

Université de Gafsa

Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de GAFSA

Département d'ASI



**Etude et conception d'un analyseur
communicant des signaux VOR.**

Présenté et soutenu par :

Samar ERRAHEM

En vue de l'obtention de

Licence Appliquée en Télécommunications

Sous la Direction de :

Sami ZAMMEL

Najeh DARGOUTH (OACA)

Soutenu le 08/06/2023

Devant le jury composé de :

Président :

ELHADJ Abdalah Saber

Rapporteur :

KHLIFI Ahmed

Encadrant :

ZAMMEL Sami

Encadrant Industriel :

DARGOUTH Najeh

2022/2023

Dédicaces

A Ma Mère Bouthaina

Grâce à ton amour , ton soutien continu et ta patience que j'ai pu réaliser tes vœux, que ce travail te soit particulièrement dédié en témoignage de mon grand amour, mon adoration et mon éternel attachement. Restes toujours ma lumière et ma source de bonheur.

Je prie pour que Dieu te protège et te donne santé et longue vie.

A Mon Père Mohamed,

Il est impossible de trouver les mots justes pour exprimer l'intensité de mon profond amour, de ma reconnaissance et de mon respect à ton égard . Ton sens de responsabilité, d'affection et de consécration pour la famille font de toi un père exemplaire.

A mon adorable frère Amin et mes sœurs Chahd et Loujain .

Je vous souhaite une vie pleine de joie et de réussite.

A toute ma grande famille,

A tous mes amis, et tous ceux que j'aime...

Je dédie ce travail.

Remerciements

Je souhaite exprimer ma gratitude envers mes encadreurs **Mr Zammel Sami** et **Mr Dargouthi Najeh** dar pour avoir proposé ce sujet et pour m'avoir accompagné et soutenu tout au long de ce projet. Leur patience et leur disponibilité ont été d'une grande aide dans la préparation de ce projet de fin d'études.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réussite de ce travail. Mes enseignants à l'ISSAT Gafsa méritent également notre reconnaissance pour leur métier noble d'enseignement et pour leur transmission de savoir, mais aussi pour l'inspiration et l'ambition qu'ils nous ont inculquées.

Enfin, je suis reconnaissant envers les membres du jury pour avoir assisté à la présentation de ce travail.

Résumé

Le VOR (VHF Omnidirectional Range) est un système de localisation radioélectrique qui utilise des fréquences VHF (108-118 MHz) pour la navigation aérienne. Il est largement utilisé à l'échelle internationale pour guider les avions sur des distances courtes et moyennes, et peut être contrôlé et surveillé à distance. Le principe du VOR repose sur une émission dont la phase varie en fonction de l'azimut du récepteur par rapport à la station au sol. Les objectifs de notre projet de fin d'études sont :

- Etude du système VOR
- Etude des signaux Modulés dans un système VOR
- Conception d'un analyseur des signaux VOR
- Simulation des fonctions de notre analyseur
- Rendre l'analyseur communicant

Mots clés :

Analyseur , signal VOR , LabVIEW , Interface graphique , Arduino , clé RTL-SDR

Liste des abréviations

AM : Modulation d'Amplitude.

A/N : Analogique/Numérique.

BF : Basse Fréquence.

BL : Bande Latérale.

CVOR : VOR Conventionnel.

DC : Courant Continu.

DME : Distance Measuring Equipment.

EPROM : Erasable Programmable Read-Only Memory.

FLI : Fréquence Latérale Inférieure.

FLS : Fréquence Latérale Supérieure.

FM : Modulation de Fréquence.

HF : Haute Fréquence.

HSI : Horizontal Situation Indicator.

ILS : Instrument Landing System.

OACI : Organisation Internationale de l'Aviation Civile.

OBI : Omni-Bearing Indicator.

PLL : Phase Locked Loop.

RAM : Random Access Memory.

REF : Référence.

RF : Radio Fréquence.

Rq : Remarque.

RMI : Radio Magnetic Indicator.

SDR : Software Defined Radio.

VAR : Variable.

VHF : Verry High Frequency.

VOR : VHF Omnidirectionnel Range.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
I- CHAPITRE 1 :VOR RADIOPHARE OMNIDIRECTIONNEL VHF.....	3
1- INTRODUCTION.....	4
2- PRESENTATION VOR.....	4
3- FONCTIONNEMENT	4
4- ÉMISSIONS DES SIGNAUX.....	5
4-1- Le signal de référence Réf	6
4-2- Le signal variable(VAR) :.....	8
5- LE SPECTRE DE PORTEUSE DE SIGNAL VOR :.....	9
6- ALIGNEMENT ET MAINTENANCE DU VOR :	10
6-1- Alignement du VOR :	10
6-2- Maintenance du VOR :	10
6-3- Dipôles de moniteur :.....	11
7- PROBLEMATIQUE SOULEVEE :.....	12
8- HYPOTHESE DE SOLUTION PROPOSEE :	12
9- PRINCIPE DE BASE DE L' ANALYSEUR :.....	13
10- CONCLUSION	15
II- CHAPITRE 2 : ÉTUDE ET CONCEPTION.....	16
1- INTRODUCTION.....	17
2- CONCEPT GENERAL D'UN ANALYSEUR	17
3- ÉTUDE THEORIQUE DES PRINCIPAUX FONCTIONS DE NOTRE ANALYSEUR.....	18
3-1- Étude théorique de traitement du signal	18
3-1-1- Récepteur :.....	18
3-1-2- Amplificateur :.....	19
3-1-3- Mélangeur :.....	19
3-1-4- Démodulation d'un signal :	19
3-1-5- Démodulation AM :.....	19
3-1-6- Démodulation FM :	20
3-1-7- Détection de l'enveloppe :.....	21

3-2- Étude de fonctionnement des différents blocs	21
3-2-1- PLL :	21
3-2-2- Comparateur de phase :	21
3-2-3- Filtres:	22
3-2-4- L'oscillateur :	22
3-2-5- Multiplexeur :	22
3-2-6- Un Processeur :	23
3-2-7- Une mémoire EPROM :	24
3-2-8- Convertisseur analogique numérique :	24
4- ETUDE ET CONCEPTION PRATIQUE.....	25
4-1- Bloc1 : Réception du signal	25
4-2- Bloc2 : Démodulation du signal	27
4-2-1- Résolution mathématique de la démodulation d'un signal VOR :	28
4-3- Bloc3 : Multiplexeur 16 :1	29
4-4- Bloc4 : Conversion analogique Numérique	29
4-5- Bloc5 : Conversion de puissance en niveau de puissance (%).....	30
4-6- Bloc6 : Comparaison et affichage.....	31
5- MODULE D'ALIMENTATION STABILISE	33
6- CONCLUSION	33
III- CHAPITRE 3 : SIMULATION/VALIDATION ET TELE-CONTROLE	34
1- INTRODUCTION.....	35
2- BESOINS FONCTIONNELS	35
2-1- Partie logicielle	35
2-2- Outils de simulation : Matériel utilisé.....	35
2-2-1- LabVIEW :	35
2-2-2- Clé RTL-SDR :	37
3- LE TELE-CONTROLE :	38
3-1- Rendre l'analyseur communicant et accessible a distance	38
3-2- Conception de l'application de contrôle et de commande	38
3-3- Création de l'interface graphique	39
3-4- Création d'une base de données.....	40
3-5- Communication Arduino base de données	41
3-6- Mise hors ou sous tension de l'analyseur	41

3-7- Création d'interface de contrôle	42
4- SIMULATION ET VALIDATION.....	42
4-1- Création du signal	42
4-1-1- Modulation FM :.....	43
4-1-2- Modulation AM :.....	43
4-2- Analyse et traitement du signal :.....	45
4-2-1- Démodulation AM :.....	45
4-2-2- Démodulation FM :	46
5- CONCLUSION	46
CONCLUSION GENERALE	47
BIBLIOGRAPHIE	48

Liste des figures

Figure I-1 : Station VOR sidi ali ben oune	2
Figure I-1 : Principe de la navigation en route du VOR.....	4
Figure I-2 : Principe de la navigation en route du VOR.....	5
Figure I-3 : Schéma de la génération du signal REF	6
Figure I-4 : Schéma de la génération du signal VAR	9
Figure I-5 : Signal et modulation AM	9
Figure I-6 : Spectre de fréquence du VOR	10
Figure I-7 : Représentation schématique d'une installation d'une antenne VOR	11
Figure I-8 : Concept de l'analyseur	14
Figure II-1 : présentation des outputs d'un analyseur	17
Figure II-2 : Gestion des blocs de l'analyseur	18
Figure II-3 : Schéma électrique d'un démodulateur	19
Figure II-4 : Démodulation AM	20
Figure II-5 : <i>Démodulation FM</i>	20
Figure II-6 : Schéma de principe de PLL	21
Figure II-7 : comparateur de phase.....	21
Figure II-8 : Courbe du signal filtré Figure II-9 : courbe du signal après oscillation.....	22
Figure II-10 : Symbole normé du convertisseur analogique numérique	24
Figure II-11 : blocs de conception.....	25
Figure II-12 : Bloc de réception du signal.....	26
Figure II-13 : Bloc de démodulation du signal.....	28
Figure II-14 : Principe de la conversion analogique numérique.....	30
Figure II-15 : Conversion de puissance	30
Figure II-16 : Concept général de l'analyseur	32
Figure II-17 : Différents blocs d'une alimentation stabilisée	33
Figure III-1 : Interface LabVIEW	36
Figure III-2 : Front Panel.....	36
Figure III-3 : Block Diagram.....	37
Figure III-4 : Composition interne de la clé RTL-SDR.....	37
Figure III-5 : Concept du système de récolte des données	39
Figure III-6 : Séquence d'une requête http.....	39
Figure III-7 : Stockage/récolte des données	40
Figure III-8 : Commande alimentation à distance	42

Figure III-9 : Interface de contrôle	42
Figure III-10 : Modulation d'un signal FM sur LabVIEW	43
Figure III-11 : Schéma global de la modulation du signal VOR	44
Figure III-12 : Schémas global de la démodulation AM	45
Figure III-13 : Schémas global de la démodulation FM	46

Introduction générale

La résolution du problème de la localisation a toujours préoccupé l'homme, ce qui a conduit à la mise au point de nombreuses techniques. La navigation est la discipline qui rassemble ces techniques permettant de déterminer la position d'un objet mobile et de recueillir d'autres informations sur son déplacement dans l'espace. Ces méthodes peuvent être divisées en deux grandes catégories. La première, appelée navigation à l'estime, consiste à estimer la position actuelle de l'objet mobile en se basant sur sa position antérieure, son orientation et sa vitesse. La deuxième catégorie vise à estimer la distance et/ou l'orientation de l'objet mobile par rapport à un ou plusieurs points de référence dont la position est connue, afin de déterminer sa position dans l'espace. Ces points de référence peuvent être naturels, tels que l'astronavigation ou la navigation céleste, ou artificiels, tels que la radionavigation.

La radionavigation est une méthode de navigation qui se sert des ondes radioélectriques. Elle nécessite des équipements externes tels que des émetteurs au sol ou des satellites, ainsi que des équipements à bord de l'aéronef qui utilisent des ondes radio pour fournir des indications précises sur la position de l'avion dans l'espace. Au fil des années, de grands progrès ont été réalisés dans ce domaine, notamment avec l'avènement des systèmes en VHF qui sont devenus fondamentaux dans la navigation aérienne. L'OACI a instauré des normes pour garantir la sécurité du trafic aérien, étant donné que toute erreur ou dysfonctionnement peut avoir des conséquences catastrophiques. Ainsi, pour améliorer la formation et la maintenance des équipements, nous avons développé un simulateur de récepteur du signal VOR avec le logiciel LabVIEW. Ce manuscrit est structuré en trois chapitres :

- Le chapitre 1 présente les systèmes de radionavigation et leur classification.
- Le chapitre 2 décrit le fonctionnement de l'analyseur et la méthode de démodulation du signal VOR.
- Le chapitre 3 est consacré à la simulation avec LabVIEW et les équipements utilisés pour réaliser ce projet.

Les systèmes de navigation aérienne, tels que la gamme de radiophares omnidirectionnels VHF (VOR), le système d'atterrissage aux instruments (ILS), l'équipement de mesure des distances (DME) et les radiobalises (MKR BCN), sont d'une importance cruciale pour l'aviation civile internationale et militaire. Les pilotes doivent pouvoir se fier au fonctionnement précis de ces systèmes de navigation terrestres pour obtenir des informations

fiables sur leur position, leur direction et leur distance réelles, ainsi que pour atterrir en toute sécurité. Le récepteur d'un avion compare et mesure la différence de phase de ces signaux, ce qui donne une position radiale précise qui est affichée sur son Omni-Bearing Indicator (OBI), son Horizontal Situation Indicator (HSI) ou son Radio Magnetic Indicator (RMI), ou une combinaison de deux types différents.



Figure III-1 : Station VOR sidi ali ben oune

I- Chapitre 1 :VOR Radiophare Omnidirectionnel VHF

1- Introduction

Le chapitre actuel traite de la radionavigation, une technique de navigation aérienne qui utilise des moyens radioélectriques pour localiser un avion. Il explore les différents moyens de radionavigation et se concentre particulièrement sur la station VOR en fournissant des descriptions détaillées de son fonctionnement et de ses caractéristiques techniques. De plus, le chapitre fournit des précisions sur les équipements embarqués dans l'avion pour utiliser le système VOR.

2- Présentation VOR

Le VOR (VHF Omnidirectionnel Radio range) est un système normalisé par l'OACI pour la navigation aérienne qui permet aux avions de trouver leur chemin vers leur destination en se calant sur des repères VOR.

En utilisant un récepteur VOR, il est possible de déterminer un relèvement magnétique par rapport à une station au sol (qui émet les signaux VOR et dont la position est connue), ainsi que le radiale sur lequel le récepteur (l'avion) est positionné.

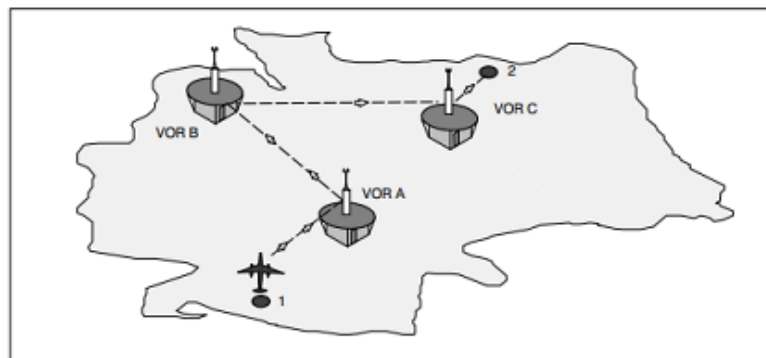


Figure I-1 : Principe de la navigation en route du VOR

3- Fonctionnement

Le fonctionnement du système VOR est basé sur la mesure de l'angle de phase de deux signaux rayonnés par la station à une fréquence de 30Hz. Le premier signal est un signal de référence qui est rayonné avec la même phase dans toutes les directions. Le deuxième signal est variable et sa relation de phase par rapport au premier change en fonction de l'azimut. L'angle de phase électrique mesuré par le récepteur correspond à l'angle d'azimut. Les informations fournies par le VOR au pilote via le récepteur embarqué incluent :

1. L'azimut de la position de l'aéronef par rapport à la balise du sol se réfère à l'angle formé entre les lignes du nord magnétique et la direction de la balise au sol vue de l'aéronef.
2. Le relèvement fournit des informations sur la position de l'avion par rapport à la route présélectionnée (ligne de position), en indiquant s'il vole à gauche ou à droite de celle-ci, ou s'il se trouve au-dessus.
3. L'indication "from/to" renseigne sur la direction de vol de l'avion par rapport à la balise VOR, en indiquant s'il se dirige vers celle-ci ou s'en éloigne.

