection des signaux de la radio amateur : écouter les signaux radioamateurs dans les bandes HF, VHF et UHF.

Chapitre2 : Récepteur SDR à faible coût RTL-SDR

- ✓ Détection des signaux ADS-B : capturer et démoduler les signaux ADS-B émis par les avions, ce qui permet de suivre leur position en temps réel.
- ✓ Décodage des signaux météorologiques : recevoir les transmissions météorologiques NOAA, qui fournissent des prévisions météorologiques, des alertes et des observations météorologiques à partir de satellites en orbite basse.
- ✓ Détection des signaux GPS : capturer et démoduler les signaux GPS, ce qui permet de surveiller la position des satellites GPS en temps réel.
- ✓ Analyse des signaux sans fil : analyser les signaux sans fil, tels que les signaux Wi-Fi, les signaux Bluetooth, les signaux Zigbee et les signaux de télécommande.
- ✓ Décodage des signaux numériques : décoder les signaux numériques tels que le PSK31, le RTTY, le JT65 et le FT8.
- ✓ Surveillance des signaux de la téléphonie mobile : surveiller les signaux de la téléphonie mobile dans les bandes GSM, UMTS et LTE.
- ✓ Réception des signaux de la météorologie spatiale : recevoir les transmissions de la
- ✓ Météorologie spatiale, telles que les données du satellite GOES pour la surveillance des conditions météorologiques sur la Terre et de l'espace.
- ✓ Détection des signaux de drones : détecter les signaux émis par des drones, ce qui permet de surveiller et de détecter la présence de drones dans une zone donnée.

Il est important de noter que ces applications ne sont qu'un aperçu des nombreuses utilisations possibles de la clé RTL-SDR, et que les fonctionnalités de la clé dépendent du logiciel et des accessoires utilisés avec elle.

2.4 Différentes clés RTL-SDR

Plusieurs générations ont été développées depuis l'apparition des clés RTL-SDR. La génération dépend de la connexion d'antenne MCX (connecteur micro-coaxial), PAL (Connecteur Belling-Lee) ou SMA (version sub-miniature A) figure 2.2, du type de chambre d'oscillateur utilisé et du tuner utilisé (Tableau 2.1), [12] [13].



PAL



SMA



MCX

Figure 2.2 : Connecteurs d'antennes

<i>Tuner</i>	<i>Fréquences détectées</i>
Elonics E4000	52 - 2200 MHz avec un écart de 1100 MHz à 1250 MHz (variable)
Rafael Micro R820T	25 - 1766 MHz (utilisée dans notre mémoire)
Fitipower FC0013	22 - 1100 MHz
Fitipower FC0012	22 - 948.6 MHz
FCI FC2580	146 - 308 MHz et 438 - 924 MHz

Tableau 2. 1 : Les différents tuners de la clé RTL-SDR.

Chapitre2 : Récepteur SDR à faible coût RTL-SDR

Il existe plusieurs types de dongles RTL-SDR disponibles sur le marché, chacun avec des caractéristiques et des prix différents. Voici quelques exemples :

1. RTL-SDR Blog V3 - Ce dongle est considéré comme l'un des meilleurs RTL-SDR disponibles sur le marché. Il a une plage de fréquences allant de 24 MHz à 1,766 GHz, un TCXO (oscillateur à quartz compensé en température) haute précision et une connectique SMA femelle pour une meilleure connectivité. Son prix est d'environ 25-30 dollars US.
2. NooElec NESDR SMARt - Ce dongle est similaire au RTL-SDR Blog V3 en termes de spécifications, avec une plage de fréquences de 25 MHz à 1,766 GHz, un TCXO haute précision et une connectique SMA femelle. Son prix est d'environ 20-25 dollars US.
3. Generic RTL-SDR Dongles - Il s'agit de dongles génériques, souvent disponibles à un prix inférieur à celui des modèles de marque. Leur plage de fréquences et leurs spécifications peuvent varier, mais la plupart d'entre eux sont compatibles avec le logiciel SDR populaire tels que SDR#, HDSDR et GQRX. Les prix de ces dongles peuvent varier de 10 à 20 dollars US.
4. Airspy Mini - Ce dongle est un peu plus cher que les modèles de base, mais il offre une plage de fréquences allant jusqu'à 1,7 GHz, une bande passante maximale de 10 MHz et une faible consommation d'énergie. Son prix est d'environ 100-120 dollars US.
5. HackRF One - Ce n'est pas exactement un dongle RTL-SDR, mais plutôt un transceiver logiciel qui peut être utilisé pour recevoir et transmettre des signaux radio. Il offre une plage de fréquences allant jusqu'à 6 GHz, une bande passante maximale de 20 MHz et de nombreuses fonctionnalités avancées. Son prix est d'environ 300-350 dollars US.
6. SDRplay RSPdx - Ce dongle SDR haut de gamme offre une plage de fréquences allant de 1 kHz à 2 GHz, une bande passante maximale de 10 MHz et une connectivité coaxiale. Il est compatible avec de nombreux logiciels SDR populaires. Son prix est d'environ 200-250 dollars US.

7. LimeSDR Mini - Ce dongle SDR haute performance offre une plage de fréquences allant jusqu'à 3,5 GHz, une bande passante maximale de 30 MHz et une connectivité MIMO (entrées multiples, sorties multiples). Il peut également être utilisé pour la transmission de signaux radio. Son prix est d'environ 150-200 dollars US.

Il est important de noter que ces dongles peuvent offrir des fonctionnalités avancées et des performances supérieures, mais ils sont également plus chers que les modèles de base. Il est recommandé de bien réfléchir à ses besoins avant de choisir un dongle RTL-SDR pour s'assurer que l'on investit dans l'outil qui convient le mieux à ses besoins.

2.5 Eléments internes de la clé RTL-SDR (R820T2-RTL2832U)

La clé RTL-SDR (R820T2-RTL2832U) est un récepteur SDR à faible coût qui utilise un tuner R820T2 et un chipset RTL2832U pour numériser les signaux RF et les transmettre à un ordinateur via USB. Voici une description plus détaillée des composants analogiques et numériques de la clé RTL-SDR :

Composants analogiques :

- ✓ Tuner R820T2 : Il s'agit d'un tuner RF à faible bruit et à large bande passante qui couvre une gamme de fréquences de 24 MHz à 1,7 GHz. Il permet une plage de réglage de fréquence de 0,1 MHz avec une précision de 1 kHz. Le tuner a une sensibilité élevée, ce qui permet de recevoir des signaux faibles.
- ✓ Amplificateur RF : C'est un amplificateur à faible bruit qui amplifie le signal RF avant qu'il ne soit transmis au tuner. Il aide à augmenter la sensibilité de la clé RTL-SDR.
- ✓ Filtre passe-bas : Il est placé juste avant le tuner pour éliminer toutes les fréquences RF supérieures à 1,7 GHz. Cela permet de réduire les interférences qui peuvent affecter la qualité du signal.
- ✓ Oscillateur à quartz : Il fournit une horloge précise pour le circuit intégré RTL2832U. Il est utilisé pour synchroniser le tuner et le circuit numérique.
- ✓ Quartz : La clé RTL-SDR est équipée d'un oscillateur à quartz de haute précision qui fournit une horloge stable pour le tuner et le circuit intégré RTL2832U. Cela permet de

Chapitre2 : Récepteur SDR à faible coût RTL-SDR

garantir la précision de la fréquence de réception et d'assurer une bonne qualité de signal. La fréquence varie en fonction du modèle de la clé. Toutefois, pour la plupart des clés RTL-SDR, la fréquence du quartz est de 28,8 MHz.

