

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère Des Etudes Supérieures et de la Recherche Scientifiques
Université SAAD DAHLEB Blida 01
Faculté des sciences et Technologies



*Institut
d'Aéronautique et des
Etudes Spatiales*



*Établissement National
de la Navigation
Aérienne*

Mémoire de fin de cycle

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Master aéronautique spécialité CNS/ATM

**Simulation d'un récepteur de signal VOR et élaboration
d'une méthode pour le calcul et simulation des erreurs
intrinsèques à l'équipement au sol**

Réalisé par :

- *BAHOUCHE Sabria*
- *BOUHINI Thiziri*

Proposé et encadré par :

- *Mr. ZENATI Houssam Eddine*

Promotrice :

- *Mme. BENCHEIKH Saliha*

Promotion : 2018/2019

ملخص

نظام المدى متعدد الاتجاهات عالي التردد VOR هو نظام لاسلكي لتحديد المواقع يستخدم في الملاحة الجوية ويعمل بالترددات (108-118 ميغاهرتز). معترف به دوليا لتوجيه الطائرات قصيرة ومتوسطة المدى. يمكن التحكم فيه ومراقبته عن بعد. مبدأ عمل نظام VOR هو اصدار بث حيث الطور يتوقف على سمت جهاز الاستقبال بالنسبة للمحطة الأرضية. أهداف مشروعنا للتخرج كانت كما يلي:

- دراسة مختلف أنواع التعديل الخاصة بنظام VOR.
- دراسة نظام VOR (VOR التقليدي و VOR دوبلر).
- إنجاز مستقبل إشارة VOR.
- دراسة أخطاء VOR.
- عرض لنموذج حسابات أخطاء VOR ومحاكاة الرسوم البيانية لإشعاعات الأشرطة الجانبية.

Résumé

Le VOR (VHF Omnidirectional Range) est un système de positionnement radioélectrique utilisé en navigation aérienne et fonctionnant avec les fréquences VHF (108-118MHz). Il est reconnu à l'échelle internationale pour le guidage des avions à courte et moyenne distance. Il peut être commandé et surveillé à distance. Le principe de VOR est de créer une émission dont la phase dépend de l'azimut du récepteur par rapport à la station au sol.

Les objectifs de notre projet de fin de cycle étaient :

- Etude des différents types de modulation utilisée dans un système VOR.
- Etude du système VOR (VOR conventionnel & VOR doppler).
- Réalisation d'un récepteur de signal VOR.
- Etude des erreurs VOR.
- Présentation d'un canevas de calculs des erreurs VOR et simulation des diagrammes de rayonnements des bandes latérales.

Abstract

VOR (VHF Omnidirectional Range) is a radio positioning system used in aerial navigation and operating with VHF frequencies (108-118MHz). It is recognized internationally for the guidance of short and medium-range aircraft. It can be controlled and monitored remotely. The principle of VOR is to create a transmission whose phase depends on the azimuth of the receiver relative to the station.

The objectives of our end-of-cycle project were:

- Study of the different types of modulation used in a VOR system.
- Study of the VOR system (conventional VOR & VOR doppler).
- Realization of a VOR signal receiver.
- Study of VOR errors.
- Presentation of a VOR error calculation scheme and simulation of sideband radiation diagrams.

Sommaire.....	I
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VIII
Acronymes.....	IX
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités Sur Les Systèmes De Radionavigation.....	3
I.1.Introduction.....	3
I.2.Les Systèmes De Radionavigation.....	3
I.2.1. Classification Opérationnelle Ses Moyens De Radionavigation.....	3
I.2.2. Description de quelques équipements	4
I.2.2.1. Radiocompas automatique ADF	4
I.2.2.2. Le DME (Distance Measuring Equipment).....	5
I.2.2.3. Le VOR (VHF Omnidirectionnel Range).....	7
I.2.2.4. L'ILS (Instrument Landing System).....	9
I.3. Conclusion	11
Chapitre II: Etude Et Analyse Du Système VOR.....	12
II.1. Introduction.....	12
II.2. Définition Du VOR.....	12
II.3. Principe General Du VOR.....	14
II.4. Description D'une Station VOR Au Sol.....	14
II.4.1. L'antenne.....	15

II.4.2. Le détecteur du champ et le système monitoring.....	17
II.4.3. Alimentation en énergie.....	19
II.4.4. Climatisation.....	19
II.5. Le Système CVOR	20
II.5.1.Principe de fonctionnement de CVOR	20
II.5.1.1. Le signal de référence.....	20
II.5.1.2. Le signal variable.....	23
II.5.1.3. Transmission de l'indicatif et de la phonie.....	25
II.5.2. Diagramme de rayonnement de VOR.....	27
II.6. Le Système DVOR	28
I.6.1. Rappel de l'effet Doppler.....	28
II.6.2. Définition du DVOR.....	29
II.6.3. Principe de fonctionnement du DVOR.....	30
II.6.4. Diagramme de rayonnement d'un DVOR.....	33
II.7. Comparaison Entre CVOR Et DVOR.....	34
II.8. Instrument De Bord – Récepteur.....	35
II.8.1. Présentation de l'équipement.....	35
II.8.3. Le but du récepteur à bord d'un aéronef.....	36
II.8.4. Principe du récepteur.....	37
II.8.5. Constitution du récepteur.....	37
II.9. Normes et recommandations.....	41

II.10. Conclusion.....	42
Chapitre III : Erreurs VOR Et Environnement De Travail.....	43
III.1. Introduction.....	43
III.2. Définition.....	43
III.3. Erreurs Intrinsèques à L'équipement Sol.....	44
III.3.1. Erreur Duantale	44
III.3.3. Erreur Quadrantale Semi-Cardinale.....	46
III.3.4. Erreur Quadrantale Cardinale (Qc).....	47
III.3.2. Erreur Octantale	48
III.3.5. Erreur Constant.....	49
III.4. Partie Logicielle	49
III.4.1. Radio Logiciel.....	49
III.4.2. GNU Radio.....	49
III.4.3. GNU Radio Companion.....	50
III.4.4. Applications de GNU Radio.....	51
III.4.5. Dispositif RTL-SDR.....	51
III.5. Conclusion.....	52
Chapitre IV : Simulation Du Récepteur Vor Et Méthodes De Calculs D'erreurs Intrinsèques.....	53
IV.1 Introduction.....	53
IV.2 Simulation D'un Récepteur A Démodulation Directe.....	53

IV.2.1 Principe De Fonctionnement D'un Récepteur A Démodulation Directe.....	53
IV.2.2 Simulation D'un Récepteur A Démodulation Directe A L'aide D'une Clé Rtl-Sd.....	54
IV.2.3 Le Résultat Obtenu.....	58
IV.3 Réalisation D'un Récepteur De Signal Vor.....	58
IV.3.1 Principe De Fonctionnement D'un Récepteur De Signal Vor.....	58
IV.3.2 Réalisation De Récepteur.....	59
IV.3.3 Génération Du Signal Vor	62
IV.3.4 Réception De Signal Vor.....	63
IV.4 Calcul Et Simulation Des Erreurs Intrinseques A L' Equipement Vor.....	65
IV.4.1 Simulation Des Erreurs avec Microsoft Excel.....	66
IV.4.2 Erreurs intrinsèques à l'équipement sol.....	67
IV.4.2.1 Erreur Duantale Cosinus Dc.....	67
IV.4.2.2 Erreur Duantale Sinus Ds.....	68
IV.4.2.3 Erreur Quadrentale Semi-Cardinale Antenne (Q_{Sant})	69
IV.4.2.4 Erreur Quadrantale Cardinale Qc.....	71
IV.4.2.5 Erreur Constante Ec.....	72
IV.5 Conclusion.....	73
CONCLUSION GENERALE	74

Listes des Figures

Fig.I.2 : Station NDB de l'aérodrome de BJA.

Fig.I.3 : Fonctionnement du DME.

Fig.I.4 : Antenne DME.

Fig.I.5 : Baie VOR.

Fig.I.6 : Station VOR de l'aérodrome de BJA.

Fig.I.7 : Antennes du Localizer.

Fig.I.8 : Antennes du Glide.

Fig.1.9 : l'atterrissage (ILS).

Fig.II.1 : Protocole de fonctionnement Air-sol de VOR.

Fig.II.2 : Principe de la navigation en route du VOR.

Fig.II.3 : Représentation schématique d'une installation VOR (Adjoint avec DME).

Fig.II.4 : Antenne Thomson.

Fig.II.5 : Rayonnement de VOR en site.

Fig.II.6 : Rayonnement de VOR sans contreponds.

Fig.II.7 : Rayonnement de VOR avec contreponds infini.

Fig.II.8 : Rayonnement de VOR avec contreponds fini.

Fig.II.9 : Organigramme de contrôle.

Fig.II.10 : Schéma synoptique de l'alimentation en énergie.

Fig.II.11 : Phase des 30 Hz de CVOR.

Fig.II.12 : Spectre de l'émission omnidirectionnelle.

Fig.II.13 : Représentation graphique du signal 30Hz REF.

Fig.II.14 : Spectre de l'émission directionnelle.

Liste des figures

Fig.II.15 : Génération des bandes latérales du signal VAR.

Fig.II.16 : Transmission de l'indicatif et de la phonie.

Fig.II.17 : Spectre d'émission de signal CVOR.

Fig.II.18 : Diagramme de rayonnement du Signal CVOR.

Fig.II.19 : Présentation d'une station DVOR.

Fig.II.20 : Spectre du signal DVOR émis par la balise.

Fig.II.21 : Diagramme de rayonnement du Signal DVOR.

Fig.II.22 : Comparaison spectrale des deux signaux CVOR et DVOR.

Fig.II.23 : Indicateur VOR.

Fig.II.24 : Synoptique du principe d'un récepteur VOR.

Fig.II.25 : Fonctionnement du VOR en chaîne manuelle.

Fig.II.26 : Fonctionnement du VOR en chaîne automatique.

Fig.II.27 : Figuration du RMI.

Fig.III.1 : différentes origines de l'erreur.

Fig.III.2 : courbe d'erreur octantale.

Fig.III.3 : diagramme de rayonnement en présence de l'erreur Octantale.

Fig.III.4 : diagramme de rayonnement en présence de l'erreur duantale cosinus.

Fig.III.5 : Courbe d'erreur duantale cosinus.

Fig.III.6 : diagramme de rayonnement en présence de l'erreur duantale sinus.

Fig.III.7 : courbe d'erreur duantale sinus.

Fig.III.8 : La courbe d'erreur quadrantale semi-cardinale B.F ($Q_{S_{BF}}$).

Fig.III.9 : Erreur Quadrantale semi-cardinale antenne ($Q_{S_{ant}}$).

Fig.III.10 : courbe d'erreur quadrantale semi-cardinale antenne ($Q_{S_{ant}}$).

