



2025 

RAPPORT SAÉ 202

Auteurs : Perez Loris & Auduberteau Emilien

INTRODUCTION

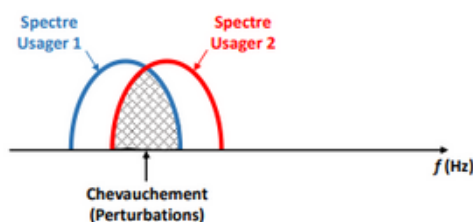
Comme nous le savons, il existe trois supports de transmission: le cuivre, la fibre et l'espace hertzien.

Dans le cadre de cette SAE nous allons étudier et mesurer les signaux qui circulent à travers l'air.

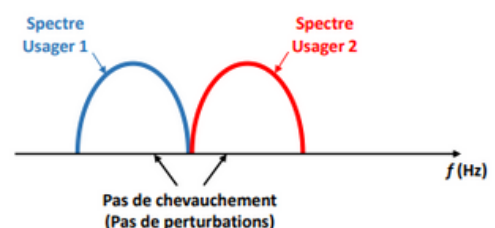
Cependant une question légitime peut se poser : "Comment se fait-il que les milliers de signaux ne se perturbent pas ?"... Tout simplement parce que L'ANFR "découpe" et met à disposition des opérateurs, des forces publiques et de passionnés, des plages de fréquences qui permettent à tous le monde de communiquer sans interférences.

Dans un premier temps, nous allons vous expliquer comment les données binaires sont codées. Puis nous allons vous expliquer comment moduler ces signaux dit "en bande de base". Et pour finir, nous allons vous montrer la chaine de modulation d'un signal avec GNU-Radio, puis nous allons mesurer et interpréter des spectres de signaux grâce à un analyseur de spectre afin de voir quelques plages de fréquences utilisées.

- *Canaux perturbés*



- *Canaux non perturbés*



SOMMAIRE

I] Le signal NRZ

- A) Préambule**
- B) Le débit**
- C) Le spectre**

II] La modulation

- A) Principe de la modulation**
- B) Modulation analogique FM**
- C) Modulation Numérique DAB+**

III] Manipulation & observations expérimentales

- A) GNU Radio**
- B) Tiny**

LE SIGNAL NRZ

PRÉAMBULE

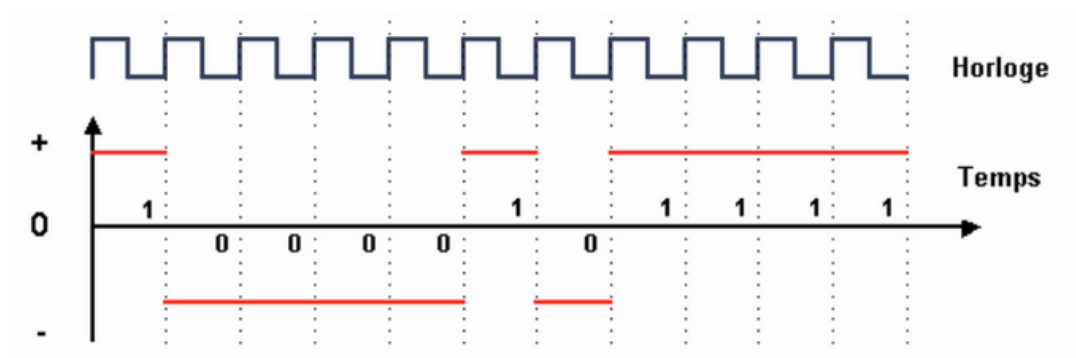


Figure I.1 : Chronogramme du signal NRZ + horloge

NRZ est une technique de codage utilisant deux niveaux de signal pour représenter l'information (0 ou 1) d'un signal logique numérique. Le niveau logique 0 correspond à une tension négative et le niveau logique 1 à une tension positive. Un bit d'information logique peut être transmis ou reçu dans chaque période d'horloge. Le débit en bauds, ou la vitesse à laquelle un symbole peut changer, est égal au débit binaire pour les signaux NRZ.

Ce codage est très facile à mettre en œuvre cependant il n'a pas de transition générée lors d'une longue séquence de 1 ou 0, ce qui rend la synchronisation difficile. Pour cette raison, le codage Manchester est préféré dans les cas où le flux à coder peut contenir de longues séquences de 0 ou 1 contiguës.

LE SIGNAL NRZ

LE DÉBIT

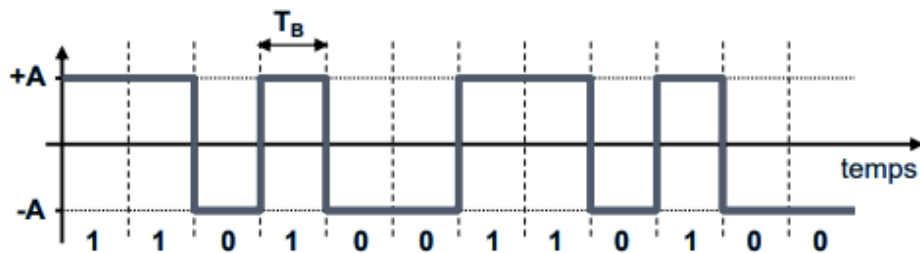


Figure I.2 : Chronogramme du signal NRZ

La fréquence (ou débit binaire) d'un signal se calcule en prenant l'inverse du temps de transmission d'un bit :

$$f = \frac{1}{T_b} \quad \text{où } T_b \text{ est la durée (en secondes) d'un bit.}$$

Une transmission avec le mécanisme NRZ aura le même débit en bauds et en bits car un symbole peut transporter un bit. Un débit binaire de 28Gbps (gigabit par seconde) équivaut à un débit binaire de 28GBdps (gigabaud par seconde).