- ✓ Connecteur MCX : La clé RTL-SDR est dotée d'un connecteur d'antenne MCX qui permet de connecter une antenne externe. Le connecteur MCX est compact et facile à utiliser, ce qui en fait un choix populaire pour les clés RTL-SDR. Il est important de noter que certains modèles de clés RTL-SDR peuvent avoir un connecteur SMA à la place du connecteur MCX.
- ✓ Le capteur infrarouge (IR) n'est généralement pas présent sur les clés RTL-SDR standard, car elles sont conçues pour la réception des signaux radiofréquences (RF). Cependant, certains modèles de clés RTL-SDR ont été modifiés pour ajouter un capteur IR, afin de permettre la réception de signaux infrarouges, tels que ceux émis par les télécommandes de télévision ou d'autres appareils électroniques.
- ✓ La LED présente sur la clé RTL-SDR (R820T2-RTL2832U) est utilisée pour indiquer l'état de fonctionnement de la clé. En général, la LED s'allume lorsque la clé est branchée sur un port USB et que le logiciel associé est en train de fonctionner.

Composants numériques :

- ✓ Chipset RTL2832U : C'est un circuit intégré qui convertit les signaux RF en signaux numériques pour être traités par l'ordinateur. Il a une résolution de 8 bits et une fréquence d'échantillonnage maximale de 3,2 MS/s. Il prend également en charge la démodulation de différents types de signaux, tels que la modulation d'amplitude (AM), la modulation de fréquence (FM), la modulation de phase continue (C-QUAM), la télévision numérique terrestre (DVB-T) et d'autres.
- ✓ La clé RTL-SDR dispose également d'une EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) qui stocke les informations de configuration de la clé, telles que les fréquences de réception, les modes de démodulation, les gains RF, etc. Cette mémoire est programmable et peut être modifiée à l'aide d'un logiciel spécifique. L'EEPROM permet également de stocker des informations d'identification telles que le

Chapitre2 : Récepteur SDR à faible coût RTL-SDR

numéro de série de la clé ou les informations de licence pour certains logiciels associés à la clé RTL-SDR.

- ✓ Port USB : Il est utilisé pour connecter la clé RTL-SDR à un ordinateur et pour transmettre les signaux numériques.

La figure 2.3 illustre les essentiels éléments internes de cette clé

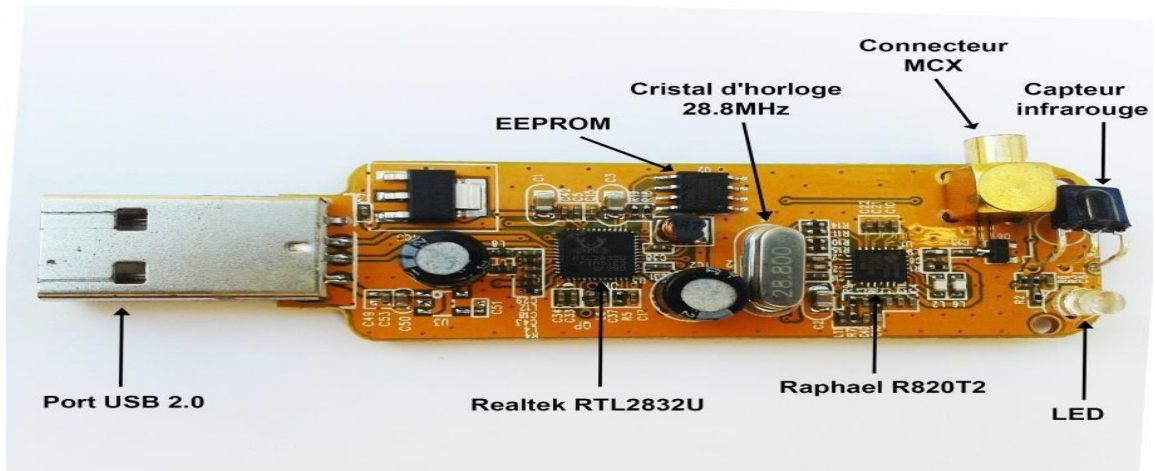


Figure 2.3 : Eléments internes de la clé RTL-SDR (R820T2-RTL2832U)

La puce RTL2832 de chez Realtek contient un convertisseur analogique-numérique, un USB *datapump* pour transférer les échantillons bruts I (In-phase) et Q (Quadrature) codé sur 8 bits avec une fréquence d'échantillonnage maximale de 3.2Mhz.

Il a été montré que la clé RTL-SDR est instable avec la fréquence d'échantillonnage maximale de 3.2 MHz qui engendre une perte des échantillons. Ainsi pour empêcher les pertes et garantir une stabilité du dongle la fréquence appropriée est de 2.4MHz [2]. Pour la réception, la gamme de fréquence varie et dépend du tuner utilisé.

2.6 Architecture de la clé RTL-SDR

La figure 2.4 illustre le schéma bloc d'une clé RTL-SDR.

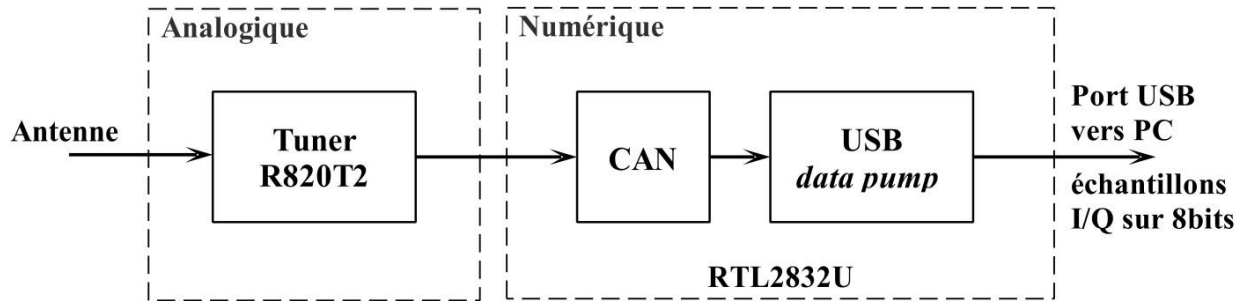


Figure 2.4 : Schéma bloc de la clé RTL-SDR.

Partie analogique représenté par le tuner radio Raphael R820T2:

- antennes,
- amplificateurs et filtres.

Partie numérique représenté par le RTL2832U combinant :

- le Convertisseur Analogique-Numérique (CAN),
- le port USB.