Liste des figures

Fig.III.11 : Diagramme de rayonnement en présence de l'erreur quadrantale cardinale (Q_c).

Fig.III.12 : courbe d'erreur de l'erreur quadrantale cardinale (Q_c).

Fig.III.13 : Interface GNU Radio.

Fig.III.14 : Composition interne de la clé RTL-SDR.

Fig.III.15 : Diagramme de fonctionnement de la clé RTL-SDR.

Fig.IV.1 : Schéma bloc d'un récepteur à démodulation directe.

Fig.IV.2 : Bloc RTL-SDR

Fig.IV.3 : WX GUI Chooser

Fig.IV.4 : Bloc Variable

Fig.IV.5 : Bloc FFT Sink

Fig.IV.6 : Bloc low Pass Filter

Fig.IV.7 : Bloc Wide-Band FM Receiver

Fig.IV.8 : Bloc Rational Resampler

Fig.IV.9 : Bloc Audio Sink

Fig.IV.10 : Schéma global de récepteur FM

Fig.IV.11 : Installation de récepteur FM

Fig.IV.12 : Tracés de la FFT et le signal démodulé d'un récepteur FM

Fig.IV.13 : Schéma synoptique d'un récepteur VOR

Fig.IV.14 : Bloc RTL-SDR Source

Fig.IV.15 : Bloc Throttle

Fig.IV.16 : Bloc AM Demod

Fig.IV.17 : Bloc Low Pass Filter

Fig.IV.18 : Bloc AM Demod

Fig.IV.19 : Bloc Band Pass Filter

Liste des figures

Fig.IV.20 : Bloc DC Blocker

Fig.IV.21 : Bloc Multiply

Fig.IV.22 : Bloc FM Demod

Fig.IV.23 : Bloc Multiply

Fig.IV.24 : Bloc Float To Complex

Fig.IV.25 : Bloc Complex to Arg

Fig.IV.26 : Bloc GUI Scope Sink

Fig.IV.27 : Schéma global de récepteur signal VOR sur GNU Radio.

Fig.IV.28 : Générateur de signal VOR

Fig.IV.29 : Installation de récepteur signal VOR

Fig.IV.30 : Résultats d'exécution du programme pour un récepteur VOR immobile.

Fig.IV.31 : Récepteur professionnel de DETR.

Fig.IV.32 : Schéma global de récepteur d'un signal VOR.

Fig.IV.33 : Résultats d'exécution du programme d'un récepteur VOR mobile.

Fig.IV.34 : Méthode de calculs des erreurs.

Fig.IV.35 : Diagramme de rayonnement des BL cosinus et sinus dans le cas idéal.

Fig.IV.36 : Diagramme de rayonnement de l'erreur Duantale Cosinus Dc.

Fig.IV.37 : Diagramme de rayonnement de l'erreur Duantale Sinus Dc.

Fig.IV.38 : Diagramme de rayonnement de l'erreur Quadrentale semi-cardinale antenne (QS_{ant})

Fig.IV.39 : Diagramme de rayonnement de l'erreur Quadrantale Cardinale Qc.

Fig.IV.40 : Diagramme de rayonnement de l'erreur constante Antenne.

Liste Des Tableaux

Tableau II.1 : Comparaison entre CVOR et DVOR.

Tableau II.2 : Normes et Recommandation.

Acronymes

AC: Courant Alternatif.

ADF : Automatic Directional Finder.

AM : Modulation d'Amplitude.

BF : Basse Fréquence.

BL : Bande Latérale.

CDI : Course Deviation Indicator / Indicateur d'écart de route.

CVOR : VOR Conventionnel.

DDM : Différence des Taux de Modulation.

DETR : Département des Equipement Techniques et Radio Navigations.

DME : Distance Measuring Equipment.

DVOR : VOR Doppler.

ENNA : Etablissement Nationale De La Navigation Aérienne.

FLI : Fréquence Latérale Inférieure.

FLS : Fréquence Latérale Supérieure.

FM : Modulation en Fréquence.

IF : Fréquence Intermédiaire.

IFR : Instrument Flight Rules

ILS : Instrument Landing System.

L : Locator.

LF : Low Frequency.

LOC: Localiser.

MF : Middle Frequency.

MM : **M**edium **M**arker.

NDB : **N**on **D**irectional **B**eacon.

NM : **N**autical **M**ile.

Notam : **N**ote **T**o **A**ir **M**an.

OACI : **O**rganisation **I**nternationale de l'**A**viation **C**ivile.

OBS : **O**mnibearing **S**elector.

OM : **O**uter **M**arker.

QDM : Relèvement **M**agnétique.

QDR : Relèvement de l'avion par rapport à la station

REF : **R**éférence.

RF : **R**adio **F**réquence.

RMI : **R**adio **M**agnetic **I**ndicator

SDR : **S**oftware **D**efined **R**adio.

UHF : **U**ltra **H**igh **F**requency.

VAR : **V**ariable.

VHF : **V**ery **H**igh **F**requency.

VLF : **V**ery **L**ow **F**requency.

VOR : **V**HF **O**mnidirectionnel **R**ange.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Savoir se situer est un problème que l'homme a toujours voulu résoudre et c'est pourquoi un grand nombre de techniques ont été développées dans ce sens. La navigation est la science qui regroupe l'ensemble de ces techniques qui permettent de connaître la position d'un mobile ainsi que toutes autres informations concernant son déplacement dans l'espace. Ces méthodes peuvent se séparer en deux grandes familles. La première (Navigation à l'estime) cherche à estimer la position présente du mobile connaissant sa position à l'instant précédent, son orientation ainsi que sa vitesse. La seconde a pour but d'estimer la distance et/ou l'orientation du mobile à un ou plusieurs points de références dont la position est connue et ainsi déterminer sa position dans l'espace. Ces points de références peuvent être naturels (Astronavigation ou navigation céleste) ou artificiels (Radionavigation).

La radionavigation est un type de navigation utilisant les propriétés des ondes radioélectriques. Elle nécessite des équipements extérieurs à l'avion, généralement des émetteurs placés au sol ou des satellites ainsi que des équipements embarqués à bord de l'aéronef, utilisant des ondes radio pour obtenir ou fournir des indications fiables sur la position de l'avion dans l'espace.

Au tout début de l'aviation, les vols étaient contraints à être effectués que par temps clair, c'est alors que les vols aux instruments (IFR) débarquèrent, créèrent un rebondissement et une évolution remarquable dans le domaine de l'aéronautique. De grands progrès ont été effectués au fil des années, particulièrement la venue des systèmes en VHF qui sont devenus dès lors fondamentaux dans la navigation aérienne. Plus le trafic aérien grandissait plus les différentes phases de vol devenaient compliquées à être effectuées. C'est pour cela que l'OACI instaura des normes. L'aéronautique est un domaine très exigeant, où n'importe quel dysfonctionnement ou la moindre erreur peut provoquer des catastrophes ce qui compromettrait la sécurité.

L'ENNA (Etablissement National de la Navigation Aérienne), sur qui repose la responsabilité en termes de sécurité sur le plan aérien, est composé de nombreuses directions. Parmi elles, la direction technique de la navigation aérienne DTNA qui a essentiellement pour rôle d'assurer le bon fonctionnement des différents instruments au sol et de répondre aux normes exigées par l'OACI. Pour accomplir cela, de nombreux tests doivent être effectués.

Le département concerné doit avoir en sa possession des simulateurs théoriques et techniques fournis par les constructeurs. Ces simulateurs n'étant pas gratuits et ayant une durée de vie limitée, nous nous sommes penchés sur ce problème afin de simuler un récepteur du signal VOR avec le logiciel GNU RADIO qui sera utilisé par les ingénieurs de service radionavigation dans l'encadrement pédagogique, d'une autre part les différents types d'erreurs de VOR et la méthode de calculs suivie causent une difficulté de maintenance et une grande perte du temps. Ce qui nous a poussés à aborder cette partie et élaborer une méthode qui sera utile et efficace pour les ingénieurs de même service lors de leurs travaux de maintenance et de réglages.

Le présent manuscrit est organisé de la manière suivante :

Le chapitre I porte sur les systèmes de radionavigation, en décrivant ses équipements qui sont toujours exploités, ainsi qu'un bref rappel sur la classification opérationnelle des moyens de la radionavigation.

Le chapitre II est réservé à l'étude et analyse du système VOR, en expliquant le fonctionnement des VOR conventionnel et Doppler avec une petite comparaison entre les deux, en l'occurrence le signal VOR à la réception et la méthode de démodulation.

Le chapitre III sera consacré à l'étude théorique des erreurs intrinsèques, en mettant la lumière sur GNU RADIO ; le logiciel exploité, ainsi le matériel utilisé pour le réaliser notre projet.

Le chapitre IV, le cœur du projet, où nous présenterons les récepteurs réalisés et l'utilité de chaque bloc choisi, les résultats qui découlent de nos tests ainsi la méthode de calcul d'erreurs élaborée avec des simulations, interprétations et solutions pour chacune.

En dernier, nous clôturons ce travail par une conclusion générale et des perspectives proposées.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE RADIONAVIGATION

I.1 INTRODUCTION

La radionavigation est une des techniques de la navigation aérienne qui est basée sur des moyens radioélectriques permettant de déterminer la position d'un aéronef. L'ENNA (Etablissement Nationale de la Navigation Aérienne), en particulier le département technique DETR où nous avons fait notre stage pratique, dispose d'un ensemble d'équipements et de personnels permettant de bien maîtriser la navigation aérienne (voir Annexe1). Ce présent chapitre définit les différents moyens de Radionavigation et de télécommunication les plus actifs.

I.2 LES SYSTÈMES DE RADIONAVIGATION

I.2.1 Classification opérationnelle des moyens de radionavigation

Les aides radioélectriques sont classées en fonction de leur utilisation. Celle-ci détermine leur implantation et leur portée :

- **Aides à grande distance ($D > 300 \text{ NM}$)** : ils sont utilisables pour la navigation long-courrier au-dessus des grandes étendues désertiques ou maritimes. La précision attendue est de 5 à 10 NM. Ces aides ne peuvent utiliser que les fréquences VLF, LF ou MF.
- **Aides à moyenne distance ($D < 300 \text{ NM}$)** : ce type est utilisé pour la navigation sur des routes aériennes et dont la précision est de quelques nautiques miles ou quelques degrés. Les fréquences utilisées sont : la MF (radiophares) mais surtout la VHF et l'UHF (VOR/DME). Dans ce cas, la portée est limitée par la visibilité radioélectrique et fonction de l'altitude de vol.
- **Aides à courte distance, approche et atterrissage** : ce sont des aides utilisées dans les régions terminales et au voisinage des aérodromes. Les aides à moyenne distance (radiobalises, VOR, DME) sont utilisées, mais complétées par des aides spécifiques à l'atterrissage (ILS, GCA) capables de précisions supérieures [1].