LE SIGNAL NRZ

LE SPECTRE

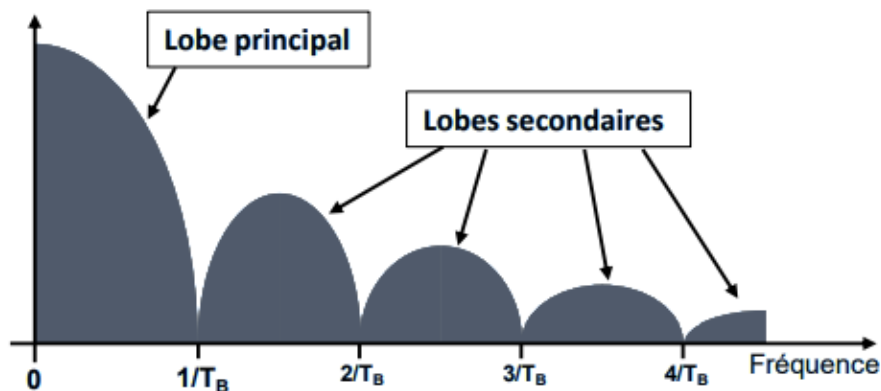


Figure I.3 : Spectre du signal NRZ

Intéressons-nous maintenant au spectre de ce signal. Nous savons depuis le début d'année que le spectre d'un signal aléatoire correspond à un ou plusieurs lobes contrairement aux signaux périodiques, où leur spectre correspond à une ou plusieurs raies.

De ce fait, les spectres des signaux aléatoires dépend du type de codage utilisé, dans notre cas, on choisi d'étudier le codage NRZ.

Pour le codage NRZ, le spectre du signal commence à 0Hz , puis, les lobes sont positionnés à intervalles réguliers f , $2f$, $3f$, ... Aussi, plus nous avançons dans l'espace des fréquences et plus les lobes sont petits (contiennent moins d'énergie donc moins d'informations).

Etant donné que le lobe principale (premier lobe) contient 90% de l'énergie du signal, il contient 90% de l'information. De ce fait, nous pouvons enlever les lobes secondaires grâce à un filtre passe-bas afin de réduire la bande passante du signal pour ne pas perturber d'autres plages de fréquences.

MODULATION

PRINCIPE DE LA MODULATION

La modulation est un principe très important dans les télécommunications. En effet, émettre un signal en bande de base c'est à dire avec des fréquences proche de zéro, possède plusieurs contraintes.

1. En radio, une antenne efficace doit avoir une taille proportionnelle à la longueur d'onde du signal. Pour des fréquences très basses, l'antenne serait immense, donc impossible à réaliser.
2. Les fréquences basses sont souvent plus sujettes au bruit (parasites électriques, interférences naturelles...). Cela réduit la qualité du signal transmis.
3. Si tous les signaux envoyés étaient en bande de base, cela empêcherait ce partage du spectre, car tous les signaux se mélangeraient.

C'est pour ça qu'il faut moduler les signaux.

Il existe deux type de modulation :

- Modulation analogiques : qui permet de moduler des informations analogiques (voix, musique). L'objectif est d'assurer une qualité suffisante des informations.
- Modulation numérique : qui permet de moduler des informations binaire. L'objectif est d'avoir le moins d'erreurs possible.

MODULATION

La modulation permet de traduire le spectre du message dans un domaine de fréquences qui est plus adapté au moyen de propagation et d'assurer après démodulation la qualité requise par les autres couches du système.

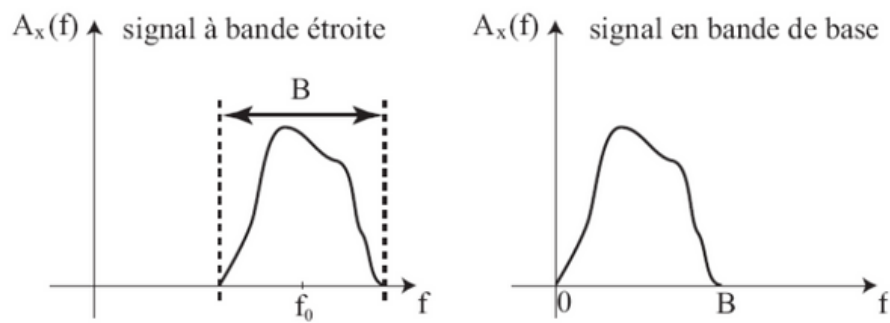


Figure II.1 : Translation de spectre autour de f_0

MODULATION ANALOGIQUE FM

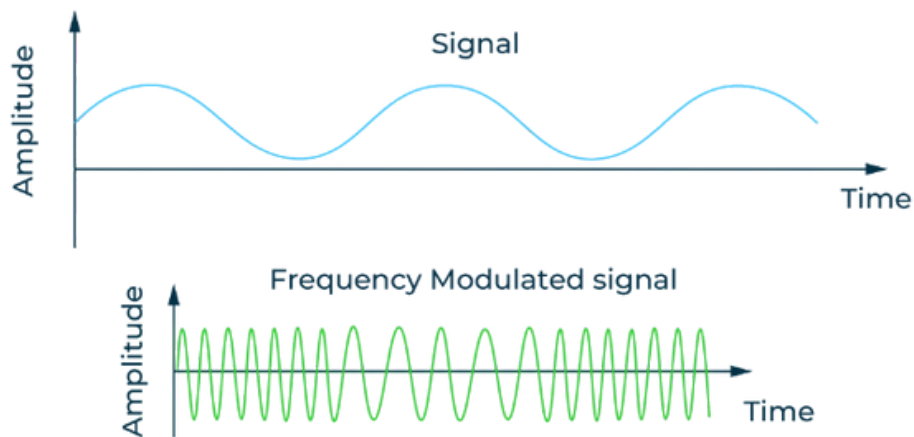


Figure II.2 : Modulation FM

La modulation de fréquence (FM) est une technique de modulation analogique dans laquelle la fréquence de l'onde porteuse varie en fonction de l'amplitude du signal de message tandis que l'amplitude et la phase restent constantes.