La figure 2.5 illustre l'architecture d'une clé RTL-SDR. Le traitement du signal est réalisé en deux étapes :

- Dans l'étage analogique : la transposition radio fréquence (RF) vers une fréquence intermédiaire (FI).

Le signal RF provenant de l'antenne passe par un amplificateur à faible bruit (Low Noise Amplifier LNA) et un filtre de rejection d'image. La transposition de fréquence RF est effectuée par oscillateur commandé en tension (VCO), à une FI de de 3.57MHz. Le signal à la sortie du mélangeur passe par un filtre passe bande FI pour conserver uniquement le signal utile à la fréquence FI. Le contrôle du gain est réalisé par le LNA et l'amplificateur à gain variable (VGA, Variable Gain Amplifier) [14].

- Dans l'étage numérique : la conversion de la FI en bande de base.

Le signal issu de tuner Raphael R820T2 est transféré au RTL2832U qui contient un CAN, sa fréquence d'échantillonnage est de 28.8MHz. Le signal FI est numérisé par le CAN et transposé en bande de base à l'aide d'un oscillateur à contrôle numérique (NCO, Numerically Controlled Oscillator). Un processus de décimation est effectué pour diminuer le taux d'échantillonnage à une valeur inférieure (exemple 2.4 MHz). Des échantillons I/Q (en phase et en quadrature) sont ainsi envoyés au PC à travers le port USB. Le signal que le PC reçoit a une largeur de bande de 2,4 MHz [10][14].

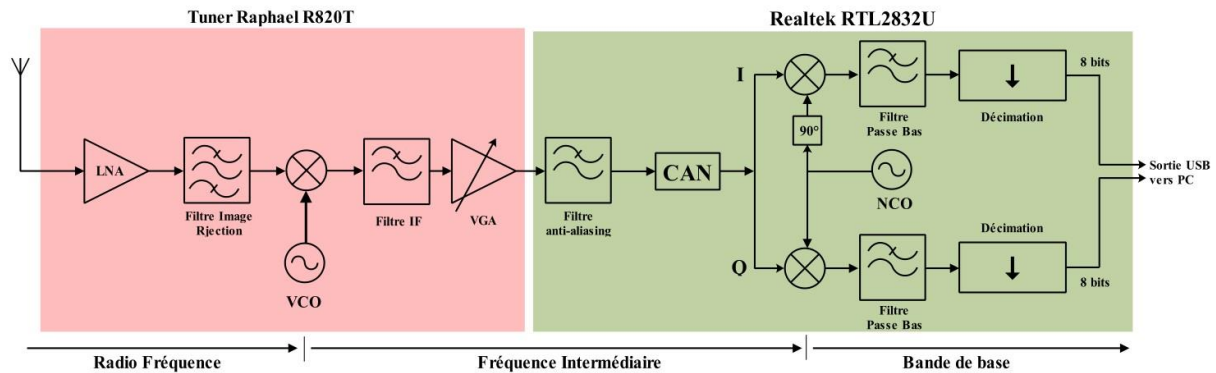


Figure 2.5 : L'architecture interne de la clé RTL-SDR (R820T/RTL2832U).

2.7 Exemple d'utilisation de la clé RTL-SDR pour la réception de données

Pour réceptionner la fréquence radio de $f_{RF} = 94.7$ MHz avec la clé Nooelec NESDR Mini USB RTL-SDR, DVB-T et ADS-B Récepteur (figure 2.1), procède comme suit :

- Le signal est capté par l'antenne, qui est connectée à la clé via un connecteur MCX.
- Le signal est amplifié par un amplificateur à faible bruit (LNA) intégré à la clé. Le gain de

cet amplificateur est d'environ 20 dB.

- Le signal est ensuite filtré par un filtre passe-bande pour sélectionner la fréquence de 94.7 MHz. La fréquence de coupure inférieure du filtre est de 88,7 MHz (94,7 MHz - 6 MHz), ce qui correspond à la limite inférieure de la bande FM. La fréquence de coupure supérieure est de 100,7 MHz (94,7 MHz + 6 MHz), ce qui correspond à la limite supérieure de la bande FM.
- Le signal passe ensuite par un mélangeur (mixer) qui mélange la fréquence de la station de radio sélectionnée avec une fréquence locale générée par un oscillateur local (LO). Le résultat est la fréquence intermédiaire (IF) qui est égale à la différence entre la fréquence de la station de radio et la fréquence LO, f_{OL} . Dans notre cas, la fréquence LO est de 98,27 MHz, ce qui donne une $f_{IF} = 3,57$ MHz

$$f_{IF} = f_{OL} - f_{RF} = 98,27 \text{ MHz} - 94,7 \text{ MHz}.$$

- Le signal IF de 3,57 MHz est ensuite filtré par un filtre passe-bas pour supprimer toutes les fréquences supérieures à la fréquence de coupure du filtre, qui est généralement autour de la moitié de la fréquence d'échantillonnage. Dans ce cas, le filtre coupe les fréquences supérieures à environ 14,4 MHz (la moitié de la fréquence d'échantillonnage de 28,8 MHz).
- Le signal filtré est ensuite échantillonné par le convertisseur analogique-numérique (ADC) intégré au RTL2832U à une fréquence de 28,8 MHz. Les échantillons sont ensuite traités par un logiciel SDR pour afficher le spectre du signal et pour démoduler le signal audio correspondant à la station de radio sélectionnée.

Remarque :

Le gain de la clé représente la quantité d'amplification appliquée au signal capté par l'antenne avant que celui-ci ne soit converti en signal numérique. Dans le cas de la clé Nooelec NESDR Mini USB RTL-SDR, le gain est d'environ 20 dB, ce qui peut augmenter la puissance du signal, mais peut également causer des problèmes de saturation et de distorsion si le signal est trop fort.

Ainsi, il est important de régler le gain en fonction de la puissance du signal capté pour éviter ces problèmes. Si le signal est faible, il peut être nécessaire d'augmenter le gain pour améliorer la qualité du signal, tandis que si le signal est trop fort, il peut être nécessaire de réduire le gain pour éviter la saturation et la distorsion du signal.

Pour ajuster le gain de la clé, il peut être nécessaire de modifier les paramètres du logiciel de réception utilisé, ou d'utiliser un filtre d'atténuation externe pour réduire la puissance du signal avant qu'il ne soit capté par la clé. En règle générale, il est recommandé de commencer avec un faible gain et d'augmenter progressivement le gain jusqu'à ce que le signal soit clair et précis, en évitant la saturation et la distorsion du signal.

2.8 Conclusion

Les clés RTL-SDR sont des périphériques peu coûteux et polyvalents qui permettent de recevoir et de démoduler une grande variété de signaux radio. Grâce à leur faible coût, ces clés ont permis à de nombreux amateurs de radio et de technophiles d'explorer le monde de la radio logicielle (SDR). Dans le prochain chapitre, en utilisant des outils tels que MATLAB, il est possible d'utiliser une clé RTL-SDR pour analyser des signaux et même décoder des signaux numériques tels que des signaux FM.