Rq :: La technique de modulation d'amplitude AM implique la variation de l'amplitude d'un signal de fréquence élevée, appelé signal porteur, en fonction d'un signal de fréquence plus basse, appelé signal modulant. C'est ce dernier qui contient l'information à transmettre.

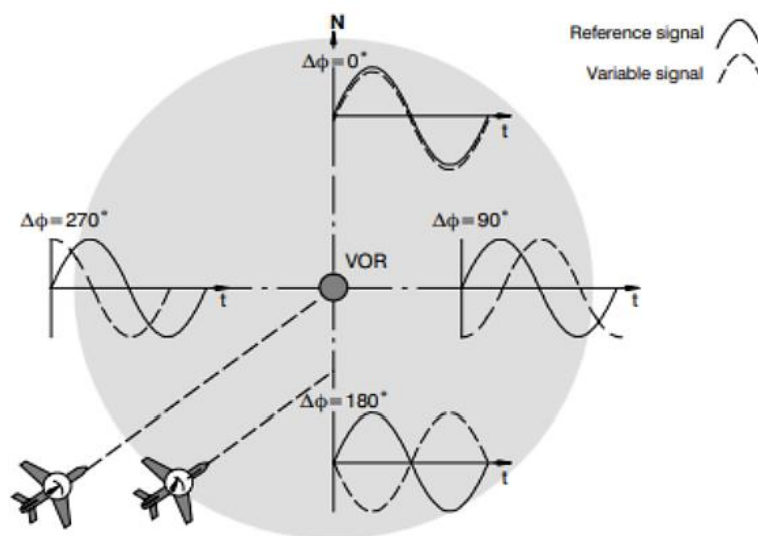


Figure I-2 : Principe de la navigation en route du VOR

4- Émissions des signaux

Chaque degré d'azimut du rayonnement émis par un émetteur VOR correspond à une information spécifique.

Pour cela, l'émetteur émet simultanément deux signaux distincts :

- un premier signal omnidirectionnel de 30 Hz appelé signal "Réf".
- un second signal variable de 30 Hz appelé signal "VAR", qui est émis par une antenne directionnelle tournant en permanence sur elle-même.

- Le signal variable est émis par une antenne composée de deux dipôles croisés, chacun émettant un signal suivant un diagramme en huit.

Par ailleurs, un autre signal de 30 Hz, fixe et stable, est émis avec la même puissance et la même phase dans toutes les directions par une autre antenne, servant de référence pour la comparaison de phase avec le signal variable.

Les deux signaux à 30 Hz ne diffèrent que par leurs phases, ce qui nécessite l'utilisation de deux porteuses différentes pour leur transmission. Ainsi, l'un des signaux est modulé en amplitude (AM) pour transmettre le signal variable, tandis que l'autre est modulé en fréquence comme sous-porteuse de fréquence $f_0 = 9960$ Hz pour transmettre le signal "Réf".

4-1- Le signal de référence Réf

Le VOR émet un signal qui utilise deux ondes sinusoïdales de 30Hz modulées, dont la phase relative est déterminée par la direction du signal. Le signal de référence modifie en fréquence une sous-porteuse de $f_0 \pm 9960$ Hz avec une excursion de fréquence de ± 480 Hz en utilisant une modulation de fréquence (FM).(figure1.3)

Cette sous-porteuse est émise en utilisant une modulation d'amplitude (AM) de la porteuse f_0 à un taux de modulation de 30% par une antenne omnidirectionnelle polarisée horizontalement. (figure1.5)

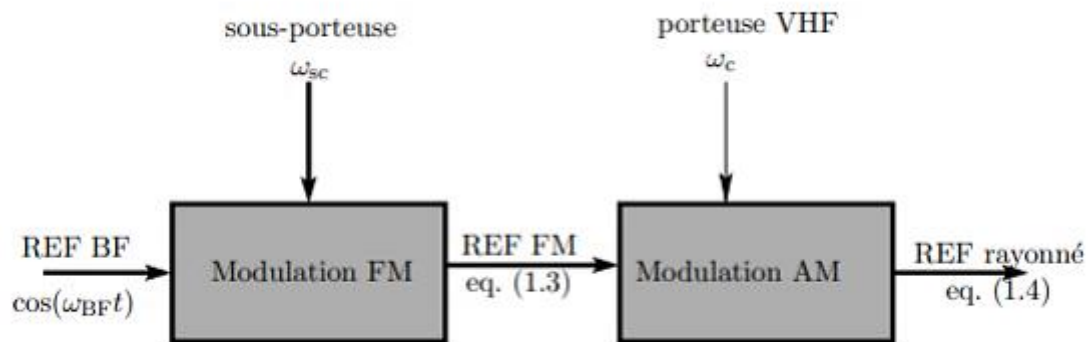


Figure I-3 : Schéma de la génération du signal REF

La sous-porteuse modulée en fréquence est représentée par l'expression suivante :

La fréquence instantanée de la sous-porteuse est représentée par l'équation :

$$f_0(t) = f_0 + \Delta f_0 \cos(\omega t) \quad (1.1)$$

où f_0 est la fréquence nominale de la sous-porteuse (9960 Hz), ω est la pulsation du signal modulant ($2\pi \cdot 30$), et Δf_0 est l'excursion de fréquence autour de f_0 qui est égale à $n f$, avec ; $n = 16$ (une valeur fixée par l'OACI) et $f = 30$ Hz, donc

$$\Delta f_0 = 16 * 30 = 480 \text{ Hz.}$$

Ainsi, on peut exprimer la fréquence instantanée comme :

$$f_0(t) = 9960 + 480 \cos(\omega t). \quad (1.2)$$

Le signal modulé en fréquence peut être représenté par l'équation générale :

$$e_0(t) = A_c \cos(\Phi_0(t)) \quad (1.3)$$

où la phase instantanée $\Phi_0(t)$ est liée à la pulsation instantanée $\omega_0(t)$ par la relation :

$$\omega_0(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (1.4)$$

En utilisant l'expression de $f_0(t)$, on peut exprimer :

$$\omega_0(t) = \omega_0 + \Delta \omega_0 \cos(\Omega t) = 2\pi f_0(t) \quad (1.5)$$

La phase instantanée peut être écrite sous la forme :

$$\Phi_0(t) = \int \omega_0(u) du = \omega_0 t + \frac{\Delta \omega_0}{\Omega} \sin(\Omega t) + cte \quad (1.6)$$

En choisissant l'origine des phases pour que la constante soit nulle et en remarquant que $\frac{\Delta \omega_0}{\Omega} = \frac{\Delta f_0}{f_0} = n$, on peut écrire l'équation finale pour le signal modulé en fréquence comme :

$$e_0 = A_c \cos(\omega_0 t + n \sin(\Omega t)). \quad (1.7)$$

Expression de la porteuse VHF modulée en amplitude par la sous porteuse :

Il convient de rappeler que la forme générale d'un signal modulé en amplitude s'écrit comme ceci :

$$e(t) = [A_p + x(t)] \cos(\omega t) \quad (1.8)$$

Dans ce contexte, la porteuse VHF modulée est représentée par la fonction $\cos(t)$ et le signal BF modulant est représenté par la fonction $x(t)$:

$$x(t) = e_0 = A_c \cos(\omega_0 t + n \sin(\Omega t))$$

$$e(t) = [A_p + A_c \cos(\omega_0 t + n \sin(\Omega t))] \cos(\omega t)$$

$$e(t) = A_p \cos(\omega t) \left[1 + \frac{A_c}{A_p} \cos(\omega_0 t + n \sin(\Omega t)) \right] \quad (1.9)$$

Les diverses formes de modulation d'amplitude sont distinguées les unes des autres par leur taux de modulation. Ce taux correspond au rapport entre les amplitudes maximales du signal modulant et de la porteuse, soit $m = \frac{A_c}{A_p} = 0,3$.

4-2- Le signal variable(VAR) :

Dans ce cas précis, le signal de position, également appelé 30 Hz variable, est utilisé pour moduler la porteuse en amplitude avec un taux de modulation de 30%. La Figure 1.6 montre les raies spectrales qui se situent entre -30 et +30 de part et d'autre de la porteuse.

Le 30 Hz VAR est caractérisé par une variation linéaire de sa phase instantanée en fonction de l'azimut, exprimée par $VAR = \omega t - \theta$. Ainsi, à un azimut donné θ , le signal VAR est représenté par l'expression suivante :

$$e_{VAR}(t) = \cos(\Omega t - \theta) \quad (1.10)$$

Étant donné que le signal est transmis de manière omnidirectionnelle par modulation d'amplitude, la forme du signal de 30 Hz variable émis par le VOR est la suivante :

$$e(t) = [A_c + e_{VAR}] \cos(\omega t) = [A_c + \cos(\Omega t - \theta)] \cos(\omega t)$$

$$e(t) = E_r [1 + m_1 \cos(\Omega t - \theta)] \quad (1.11)$$

avec $E_r = A_c \cos(\omega t)$ et $m_1 = 0.3$ le taux de modulation du 30Hz VAR.

Le champ électrique E , qui s'exprime sous la forme $f(\theta, t) \cdot \cos(\omega t)$, peut être interprété comme l'émission d'une porteuse modulée en amplitude par un signal de 30 Hz dont la phase est déterminée par l'azimut θ , dans toutes les directions.

En développant l'expression (1.11) de E , on obtient :

$$E = E_r + m_1 \cos(\omega t - \theta) E_r = E_r + E_{BL} \quad (1.12)$$

Et : $E_{BL} = m_1 \cos(\omega t - \theta) E_r$.

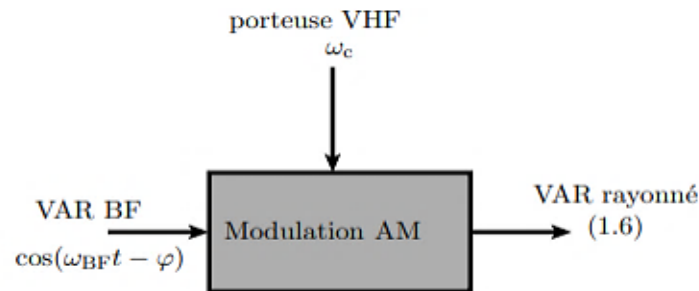


Figure I-4 : Schéma de la génération du signal VAR

5- Le spectre de porteuse de signal VOR :

En résumé, la porteuse VHF subit une modulation d'amplitude par une sous-porteuse, l'indicatif de la station, la phonie et le signal variable. Le spectre de lignes d'un VOR est représenté dans la figure ci-dessous et comprend les fréquences suivantes :

- Une modulation d'amplitude à 30 H
- Une modulation d'amplitude à 9960 Hz avec une modulation de fréquence à 30 Hz (avec une excursion de ± 480 Hz)
- Une modulation d'amplitude pour le signal vocal et le signal d'identification, ainsi que la porteuse elle-même.

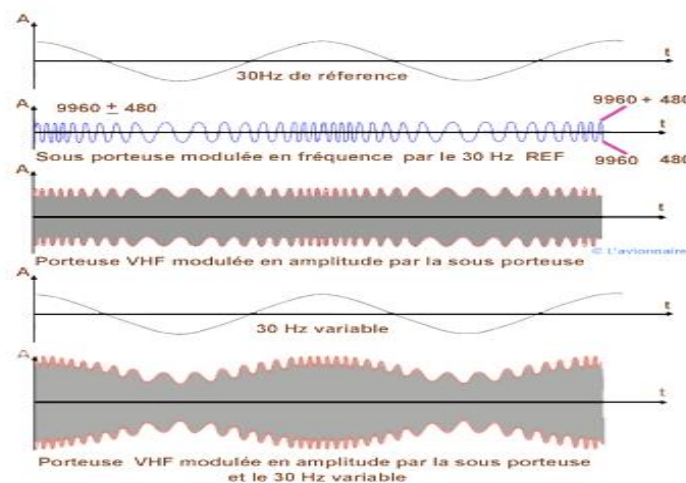


Figure I-5 : Signal et modulation AM

La porteuse VHF sera modulée en amplitude par une sous-porteuse qui contiendra l'indicatif de la station, la phonie , ainsi que le signal variable, et elle sera diffusée de manière omnidirectionnelle dans l'espace. L'équation de la porteuse VHF peut ainsi être exprimée de la manière suivante :

$$e_p = A_p \cos(\omega t) [1 + m_0 \cos(\omega_0 t + n \sin(\Omega t)) + m_2 \cos(\Omega t - \theta) + m_3 \cos(\omega_{1020} t) + m_4 \cos(\omega_{300/3000} t)] \quad (1.13)$$

Avec : $\omega_{1020} = 2\pi 1020$, $\omega_{300/3000} = (2\pi 300)$.

$m_0 = 0.3$; $m_4 = 0.3$; $m_3 = 0.1$ (absence de phonie), $m_3 = 0.05$ (présence de phonie)

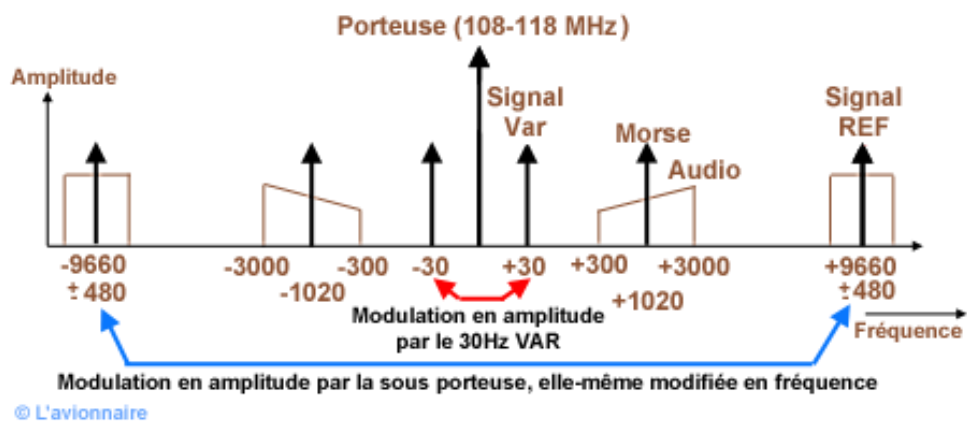


Figure I-6 : Spectre de fréquence du VOR

6- Alignement et maintenance du VOR :

6-1- Alignement du VOR :

L'alignement du VOR consiste à s'assurer que l'antenne émettrice du VOR est orientée avec précision selon l'azimut magnétique. Cela garantit que les signaux émis sont transmis avec précision aux récepteurs des avions. L'alignement est généralement effectué en utilisant des équipements de test spécialisés et en comparant les lectures obtenues avec les données cartographiques. Les techniciens de maintenance peuvent également effectuer des tests de couverture pour s'assurer que la portée du VOR est adéquate pour la région environnante.

6-2- Maintenance du VOR :

La maintenance du VOR comprend plusieurs tâches importantes pour assurer son bon fonctionnement. Cela comprend le nettoyage régulier de l'antenne et des équipements connexes pour éviter l'accumulation de saleté, de poussière et de débris. Les composants

électriques du système doivent être inspectés régulièrement pour détecter les signes d'usure, de corrosion ou de défaillance potentielle. Les techniciens de maintenance peuvent également effectuer des tests réguliers de la puissance de sortie du VOR pour s'assurer qu'il fonctionne à pleine capacité.

En résumé, l'alignement et la maintenance régulière du VOR sont essentiels pour garantir que le système fonctionne avec précision et fiabilité. Les techniciens de maintenance doivent être formés et qualifiés pour effectuer ces tâches, en utilisant des équipements de test spécialisés et des procédures de maintenance approuvées par le fabricant.