MODULATION

MODULATION NUMÉRIQUE ASK

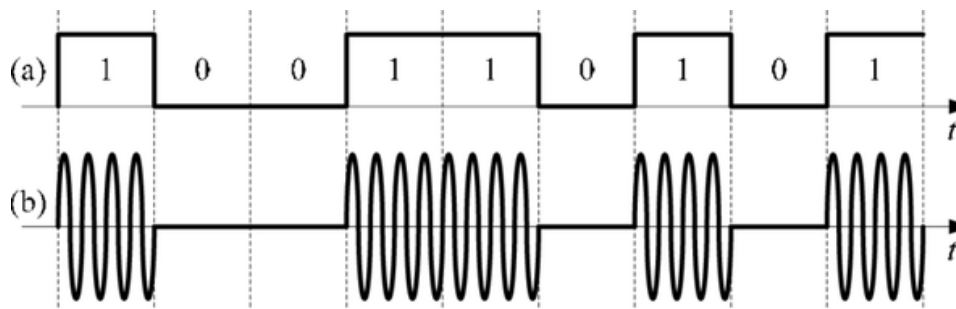


Figure II.3 : Modulation ASK

La modulation par déplacement d'amplitude (Amplitude Shift Keying, ASK) est une technique de modulation numérique dans laquelle l'amplitude du signal porteur varie en fonction du signal numérique d'entrée, représentant ainsi les valeurs binaires par des changements d'amplitude distincts. ASK est couramment utilisée dans les communications radio à courte portée, tels que les dispositifs RFID et les clés d'ouverture de voiture, en raison de sa simplicité et de sa faible consommation d'énergie.

Cette technique, bien que simple à mettre en œuvre, peut être sujette aux interférences et aux variations de l'amplitude du signal dues à des conditions environnementales.

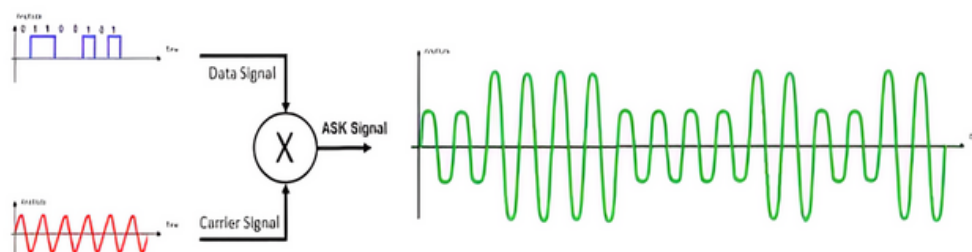
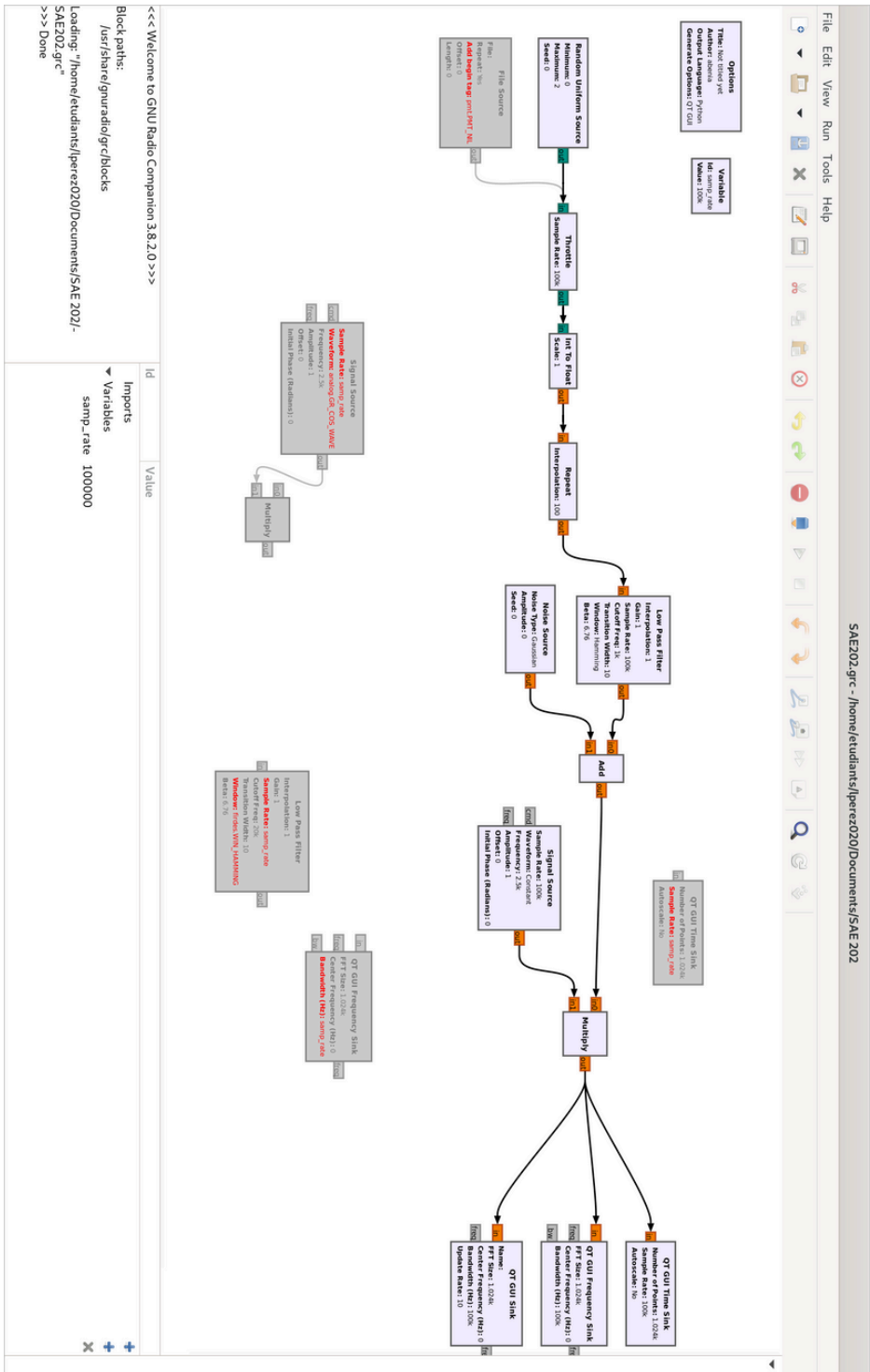