I.2.2 Description de quelques équipements

I.2.2.1 Radiocompas automatique ADF

La goniométrie au sol en moyenne fréquence n'est plus pratiquée par contre elle est toujours utilisée à bord des avions, sous forme automatique (radiocompas automatique) à partir d'émissions LF-MF au sol par radiophares L (**L**ocator) et radiobalises NDB (**N**on **D**irectional **B**eacon) [2].

Le radiocompas automatique de bord ADF (**A**utomatic **D**irectional **F**inder) est un indicateur embarqué de gisement. Il fait partie des aides à la navigation courte et moyenne distance [3].

Son principe de fonctionnement est le suivant :

- **La station émettrice au sol**

Comme nous le montre la **Fig.I.1**, la station est composée de :

- Une antenne émettrice des signaux dit MORSE
- Le mat qui est le support de l'antenne.
- Scheltes équipement de NDB de la station qui comprend une armoire d'alimentation de la balise, un chargeur de batterie, une armoire de réglage et de contrôle de courant et de tension de l'antenne de la station.



Fig.I.1 : Station NDB de l'aérodrome de BJA

Le NDB transmet grâce à une antenne verticale une onde radio en modulation d'amplitude sur une fréquence comprise entre 200 à 1750 kHz, les plus utilisées sont entre 200 et 415Khz. L'onde du signal suit la courbure de la terre, ce qui permet une bonne réception à basse altitude et sur de grandes distances. Le signal ne nécessite pas une portée optique pour être reçu.

- **L'équipement à bord de l'avion**

L'ADF reçoit les signaux de deux antennes de l'avion : l'antenne cadre et l'antenne de lever de doute. La tension induite par l'onde électromagnétique qui provient du NDB est captée par le cadre et acheminée vers le récepteur. Ce récepteur, à l'aide un système électronique, transmet la position du cadre à l'aiguille de l'ADF. L'antenne cadre indique la direction de la balise par rapport à l'axe de l'avion. Mais elle ne permet pas de déterminer si on se dirige ou si on s'éloigne d'une station NDB. L'antenne de lever de doute fournit cette information et aussi la réception audio lorsque la fonction ADF n'est pas requise. Sur les avions modernes, et ce depuis assez longtemps, l'antenne cadre a été réduite considérablement en dimensions et elle inclut une antenne de lever de doute.

- **Réception d'un signal du NDB**

La porteuse de l'émetteur est émise en continu, seulement interrompue, à intervalles réguliers, par l'identification en code Morse de la balise. Ceci permet de déterminer avec certitude l'origine du signal reçu [4].

- **Avantages et inconvénients de l'ADF** : Ils sont cités comme suit,

- Bonne portée et précision acceptable
- Moyen universel et « tous usages » ; matériel peu complexe et coûteux, à bord et au sol.
- Faible coût d'installation et d'entretien pour la station au sol.
- Le NDB permet la navigation dans les régions non équipées de couverture VOR.
- Inutilisable par temps très orageux
- Difficilement utilisable à distance, de nuit.

I.2.2.2 Le système DME

Le système DME (**D**istance **M**easuring **E**quipment) est un équipement qui permet la mesure de la distance oblique entre un aéronef équipé d'un interrogateur et une station au sol identifiée.

- **Principe de fonctionnement d'un DME**

La distance D est mesurée en chronométrant le temps (T_m) que met une paire d'impulsion radioélectrique UHF pour faire le trajet aller-retour entre l'avion et la station au sol, sachant que la vitesse de propagation de cette onde est égale à la vitesse de la lumière $C=3 \times 10^8$ m / s).

Elle est donnée comme suit :

$$D = C \times t \tag{I.1}$$

$$T_m = t_1 + t_2 + \Delta t \tag{I.2}$$

avec $t_1 = t_2 = t$ et $\Delta t = 50 \mu s = 50 \times 10^{-6}$ (retard systématique ou temps de traitement du signal). Donc

$$T_m = 2 \times t + \Delta t \tag{I.3}$$

$$\text{D'où} \quad \Rightarrow \quad t = \frac{T_m - \Delta t}{2} \quad \Rightarrow \quad D = C \times \frac{T_m - \Delta t}{2} \tag{I.4}$$

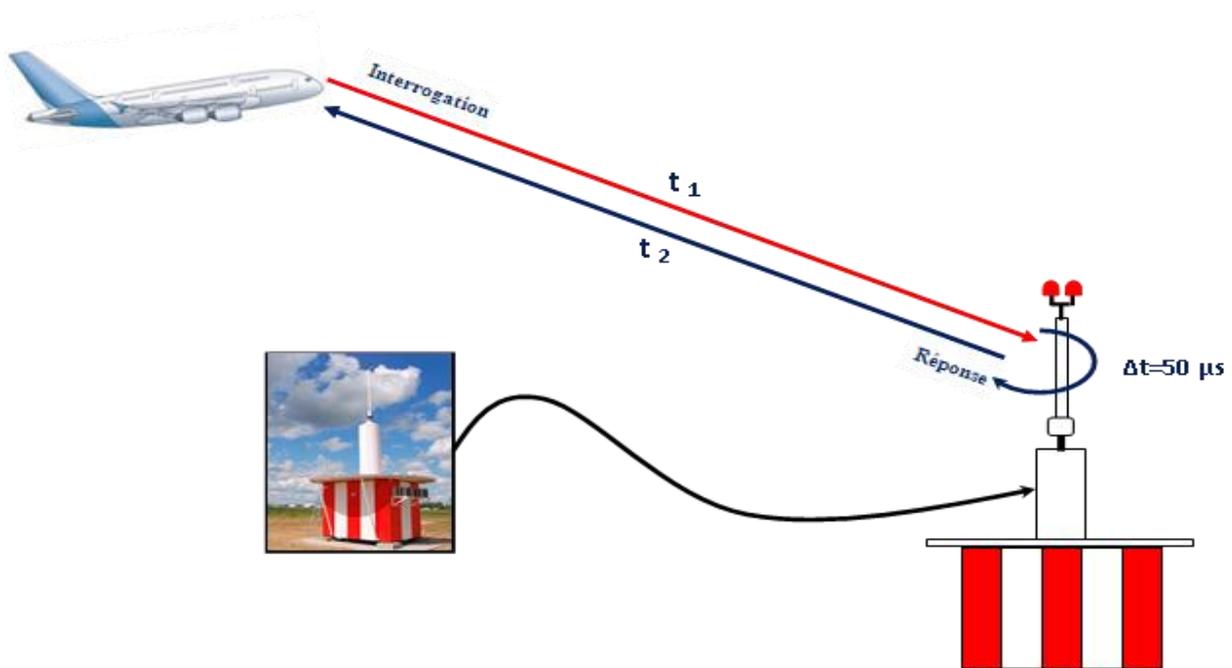


Fig.I.2: Principe de fonctionnement de DME

• **Description technique du DME**

La bande de fréquence attribuée au DME est 960-1215 MHz, sa couverture est à peu près d'un rayon de 200 NM. La baie est constituée de :

- deux transpondeurs
- deux moniteurs
- une alimentation électrique secteur, plus un système de batterie secours
- une unité de contrôle d'état locale

L'antenne DME est une antenne polarisée verticalement, omnidirectionnelle pour le DME de route et directionnelle pour le DME d'approche.



Fig.I.3 : Antenne DME

I.2.2.3 Le système VOR

Le VOR (VHF Omnidirectionnel Range) est un moyen d'aide à la navigation utilisé pour l'orientation des aéronefs à courte et moyenne distance.

Il définit 360 directions d'azimut (l'angle que fait la direction avion station avec celle du nord magnétique) comptées positivement dans le sens des aiguilles d'une montre à partir de la direction du nord magnétique passant par la station.

Il existe deux types de VOR :

- Le VOR Conventionnel CVOR qui est utilisé dans les sites où il n'y a pas d'obstacles importants.
- Le VOR Doppler DVOR pour présence des obstacles et des reliefs.



Fig.I.4 : Baie VOR

- **Le principe de fonctionnement du VOR**

Le VOR rayonne une porteuse VHF modulée de façon à transmettre deux signaux de même fréquence 30 Hz mais de phase différente pour chaque degré de son rayonnement. Ses deux signaux sont :

- Un signal de référence dont la phase est identique quelque soit la direction d'émission.
- Un signal variable dont le déphasage par rapport au précédent est égal à l'azimut de la direction d'émission.

A bord, après réception, démodulation, séparation et comparaison de phases des deux signaux, on obtient l'information d'azimut.

- **Description technique du VOR**

Le CVOR utilise une portion de bande VHF comprise entre 111,975 à 117,975Mhz, sa couverture peut atteindre un rayon de 200NM. La constitution de la baie du VOR (**Fig.I.4**) est la suivante :

- Deux ensembles émetteurs.
- Deux moniteurs.
- Une interface de communication locale /distance.
- Un système d'alimentation électrique 220V secourue par un réseau de batterie.

Concernant le système d'antennes, il est constitué de deux antennes omnidirectionnelles pour l'émission du signal de référence, deux dipôles perpendiculaires pour l'émission du signal variable et un dipôle moniteur.

- **Description de la station VOR**

Dans la station VOR, on trouve :

- une antenne VOR
- un moniteur de champs, le dipôle du moniteur est monté sur un mat à une hauteur de 2 m au-dessus d'un contrepoids à une distance de 8 m par rapport au centre de l'antenne. Il s'agit d'un module passif constitué de l'antenne de dipôle et d'une distance de transmission (transformateur d'impulsions)
- les feux d'obstacles de couleur rouge
- un contrepoids
- un Schalter qui contient deux armoires une du VOR, et l'autre du DME pour le contrôle et le réglage des paramètres

- un transformateur abaisseur de tension 33 KV /220 V qui assure l'alimentation de la station.



Fig.I.5 : Station VOR de l'aérodrome de Béjaia

- **Avantages et Inconvénients :**

Les avantages du VOR sont :

- Un relèvement magnétique de position par rapport à la balise.
- Une précision angulaire de 1° à 5°.
- Une consommation électrique moindre que celle d'une balise NDB.

Les inconvénients du VOR sont :

- La portée est plus réduite que les stations NDB (le signal ne suit pas la courbure terrestre).
- Le rayonnement est stoppé par les montagnes et les gros obstacles.
- Sa mise en place au sol est plus complexe et nettement plus coûteuse que celle d'un NDB. Cependant, la consommation en énergie étant plus faible, l'amortissement se fera à moyen terme.

I.2.2.4 Le système ILS

Le système ILS (**I**nstrument **L**anding **S**ystem), ou système d'atterrissage aux instruments, constitue l'aide normalisée non visuelle à l'approche finale et à l'atterrissage. Il comprend :

- un radiophare d'alignement de piste LOC (**L**ocalizer) qui fournit au pilote les informations de navigation gauche-droit pour s'aligner sur l'axe de piste en générant un plan de guidage vertical. Il fonctionne dans la bande de fréquences VHF comprise entre 108- 112Mhz.