6-3- Dipôles de moniteur :

Pour surveiller les champs, un module passif appelé moniteur de champs est utilisé. Le dipôle du moniteur est monté sur un mât à une hauteur de 2 mètres au-dessus d'un contrepoids, à une distance de 8 mètres du centre de l'antenne. Le module est constitué de l'antenne dipôle et d'un transformateur d'impulsions pour la transmission des données.

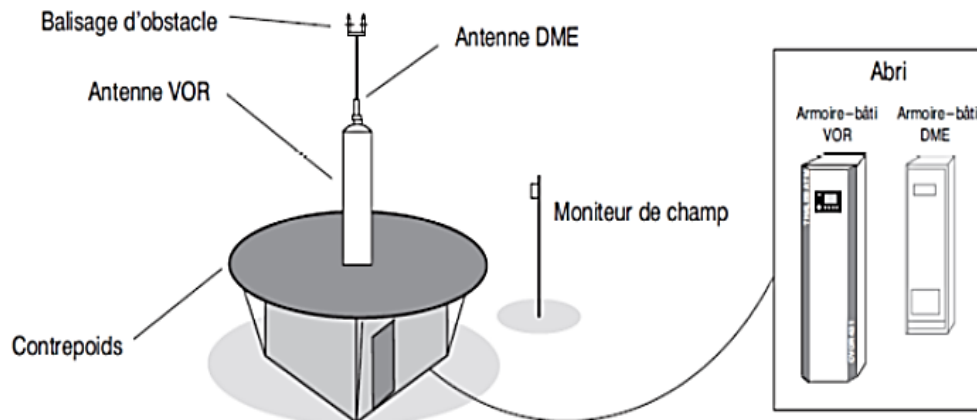


Figure I-7 : Représentation schématique d'une installation d'une antenne VOR

7- Problématique soulevée :

Le VHF Omnidirectional Range (VOR) est un système très répandu de navigation aérienne qui utilise des techniques de modulation analogiques. Étant donné son utilisation dans les phases d'approche les plus critiques, il doit répondre à des exigences de précision, de fiabilité et de confiance très strictes. Afin de tester les récepteurs de navigation aérienne tout au long de la production et de la maintenance, ainsi que pour l'étalonnage des équipements de test, notre analyseur fournit des signaux de navigation de haute précision conformes aux normes de l'OACI, y compris notre propre station VOR. La grande précision, la stabilité, la linéarité et la pureté spectrale garantissent que l'instrument de test n'influence pas les mesures prises sur le dispositif testé.

Notre objectif avec cette étude est d'analyser et de traiter le fonctionnement du VOR.

En particulier :

- Les stations VOR, étant installées dans des endroits difficiles d'accès, peuvent rencontrer des interruptions de signal lors de la maintenance ou en cas d'incidents.
- En raison du coût élevé des analyseurs nécessaires, certaines stations VOR ne sont plus fonctionnelles.
- Pas de contrôle en temps réel du signal rayonné.
- Lorsque le taux de disponibilité est élevé, cela peut entraîner la mise hors service du transporteur VOR pendant la maintenance préventive.
- Lors de l'exécution de la procédure de calibrage, plusieurs tâches nécessitent l'utilisation d'un analyseur de signaux.

8- Hypothèse de solution proposée :

L'analyseur de réseau est un outil essentiel pour tout développeur de systèmes radiofréquences, tout comme le multi-mètre pour les développements en électronique analogique ou GDB en logiciel. Traditionnellement, un analyseur de réseau coûtait plusieurs dizaines de milliers d'euros, ce qui le rendait inaccessible à la plupart des amateurs. Cependant, l'émergence de composants radiofréquences intégrés contenant des émetteurs et des récepteurs agiles en fréquence a permis la création d'analyseurs de réseau à moindre coût, même si les performances sont réduites. Malgré cela, ces

analyseurs de réseau open source peuvent être adaptés aux besoins spécifiques de l'utilisateur, les rendant souvent irremplaçables par rapport aux offres commerciales.

Voici une liste de recommandations :

- Éviter de couper la station VOR lors de la vérification du signal .
- Concevoir un analyseur à moindre coût pour économiser du temps et de l'argent .
- Maintenir le fonctionnement de la station VOR et éviter les interruptions pendant la maintenance .
- Concevoir un système de modulation du signal VOR contrôlable à distance.

9- Principe de base de l' analyseur :

Notre analyseur peut être utilisé pour effectuer des tests en vol ou au sol pour déterminer la performance des différents systèmes de l'aéronef. Il peut mesurer les données de vitesse, de pression, de température, de vibration, d'accélération et d'autres paramètres critiques. Il peut également être utilisé pour surveiller les systèmes de navigation, les communications et d'autres équipements électroniques.

Aussi notre analyseur peut être portable ou installé à bord de l'aéronef. Les systèmes de mesure portables peuvent être utilisés pour effectuer des tests et des diagnostics sur des équipements individuels, des systèmes ou des composants de l'aéronef. Les systèmes de mesure embarqués peuvent surveiller en continu les données de performance de l'aéronef, transmettre ces données aux centres de contrôle au sol et fournir des alertes en temps réel en cas de problèmes.

Les données collectées par l'analyseur peut être utilisées pour optimiser les performances de l'aéronef, pour identifier et résoudre les problèmes de maintenance, pour améliorer la sécurité des vols et pour d'autres applications importantes. Les équipements de mesure et d'analyse utilisés dans l'aéronautique doivent être précis, fiables et conformes aux normes de sécurité élevées de l'industrie aéronautique.

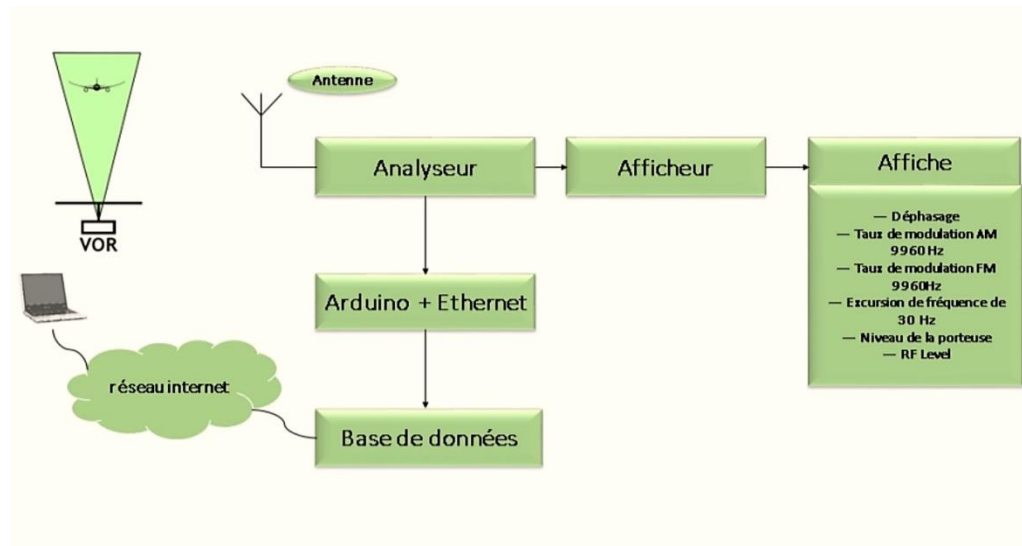


Figure I-8 : Concept de l'analyseur

Objectif :

Notre principal objectif pour ce projet est de concevoir un analyseur de signaux VOR capable de mesurer, analyser et afficher les valeurs dérivées du signal composite VOR rayonné. Cela sera utile pour les opérations de maintenance et de contrôle continu. De plus, nous souhaitons rendre l'analyseur communicant en utilisant des composants intelligents connectés, sécurisés et faciles à contrôler et à commander à tout moment et de n'importe où. Le contrôle sera possible à distance via une page web ou une application Android et une base de données garantira une réponse rapide et sécurisée aux besoins des utilisateurs.

Intérêt :

Lorsqu'une dégradation progressive du transporteur VOR se produit, elle peut causer une variation des paramètres du signal rayonné, ce qui peut entraîner une erreur d'azimut et une position erronée. Cependant, grâce à un contrôle en temps réel, ce type d'anomalie peut être détecté et résolu, augmentant ainsi le taux de maintenabilité et de fiabilité. De plus, lors de la maintenance préventive, l'arrêt du système pour effectuer les tâches nécessaires peut entraîner une diminution du taux de disponibilité. Toutefois, en utilisant l'analyseur, il est possible d'effectuer la maintenance préventive sans arrêter le transporteur en fonction, en prenant des mesures et en effectuant l'analyse via l'analyseur.

Finalement, en ce qui concerne la surveillance à distance de l'analyseur, toutes les données relatives aux signaux rayonnés sont collectées en temps réel, ce qui permet de

prendre rapidement les mesures (réglage, reconfiguration, suivi , détection des défauts) afin de préserver le bon fonctionnement du système VOR. Cela témoigne d'une amélioration du temps de réponse face aux aléas.

10- Conclusion

Les moyens de radionavigation présentés dans ce chapitre sont les plus couramment utilisés en aéronautique, ils jouent un rôle important dans la navigation aérienne. Le chapitre 2 approfondira la manière d'évaluer la précision globale d'un système de navigation afin d'améliorer ses performances ou de déterminer ses limites d'utilisation.

II- Chapitre 2 : Étude et conception

1- Introduction

Dans ce chapitre, je vais d'abord examiner les caractéristiques techniques des composants à utiliser pour mon projet, afin de déterminer les besoins fonctionnels que l'analyseur doit satisfaire. Ce sera fait après avoir établi le cadre général de mon projet.

L'analyseur est un appareil qui va fournir des informations détaillées sur un composant radiofréquence ou sur l'environnement électromagnétique d'une antenne (VOR). Dans ce contexte, nous avons cherché à illustrer la mesure par analyseur sur les composants couramment utilisés en traitement des signaux radiofréquences. Nous avons ainsi développé différentes méthodes pour exploiter les informations acquises par l'instrument dans le domaine spectral, ainsi que pour les convertir en informations temporelles.

Selon le schéma organisationnel, les éléments à surveiller comprennent l'azimut, taux de modulation d'amplitude à 30Hz AM , taux de modulation d'amplitude à 9960Hz AM, L'excursion de fréquence de 30Hz FM, Le niveau et la fréquence de la porteuse.

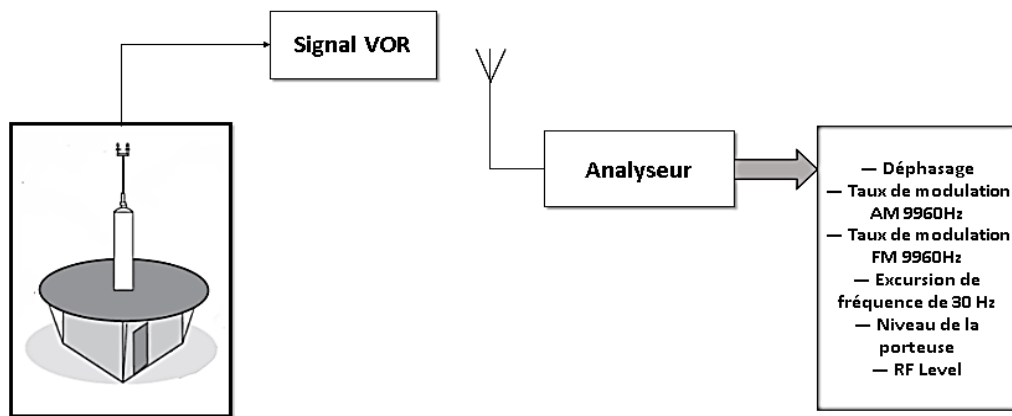


Figure II-1 : présentation des outputs d'un analyseur

2- Concept général d'un analyseur

Nous avons observé que pour que le système fonctionne, l'un des signaux est modulé directement en AM sur la porteuse et le deuxième est modulé en FM sur une "sous-porteuse" AM de 9960 Hz. Le schéma ci-dessous présente le diagramme d'un récepteur VOR :

- Réception du signal VHF par l'antenne .
- Synchronisation, amplification et filtrage du signal de la balise souhaitée dans les premiers stades du récepteur .
- Démodulation AM de la porteuse par le détecteur AM pour récupérer les deux signaux d'amplitude modulée: le premier signal de 30 Hz et la sous-porteuse AM de 9960 Hz qui porte le deuxième signal de 30 Hz avec une modulation FM .
- Récupération du premier signal de 30 Hz AM par une branche inférieure équipée d'un filtre passe-bas dédié .
- Filtrage passe-bande du signal de 9960 Hz par une branche supérieure, suivie de la démodulation FM du deuxième signal de 30 Hz .
- Utilisation d'un comparateur pour déterminer le déphasage entre les deux signaux de 30 Hz, permettant ainsi d'interpréter l'angle du radial sur lequel l'avion se trouve.
- Filtrage de l'information pour éliminer les bruits parasites avant l'envoi à l'afficheur.

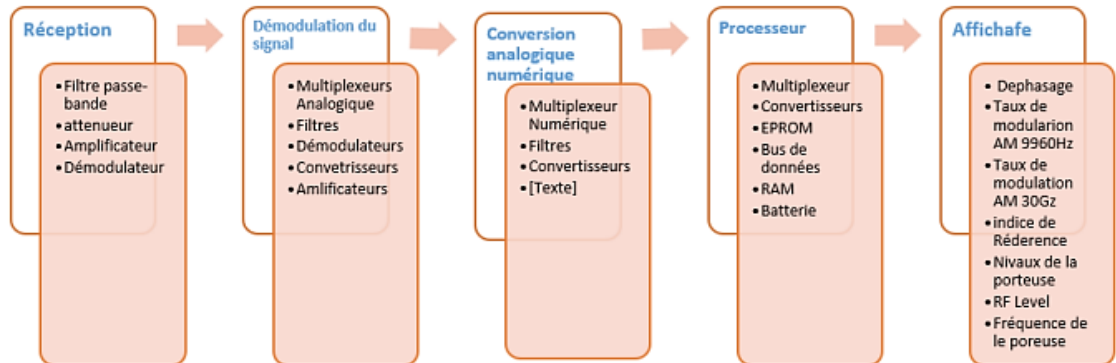


Figure II-2 : Gestion des blocs de l'analyseur

3- Étude théorique des principales fonctions de notre analyseur

3-1- Étude théorique de traitement du signal

3-1-1- Récepteur :

Un récepteur radio est un dispositif électronique conçu pour capter les ondes radioélectriques émises par un émetteur radio, ainsi que pour extraire les informations qu'elles contiennent lors de leur émission.

3-1-2- Amplificateur :

Le cœur d'une installation radiofréquence est indéniablement l'amplificateur. Son rôle principal est d'amplifier le signal reçu par le récepteur et de le transmettre aux enceintes, de manière à ce que le volume soit suffisamment élevé pour être traité.

3-1-3- Mélangeur :

Le mélangeur est un composant électronique qui a pour fonction de multiplier deux signaux. De façon semblable, un mélangeur est également présent dans le récepteur pour détecter des signaux similaires. Cela permet de ramener le signal modulé à la fréquence de base de 109MHz, jusqu'à obtenir un signal en bande de base.

3-1-4- Démodulation d'un signal :

La démodulation implique la récupération du signal modulant informatif qui est inclus dans la partie supérieure (ou inférieure) de l'enveloppe du signal modulé en amplitude.

Ainsi, il est nécessaire de mettre en place deux chaînes de traitement, l'une pour la démodulation AM et l'autre pour la démodulation FM, afin d'obtenir les deux sinusoïdes de référence et de mesure à 30 Hz, ce qui nous permettra de déterminer notre position.