Figure II.4 : Chaîne de modulation ASK

MANIPULATIONS & OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES

GNU RADIO

Schéma GNU RADIO



MANIPULATIONS & OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES

GNU RADIO

Le schéma GNU RADIO ci-dessus permet de créer un signal numérique aléatoire, puis de le moduler en amplitude.

Pour cela, nous générons une suite aléatoire de 0 et de 1 à la vitesse de l'horloge du processeur, cependant, pour ne pas surcharger la machine, nous mettons le bloc "Throttle" qui permet de prendre 100 000 échantillons par seconde. Après ça, nous mettons le bloc "Repeat" avec une interpolation de 100, ce qui permet de répéter la valeur échantillonnée 100 fois. Cela permet de diviser par 100 la fréquence du signal.

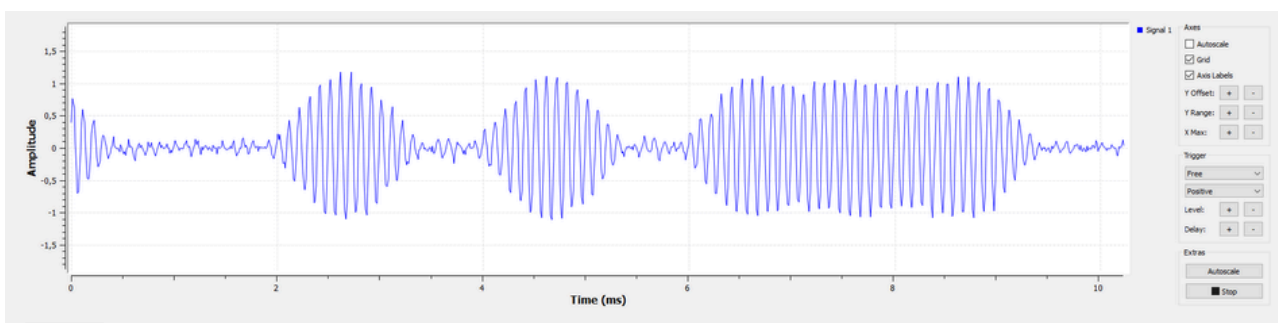
Après ça, nous mettons un filtre passe-bas coupant à 1Khz pour enlever les lobes secondaires. Après ça, nous additionnons le signal avec du bruit.

Ensuite nous le multiplions avec une cosinusoïde de 2,5Khz.

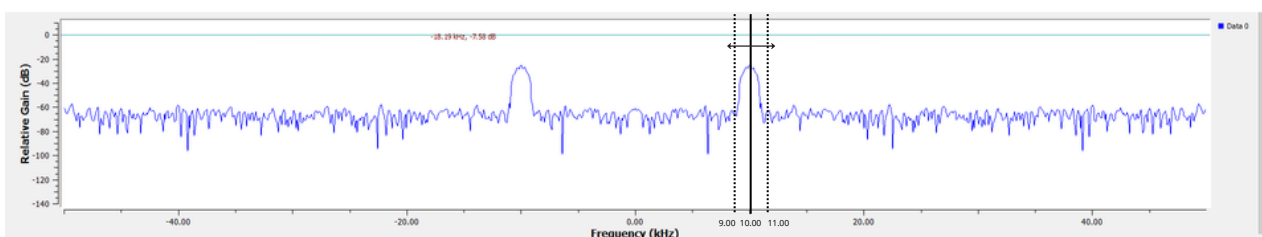
Finalement nous affichons l'allure temporelle du signal ainsi que son allure fréquentielle.

Ci-dessous vous trouverez la représentation temporelle et fréquentielle du signal numérique de 1Khz modulé en à un instant t avec un peu de bruit et une fréquence porteuse de 10KHz.