Chapitre 3
Résultats et interprétations

3.1 Introduction

L'analyse spectrale est une technique essentielle dans le domaine de l'électronique et des communications sans fil, qui permet d'extraire des informations précieuses à partir de signaux radio. La clé RTL-SDR est un dispositif basé sur le concept de radio logicielle (SDR), capable de recevoir des signaux sur une large gamme de fréquences. Elle capture les signaux analogiques et les convertit en signaux numériques, permettant ainsi leur traitement et leur analyse par des logiciels comme MATLAB.

En combinant la clé RTL-SDR et MATLAB, les utilisateurs peuvent acquérir des données à partir des signaux reçus par la clé RTL-SDR, les prétraiter et les analyser à l'aide des outils d'analyse spectrale de MATLAB. Cela permet d'identifier les caractéristiques des signaux, comme la fréquence, l'amplitude, la modulation, les interférences, etc.

L'analyse spectrale avec MATLAB et la clé RTL-SDR peut être utilisée dans divers domaines d'application, tels que la surveillance du spectre radio, la détection et la classification des signaux, l'identification des interférences, l'analyse des communications sans fil, la recherche en radiofréquence, et bien d'autres.

Dans ce chapitre, nous explorerons les fonctionnalités spécifiques de MATLAB pour l'analyse spectrale, ainsi que les possibilités offertes par l'utilisation de la clé RTL-SDR. Nous aborderons des exemples pratiques et des cas d'utilisation pour avoir un aperçu de comment exploiter cette combinaison puissante dans des propres projets d'analyse spectrale.

3.2 Acquisition des données de la clé RTL-SDR avec MATLAB

Afin d'exploiter les données émanant d'un environnement hertzien par la clé RTL-SDR en utilisant Matlab, nous devons suivre les étapes suivantes :

1- Installation du support RTL-SDR :

Tout d'abord, vous devez installer le support RTL-SDR dans MATLAB. Pour cela, vous pouvez utiliser le package MATLAB "Communications Toolbox Support Package for RTL-SDR". Assurez-vous d'avoir une connexion Internet active et suivez les instructions d'installation fournies par MathWorks.

2- Connexion de la clé RTL-SDR :

Une fois le support RTL-SDR installé, branchez la clé RTL-SDR sur un port USB disponible de votre ordinateur. Assurez-vous que les pilotes nécessaires sont installés correctement pour la clé RTL-SDR.

3- Démarrage de MATLAB et configuration :

Ouvrez MATLAB sur votre ordinateur et vérifiez que le support RTL-SDR est correctement configuré. Vous pouvez le faire en exécutant la commande suivante dans la fenêtre de commande MATLAB :

```
rtlsetup
```

Cette commande détectera automatiquement les périphériques RTL-SDR connectés et configurera MATLAB pour les utiliser.

4- Acquisition de données : Maintenant, vous pouvez utiliser les fonctions de MATLAB pour acquérir des données à partir de la clé RTL-SDR. Par exemple, la fonction `comm.SDRRTLReceiver` vous permet de recevoir des signaux radio et de les stocker dans une variable.

Voici un exemple de code pour acquérir des données radio FM avec la clé RTL-SDR

```
rtl=
comm.SDRRTLReceiver('CenterFrequency',98.5e6,'SampleRate',
2e6);

samples = rtl();
```

Dans cet exemple, nous avons configuré la fréquence centrale sur 98,5 MHz et le taux d'échantillonnage sur 2 MHz. La fonction `rtl()` capture les échantillons du signal radio et les stocke dans la variable 'samples'.

- 5- Traitement et analyse des données : Une fois que vous avez acquis les données, vous pouvez les traiter et les analyser à l'aide des outils de traitement du signal de MATLAB. Vous pouvez appliquer des opérations de filtrage, de démodulation, de détection de signaux, de représentation spectrale, etc., selon vos besoins.
- 6- Par exemple, pour effectuer une transformation de Fourier sur les échantillons pour obtenir la représentation spectrale du signal
- 7- Expérimentation et développement : Une fois que vous avez acquis et analysé les données, vous pouvez poursuivre votre expérimentation en utilisant les capacités de MATLAB. Vous pouvez explorer différentes techniques de traitement du signal, développer des décodeurs de signaux, concevoir des systèmes de communication, etc.

La figure 3.1 représente le spectre des données acquises à l'aide de la clé RTL-SDR NESDR Mini et du logiciel Matlab. La fréquence centrale utilisée pour cette acquisition est de 94.7 MHz. Dans la figure, le spectre est représenté en utilisant l'axe des fréquences en MHz, et il met en évidence les composantes fréquentielles présentes dans les données acquises. Cela permet d'obtenir une vue claire et détaillée des signaux capturés à la fréquence centrale de 94.7 MHz qui est la station radio de Tlemcen.

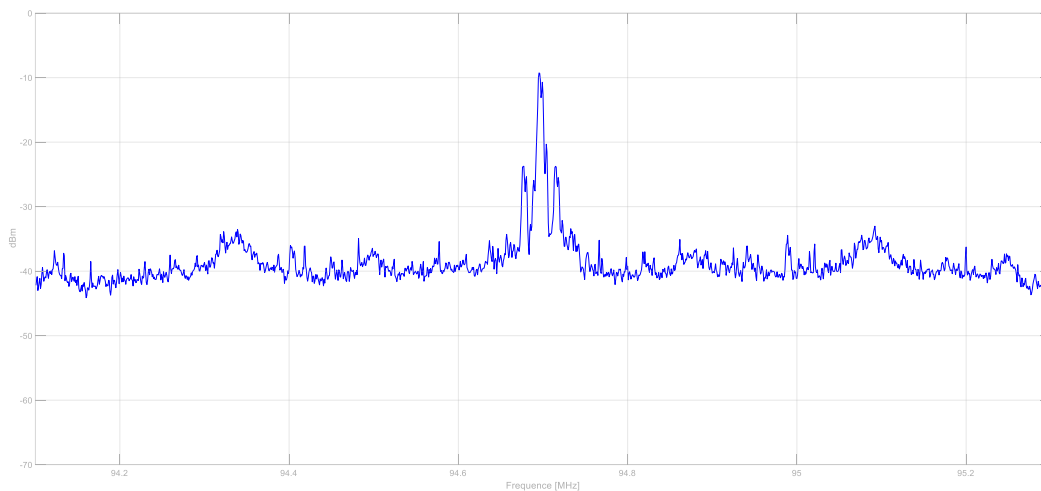


Figure 3.1: Exemple de Spectre de données de la clé RTL-SDR NESDR Mini

3.3 Largeur de bande de la clé RTL-SDR NESDR Mini

La clé RTL-SDR NESDR Mini offre une largeur de bande significative pour la réception des signaux radio. Basée sur le chipset RTL2832U, sa largeur de bande maximale théorique est d'environ 2,4 MHz à 2,8 MHz. Cependant, la largeur de bande réelle peut varier en fonction de divers facteurs, notamment les limitations matérielles et la configuration du

logiciel. Dans la plupart des cas, la largeur de bande pratique de la clé RTL-SDR NESDR Mini se situe généralement entre 2 MHz et 2,4 MHz. Cette largeur de bande permet de capturer et d'analyser efficacement un large éventail de signaux radio dans cette plage de fréquences.