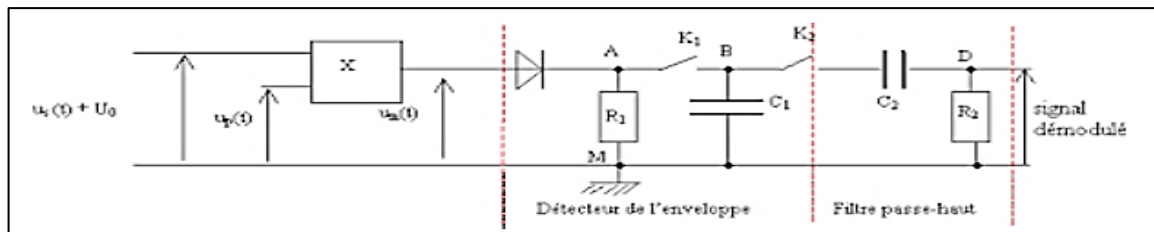


Figure II-3 : Schéma électrique d'un démodulateur

3-1-5- Démodulation AM :

Traditionnellement, la démodulation AM implique la détection des variations d'amplitude de l'enveloppe de la porteuse à l'aide d'un redresseur, suivi d'un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure doit être inférieure à la différence potentielle entre la fréquence de l'oscillateur local du récepteur et celle de l'émetteur. Cependant, si nous souhaitons détecter un signal modulé à 30 Hz, la conception d'un tel filtre devient complexe. Par conséquent, nous utilisons une boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop, PLL) pour corriger l'oscillateur local en comparant sa fréquence à celle de la porteuse reçue.

- On utilise une diode pour faire passer le signal radiofréquence dans une seule direction.
- Un filtre RC passe-bas est utilisé pour laisser passer les fréquences audio et découpler ou lisser les fréquences radio.
- Les diodes au silicium ne sont pas idéales car elles ont besoin d'une tension minimale de 0,7 volt pour conduire.
- Les diodes au germanium sont plus performantes car elles n'ont besoin que d'une tension minimale de 0,2 volt pour conduire.

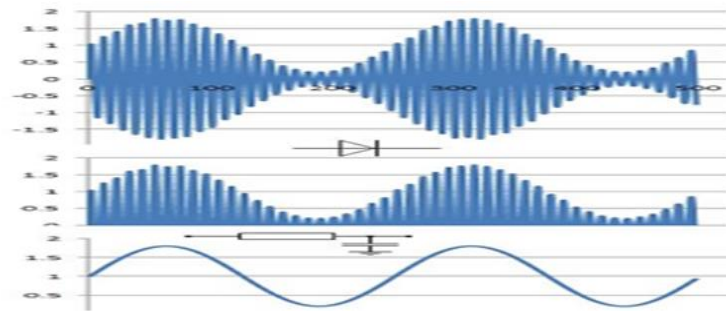


Figure II-4 : Démodulation AM

3-1-6- Démodulation FM :

La méthode de démodulation FM implique l'utilisation de deux signaux décalés de la porteuse de 9960Hz. Pour extraire les données modulées, les changements de fréquence sont convertis en changements d'amplitude en utilisant des techniques de démodulation de l'AM. Pour ce faire, le récepteur utilise un différenciateur pour convertir la fréquence en amplitude, suivi d'un détecteur d'enveloppe et d'un filtre passe-bas pour supprimer la fréquence porteuse et ne laisser que les données. Enfin, un trancheur de données convertit la valeur analogique en un signal numérique. L'amplificateur basse fréquence joue un rôle essentiel dans ce processus en amplifiant le signal démodulé.

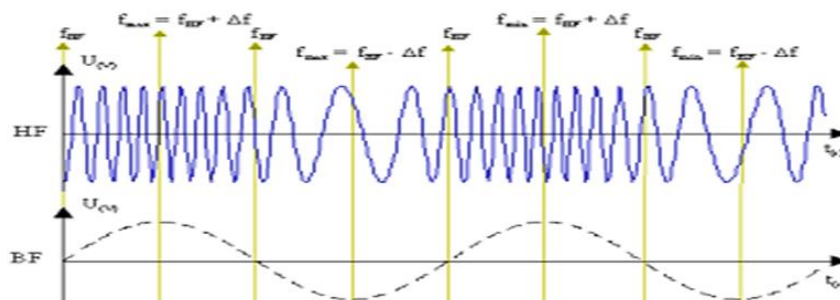


Figure II-5 : Démodulation FM

3-1-7- Détection de l'enveloppe :

En utilisant l'association en parallèle, on peut créer un filtre passe-bas qui permet le passage des basses fréquences tout en éliminant la porteuse de haute fréquence.

3-2- Étude de fonctionnement des différents blocs

3-2-1- PLL :

Le dispositif qui assure la régulation de la fréquence est connu sous le nom de boucle à verrouillage de phase (PLL ou Phase locked loop).

La figure ci-dessus montre le schéma de principe d'une PLL, qui est composée d'un comparateur de phase produisant un signal de sortie E, d'un filtre de boucle dont la fonction de transfert est supposée être celle d'un filtre passe-bas, et d'un oscillateur contrôlé en tension (OCT) produisant un signal de sortie noté $V(t)$:

$$V(t) = V_0 \cos(\omega_0 t + \Phi) \quad (2.1)$$

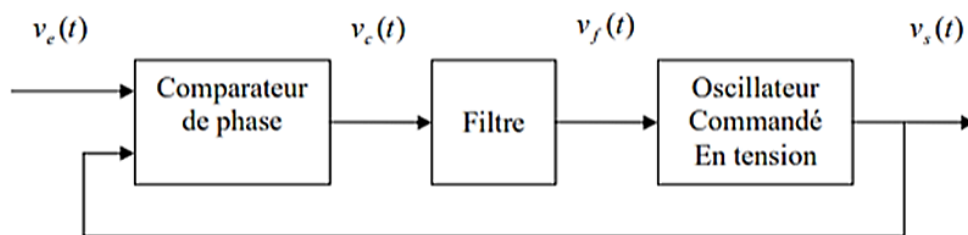


Figure II-6 : Schéma de principe de PLL

3-2-2- Comparateur de phase :

Le signal de sortie du comparateur de phase est basé sur la différence entre les phases instantanées du signal d'entrée. Il existe plusieurs types de comparateurs analogiques, tels que les multiplieurs, les multiplieurs ± 1 et les mélangeurs à diodes (utilisés en RF ou en HF). Dans ce cas, le comparateur proposé est un multiplieur.

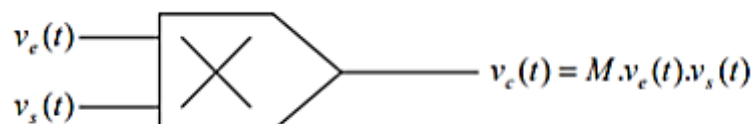


Figure II-7 : comparateur de phase

3-2-3- Filtres:

- Le filtre passe-haut permet uniquement le passage des fréquences supérieures à une fréquence de coupure spécifique, tandis qu'il atténue les fréquences plus basses. Il agit comme un atténuateur des graves pour un signal audio et pourrait également être appelé coupe-bas.
- Le filtre passe-bas ne permet le passage que des fréquences inférieures à sa fréquence de coupure. Il agit comme un atténuateur des aigus pour un signal audio et pourrait être appelé coupe-haut.
- Le filtre passe-bande ne permet le passage que d'une plage de fréquences spécifique (et atténue tout ce qui est en dessous ou au-dessus). Il est largement utilisé dans les récepteurs radio, TV, etc., pour isoler le signal recherché.

3-2-4- L'oscillateur :

Si l'oscillateur contrôlé en tension (Voltage Controlled Oscillator =VCO) est centré sur une fréquence f_0 , il génère un signal $v(t)$ en sortie dont la fréquence est déterminée par la tension d'entrée, à condition que son comportement soit linéaire.

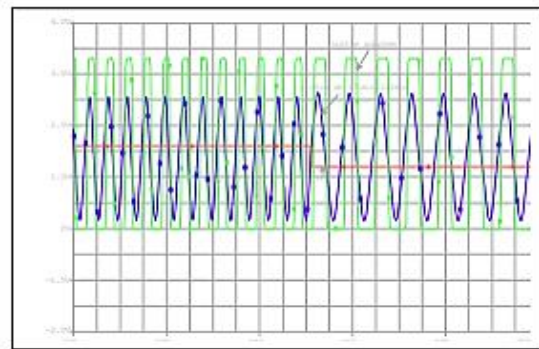
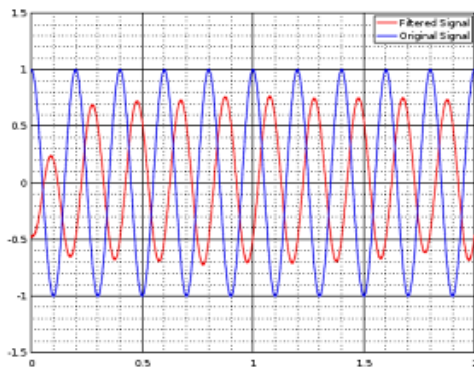


Figure II-8 : Courbe du signal filtré **Figure II-9 :** courbe du signal après oscillation

3-2-5- Multiplexeur :

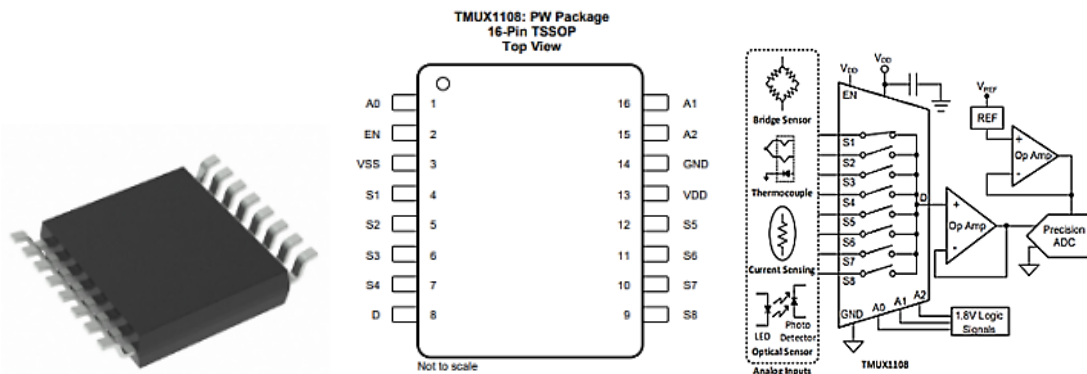
Pour faire fonctionner notre analyseur, nous avons besoin de deux types de multiplexeurs : l'un analogique et l'autre numérique. Nous avons opté pour le TMUX1108PWR comme choix de multiplexeur pour notre projet.

Le TMUX1108PWR 8 :1 est un multiplexeur de précision de Texas Instruments qui permet l'interface avec un ADC. Il peut être alimenté avec une tension allant de 1,08V à 5V et accepte des signaux analogiques ou numériques bidirectionnels variant de 0V à VDD. Chaque canal possède une résistance série R_{on} typique de 2,5 ohms et un courant de fuite inférieur à 3

picoampères (pA). La capacité à l'état passant est de 65 pF, le temps de transition moyen entre les canaux est de 14 nanosecondes (ns), et la bande passante atteint 90 mégahertz (MHz).

3-2-6- Un Processeur :

Le processeur (ou "unité centrale de traitement", UCT ; en anglais "central processing unit", CPU) est un élément présent dans divers dispositifs électroniques qui permet d'exécuter les instructions machine des programmes informatiques. Cette fonctionnalité, qui existe depuis les premiers ordinateurs, est souvent associée à la mémoire. Lorsque le processeur est conçu sous forme d'un unique circuit intégré, on parle de microprocesseur.

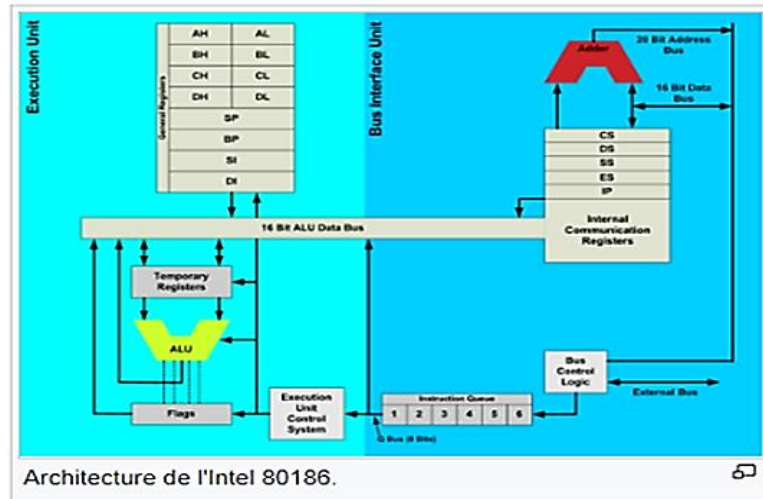


(a) Multiplexeur analogique (b) Le commutateur SPST à huit (c) : Le schéma illustre l'utilisation circuits TMUX6111RTER de deux multiplexeurs

En 1982, Intel a développé le microprocesseur CISC 16 bits Intel 80186, qui n'a pas été très connu car il est sorti la même année que le plus puissant 80286 et a été éclipsé par ce dernier. Le 80186 est une version améliorée du processeur Intel 8086 8088 et dispose d'un bus externe de 16 bits comme son prédécesseur. Il existe également une variante du processeur appelée l'Intel 80188 qui dispose d'un bus externe de 8 bits. Les deux processeurs ont une fréquence de base de 6 MHz.



(a) Une version de microprocesseur en boîtier céramique C8085.



(b) Architecture du c8085

3-2-7- Une mémoire EPROM :

L'électronique de l'équipement peut lire la mémoire EPROM, mais il n'est pas facile de la réécrire. Le processus d'écriture est relativement lent et nécessite des tensions électriques plus élevées qui ne sont pas directement gérées par la carte mémoire. La réécriture de l'EPROM nécessite de retirer la mémoire de son support et de la placer dans un dispositif conçu à cet effet. Bien qu'il soit possible d'écrire la totalité de l'EPROM ou des adresses mémoire individuelles, cela reste un processus compliqué.

3-2-8- Convertisseur analogique numérique :

Un appareil électronique connu sous le nom de convertisseur analogique-numérique a pour rôle de transformer une grandeur analogique en une valeur numérique qui est ensuite codée sur plusieurs bits. En général, le signal qui est converti est une tension électrique. Pour obtenir le résultat de la conversion, on peut utiliser la formule suivante : $Q = 2^n V_e / V_{ref}$ où Q représente le résultat de la conversion, V_e est la tension à convertir, n correspond au nombre de bits du convertisseur et V_{ref} désigne la tension de référence utilisée pour la mesure.

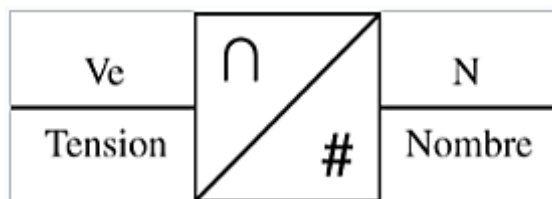


Figure II-10 : Symbole normé du convertisseur analogique numérique

4- Etude et Conception pratique

Notre analyseur sera divisé en six blocs pour son traitement. Le premier bloc est responsable de la réception du signal, qui sera filtré pour éliminer les bruits. Ensuite, il passera par le premier multiplexeur, qui va le fractionner en plusieurs signaux, puis vers le deuxième multiplexeur. Enfin, le signal sera acheminé vers le microprocesseur pour être traité.