Représentation temporelle du signal à un instant t :



Spectre bilatéral du signal à un instant t :



MANIPULATIONS & OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES

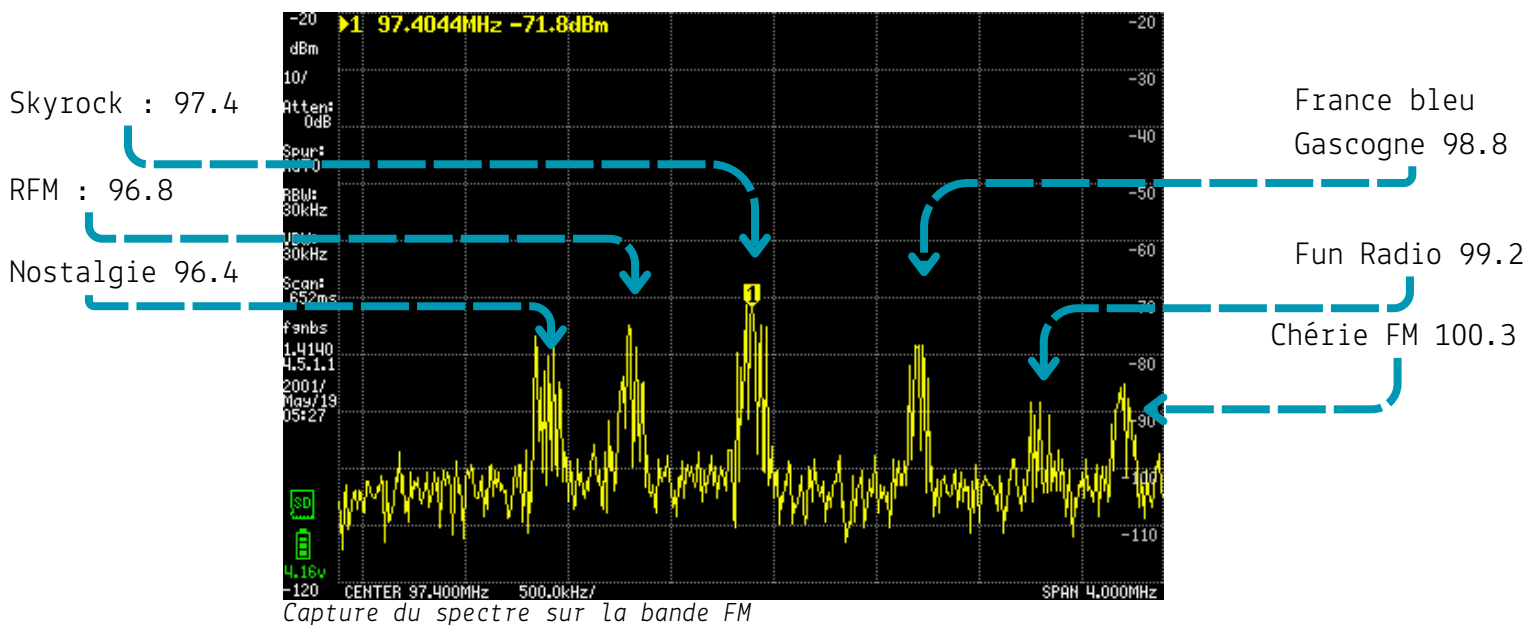
TINY

VISUALISATION DE LA BANDE FM À MONT-DE-MARSAN

1. Principe et matériel utilisé

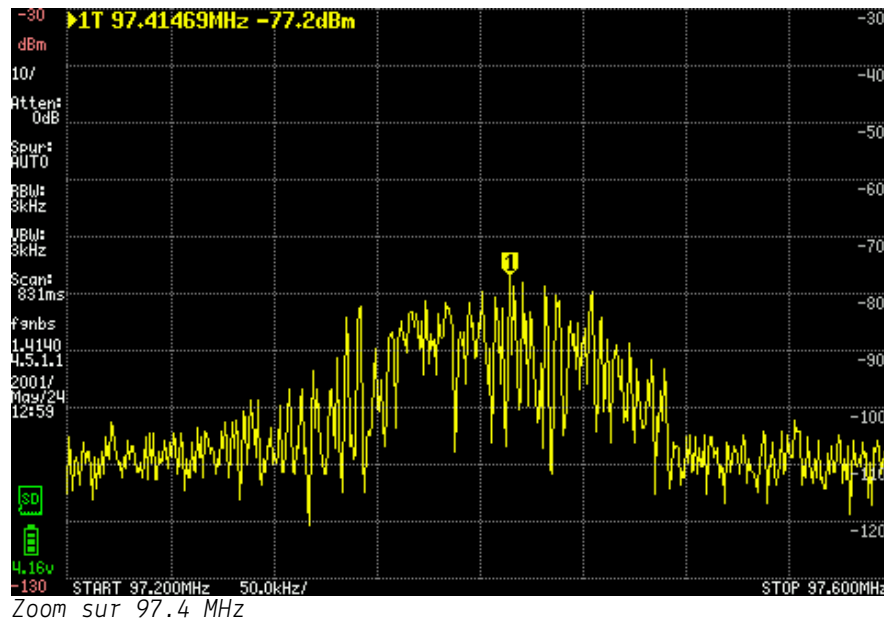
- Utilisation de l'analyseur de spectre TinySA ULTRA
- Recherche de la bande FM (87.5 MHz à 108 MHz)
- Logiciel TinySA-App utilisé pour une meilleure visualisation

2. Résultats obtenus



3. Caractérisation d'un signal FM

Afin d'analyser plus en détail un signal FM, nous avons choisi la station Skyrock, émettant à 97,4 MHz à Mont-de-Marsan. À l'aide de l'analyseur de spectre, nous avons réalisé un zoom sur cette fréquence afin d'observer les caractéristiques précises de ce signal.



• Type de modulation

Skyrock utilise la modulation de fréquence (FM), une modulation analogique dans laquelle la fréquence de la porteuse varie en fonction de l'amplitude du signal audio transmis. L'amplitude de la porteuse reste constante.

• Largeur de bande observée

Le spectre de Skyrock occupe une bande passante d'environ 200 kHz, ce qui est conforme à la norme FM en France (bande FM attribuée par l'ANFR entre 87,5 MHz et 108 MHz, avec un espacement de 100 kHz entre chaque station).