- un radiophare d'alignement de descente GP (Glide Path) qui fournit les informations de navigation haut-bas au pilote en générant un plan de guidage qui fait un angle généralement de 3° avec le plan horizontal. Il fonctionne dans une portion de la bande UHF comprise entre 328 - 336Mhz.



Fig.I.6: Antennes du Localizer (à gauche) et du Glide (à droite)

- une série de radiobalises (Les Markers), incluant une balise extérieure OM (Outer Marker) et une balise centrale MM (Middle Marker), qui fournissent les informations à propos de la distance jusqu'au seuil de la piste.

Le principe de fonctionnement du LOC et du GLIDE repose sur les mesures de la variation du taux de modulation (différence des taux de modulation DDM) entre deux signaux disposant des fréquences 90 et 150Hz.

Il s'agit des fréquences de navigation employées afin de détecter le cap d'approche correcte ($DDM=0$) ainsi que l'angle d'alignement de descente spécifié ($DDM=0$).

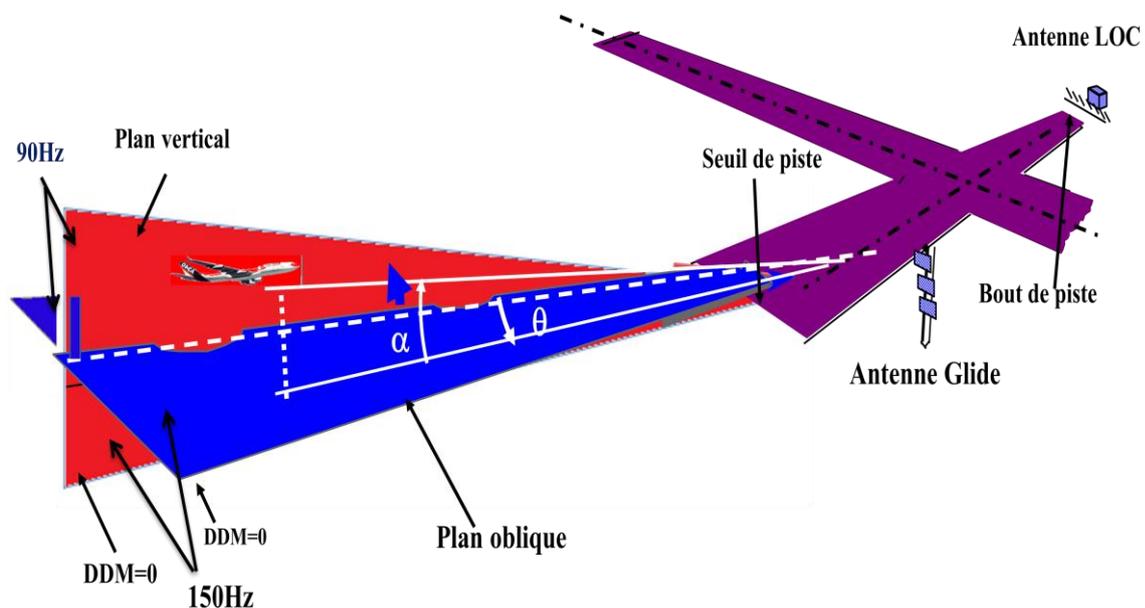


Fig.I.7: Le système d'atterrissage aux instruments ILS

I.3 CONCLUSION

Les moyens de radionavigation qu'on a cités dans ce chapitre restent les plus exploités en aéronautique, ils servent en quelque sorte d'éclaireurs dans les airs. Quelles que soient les conditions météorologiques, en vol IFR ou VFR, ils permettent aux pilotes de suivre la bonne trajectoire. En ce qui concerne le VOR, il sera expliqué en profondeur dans le chapitre II.

CHAPITRE II

ETUDE ET ANALYSE DU SYSTEME VOR

II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons introduire les descriptions du système VOR, ses caractéristiques techniques ainsi que son fonctionnement, en mettant en évidence ses deux principaux types VOR Conventionnel (CVOR) et VOR Doppler (DVOR). Par ailleurs, nous allons citer la constitution des équipements à bord de l'avion.

II.2 DÉFINITION DU VOR

Le radiophare omnidirectionnel VOR (VHF Omnidirectional Range) est un système de positionnement radioélectrique utilisé en navigation aérienne et fonctionne dans la gamme de fréquences VHF:108-118 MHz.

Son but est de fournir une information de relèvement magnétique (QDM) d'une station d'émission omnidirectionnelle au sol qui pourra être lue par le pilote sur un indicateur.

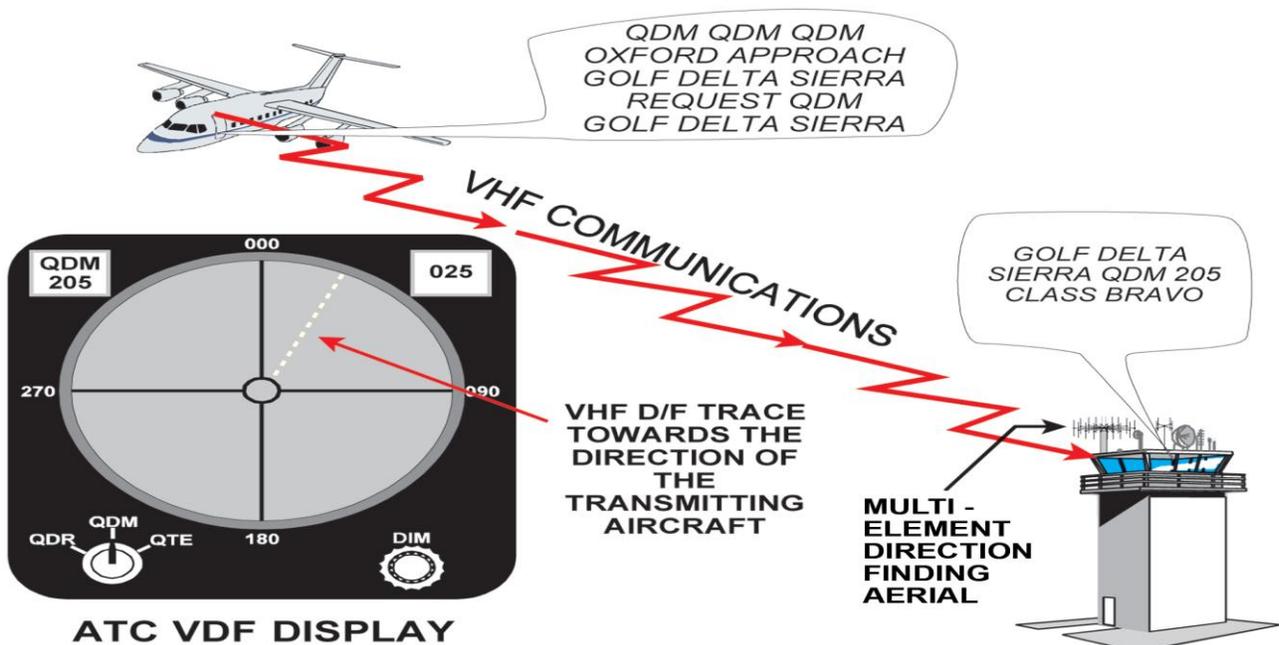


Fig.II.1 : Protocole de fonctionnement Air-sol de VOR

Le QDM est le cap magnétique qui permet de rejoindre la station VOR sans vent. Les indications à bord sont indépendantes du cap de l'aéronef, on note alors : $QDM = QDR \pm 180$.

Le réseau de trafic aérien actuel se caractérise par un certain nombre de stations au sol VOR Conventionnel (CVOR), ou VOR Doppler (DVOR) ayant une portée allant jusqu'à 300 Km (caractéristique de propagation optique de VHF). CVOR/DVOR fournissent une information d'azimut permettant au pilote de voler d'une station VOR à une autre au moyen des trajectoires préprogrammées (Fig.II.2).

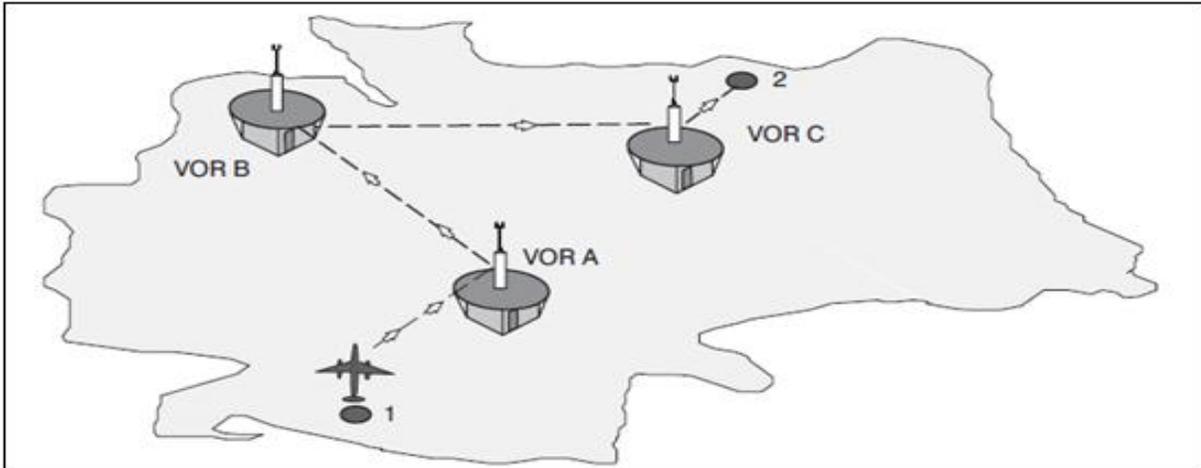


Fig.II.2 : Principe de la navigation en route du VOR

La position de l'avion est marquée par l'intersection de deux lignes de position. Pour évaluer les indications, il suffit de disposer d'une carte et de connaître les positions et les fréquences des CVOR et des DVOR ainsi que le plan de leurs fréquences.

➤ Classification des émetteurs VOR

Il existe 2 types de VOR, dont le fonctionnement est identique, mais l'utilisation détermine l'implantation et la puissance d'émission mise en jeu, c'est-à-dire la portée.

Le T/VOR (Terminal VOR) est un moyen radio d'atterrissage et il est donc situé sur un aéroport. Sa portée est limitée à 50 Km environ et son indicatif comporte en général deux lettres. Il travaille sur la gamme de fréquences 108,00 à 111,85MHz.