L'étude comparative du spectre obtenu avec la clé RTL-SDR NESDR Mini en variant la valeur de la largeur de bande permet de mieux comprendre son impact sur la qualité et la résolution des signaux capturés.

En augmentant la largeur de bande à 3.2 MHz, figure 3.2, il est possible de capturer un plus grand nombre de composantes fréquentielles simultanément (autour de 94.7 et 96 MHz), ce qui peut être avantageux pour des applications telles que la surveillance du spectre ou la recherche de signaux spécifiques sur une large plage de fréquences. Cependant, il convient de noter que l'augmentation de la largeur de bande peut également entraîner une réduction de la résolution fréquentielle qui est de 3.125 KHZ, ce qui peut rendre difficile la distinction fine entre les différentes composantes du spectre.

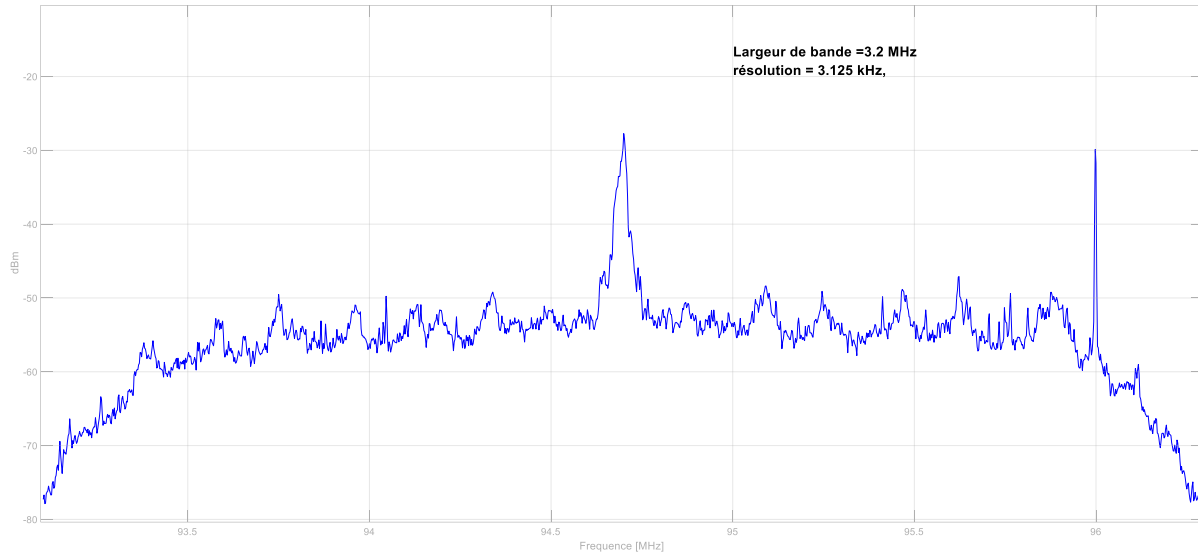


Figure 3.2 : Spectre de données Largeur de bande = 3.2 MHz

D'autre part, en réduisant la largeur de bande, la résolution fréquentielle du spectre augmente, permettant une meilleure séparation des signaux rapprochés en fréquence. Cela peut être bénéfique dans des scénarios où l'on souhaite analyser des signaux spécifiques avec une précision accrue comme pour la figure 3.3, où la largeur de bande est de 300 KHz et la résolution diminue à une valeur de 292.9 Hz. Cependant, une réduction de la largeur de bande peut entraîner la perte de certains signaux qui se trouvent en dehors de la plage capturée.

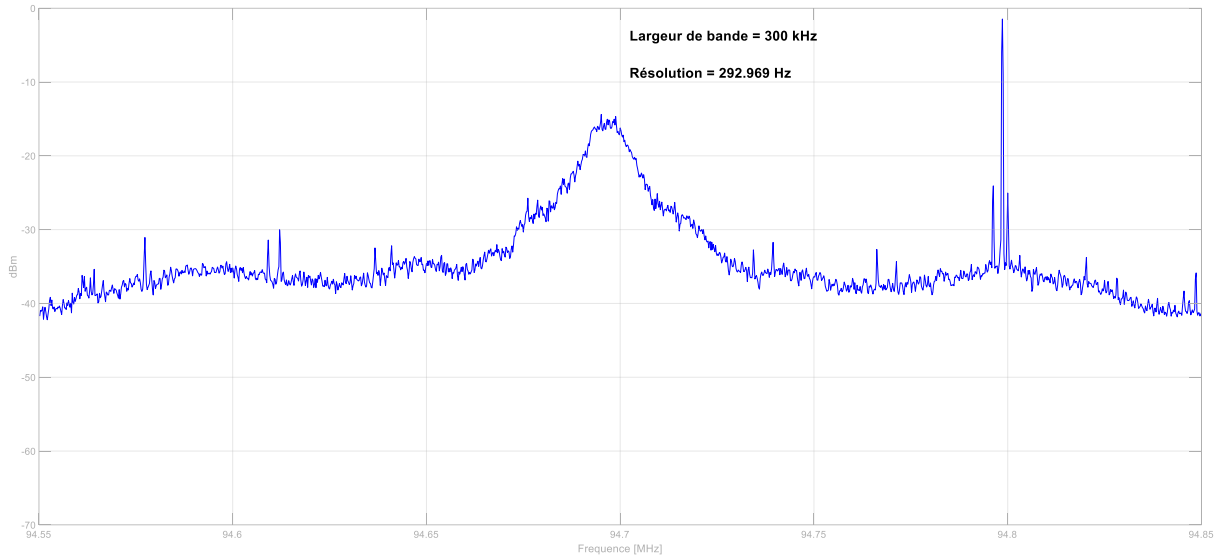


Figure 3.3 : Spectre de données Largeur de bande = 300 KHz

La figure 3.4 donne un compromis avec une valeur de largeur de bande égale à 2 MHz. La résolution fréquentielle est de 1.9 KHz.