• Analyse spectrale

Sur l'analyseur de spectre, le signal de Skyrock se distingue par :

- Un lobe central large centré sur 97,4 MHz (porteuse).
- Une forme en cloche arrondie, typique d'une émission FM stéréo.
- L'absence de pics multiples comme dans le cas d'un signal numérique, ce qui confirme le caractère analogique.
- Une porteuse stable, sans fluctuations notables, traduisant une bonne qualité de transmission.

MANIPULATIONS & OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES

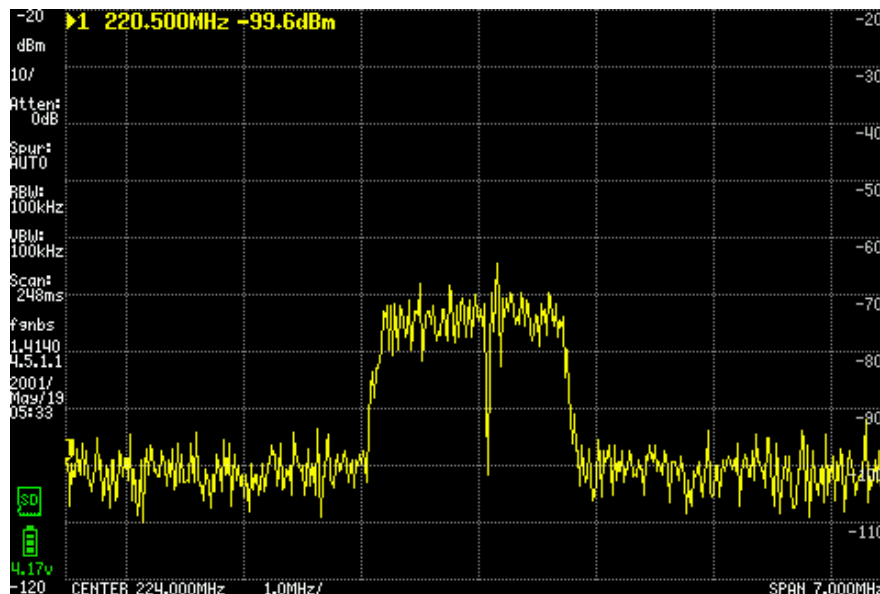
TINY

OBSERVATION DES RADIOS DAB+ À MONT-DE-MARSAN

1. Recherche des canaux DAB+

- Consultation du site *cartoradio.fr*
- Relevé des blocs DAB+ et fréquences associées.

2. Visualisation & vérification



Capture du spectre sur le canal 12A (223-225 MHz) DAB+

MANIPULATIONS & OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES

TINY

3. Localisation géographique

L'antenne se situe rue DE LA TÉOULÈRE à Saint Pierre Du Mont.



D'autres canaux : 8A et 11D seront bientôt disponible sur Mont-De-Marsan.

4. Analyse spectrale

- **Forme du signal**

Contrairement aux signaux analogiques FM, le spectre d'un signal DAB+ se distingue par une forme rectangulaire bien définie, avec des bords nets. Ce type de signal est typique d'un signal numérique multiplexé et indique l'utilisation d'une modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Cette forme régulière permet une meilleure résistance aux interférences et aux réflexions, notamment en environnement urbain.

MANIPULATIONS & OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES

TINY

- **Largeur de bande**

La largeur de bande observée est d'environ 1,5 MHz, ce qui est conforme aux spécifications du DAB+. Cette bande permet de transporter simultanément plusieurs stations radio numériques regroupées dans un multiplex.

- **Comparaison avec un signal FM**

En comparaison avec le signal FM de Skyrock (analysé précédemment), le spectre DAB+ est beaucoup plus net et uniforme. Le FM présente une forme plus arrondie, avec une porteuse unique et de nombreux lobes secondaires, ce qui reflète la nature analogique et continue du signal audio. Le DAB+, au contraire, offre un signal plus "carré", révélateur de la numérisation et compression du signal audio, et donc une utilisation plus efficace du spectre.

MANIPULATIONS & OBSERVATIONS EXPERIMENTALES

TINY

ANALYSE DES BANDES DE FREQUENCES DES OPERAEURS MOBILES

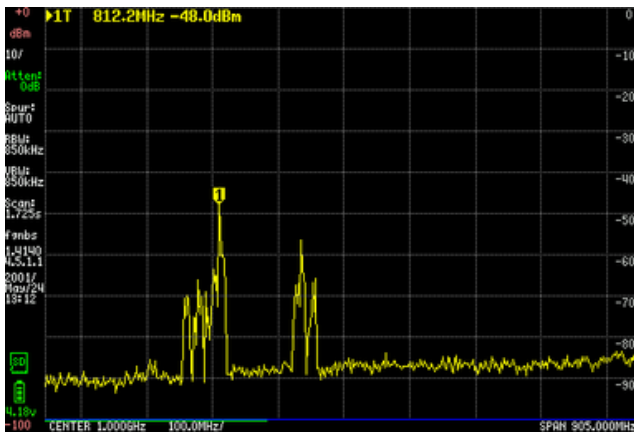
Tableau synthétique des principales bandes attribuées aux différents opérateurs :

Technologie	Bande de fréquence	Opérateurs présents	Largeur de bande typique
2G (GSM)	900 MHz / 1800 MHz	Orange, SFR, Bouygues	~10 à 20 Mhz
3G (UMTS)	2100 MHz	Orange, SFR, Bouygues	~10 à 20 Mhz
4G (LTE)	800 MHz, 1800 MHz, 2600 MHz	Orange, SFR, Bouygues, Free	~20 Mhz
5G (NR)	700MHz, 3.5GHz	Orange, SFR, Bouygues, Free (selon zone)	~60 à 100 MHz