Le VOR/NAV est un moyen de radionavigation qui sert à jalonner les voies aériennes ou airways. Il peut être situé sur un aéroport, beaucoup plus fréquemment dans la nature ou aux points remarquables des régions de contrôle. Sa portée est nettement plus grande (100 km environ pour un avion situé à 1000 m d'altitude). Son indicatif comporte trois lettres. Il travaille sur les fréquences de 112 à 117,95 MHz [3].

II.3 PRINCIPE GENERAL DU VOR

Le principe du VOR est d'émettre une porteuse VHF modulée de façon à transmettre simultanément et indépendamment deux signaux de navigation à 30Hz dont la différence de phase dans un azimut donné soit précisément égale à cet azimut. L'information angulaire Θ est transmise sous forme de différence de phase entre deux signaux sinusoïdaux suivants :

- Le signal 30Hz, dit signal de référence, dont la phase est identique dans toutes les directions (rayonnement omnidirectionnel).
- Le signal 30Hz, dit signal variable, dont la phase dépendante de l'azimut Θ .

Alors, nous avons :

$$\left. \begin{array}{l} \Theta_{30 \text{ var}} = \Omega t - \Theta \\ \Theta_{30 \text{ ref}} = \Omega t \end{array} \right\} \Theta_{30 \text{ var}} - \Theta_{30 \text{ ref}} = \Theta. \quad (\text{II.1})$$

A bord, la mesure du déphasage entre ces deux signaux donne l'azimut magnétique de l'avion par rapport à la station (QDM). Au sol, la station VOR émet une porteuse support des signaux de navigation, d'identification (indicatif morse) et d'information (phonie éventuellement).

A bord, ces signaux démodulés par un récepteur VHF sont séparés. Les signaux de navigation sont traités indépendamment puis comparés en phase pour fournir l'indication d'azimut. Cette mesure de phase se fait à 1° près et permet donc de définir 360 « radiales ». Ces « radiales » constituent un repère absolu par rapport au sol et les indications VOR à bord sont indépendantes du cap de l'avion [5].

II.4 DESCRIPTION D'UNE STATION VOR AU SOL

Quoique l'objet du présent chapitre soit le VOR en tant que système, il est de le concrétiser par une description sommaire de la station sol. Vue de l'extérieur, celle-ci comprend :

- Un abri (Shelter) dont le toit est constitué d'une surface métal plus souvent circulaire.
- Une antenne implantée au milieu de la toiture et protégée des climatiques par un radome.

Un (ou plusieurs) détecteur de champ, ce sont des antennes réceptrices du champ VOR effectivement rayonné et permettant de ramener ce signal à l'intérieur de l'abri. Dans celui-ci, on trouvera la (ou les) baie électronique, l'arrivée et distribution d'énergie ainsi que les dispositifs de climatisation. (voir la figure 03).

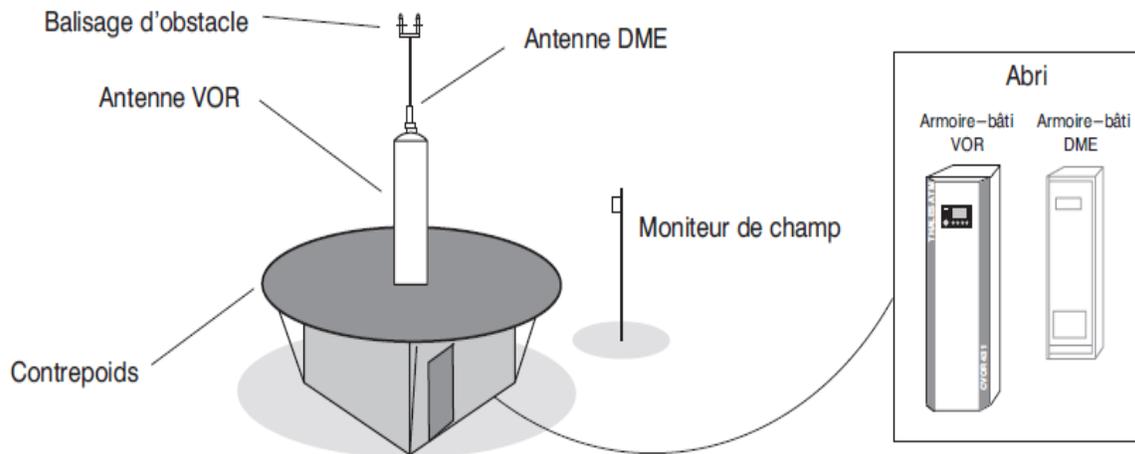


Fig.II.3 : Représentation schématique d'une installation VOR (Adjoint avec DME).

II.4.1 L'antenne

L'antenne est l'élément primordial de la station. Il en existe de nombreux types, les plus utilisés sont : l'antenne Thomson et l'antenne Wilcox.

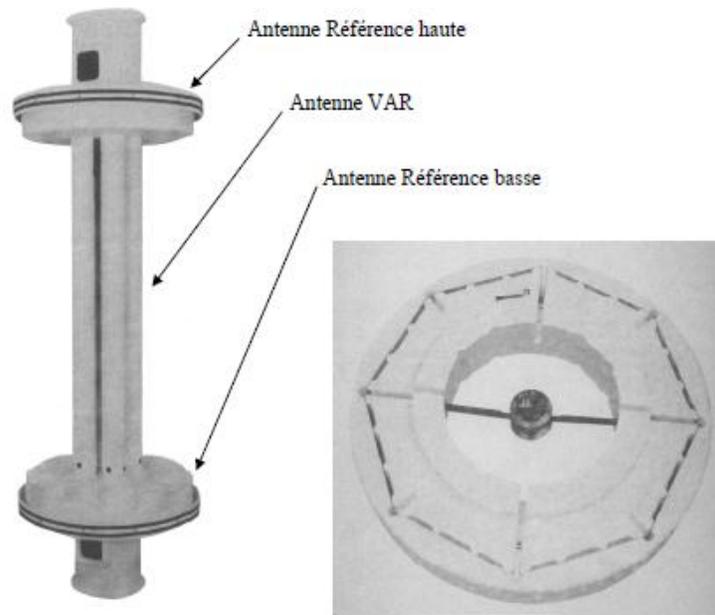


Fig.II.4 : Antenne Thomson

L'antenne de référence et l'antenne variable font l'objet de réalisations distinctes et sont mécaniquement superposées. Elles sont associées l'une à l'autre pour obtenir un centre de phase identique (Fig.II.4). Un tel ensemble présente une impédance de 50Ω et a pratiquement le même diagramme de rayonnement dans le plan horizontal qu'un dipôle.

L'antenne est située au-dessus d'un plan métallique appelé "contrepois". Le champ reçu au lointain est donc la combinaison de 3 champs émis (Fig.II.5) :

- Le champ issu du trajet direct antenne - récepteur.
- Le champ réfléchi par le contre poids, ceci pour des angles de $\Theta > \Theta_1$.
- Le champ réfléchi par le sol, qui peut posséder deux composantes :
 - le sol est éclairé par le rayonnement direct pour les angles de site $\Theta \leq \Theta_1$.
 - le sol est aussi éclairé par le rayonnement diffracté sur le contrepois.

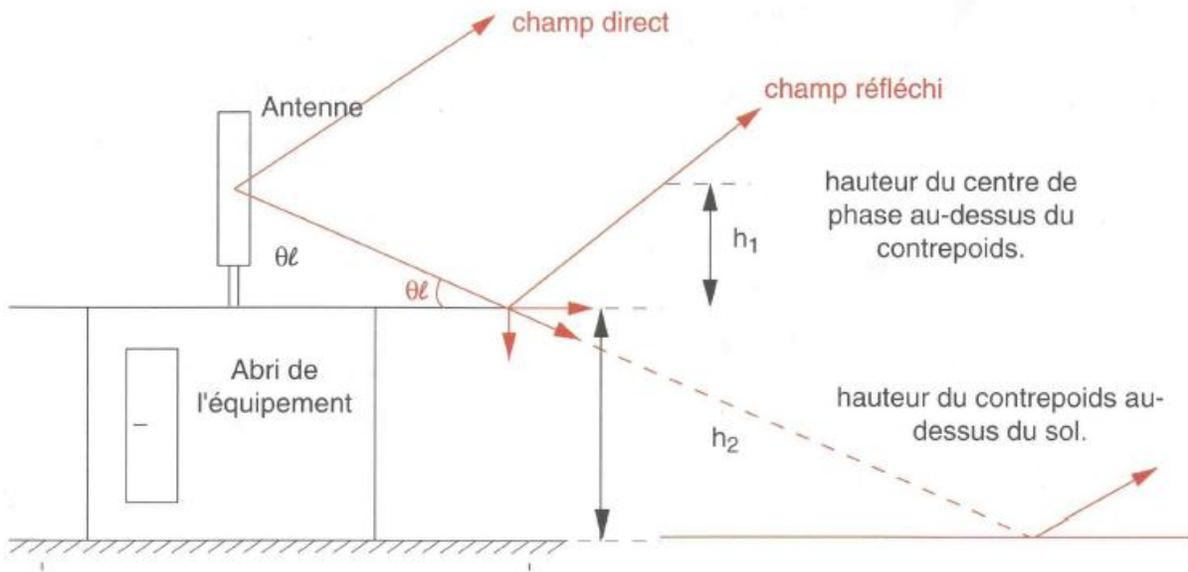


Fig.II.5: Rayonnement de VOR en site

En l'absence de contrepois et compte tenu de la hauteur de l'antenne par rapport au sol, on aurait un diagramme de rayonnement en site multilobé. Ce diagramme se traduit par des nuls de rayonnement pour certains sites, ce qui n'est pas acceptable.

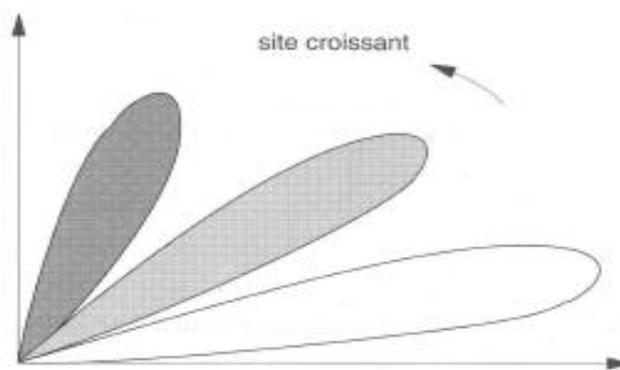


Fig.II.6 : Rayonnement de VOR sans contrepois

Si au contraire, on considère le rayonnement de l'antenne au-dessus d'un contre poids de dimensions infinies, on a un diagramme qui ne présente plus qu'un seul lobe. Cependant, on a une émission beaucoup moins importante pour les faibles angles de site.