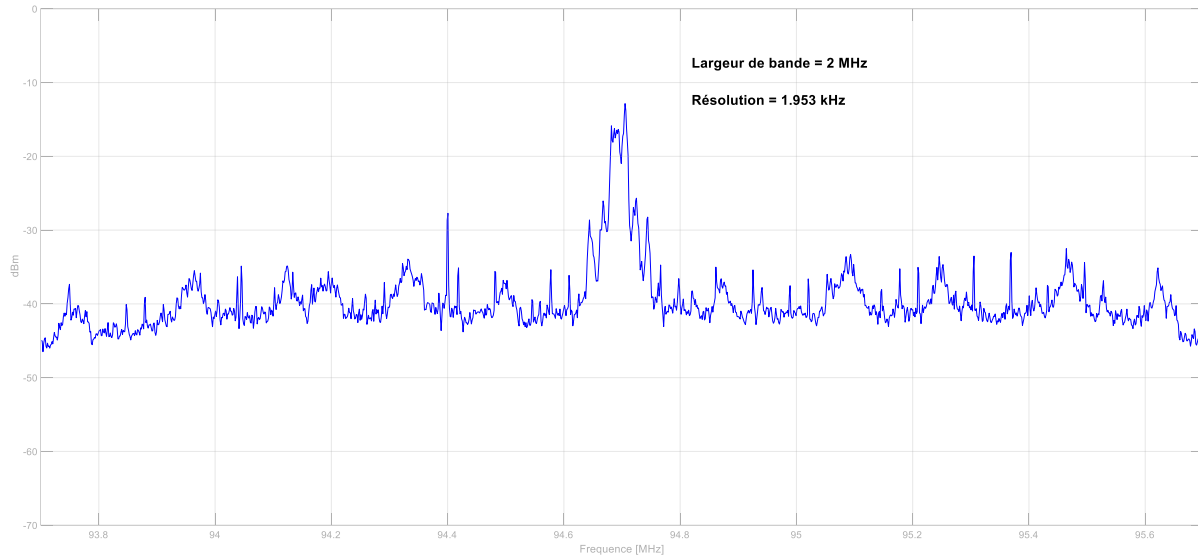


Figure 3.4 : Spectre de données Largeur de bande = 2 MHz

En réalisant une étude comparative en modifiant la valeur de la largeur de bande, il est possible de déterminer le compromis optimal entre la couverture spectrale et la résolution fréquentielle en fonction des besoins spécifiques de l'application. Cette analyse comparative permet de choisir la meilleure configuration de largeur de bande pour chaque situation, maximisant ainsi la qualité des données acquises avec la clé RTL-SDR NESDR Mini.

3.4 Analyse spectrale d'une station radio FM

La largeur de bande d'une station de radio FM (Frequency Modulation) est généralement de 200 kHz. Cela signifie que la bande passante allouée à une station FM pour diffuser

son signal audio est de 200 kilohertz. Cependant, il convient de noter que dans certains pays, notamment aux États-Unis, la largeur de bande peut être légèrement différente, allant de 150 kHz à 200 kHz.

L'analyse spectrale d'une station de radio FM fonctionnant à 94,7 MHz figure 3.5 révèle des caractéristiques intéressantes. Avec une largeur de bande de 200 kHz, la station occupe une plage de fréquences allant de 94,6 MHz à 94,8 MHz. Au sein de cette bande passante, la puissance du signal atteint son maximum à la fréquence centrale de 94,7 MHz. Cela correspond à la fréquence à laquelle la station émet avec une intensité maximale.

Cependant, aux fréquences légèrement adjacentes de 94,6 MHz et 94,8 MHz, la puissance du signal devient quasiment nulle. Cela est dû à la conception du système de modulation de fréquence qui maintient la transmission concentrée autour de la fréquence centrale, réduisant les émissions hors bande.

L'activité spectrale dans la bande de fréquences de la station radio est principalement concentrée dans la plage de 94,6 MHz à 94,8 MHz, avec une décroissance significative de l'intensité du signal à mesure que l'on s'éloigne de la fréquence centrale. Cette caractéristique permet à différentes stations de radio d'occuper des fréquences adjacentes sans interférence significative, garantissant ainsi une réception claire et distincte des stations sur des canaux différents comme le montre la figure 3.6.