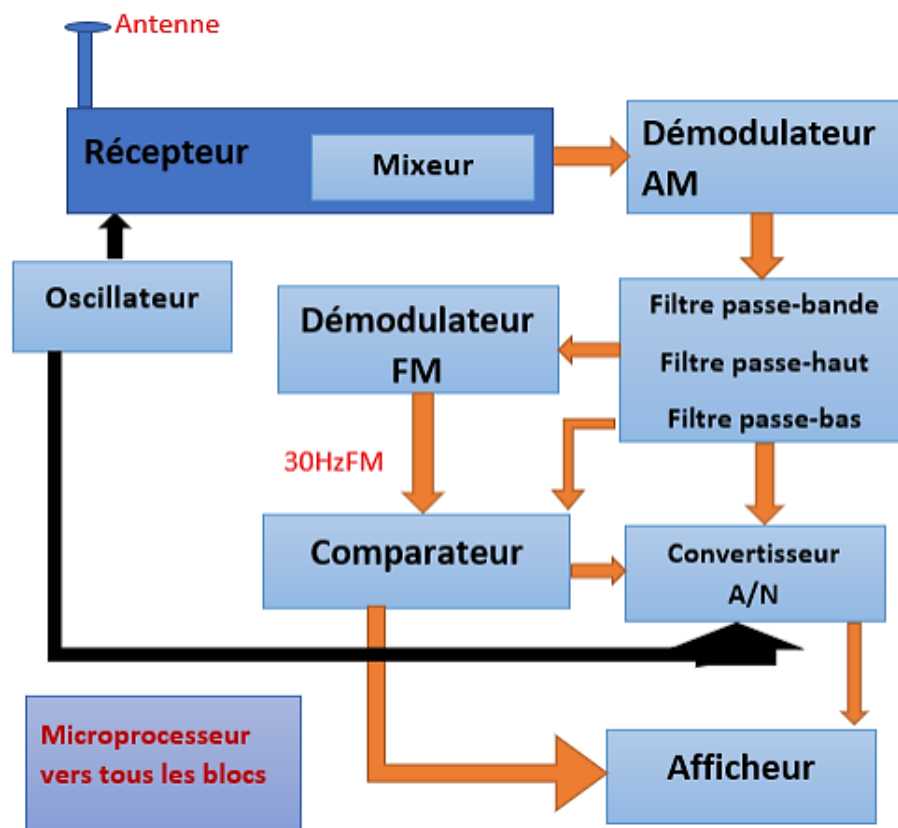


Figure II-11 : blocs de conception

4-1- Bloc1 : Réception du signal

Notre projet implique la simulation d'une carte électronique qui a pour fonction de recevoir, filtrer et déchiffrer les ondes radio émises par les émetteurs. Pour y parvenir, une antenne est utilisée pour capter les signaux électromagnétiques, mais étant donné qu'elle reçoit plusieurs signaux simultanément, le récepteur doit être capable de sélectionner le signal approprié, l'amplifier pour un traitement ultérieur.

Le signal électrique capté est d'abord filtré à l'aide d'un filtre passe-bande pour la plage de fréquences allant de 108 à 118 MHz, puis il est envoyé à l'AGC Amplificateur après avoir

été atténué par un atténuateur commutable. Le processeur de supervision est chargé de régler l'amplificateur AGC via un Convertisseur. L'utilisateur peut ajuster le niveau de contrôle de l'atténuateur RF pour obtenir une mesure précise du moniteur Niveau RF 100 % (normalisé au niveau RF = 100 %).

- Le filtre passe-bande sélectionne le canal souhaité dans la plage de fréquences de 108 à 118 MHz et élimine les signaux non désirés.
- Un atténuateur commutable est utilisé.
- L'amplificateur d'entrée est un amplificateur radiofréquence qui amplifie le signal capté de manière très sensible, améliorant ainsi le rapport signal sur bruit et assurant une première amplification.
- Les D/A convertisseurs sont utilisés pour faire varier automatiquement et en continu la démultiplication de l'effort ou du couple d'un moteur transmis à un organe d'utilisation et transformer une valeur numérique (codée sur plusieurs bits) en une valeur analogique proportionnelle à la valeur numérique codée.
- L'atténuateur RF est normalisé au niveau RF = 100%.
- Le démodulateur RF fournit une enveloppe du signal qui est ensuite utilisée comme présélecteur de l'un des signaux sources du traitement ultérieur par le multiplexeur analogique.

Le schéma de principe du récepteur, représenté dans la figure ci-dessus, se compose d'un filtre passe-bande, d'un atténuateur et d'un amplificateur. Le processeur effectue le réglage de l'amplificateur à l'aide de deux Convertisseurs :

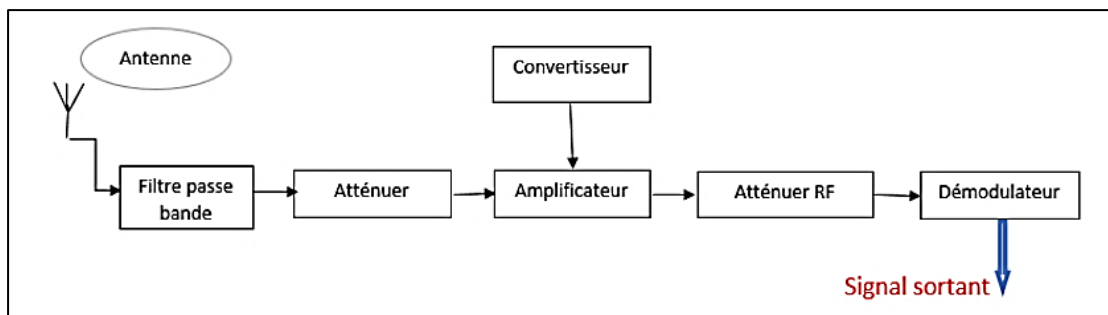


Figure II-12 : Bloc de réception du signal

4-2- Bloc2 : Démodulation du signal

Le signal obtenu à partir du bloc de réception est un signal modulé en AM qui comprend des fréquences telles que 30 Hz, 9960 Hz, 1020 Hz pour l'identité et la voix.

Afin d'obtenir les différents signaux, on utilise une combinaison de multiplexeur analogique et de démodulateurs AM et FM ,qui fonctionnent comme suit:

- Le M.A1 est un multiplexeur analogique qui joue le rôle d'un présélecteur pour l'une des sources de signal destinées à un traitement ultérieur. Les signaux en entrée sont un Signal RF démodulé qui est composé d'un signal de référence de 30 Hz, une sous-porteuse de 9960 Hz modulée à 30 Hz en FM, une identification de 1020 Hz et une option de voix, ainsi qu'un Signal du générateur de test (Calibrage) qui est constitué du courant continu, du signal de référence de 30 Hz, d'une sous-porteuse de 9960 Hz modulée à 30 Hz en FM.
- Le démodulateur AM est utilisé pour éliminer la porteuse et retrouver le signal initial (30 Hz référence).
- Le démodulateur FM est utilisé pour éliminer la sous-porteuse et retrouver le signal initial (30 Hz variable).

Le signal à une fréquence de 1020 Hz est filtré dans une chaîne d'évaluation unique. Afin de vérifier si un signal d'identification est présent avec la profondeur de modulation requise, un signal d'identification de 1020 Hz est envoyé à travers un filtre passe-bande et un convertisseur, puis est envoyé au multiplexeur de niveau ID via un filtre passe-bas de 10 Hz pour confirmer que le seuil défini n'est pas dépassé. Chaque fois qu'il y a une transition de l'intervalle d'identité à un code d'identification (1020 Hz), la sortie de déclenchement est ajustée et le microprocesseur est interrogé. Le microprocesseur réinitialise la bascule après vérification. S'il n'y a pas erreur de détection, aucune alarme n'est déclenchée.

Un autre multiplexeur analogique M.A3 reçoit les résultats de ces circuits ainsi que le résultat de l'identification démodulée. Les signaux qui sont alimentés dans M.A3 comprennent:

- Le signal DC + 30 Hz AM (provenant du filtre passe-bas RC)
- Le décalage DC + 30 Hz FM (provenant du démodulateur FM)
- Le signal DC + brouillage superposé (provenant du démodulateur AM)

- Un signal de réserve (signal ATE5 utilisé à des fins de test)
- Un signal DC est modulé avec le code Morse (provenant de la sortie 1020 Hz du démodulateur de signal d'identification).

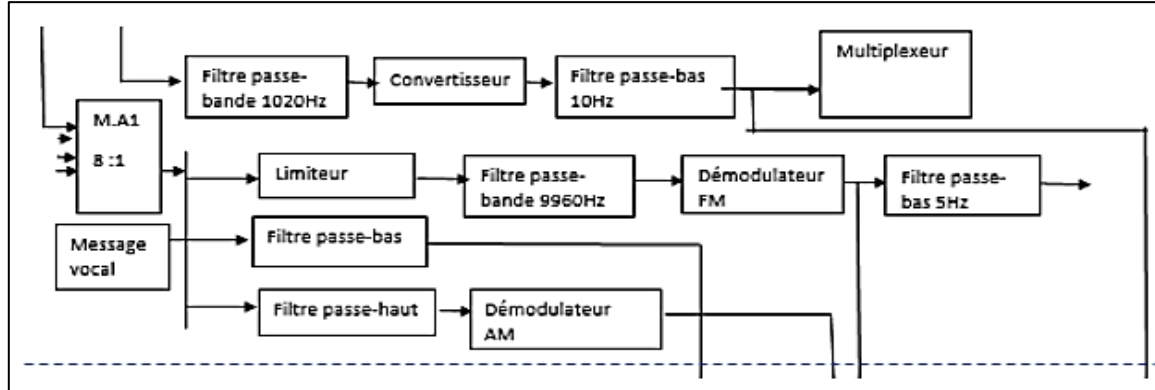


Figure II-13 : Bloc de démodulation du signal

4-2-1- Résolution mathématique de la démodulation d'un signal VOR :

Après le détecteur AM, le récepteur est divisé en deux voies : la voie 1 pour le traitement du signal REF et la voie 2 pour le traitement du signal VAR. Les étapes de démodulation sont décrites en détail ci-dessous.

On rappelle l'expression du signal REF (vois1) :

$$E_{REF} = a_c [1 + m_a \cos(\omega_0 t + m_f \sin(\omega_{BF} t))] \cos(\omega_c t)$$

Le détecteur AM multiplie d'abord ce signal par la porteuse. Le signal devient alors :

$$E_{REF} = a_c [1 + m_a \cos(\omega_0 t + m_f \sin(\omega_{BF} t))] \cos^2(\omega_c t)$$

et on a :

$$\cos^2(\omega_c t) = \frac{1 + \cos(2\omega_c t)}{2}$$

d'où l'expression du signal REF devient :

$$E_{REF} = \frac{a_c}{2} [1 + m_a \cos(\omega_0 t + m_f \sin(\omega_{BF} t))] (1 + \cos(2\omega_c t))$$

Sur la voie 1, le filtre passe-bande conserve la composante de pulsation ω_0 . En sortie du filtre il est égal à :

$$E_{REF} = \frac{a_c}{2} m_a \cos(\omega_0 t + m_f \sin(\omega_{BF} t))$$

La PLL et le filtre passe-bas démodulent ce signal REF en phase pour retrouver la phase ϕ_{ref} . La composante VAR du signal est égale à :

$$E_{\text{VAR}} = a_c [1 + m_a \cos(\omega_{BF} t - \theta)] \cos(\omega_c t)$$

Tout comme la composante REF, Le détecteur AM multiplie ma composante VAR par la porteuse. De la même manière que précédemment, on obtient le signal :

$$E_{\text{VAR}} = \frac{a_c}{2} [1 + m_a \cos(\omega_{BF} t - \theta)] (1 + \cos(2\omega_c t))$$

Le filtre passe-bas permet de retrouver $\phi_{\text{VAR}} = \omega_{BF} t_{\theta}$.

L'azimut de l'avion est calculé en comparant ϕ_{VAR} à ϕ_{ref} .

4-3- Bloc3 : Multiplexeur 16 :1

Les sorties du bloc de démodulation sont acheminées vers le multiplexeur M.A3 et sont ensuite dirigées vers un filtre passe-bas à 60 Hz, qui amplifie et élimine les hautes fréquences, y compris les composantes d'interférence du signal démodulé FM et du signal redressé de sous-porteuse 9960 Hz (9960 Hz et ses harmoniques). Ce signal est ensuite envoyé au multiplexeur M.A3 pour diriger la sortie du signal.

4-4- Bloc4 : Conversion analogique Numérique

Le signal issu du multiplexeur M.A3 est transmis au processeur pour activer la sélection du circuit d'échantillonnage, du circuit de maintien et du convertisseur A/N. De même, le signal de fréquence produit par le synthétiseur est acheminé vers un multiplexeur numérique M.N via un tampon, où il est choisi pour effectuer une mesure de fréquence dans le circuit.

À chaque interruption à une fréquence de 960Hz, une mesure est effectuée et la valeur mesurée par le convertisseur A/N est transmise au processeur. La simulation de la mesure BIT et l'évaluation des signaux indicateurs pour le multiplexeur 3 sont synchronisées avec le processeur. Le circuit de conversion A/N reçoit un signal de 960Hz à partir de la fréquence mesurée dans le circuit, ce qui déclenche l'échantillonnage du signal. En utilisant un circuit de maintien, la valeur instantanée du signal est échantillonnée et l'impulsion de déclenchement démarre la conversion A/N dans le convertisseur. La valeur de données (signal de sortie) est fournie au processeur via le bus de données.