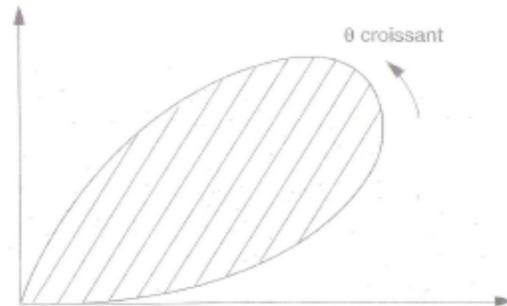


Fig.II.7 : Rayonnement de VOR avec un contre-poids infini

La réalisation pratique avec l'utilisation d'un contre-poids de dimensions finies constitue un compromis entre les deux cas précédents. On n'a plus de nuls de rayonnement et on a également une émission dans les angles de sites faibles [5].

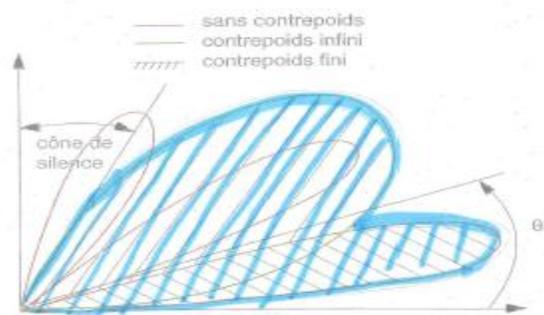


Fig.II.8 : Rayonnement de VOR avec un contre-poids fini.

II.4.2 Le détecteur du champ et le système monitoring

Selon l'annexe 10 de l'OACI, il est impératif de vérifier en permanence si le signal émis est correct au moyen d'un système de moniteurs fonctionnant de manière indépendante.

La surveillance du signal VOR est effectuée par un dispositif de contrôle disponible en option. On trouve en une (ou plusieurs) baie(s) l'ensemble de monitoring qui est généralement doublé, l'un est dit normal et l'autre de secours.

Le moniteur remplit deux fonctions : tout d'abord, la saisie des modifications de signaux interdites dans le champ hertzien en surveillant les valeurs réelles des signaux de champ hertzien. Lorsqu'un signal de navigation incorrect est saisi, le moniteur commute sur l'émetteur Standby ou met l'installation hors circuit lorsqu'aucun émetteur de Standby n'est disponible.

En second lieu, la garantie que différentes conditions ambiantes et vieillissement des composantes n'ont aucune influence sur la puissance du moniteur (Fail safe Behavior).

La procédure de surveillance est implémentée par des modules matériel et logiciel. Un monitoring automatique du signal émis est prévu afin de réaliser une surveillance permanente et d'initier une réaction exécutive de commutation sur Standby ou de mettre hors circuit de manière appropriée dès que certaines tolérances sont dépassées. A partir d'un défaut constaté s'enclenche le processus de basculement (ou arrêt) selon l'organigramme (Fig.II.9)

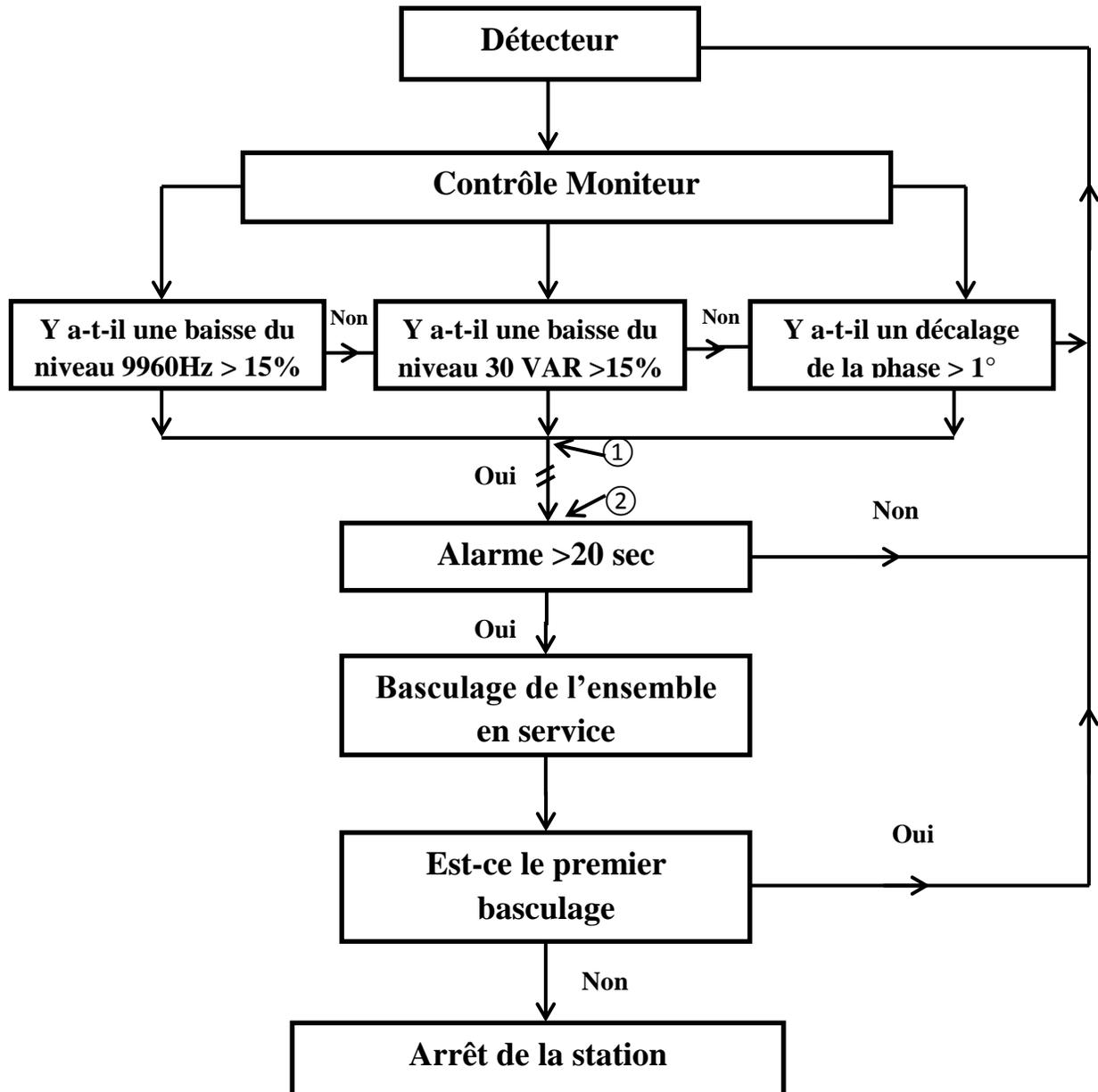


Fig.II.9 : Organigramme de contrôle.

D'après l'organigramme, les paramètres à surveiller sont les suivantes :

- Azimut
- Taux de modulation d'amplitude de 30Hz AM
- Taux de modulation d'amplitude de 9960Hz AM
- Excursion de fréquence de 30 Hz FM
- Niveau de la porteuse
- Disponibilité et exactitude du code de la tonalité d'identification Morse
- Fréquence de la porteuse.

II.4.3 Alimentation en énergie

On utilise généralement le réseau 230V AC afin d'alimenter l'installation VOR en courant. Un fonctionnement sans interruption doit être garanti en cas de panne du secteur. Celui-ci est assuré par une batterie d'alimentation de secours.

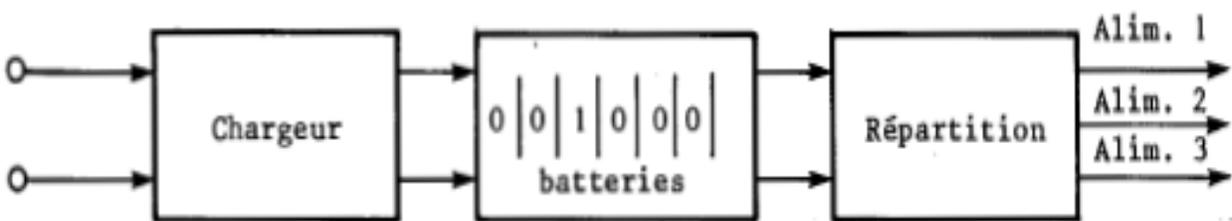


Fig.II.10 : Schéma synoptique de l'alimentation en énergie.

II.4.4 Climatisation

Pour éviter d'avoir une fiabilité d'équipement et de performances fluctuantes avec les conditions climatiques, il est important de limiter à l'intérieur de l'abri l'amplitude des variations de température et d'humidité.

Si les problèmes d'énergie et de climatisation ne constituent pas l'objet de ce cours, l'expérience montre néanmoins qu'ils occupent une place prépondérante dans les problèmes de maintenance liés à un équipement en exploitation.

II.5 LE SYSTEME CVOR

II.5.1 Principe de fonctionnement de CVOR

Le principe du VOR est de créer une émission dont la phase soit caractéristique de l'azimut par rapport à l'émetteur. Pour cela, il émet une fréquence porteuse sur laquelle deux modulations distinctes de 30Hz (Référence et Variable) sont appliquées. Pour distinguer à la réception la modulation variable de la modulation référence, l'une de ces fréquences sera transmise par l'intermédiaire d'une sous porteuse.

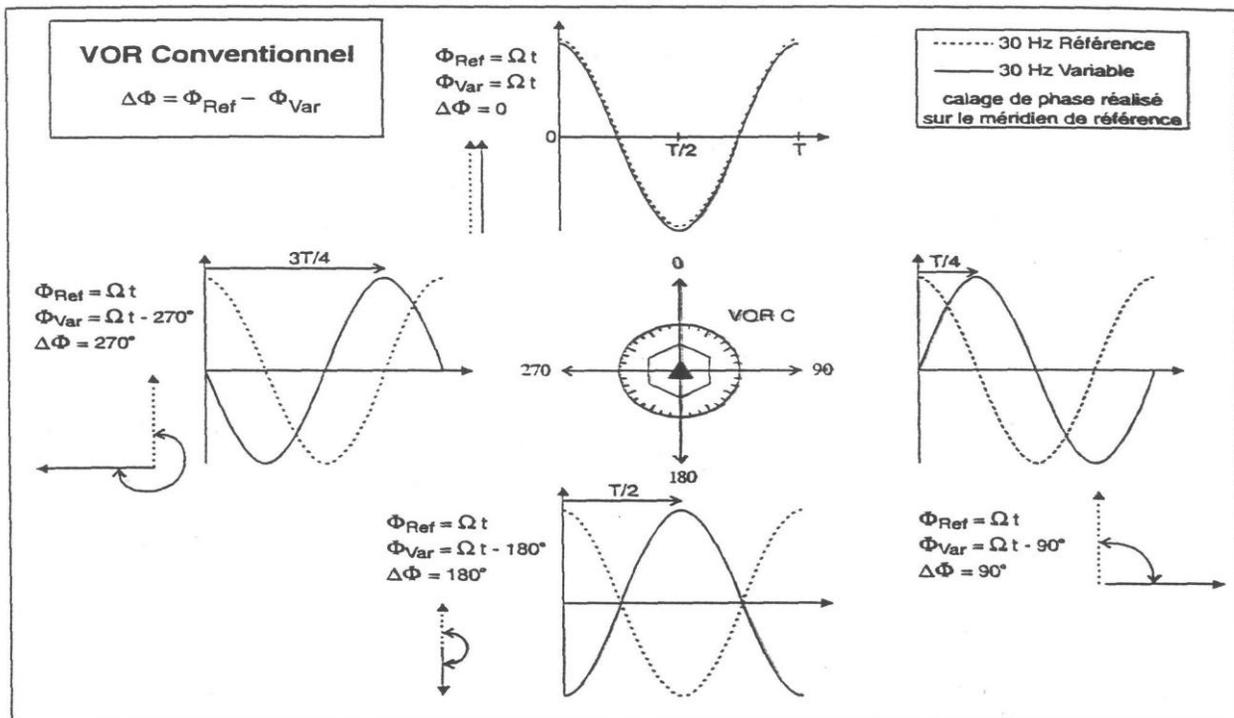


Fig.II.11: Phase des 30 Hz de CVOR

Une de ces modulations a une phase indépendante de la position en azimut du récepteur, c'est la phase de référence. L'autre modulation a une phase dépendante de la position du récepteur par rapport à la balise, c'est la phase variable.