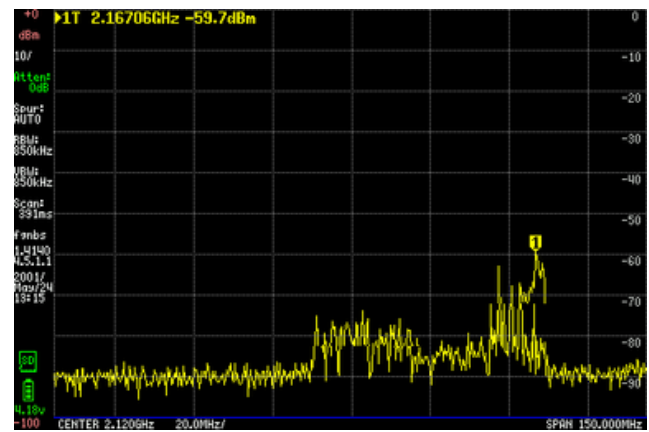
MANIPULATIONS & OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES

TINY

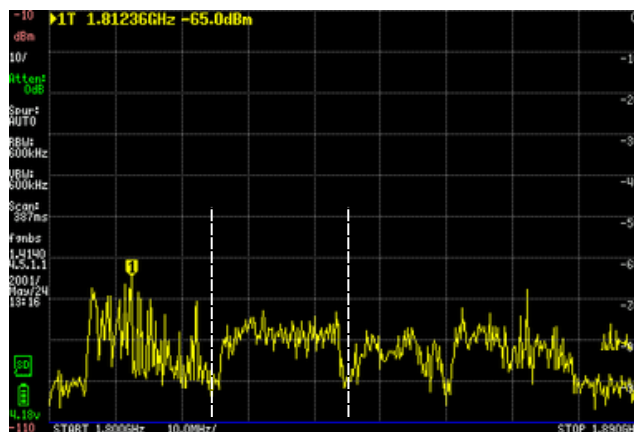
- ORANGE



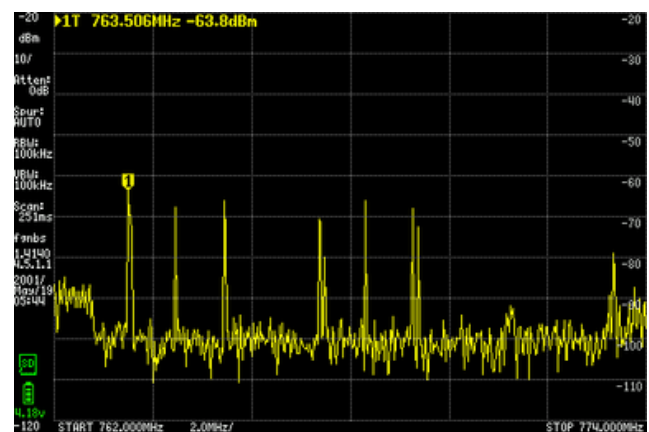
Réseau 2G



Réseau 3G



Réseau 4G LTE 1800

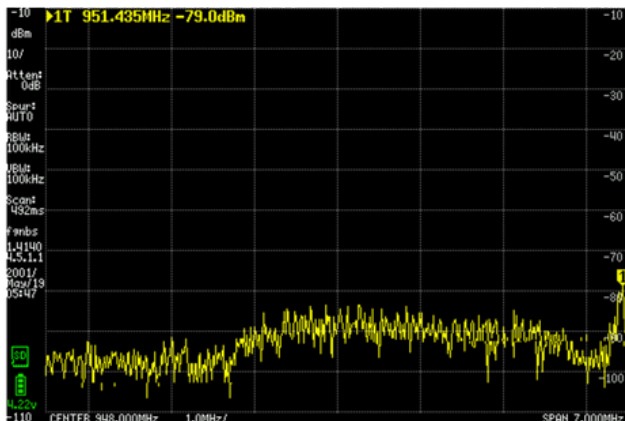


Réseau 5G NR 700

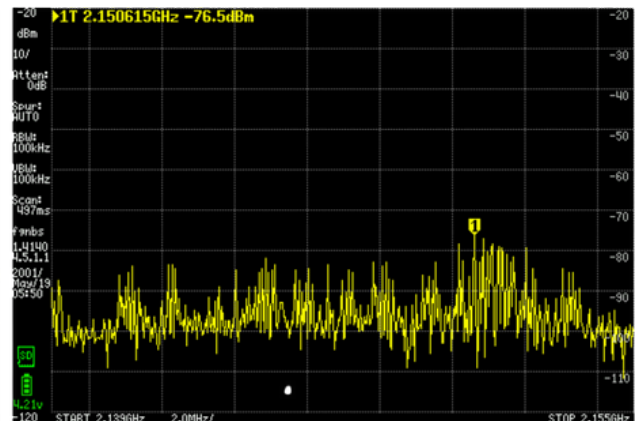
MANIPULATIONS & OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES

TINY

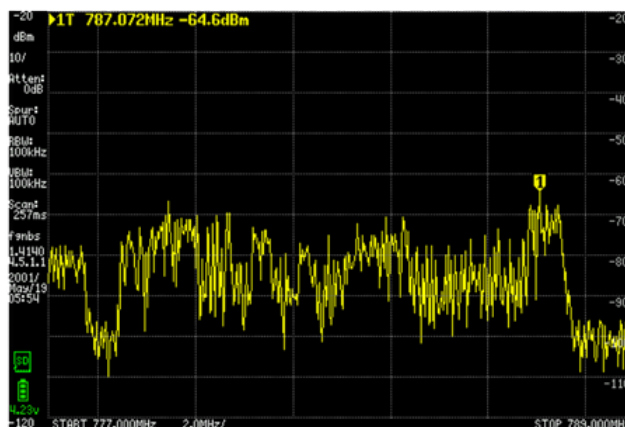
- **FREE**



Réseau 3G



Réseau 4G



Réseau 5G

Les réseaux mobiles (2G, 3G, 4G, 5G) utilisent différentes bandes de fréquences attribuées par l'ARCEP. Ces bandes de fréquences sont allouées aux opérateurs (Orange, Free...) pour transmettre voix, SMS et données mobiles.