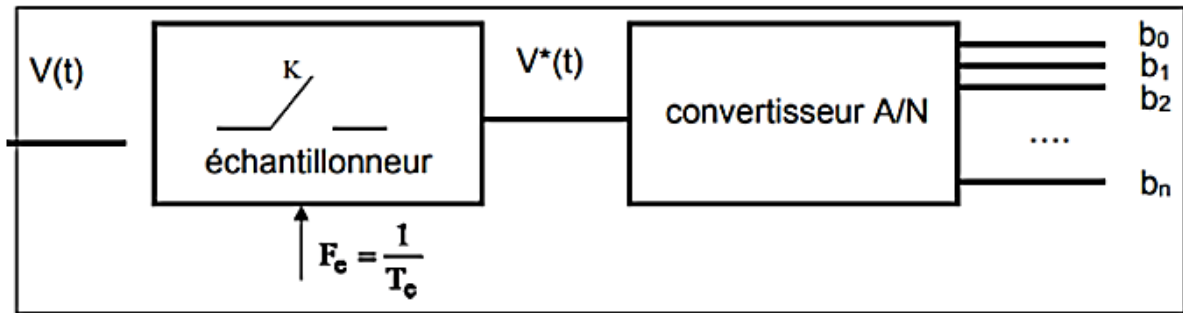


Figure II-14 : Principe de la conversion analogique numérique

4-5- Bloc5 : Conversion de puissance en niveau de puissance (%)

Afin de contrôler la puissance du signal émis et configurer une limite d'alarme, on prend comme échelle :

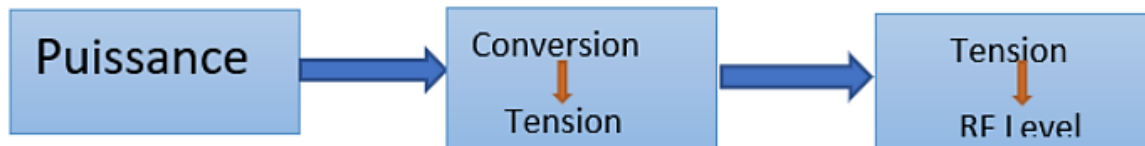


Figure II-15 : Conversion de puissance

- par exemple le changement de $\pm 20\%$ de puissance :

On a $\text{dB} = 10 \log(P_1/P_2)$ (1)

- exemple de limite d'alarme pour -20% $\text{dB} = 10 \log(P_1/P_2)$; $P_1 = 0.8P_2$

$$\Leftrightarrow \text{dB} = 10 \log(0.8P_2/P_2)$$

$$\Leftrightarrow \text{dB} = 10 \log(0.8)$$

$$\Leftrightarrow \text{dB} = -0.9691$$

- exemple de limite d'alarme pour $+20\%$ $\text{dB} = 10 \log(P_1/P_2)$; $P_1 = 1.2P_2$

$$\Leftrightarrow \text{dB} = 10 \log(1.2P_2/P_2)$$

$$\Leftrightarrow \text{dB} = 10 \log(1.2)$$

$$\Leftrightarrow \text{dB} = 0.7918$$

- Conversion d'un changement de puissance en un changement de tension

$$dB = 10 \log(P_1/P_2); P_1=U_1^2/R, P_2=U_2^2/R$$

$$\Leftrightarrow dB = 10 \log\left(\frac{U_1^2/R}{U_2^2/R}\right)$$

$$\Leftrightarrow dB = 20 \log(U_1/U_2)$$

$$\Leftrightarrow dB/20 = \log(U_1/U_2)$$

$$\Leftrightarrow 10dB/20 = U_1/U_2$$

$$\Leftrightarrow U_1 = U_2 10^{dB/20} \quad (2)$$

Les équations (1) et (2) donnent le résultat suivant : $U_1 = U_2 10^{0.5 \log(P_1/P_2)}$

La conversion donne la relation suivante : $U_1^2/U_2^2 = P_1/P_2$

Ces équations peuvent être converties pour déterminer le changement de puissance relatif à partir de l’affichage du Niveau RF.

$$P_1 = P_2 10^{2 \log(U_1/U_2)}$$

4-6- Bloc6 : Comparaison et affichage

Le processeur se compose d’un microprocesseur 80C186 et des périphériques nécessaires pour diverses fins. La fonctionnalité du processeur est définie par le logiciel associé. Le processeur et ses périphériques ont la structure suivante :

- Fréquence du processeur 20 MHz
- Bus d’adresse externe, tamponné
- Bus de données externe, tamponné
- Bus de commande externe, tamponné
- Registre 16 bits OUT, 3x
- Registre 16 bits IN, 2x
- Registre 8 bits IN, 1x
- Interface RS232, 2x
- EPROM 1 Mo
- 256 Ko de RAM, non volatile, sauvegardée par batterie (sélectionnable avec le cavalier X7)
- Surveillance de panne d’alimentation
- Minuterie de chien de garde

Ainsi que le processeur de surveillance détermine les composants de signal fondamentaux CC et 30 Hz à partir de 32 échantillons et fournit des mesures de niveau RF, AM 30 Hz et 30 Hz FM. Il calcule également l'azimut à partir des vecteurs AM 30 Hz et FM 30 Hz. 1020 Hz identifie le signal, qui détermine la profondeur de modulation et le signal de "présence d'incrustation". Le résultat calculé est comparé à la valeur nominale enregistrée. Si la limite d'alarme programmée dépasse, déclenche une réaction.

Les informations de surveillance sont transmises au panneau de commande local afin de maintenir une visibilité sur l'état actuel de l'installation. Les données sont échangées et les interruptions de communication sont contrôlées.

Au cours de la phase d'initialisation, l'analyseur effectue une vérification du jeu d'EPROM. La somme de contrôle de l'EPROM est stockée dans l'EEPROM.

Notre analyseur fournit une sauvegarde des paramètres stockés dans la RAM, ou la sauvegarde des paramètres stockés dans l'EEPROM.

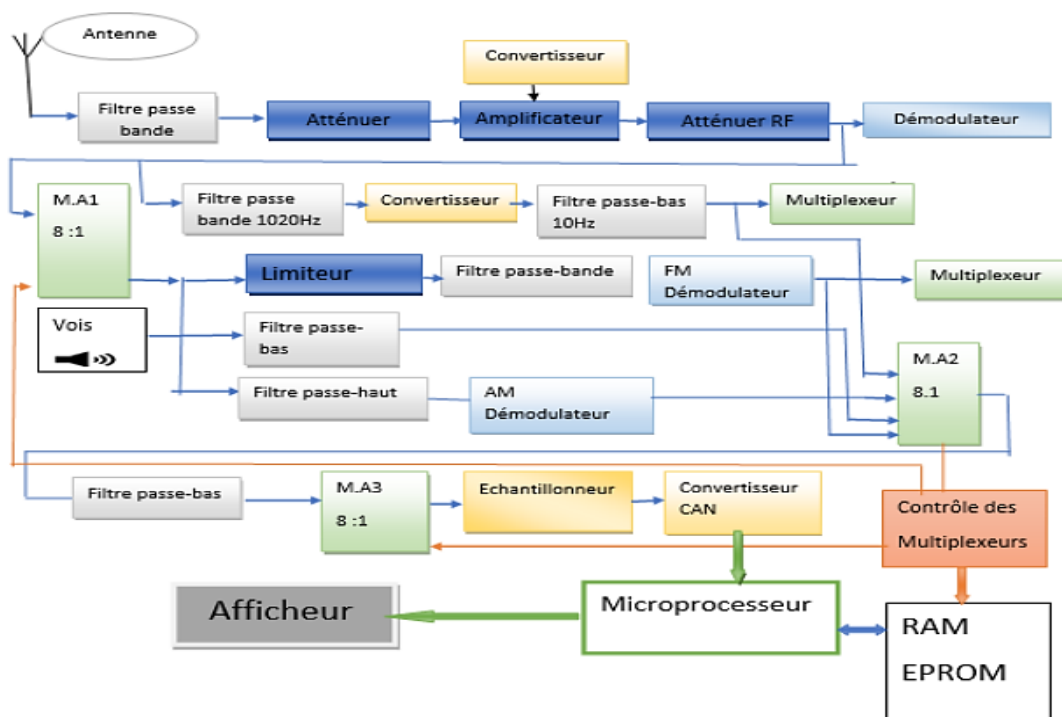


Figure II-16 : Concept général de l'analyseur

5- Module d'alimentation stabilisé

Pendant que je concevais mon projet et que je prenais en compte les composants et les blocs nécessaires pour l'analyseur des signaux VOR, j'ai eu l'idée d'utiliser un module d'alimentation stabilisé approprié. Le rôle de ce module d'alimentation est de fournir l'énergie nécessaire pour faire fonctionner les différents modules de l'analyseur, et il se distingue par une tension constante, quelle que soit la quantité de courant fournie. Généralement, il s'agit d'un dispositif électronique qui utilise une régulation pour ajuster la tension et le courant nécessaires pour faire fonctionner un appareil électrique ou électronique. En général, il est conçu pour fonctionner comme un générateur de tension et de courant performant.

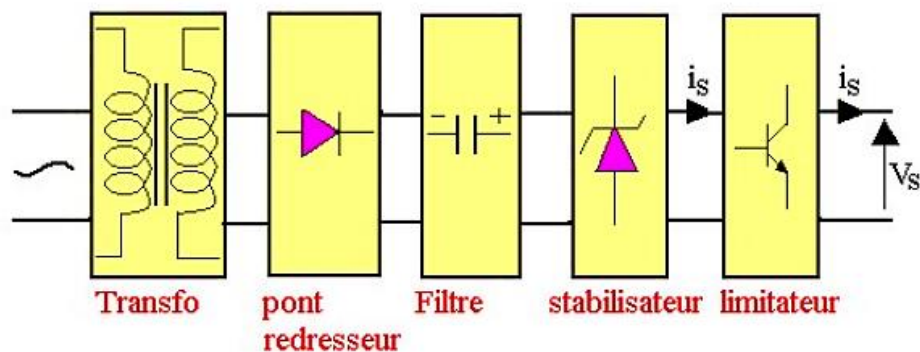


Figure II-17 : Différents blocs d'une alimentation stabilisée

6- Conclusion

Dans ce chapitre, notre objectif était de fournir une vue d'ensemble des fonctionnalités et des caractéristiques techniques des blocs qui composent le traitement du signal VOR ainsi que des composants électroniques de cet analyseur.

III- Chapitre 3 : Simulation/validation et télé-contrôle

1- Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différents blocs utilisés pour la réception et le traitement du signal VOR. Pour la réception du signal, nous avons opté pour l'utilisation d'un récepteur qui comprend une clé RTL-SDR et une antenne adaptée, reliés à un ordinateur sur lequel LabVIEW a été préinstallé. Nous présenterons ensuite la méthode utilisée pour étudier et simuler les signaux intrinsèques à l'équipement au sol. Cependant, en raison de la disponibilité limitée et des coûts élevés de ce récepteur, nous n'avons pas pu en commander un. Nous avons donc proposé de moduler un signal VOR puis de le démoduler à l'aide du logiciel LabVIEW.

2- Besoins fonctionnels

Suite à l'analyse des besoins fonctionnels du projet, nous avons identifié deux sous-catégories distinctes : d'une part, les besoins informatiques, et d'autre part, les besoins électriques.

2-1- Partie logicielle

Pour assurer une transmission sans fil radiofréquence efficace, il est important de prendre en compte la fréquence et le débit d'informations impliqués. Pour éviter d'avoir à traiter manuellement un grand volume d'informations brutes provenant du récepteur radio, il est recommandé d'utiliser un matériel spécialisé pour traiter ces données. Les fonctionnalités les plus courantes sont implémentées dans des blocs de traitement, qui peuvent être facilement configurés à l'aide du logiciel LabVIEW et de son interface graphique est connue sous le nom de "Front Panel" ou "Panneau de commande". Dans cet article, nous examinerons en détail l'interface graphique "Front Panel" et la clé RTL-SDR.

2-2- Outils de simulation : Matériel utilisé

2-2-1- LabVIEW :

LabVIEW est un environnement de développement de logiciels graphiques qui permet aux ingénieurs et aux scientifiques de développer des applications de mesure, de contrôle et d'analyse de données. Contrairement à la plupart des langages de programmation, LabVIEW utilise des diagrammes de blocs pour représenter le code, ce qui le rend plus facile à comprendre et à visualiser pour les personnes qui ne sont pas des programmeurs professionnels.



Figure III-1 : Interface LabVIEW

Un programme LabVIEW comporte 2 éléments principaux :

- * **Une face-avant : (Front Panel) :** est l'interface graphique de l'utilisateur dans LabVIEW. C'est la partie du programme que l'utilisateur final voit et avec laquelle il interagit. Elle permet à l'utilisateur de saisir des données, de visualiser les résultats et de contrôler le fonctionnement du programme. Le panneau de commande se compose de différents éléments graphiques, tels que des boutons, des graphiques, des tableaux, des jauges, des menus déroulants et des indicateurs. Ces éléments sont appelés des objets de contrôle ou des indicateurs. Les objets de contrôle permettent à l'utilisateur de fournir des entrées au programme, tandis que les indicateurs affichent les sorties du programme.

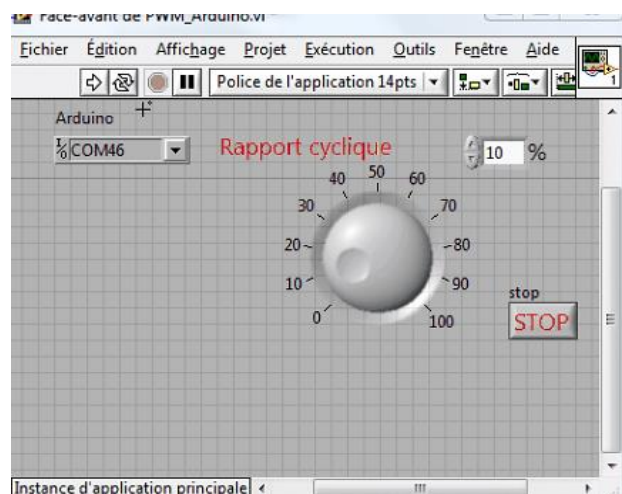


Figure III-2 : Front Panel

- * **Un diagramme (Block Diagram) :** est l'endroit où l'on programme réellement dans LabVIEW. Il s'agit d'une représentation graphique du code source du programme. Le diagramme utilise des blocs graphiques qui représentent les fonctions, les structures de

contrôle et les opérations de manipulation de données. Les blocs sont interconnectés par des fils qui transportent les données et les signaux entre les blocs.

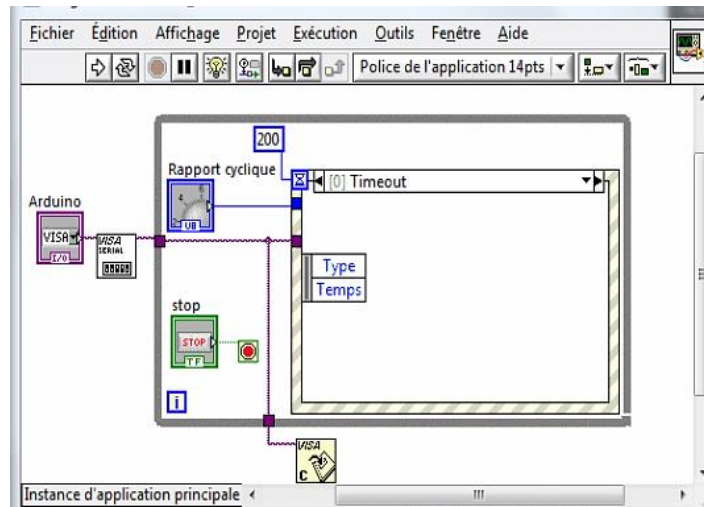


Figure III-3 : Block Diagram

2-2-2- Clé RTL-SDR :

La technologie de la radio logicielle définie (SDR) consiste à traiter les données radiofréquences en déplaçant une grande partie du traitement vers le logiciel plutôt que de dépendre entièrement du matériel.

LabVIEW n'est pas en soi un logiciel SDR (Radio logicielle). Cependant, c'est un logiciel de développement de systèmes qui peut être utilisé pour le traitement du signal et la conception de systèmes de communication, y compris les systèmes de radio logicielle (SDR).

La clé RTL-SDR est un récepteur radio logiciel peu coûteux qui utilise un tuner TV basé sur le chipset Realtek RTL2832U pour capturer des signaux radiofréquences et les démoduler avec un logiciel SDR(Software Defined Radio).

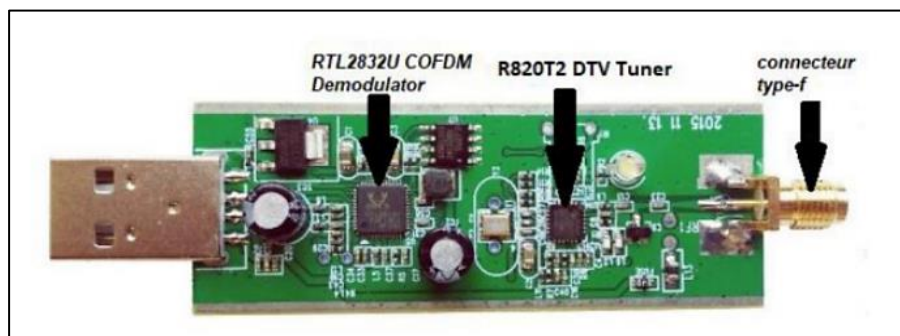


Figure III-4 : Composition interne de la clé RTL-SDR

Les clés RTL-SDR utilisent une architecture de récepteur superhétérodyne populaire qui permet de traiter des signaux à une large gamme de fréquences sélectionnées par l'utilisateur. Cette architecture permet également d'isoler les signaux des autres fréquences et de les amplifier. Les récepteurs de radio AM/FM conventionnels fonctionnent de la même manière en permettant à l'utilisateur de sélectionner une fréquence d'onde porteuse correspondant à un canal spécifique.