II.5.1.1 Le signal de référence

Le signal émis par le VOR est modulé par deux ondes sinusoïdales de 30 Hz. Ces deux ondes de 30 Hz ont une position de phase donnée l'une par rapport à l'autre dépendant de la direction dans laquelle le signal est reçu. Le signal de référence module en FM une sous-porteuse de $f_0 \pm 9960 \text{ Hz}$ avec une excursion de fréquence de $\pm 480 \text{ Hz}$.

Cette sous porteuse est émise en modulation d'amplitude (AM) de la porteuse f_0 avec un taux de modulation de 30% par une antenne omnidirectionnelle polarisée horizontalement (Fig.II.13).

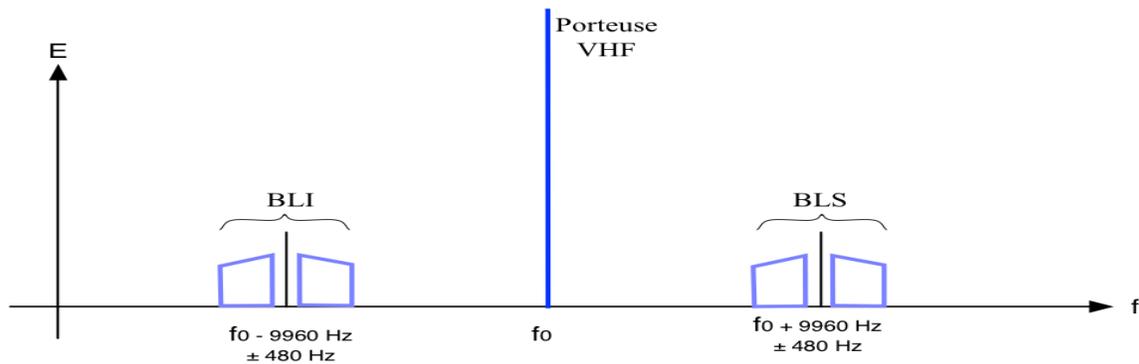


Fig.II.12 : Spectre de l'émission omnidirectionnelle

➤ Expression de la sous porteuse modulée en fréquence

La fréquence instantanée $f_0(t)$ de la sous porteuse peut s'écrire ainsi :

$$f_0(t) = f_0 + \Delta f_0 \cdot \cos(\Omega t) \tag{II.2}$$

avec f_0 la fréquence nominale de la sous porteuse (9960 Hz), ω la pulsation du signal modulant ($2\pi \cdot 30$) et Δf_0 l'excursion de fréquence autour de la fréquence f_0 où $\Delta f_0 = n \cdot f$.

$n = 16$ (valeur fixée par l'OACI) et $f = 30$ Hz $\Rightarrow \Delta f_0 = 16 \cdot 30 = 480$ Hz

D'où : $f_0(t) = 9960 + 480 \cdot \cos(\omega t)$ (II.3)

De plus, l'expression générale d'un signal modulé en fréquence est donnée comme suit :

$$e_0(t) = E_{b0} \cdot \cos[\psi_0(t)] \tag{II.4}$$

La phase instantanée $\psi_0(t)$ du signal est liée à la pulsation instantanée $\omega_0(t)$ par la relation :

$$\omega_0(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} \tag{II.5}$$

Avec : $\omega_0(t) = \omega_0 + \Delta \omega_0 \cdot \cos(\Omega t) = 2\pi \cdot f_0(t)$ (II.6)

D'où : $\psi_0(t) = \int_0^t \omega_0(u) \cdot du = \int_0^t \omega_0 \cdot \cos(\Omega u) \cdot du \rightarrow \psi_0(t) = \omega_0 \cdot t + \frac{\Delta \omega_0}{\Omega} \cdot \sin(\Omega t) + cte.$ (II.7)

On choisit l'origine des phases de sorte que la constante soit nulle et on remarque aussi que :

$$\frac{\Delta\omega_o}{\Omega} = \frac{\Delta f_o}{f} = n, \text{ d'où : } e_o(t) = E_{b0} \cdot \cos(\omega_o \cdot t + n \cdot \sin(\Omega t)) \quad (\text{II.8})$$

➤ **Expression de la porteuse VHF modulée en amplitude par la sous porteuse**

Nous rappelons que l'expression générale d'un signal modulé en amplitude est écrite comme suit :

$$e(t) = [E_p + M(t)] \cdot \cos(\omega t) \quad (\text{II.9})$$

avec $\cos(\omega t)$ la porteuse VHF qui est modulée et $M(t)$ le signal BF modulant.

Ici, $M(t) = e_o(t) = E_{b0} \cdot \cos(\omega_o \cdot t + n \cdot \sin(\omega t))$ (II.10)

$$e(t) = [E_p + E_{b0} \cdot \cos(\omega_o t + n \cdot \sin(\omega t))] \cdot \cos(\omega t). \quad (\text{II.11})$$

$$e(t) = E_p \cdot \cos(\omega t) \cdot \left[1 + \frac{E_{b0}}{E_p} \cdot \cos(\omega_o t + n \cdot \sin(\omega t)) \right] \quad (\text{II.12})$$

Où $\frac{E_{b0}}{E_p}$ est le taux de modulation $m_0=0.3$.

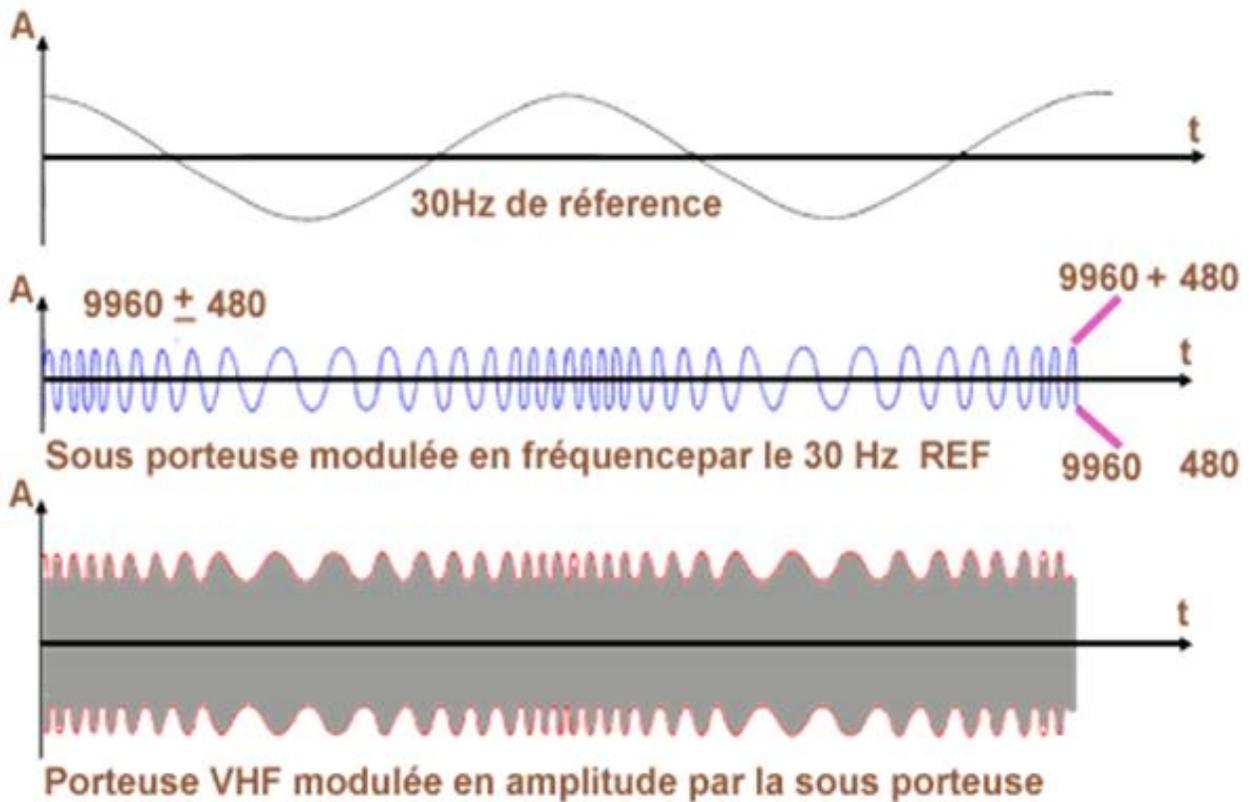


Fig.II.13 : Représentation graphique du signal 30Hz REF.

II.5.1.2 Le signal variable

Le 30 Hz variable, également appelé signal de position, module la porteuse en amplitude avec un taux de modulation de 30%. Les raies spectrales -30 à +30 de part et d'autre de la porteuse sont montrées dans la Fig.II.14.