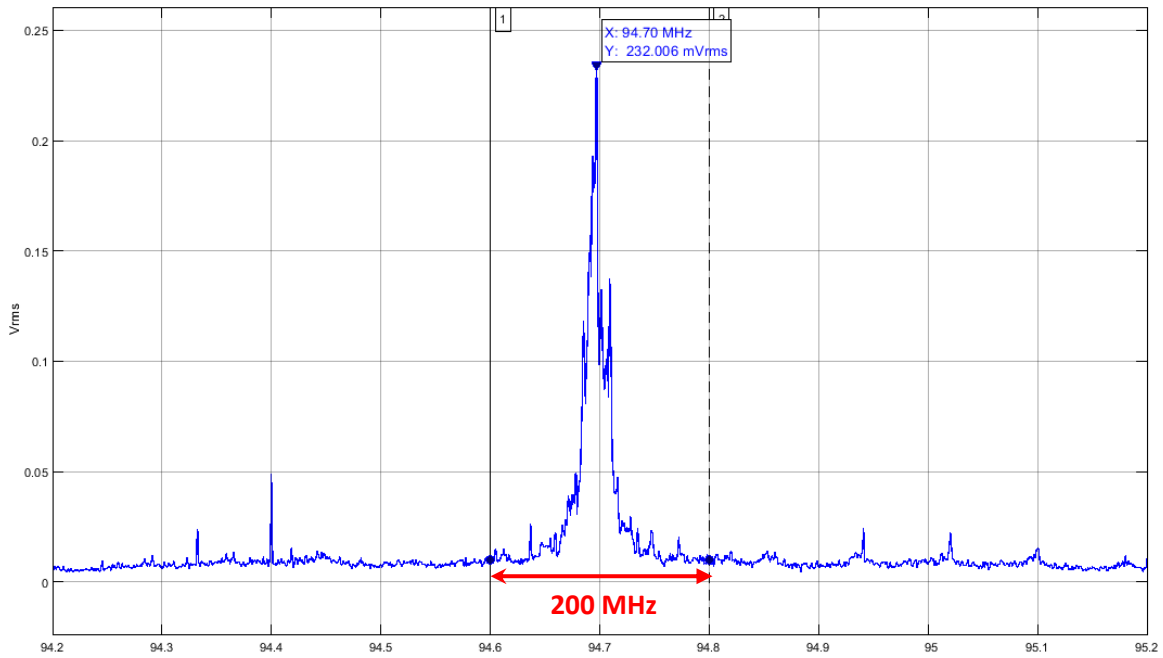


Figure 3.5 : Spectre d'une station radio FM de largeur de 200 kHz

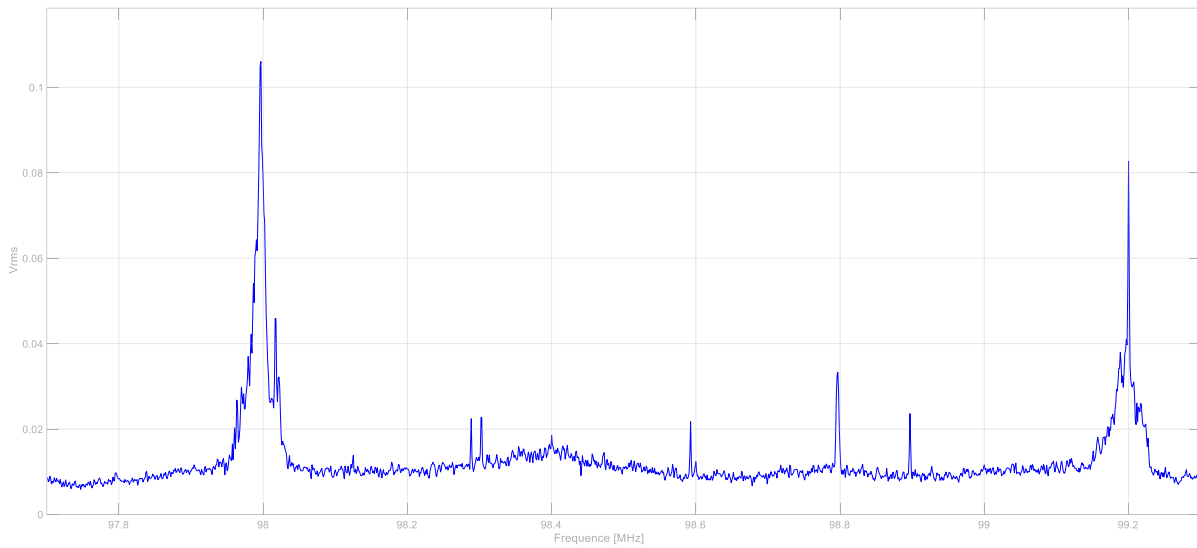


Figure 3.6 : Spectre de deux stations radios distinctes 98 et 99.2 MHz.

3.5 Spectre des maximums d'une station radio FM

Lors de l'analyse spectrale, le spectre FFT (Fast Fourier Transform) à un instant donné offre une représentation du spectre de fréquences à ce moment précis. Il permet de visualiser les différentes composantes fréquentielles présentes dans le signal étudié. Cependant, pour obtenir une vue complète du spectre sur toute la durée de l'analyse, il est nécessaire de prendre en compte le spectre des maximums donnée en figure 3.7. Ce dernier représente les valeurs maximales observées pour chaque fréquence tout au long de l'analyse (tracé en rouge), offrant ainsi une vue globale des fréquences les plus présentes et les plus dominantes dans le signal. La combinaison du spectre FFT à un instant donné (tracé en continu) et du spectre des maximums (tracé en tiret) permet donc d'obtenir une compréhension plus complète et détaillée de la composition fréquentielle du signal analysé. Ceci est clairement visible dans la figure présentée.

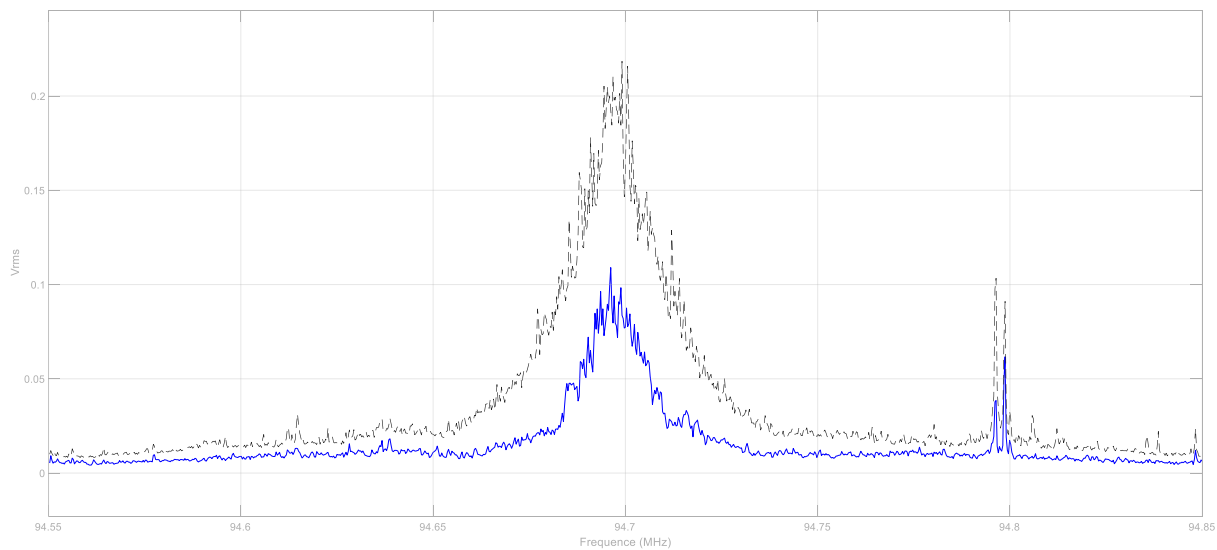


Figure 3.7 : Spectre instantané et spectre des maximums.

3.6 Spectre des maximums et spectrogramme d'une station radio FM

Prenons l'exemple d'une station de radio FM avec une fréquence centrale de 94,7 MHz et une largeur spectrale du signal de 200 kHz. Lorsque nous analysons le spectre des maximums pour cette station figure 3.8.a, nous observons les fréquences les plus dominantes présentes tout au long de l'analyse. Dans ce cas, nous nous attendons à voir un pic à la fréquence centrale de 94,7 MHz, qui représente la fréquence porteuse utilisée pour la transmission du signal FM. Ce pic correspond à la composante principale du signal de la station de radio.

De plus, en examinant le spectre des maximums, nous pouvons également identifier la présence de fréquences latérales symétriques par rapport à la fréquence porteuse. Étant donné que la largeur spectrale du signal est de 200 kHz, nous pouvons estimer que les fréquences latérales se situent à environ ± 100 kHz autour de la fréquence centrale de 94,7 MHz. Ces fréquences latérales représentent les différentes composantes du signal audio stéréo (gauche et droite) qui accompagnent le signal principal de la station de radio.

Par ailleurs, en utilisant le spectrogramme figure 3.8.b, nous obtenons une visualisation dynamique de l'évolution du spectre de fréquences de la station de radio FM au fil du temps. Cette représentation graphique nous permet d'observer les variations de puissance et les changements de contenu fréquentiel du signal. Nous pouvons y repérer les pics correspondant à la fréquence porteuse ainsi que les variations des fréquences latérales stéréo au fur et à mesure que le signal audio et les données sont transmis.

Chapitre3 : Résultats et interprétations

En combinant le spectre des maximums et le spectrogramme, nous obtenons une analyse complète du contenu fréquentiel de la station de radio FM. Le spectre des maximums nous révèle les fréquences dominantes tout au long de l'analyse, tandis que le spectrogramme nous permet de suivre les variations temporelles du spectre de fréquences, offrant ainsi une vision complète de l'évolution du signal.