La 4G et la 5G sont les technologies les plus couramment utilisées aujourd'hui, avec des débits plus élevés et une faible latence, notamment pour les usages multimédias.

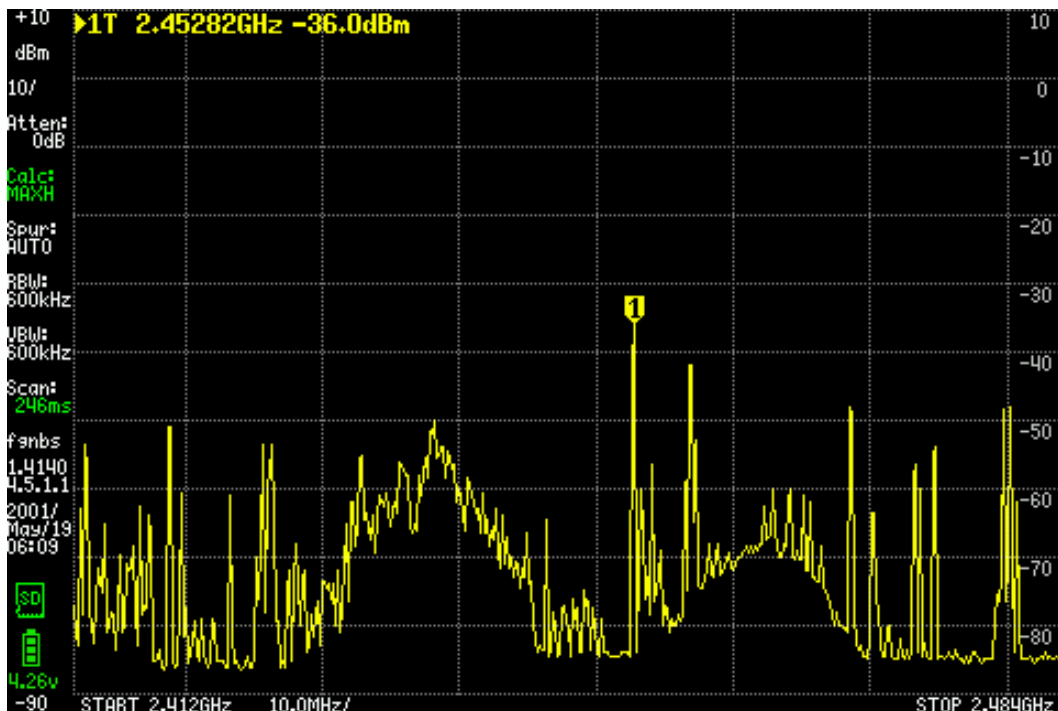
Nous avons utilisé l'analyseur de spectre pour observer les bandes de fréquences mobiles.

Les signaux mobiles utilisent des modulations numériques complexes comme le QAM (Modulation d'Amplitude en Quadrature), qui permettent de transmettre plusieurs bits par symbole. Plus la densité de modulation est élevée, plus le débit est grand, mais plus le signal devient sensible aux perturbations.

MANIPULATIONS & OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES

TINY

WIFI 2.4



Sur cette capture d'écran de l'analyseur de spectre, on observe la bande complète entre 2,412 GHz et 2,484 GHz.

Plusieurs pics sont visibles :

- Le pic principal à 2,45 GHz correspond au canal 9.
- On distingue d'autres zones d'activité autour de 2,43 GHz (canal 6) et 2,46 GHz (canal 11).
- Le spectre présente une occupation irrégulière, avec plusieurs signaux simultanés, ce qui suggère une forte densité de réseaux Wifi.

La puissance de chaque pic est exprimée en dBm ; ici, le pic principal atteint environ -36 dBm, ce qui indique un signal fort.

Cette visualisation permet de confirmer que plusieurs canaux sont utilisés en parallèle dans l'environnement de l'IUT.

CONCLUSION

Au cours de cette SAE, nous avons exploré de manière théorique et pratique la manière dont les signaux sont transmis dans l'espace hertzien, un des trois grands supports de transmission aux côtés du cuivre et de la fibre optique.

La partie théorique nous a permis de comprendre les principes fondamentaux du codage binaire (comme le NRZ), de la modulation (analogique et numérique), ainsi que les contraintes liées à la transmission en bande de base. Grâce à GNU Radio, nous avons pu visualiser la chaîne de traitement d'un signal numérique avant son émission.

La partie manipulation nous a permis de passer à la pratique grâce à l'analyseur de spectre TinySA. Nous avons pu :

- Observer et identifier plusieurs stations FM sur la bande 87,5-108 MHz, dont Skyrock à 97,4 MHz.
- Visualiser un signal DAB+ (canal 12A), une modulation numérique, avec une forme spectrale rectangulaire.
- Étudier les bandes de fréquences utilisées par les réseaux mobiles (2G à 5G).
- Analyser l'occupation de la bande Wifi 2,4 GHz au sein de l'IUT.

Ces observations confirment l'importance de l'attribution rigoureuse des fréquences par l'ANFR pour éviter les interférences et permettre une coexistence efficace des nombreux services radio. Elles illustrent aussi la diversité des technologies et modulations utilisées dans les communications modernes, qu'elles soient analogiques ou numériques.