Rq : Après avoir essayé de commander la clé RTL-SDR depuis la France, je me suis rendu compte que je ne pourrais pas l'obtenir. Cela m'a poussé à changer mon travail sur le logiciel LabVIEW.

3- Le télé-contrôle :

3-1- Rendre l'analyseur communicant et accessible a distance

Afin d'assurer le bon fonctionnement du VOR, il est essentiel de surveiller en permanence le signal émis. Les données collectées, traitées et analysées deviennent ainsi des paramètres utiles pour suivre et contrôler les tâches de maintenance corrective et préventive. Si ces données sont accessibles en temps réel aux responsables de la maintenance et qu'ils sont avertis immédiatement en cas de défaillance ou de dépassement des seuils prédéfinis, ils peuvent réagir rapidement pour remédier aux problèmes.

Pour répondre à cette exigence, une solution de télésurveillance d'un analyseur a été proposée. Cette solution repose sur un accès à distance via internet à une base de données, qui est créée et configurée sur une mémoire de stockage (une base de données) installée sous forme d'un bloc d'échange de données dans l'analyseur. L'accès à cette base de données est effectué via une interface de commande et de contrôle.

3-2- Conception de l'application de contrôle et de commande

On peut décrire une application de contrôle-commande comme un système informatique qui recueille des données à partir de l'analyseur, puis utilise ces données pour élaborer des commandes qui seront transmises au procédé physique par le superviseur.

Pour développer ce type d'applications, il est essentiel de disposer d'une interface graphique rapide, de qualité et fiable. Traditionnellement, ces applications étaient réalisées à partir de langages de bas niveau tels que l'assembleur ou des langages plus courants tels que le C. Cependant, l'apparition de langages graphiques plus simples, intuitifs et offrant des

bibliothèques plus puissantes a révolutionné la programmation des systèmes informatiques destinés au pilotage des procédés physiques.

3-3- Création de l'interface graphique

Nous avons décidé de configurer une interface web pour communiquer avec l'analyseur. Lorsque l'utilisateur accède à cette interface via son navigateur, il demande au serveur web Arduino la page web de contrôle et de commande. Cette page a pour but de collecter des informations à afficher à l'utilisateur ou d'envoyer des actions spécifiques. En utilisant la page web envoyée par notre serveur Arduino, nous avons une interface pratique de commande et de contrôle. Cette interface de contrôle utilise des technologies telles que HTML5/CSS3 et JavaScript, ainsi que des requêtes http. Ces trois éléments sont complémentaires et essentiels pour la création d'une page web capable de communiquer avec le serveur Arduino.

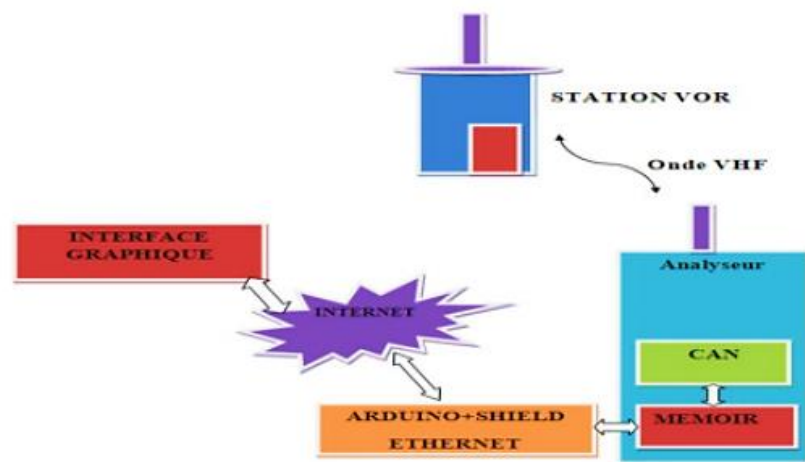


Figure III-5 : Concept du système de récolte des données

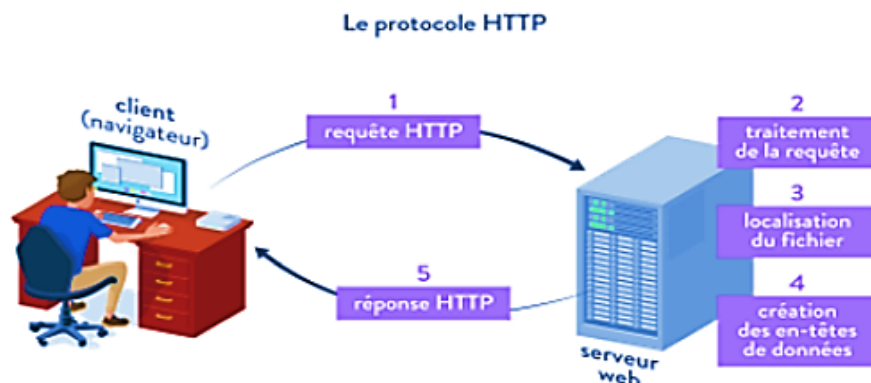


Figure III-6 : Séquence d'une requête http

Tous les sites web reposent sur les langages HTML et CSS pour leur fonctionnement essentiel.

- * HTML est un langage basé sur des balises qui permet de structurer le contenu d'une page web et de lui donner du sens. Il permet notamment de définir des éléments tels que des paragraphes, des titres, des tableaux de données, ainsi que d'intégrer des images et des vidéos.
- * CSS est un langage de règles de style qui permet de donner une mise en forme au contenu HTML. Il offre par exemple la possibilité de modifier des aspects tels que la couleur de l'arrière-plan, les polices de caractères, ainsi que de disposer le contenu en plusieurs colonnes .
- * JavaScript est un langage de programmation qui permet de générer du contenu dynamique et de contrôler des éléments multimédias. Il offre la possibilité d'animer des images et bien d'autres fonctionnalités. Bien qu'il ne puisse pas tout faire, il est incroyable de voir ce que l'on peut réaliser avec seulement quelques lignes de code JavaScript.

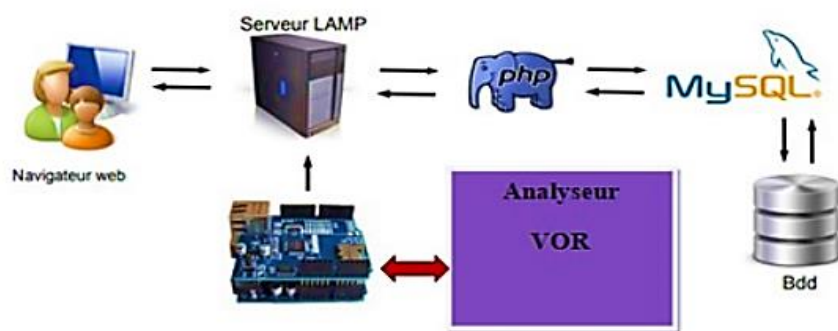


Figure III-7 : Stockage/récolte des données

3-4- Création d'une base de données

Pour manipuler une base de données MySQL, l'un des outils les plus populaires est phpMyAdmin. Voici les étapes pour l'installation :

- Ouvrez la console et saisissez la commande suivante : `sudo apt-get install phpMyAdmin`.
- Cochez la case Apache 2 en utilisant la barre d'espace pour le configurer comme serveur web.

- Répondez OUI lorsque vous êtes invité à configurer la base de données de phpMyAdmin.
- Entrez le mot de passe "sti2dsin".
- Confirmez le mot de passe "sti2dsin" à nouveau (2 fois) pour la connexion à phpMyAdmin.

3-5- Communication Arduino base de données

L'objectif principal est de mesurer des paramètres à l'aide d'un analyseur, puis de les envoyer à l'Arduino à intervalles réguliers. Ensuite, l'Arduino renvoie les données collectées vers une base de données créée sous MySQL. Un serveur PHP est utilisé pour enregistrer les données et les rendre accessibles à tout moment.

Pour réaliser cela, les étapes suivantes doivent être suivies :

- Connectez un Shield Ethernet à un Arduino UNO.
- Connectez la sortie du bloc CAN à la broche RX de l'Arduino.
- Modifiez le programme Arduino pour l'adapter à la nouvelle fonctionnalité requise.
- Créez une table "paramètre VOR" dans la base de données "sti2d" sur le PC, comprenant 4 champs : "Désignation", "valeur réf", "valeur mesurée" et "erreur".
- Écrivez un programme "enregistrement.php" qui reçoit les données de l'Arduino et les enregistre dans la table "paramètre" de la base de données "sti2d". Ce programme récupère également la date et l'heure du PC pour les associer à chaque valeur de paramètre.
- Écrivez une page web "lecture.php" qui se connecte à cette base de données et affiche les mesures.

3-6- Mise hors ou sous tension de l'analyseur

Pour faire fonctionner notre analyseur à distance, il peut être connecté à la partie d'alimentation de celui-ci. En utilisant un petit programme de gestion de sortie, on peut commander la mise sous tension ou hors tension en mode local ou à distance.

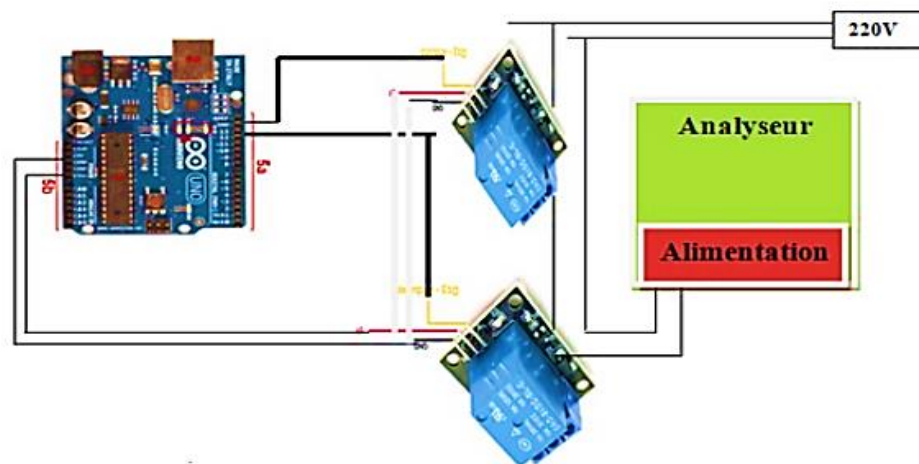


Figure III-8 : Commande alimentation à distance

3-7- Création d'interface de contrôle

Une fois que notre analyseur est connecté à l'interface de contrôle, on obtient l'affichage suivant :

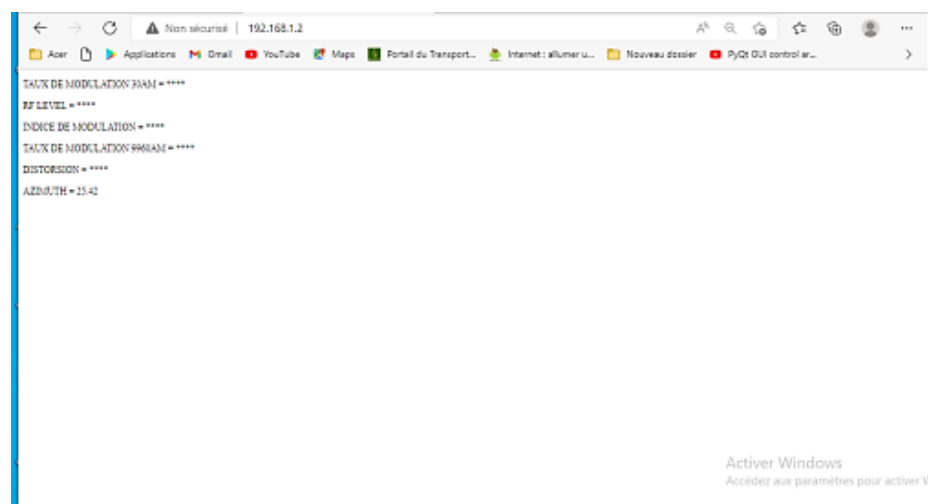


Figure III-9 : Interface de contrôle

4- Simulation et validation

4-1- Création du signal

En raison de l'absence de récepteur, il est nécessaire de moduler le signal pour le traiter. La première étape consiste à moduler deux signaux, l'un à 30 Hz sur une sous-porteuse modulée en FM et l'autre sur une porteuse AM qui agit comme une enveloppe pour transporter notre signal.

4-1-1- Modulation FM :

Le processus de modulation d'un signal en FM implique la prise d'un signal source de fréquence 30 Hz et sa modulation en FM à l'aide de LabVIEW. Le résultat obtenu est le suivant :

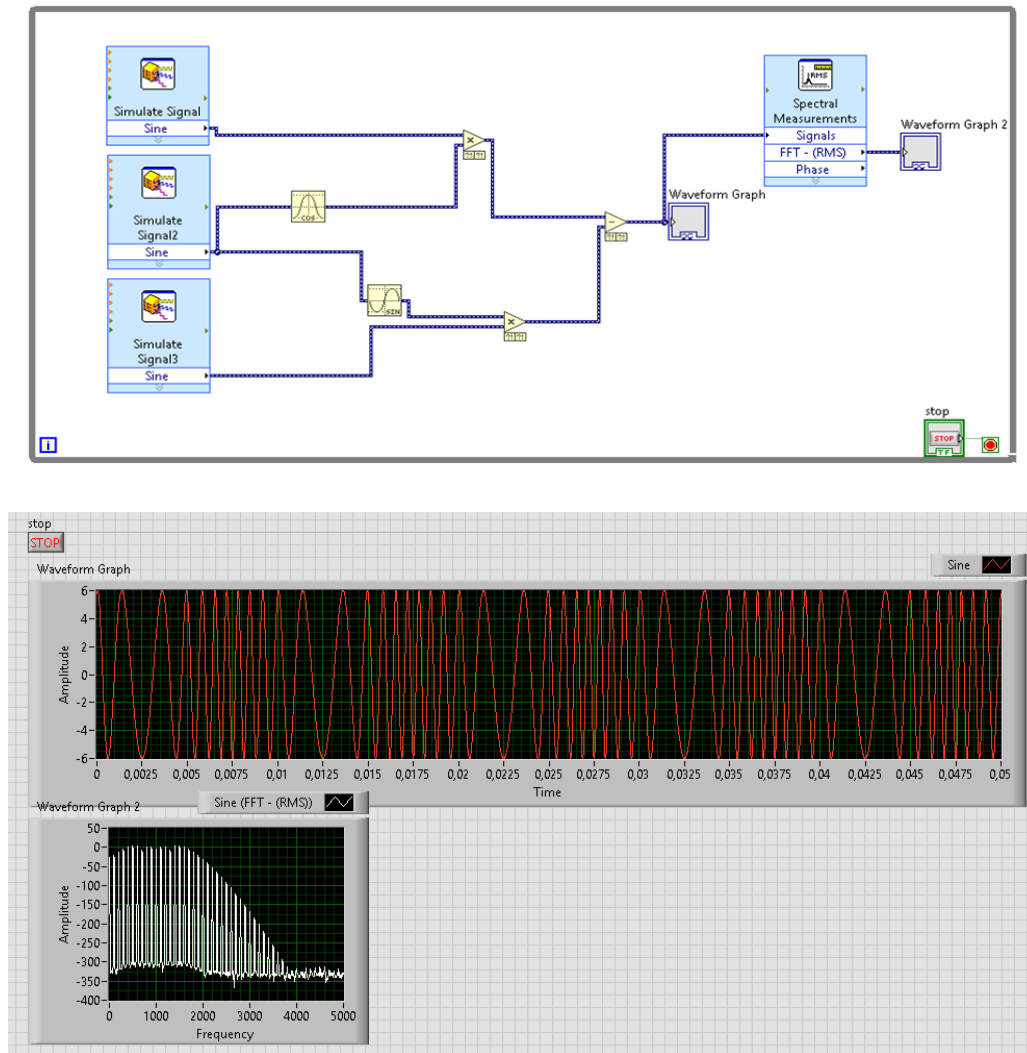


Figure III-10 : Modulation d'un signal FM sur LabVIEW

4-1-2- Modulation AM :