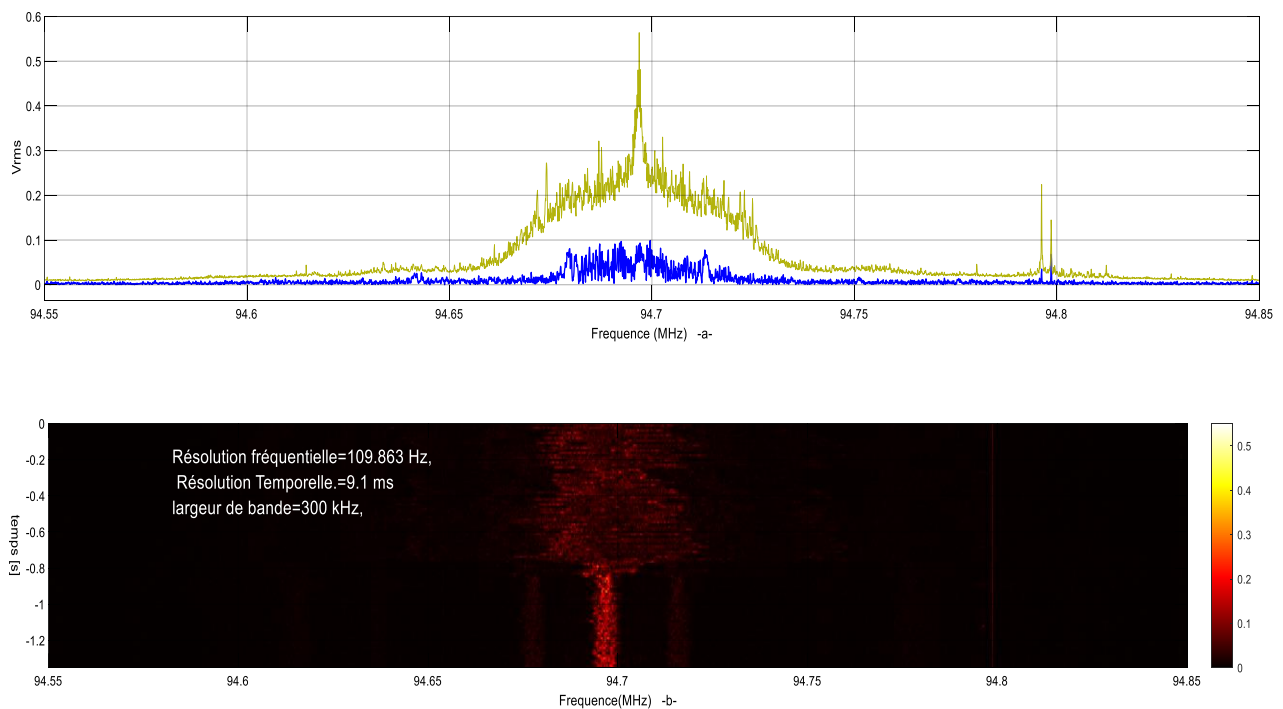


Figure 3.8 : Spectre et spectrogramme

3.7 Conclusion

L'utilisation du spectre et du spectrogramme à l'aide de MATLAB pour les données I/Q de la clé RTL-SDR offre une puissante méthode d'analyse spectrale. Grâce à la clé RTL-SDR, il est possible de capturer les signaux radio et d'extraire les données I/Q, qui représentent l'amplitude et la phase des signaux. En utilisant MATLAB, ces données peuvent être transformées en spectres, permettant ainsi de visualiser la distribution de l'énergie des signaux dans le domaine fréquentiel.

Conclusion générale

En conclusion, l'utilisation de la clé RTL-SDR NESDR Mini pour l'analyse de la bande FM offre une solution pratique et abordable pour explorer l'activité spectrale dans cette plage de fréquences.

La clé RTL-SDR NESDR Mini est capable de capturer une largeur de bande allant jusqu'à 3,2 MHz. Cette largeur de bande étendue permet de recevoir et d'analyser un large éventail de stations de radio FM.

L'exploitation des échantillons I/Q fournis par la clé RTL-SDR NESDR Mini est essentielle pour l'analyse spectrale sous l'environnement MATLAB. Les échantillons I/Q représentent les parties in-phase et en quadrature du signal reçu, ce qui permet de mesurer à la fois l'amplitude et la phase du signal. En utilisant la transformée de Fourier sur les échantillons I/Q, on peut obtenir le spectre du signal, qui représente la répartition de l'énergie dans le domaine fréquentiel.

De plus, l'utilisation du spectrogramme permet une analyse spectrale dans le domaine temporel en affichant l'évolution du spectre au fil du temps. Cela permet de détecter les variations de fréquence, les modulations, les interférences et autres caractéristiques dynamiques des signaux FM.

En combinant la largeur de bande étendue de la clé RTL-SDR NESDR Mini, l'exploitation des échantillons I/Q et l'utilisation d'outils tels que la transformée de Fourier et le spectrogramme dans MATLAB, il est possible d'effectuer une analyse spectrale détaillée de l'activité dans la bande FM ouvrant ainsi la voie à de nombreuses applications pratiques dans le domaine des communications et de la recherche en ingénierie des signaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Semlali, Hayat. "Développement de nouvelles structures et d'algorithmes appliquant l'échantillonnage aléatoire pour des systèmes de types radio logicielle et radio cognitive." PhD diss., Université De Nanates, 2015.
- [2] Réda, Yagoub (2019). Développement d'un procédé SDR hybride pour différentes générations de Télécommunications mobiles.
- [3] Andrew Barron, "Software Defined Radio for Amateur Radio Operators and Shortwave Listeners", N2AB.
- [4] Grand, M. (2011). Conception d'un crypto-système reconfigurable pour la radio logicielle sécurisée (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I) .
- [5] Sinha, D., Verma, A. K., & Kumar, S. (2016, January). Software defined radio: Operation, challenges and possible Grand, M. (2011). Conception d'un crypto-système reconfigurable pour la radio logicielle sécurisée (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I) :30.solutions. In *2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)* (pp. 1-5). IEEE .
- [6] Badarou, A. (2013). Etude et développement d'une architecture radio numérique innovante dans le contexte des communications aéronautiques (Doctoral dissertation, université de Nantes)
- [7] J. Mitola III et D. A. Reed, "Software-Defined Radio: Origins, Drivers, and International Perspectives"
- [8] Reed, Jeffrey Hugh. Software radio: a modern approach to radio engineering. Prentice Hall Professional, 2002.
- [9] Stewart, Robert W., Louise Crockett, Dale Atkinson, Kenneth Barlee, David Crawford, Iain Chalmers, Mike McLernon, and Ethem Sozer. "A low-cost desktop software defined radio design

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR." IEEE Communications Magazine 53, no. 9 (2015): 64-71.

[10] Joseph III. Mitola. Software radio architecture: object-oriented approaches to wireless systems engineering. Wiley, 2000.

[11] Laufer, Carl, and Edward J. Hoffman. The Hobbyist's Guide to the RTL-SDR: Really Cheap Software Defined Radio: A Guide to the RTL-SDR and Cheap Software Defined Radio by the Authors of the RTL-SDR. com Blog. Carl Laufer, 2016.

[12] Radioforeveryone. "RTL-SDR Generations". Accessed April 29, 2019. <http://www.radioforeveryone.com/p/rtl-sdr-generations-this-is-absolutely.html>.

[13] Rtl-sdr. "What is RTL-SDR? ". Accessed April 29, 2019. <https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>.

[14] Wickert, Mark A., and McKenna R. Lovejoy. "Hands-on software defined radio experiments with the low-cost rtl-sdr dongle." In 2015 IEEE Signal Processing and Signal Processing Education Workshop (SP/SPE), pp. 65-70. IEEE, 2015.