Pour la modulation du signal AM on a utilisé les différents blocs suivants :

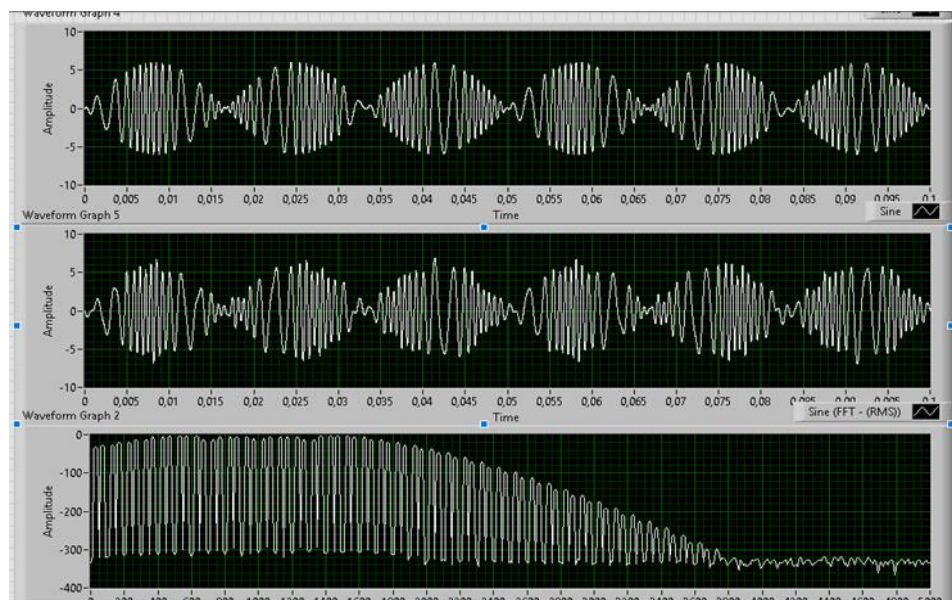
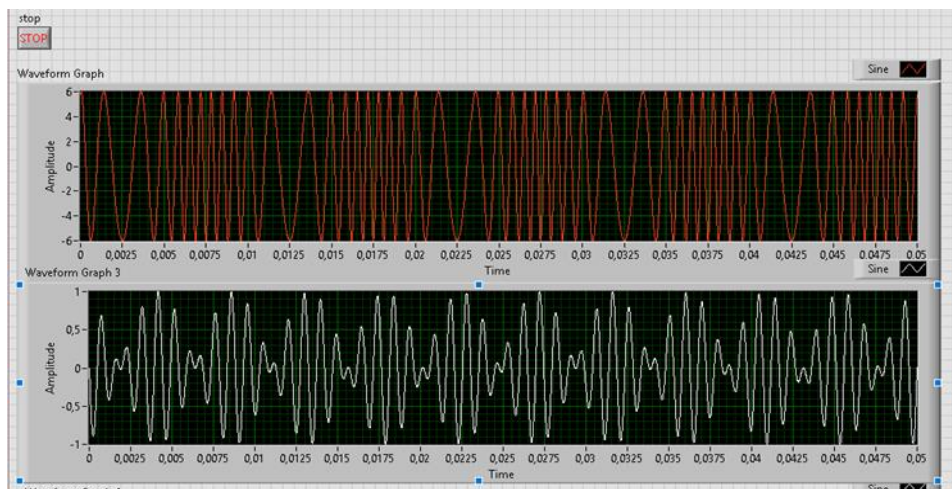
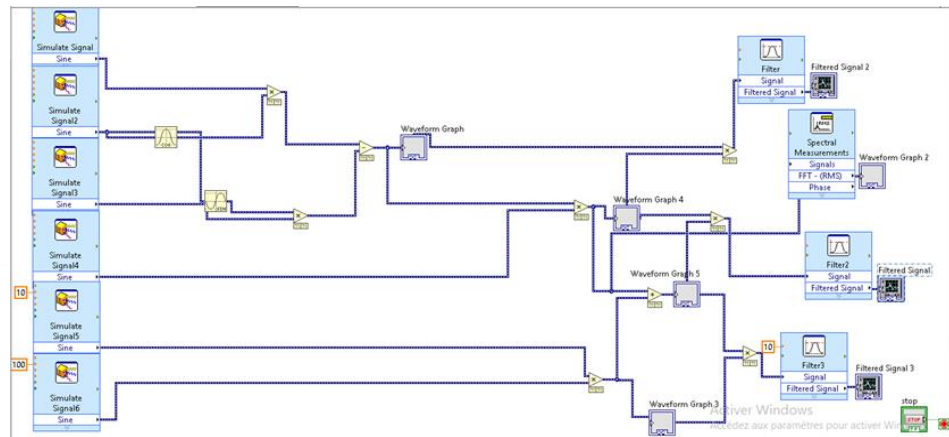


Figure III-11 : Schéma global de la modulation du signal VOR

4-2- Analyse et traitement du signal :

Suite à une estimation de modulation du signal VOR pour permettre sa démodulation, les figures ci-dessous illustrent la démodulation sur l'interface de LabVIEW :

4-2-1- Démodulation AM :

Pour la démodulation du signal AM, les blocs suivants ont été utilisés :

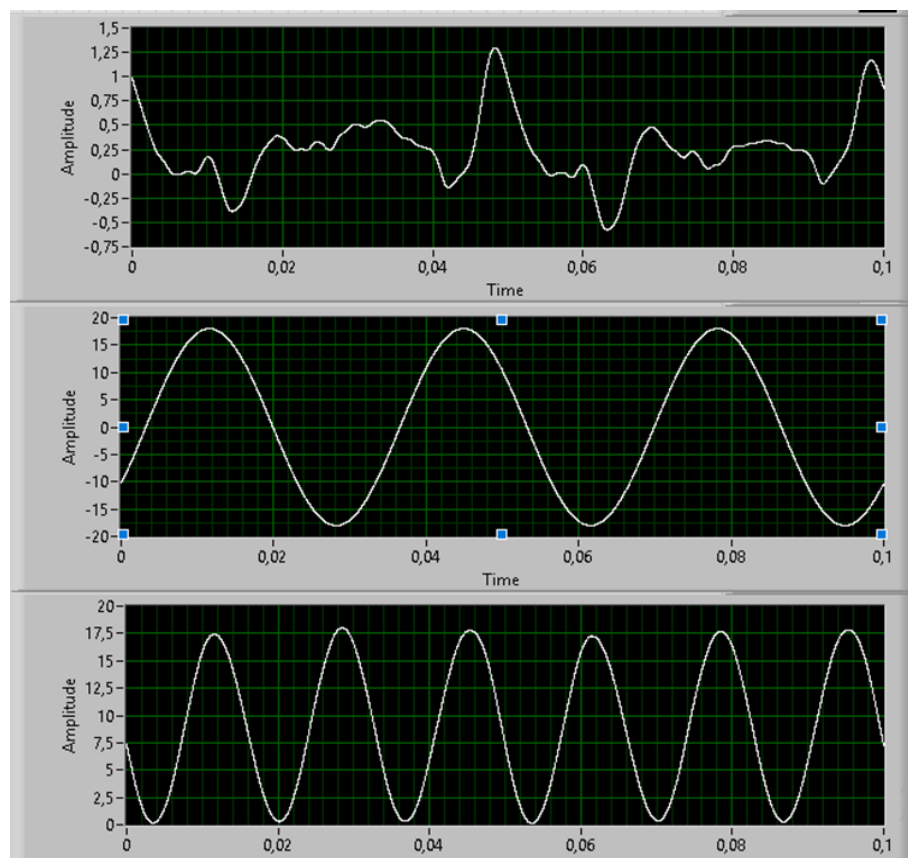
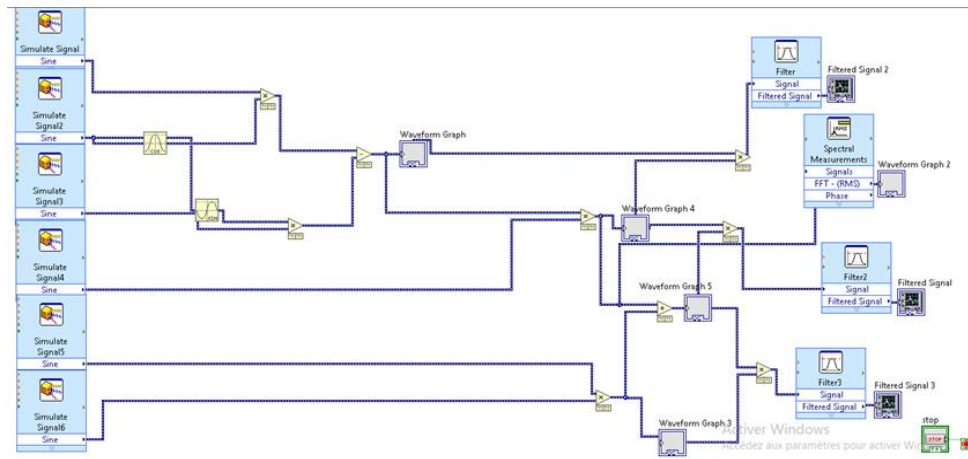


Figure III-12 : Schémas global de la démodulation AM

4-2-2- Démodulation FM :

Les blocs suivants ont été utilisés pour la démodulation du signal FM :

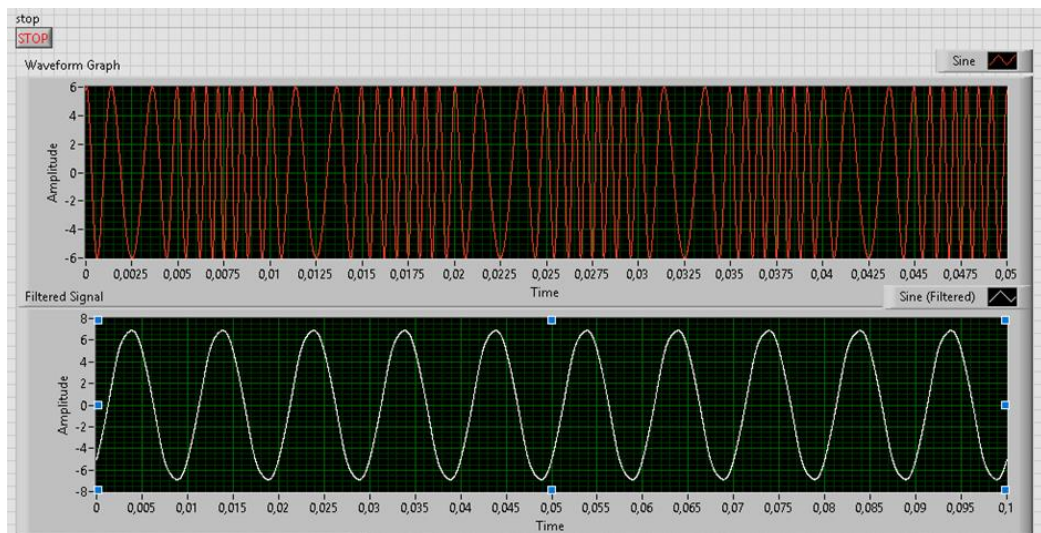
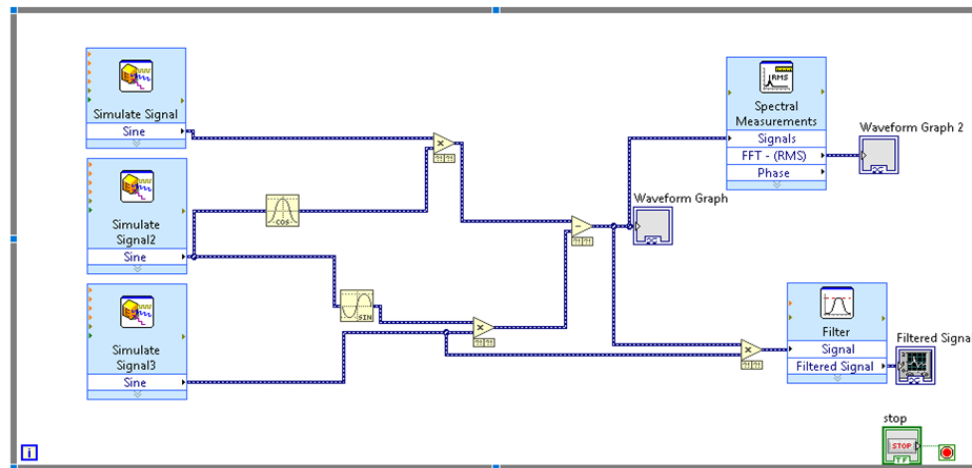


Figure III-13 : Schémas global de la démodulation FM

5- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le fonctionnement des principaux modules de modulation du signal, ainsi que les filtres et les démodulateurs logiciels sur LabVIEW. De plus, nous avons examiné la conception de l'application de contrôle et de commande.

Conclusion générale

Dans le cadre de notre projet de fin d'études actuel, notre équipe de service radionavigation de la direction technique de l'aéroport (Gafsa) s'est vu confier la tâche d'étudier le système VOR. Notre travail s'est déroulé en deux étapes principales. La première étape consistait à étudier et à concevoir un analyseur de signal VOR. La seconde étape avait pour objectif de simuler en utilisant le logiciel LabVIEW le fonctionnement de l'analyseur conçu et de le rendre communicant.

Cette étude a démontré la possibilité de transporter plusieurs signaux sur une même porteuse en utilisant des modulations différentes en amplitude et en fréquence. En se basant sur cette analyse, nous avons obtenu deux sinusoïdes dont la phase relative représente l'angle azimutal par rapport au nord magnétique. Nous avons constaté que ces deux grandeurs varient de manière cohérente. Cependant, nous avons rencontré une limitation lors de l'utilisation à longue portée depuis le sol, car le diagramme de rayonnement est exclusivement orienté vers le ciel, évitant ainsi toute propagation vers le sol.

Nous avons plusieurs pistes de recherche à envisager dans le prolongement de cette étude, notamment :

- Concevoir les différents blocs d'un analyseur des signaux VOR.
- Simuler les autres composants électroniques de la station VOR ainsi qu'un signal VOR composite et virtuel.
- Tester la démodulation et le filtrage du signal VOR.

La réalisation de ce projet nous a offert l'opportunité d'approfondir nos connaissances et compétences acquises au cours de nos années à l'institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Gafsa. De plus, cela nous a préparés à notre future intégration dans le domaine professionnel, en particulier dans les domaines de la radionavigation et des télécommunications.

Bibliographie

- [1] Aviaform. <https://dmorieux.pagesperso-orange.fr/controle_nav_aides-radio01.htm>, 2019. Last accessed Dimanche 12 Juin 2022.
- [2] ARINAIVOLALAINA Tantely Andriamanantena. Visual omni range (vor). : 02 / RC, 2004.
- [3] LabVIEW. <<https://www.ni.com/en-lb/shop/software/products/labview.html>> , NI LabVIEW 2020 (64-bit).
- [4] INSTRUMENTS DE RADIONAVIGATION. Vhf omnidirectional range. <<https://www.lavionnaire.fr/HistoriqueSite.php>>, 2010. Last accessed 21/05/2022.
- [5] THALES. Cvor 431 conventional vhf omnidirectional radio range part1. Reference No. 83130 55123, 2010.
- [6] THALES. Cvor 431 conventional vhf omnidirectional radio range part2. Reference No. 83130 55124, 2010.
- [7] THALES. volume b - c. REF NO 8305148600, 2010.