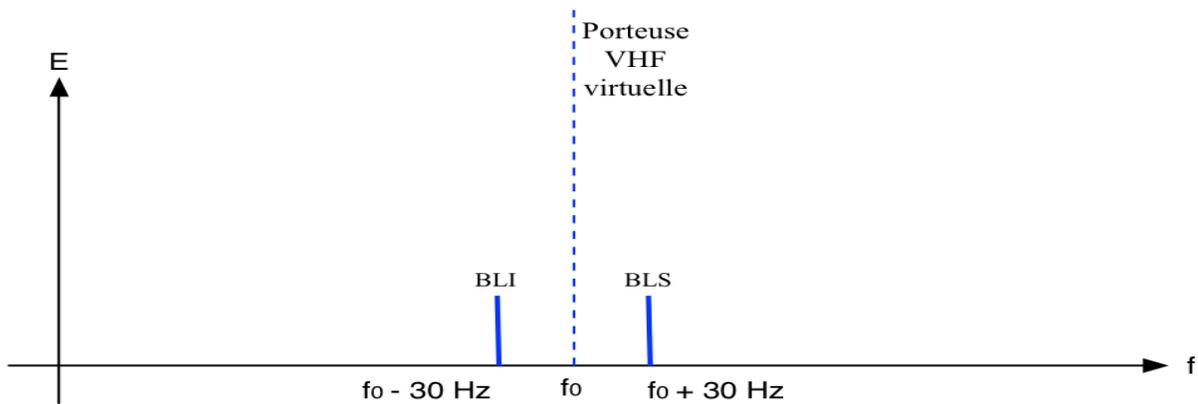


Fig.II.14 : Spectre de l'émission directionnelle

Le 30 Hz VAR se caractérise par une variation linéaire de sa phase instantanée en fonction de l'azimut : $\text{VAR} = \omega t - \alpha$

Dans un azimut α , après détection, démodulation et filtrage, on obtient :

$$e_{30\text{VAR}} = \cos(\Omega t - \alpha) \quad (\text{II.13})$$

Et comme le signal est transmis omni-directionnellement par modulation d'amplitude, le 30 VAR émis par le VOR s'écrit :

$$E = [1 + m_1 \cdot \cos(\Omega t - \alpha)] \cdot E_r \quad (\text{II.14})$$

avec : $E_r = \frac{E_p}{r} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right)$, et $m_1 = 0.3$ le taux de modulation du 30Hz VAR.

Ce champ E, de la forme $f(\alpha, t) \cdot \cos(\omega t)$, peut être considéré comme l'émission selon un diagramme omnidirectionnel d'une porteuse modulée en amplitude par un signal à 30 Hz dont la phase est en fonction de l'azimut α .

➤ Transmission du 30Hz VAR

En développant l'expression (II.14) de E, on obtient :

$$E = E_r + m_1 \cdot \cos(\Omega t - \alpha) \cdot E_r = E_r + E_{BL} \quad (\text{II.15})$$

$$E_t : E_{BL} = m_1 \cdot \cos(\Omega t - \alpha) \cdot E_r \quad (\text{II.16})$$

Cette écriture signifie concrètement que l'on peut obtenir E par rayonnement séparé des deux champs E_r et E_{BL} car ils seront additionnés dans l'espace s'ils ont été émis avec la même phase à l'origine (nécessité de réglages).

L'équation (II.16) s'écrit aussi :

$$\begin{aligned} E_{BL} &= m_1 \cdot (\cos \Omega t \cdot \cos \alpha + \sin \Omega t \cdot \sin \alpha) \cdot E_r \\ &= m_1 \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \alpha \cdot E_r + m_1 \cdot \sin \Omega t \cdot \sin \alpha \cdot E_r = E_{BL\cos} + E_{BL\sin} \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

On peut donc aussi obtenir le signal E_{BL} par rayonnement séparé et additionner dans l'espace des deux champs $E_{BL\cos}$ et $E_{BL\sin}$.

Or $E_{BL\cos} = m_1 \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \alpha \cdot E_r$ est l'expression d'un champ de bandes latérales, d'amplitude m_1 , rayonné selon un diagramme en 8 d'équation $\cos \alpha$.

$E_{BL\cos}$ s'obtient donc à partir d'un générateur de bandes latérales délivrant $m_1 \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \omega t$ et alimentant un doublet orienté est-ouest (dans le repère VOR).

De même, $E_{BL\sin} = m_1 \cdot \sin \Omega t \cdot \sin \alpha \cdot E_r$ est l'expression d'un champ de bandes latérales, d'amplitude m_1 , rayonné selon un diagramme en 8 d'équation $\sin \alpha$.

$E_{BL\sin}$ s'obtient donc à partir d'un générateur de bandes latérales délivrant $m_1 \cdot \sin \Omega t \cdot \cos \Omega t$ et alimentant un doublet orienté nord-sud (dans le repère VOR).

On remarque que $E_{BL\cos}$ et $E_{BL\sin}$ ont des enveloppes BF en quadrature.

➤ Fonctionnement d'un générateur de bandes latérales

Grâce aux formules trigonométriques, on peut écrire :

$$\cos \Omega t \cdot \cos \omega t = 0,5 [\cos(\omega + \Omega)t + \cos(\omega - \Omega)t]$$

$$\sin \Omega t \cdot \sin \omega t = 0,5 [\cos(\omega - \Omega)t - \cos(\omega + \Omega)t]$$

$\cos(\omega + \Omega)t$ est appelé fréquence latérale supérieure (FLS). C'est un signal VHF de fréquence $f + 30$ Hz.

$\cos(\omega - \Omega)t$ est appelé fréquence latérale inférieure (FLI). C'est un signal de fréquence $f - 30$ Hz.

Pour obtenir la BL_{\cos} , il suffit d'additionner FLS et FLI.

Pour obtenir la BL_{\sin} , il suffit de soustraire FLI par FLS, puis de déphaser le signal de $\pi/2$ pour transformer le $\sin \omega t$ en $\cos \omega t$ ($\sin(\omega t + \pi/2) = \cos \omega t$) [7].

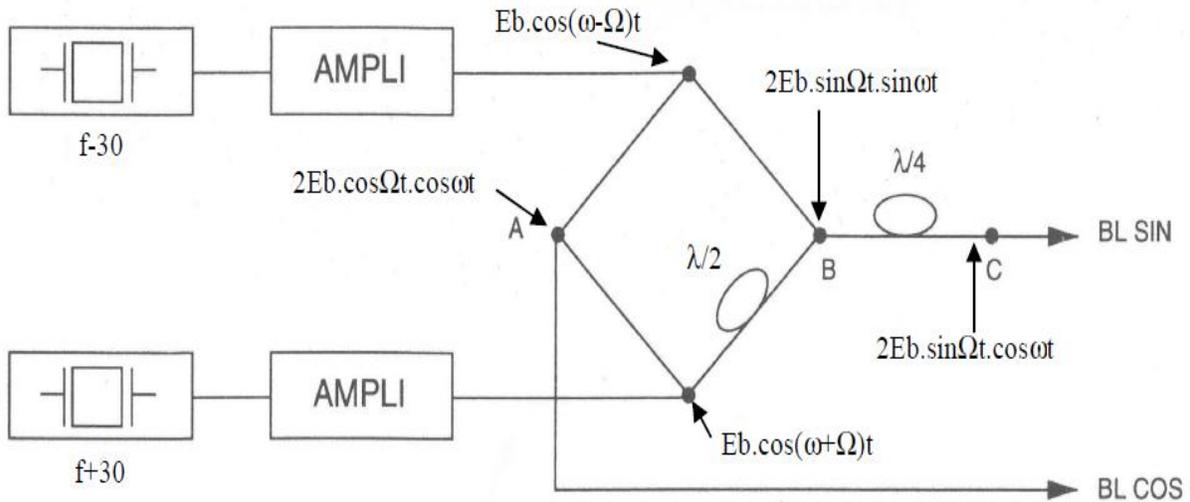


Fig.II.15: Génération des bandes latérales du signal VAR.

II.5.1.3 Transmission de l'indicatif et de la phonie

➤ Principe et expression du signal

Chaque VOR est obligatoirement caractérisé par un indicatif de 3 lettres au maximum, codé en morse et transmis en A2, c'est-à-dire en modulant en amplitude la porteuse au rythme du code par une fréquence de 1020Hz. La Fig.II.16 résume, sur un exemple (VOR de Toulouse), les principales caractéristiques d'un indicatif [5].

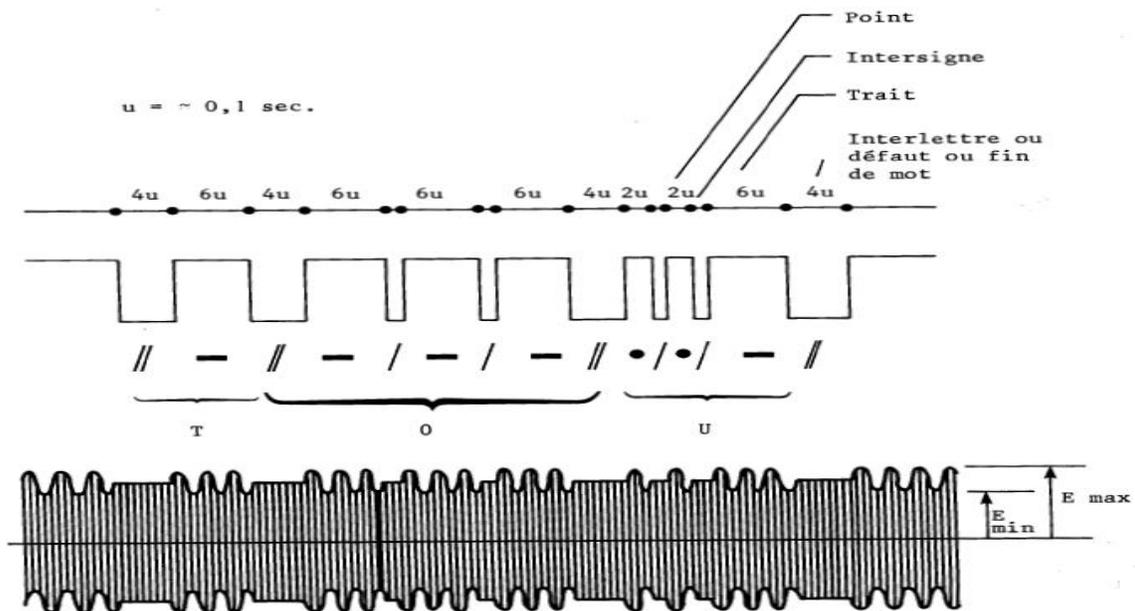


Fig.II.16: Transmission de l'indicatif et de la phonie

En outre, le VOR est utilisable aussi pour la transmission d'un certain nombre d'informations (météo, Notam, piste en service...etc) au moyen d'une bande phonie (300-3000Hz), modulant en amplitude la porteuse.

La porteuse VHF modulée en amplitude par une sous porteuse, par l'indicatif de la station, par la phonie, et par le signal variable rayonnera omni-directionnellement dans l'espace. Alors l'équation de la porteuse VHF est donnée par :

$$e_p = E_p \cdot \cos(\omega t) \cdot [1 + m_0 \cdot \cos(\omega_0 t + n \cdot \sin(\Omega t)) + m_2 \cos(\Omega t - \alpha) + m_3 \cdot \cos(\omega_{1020} t) + m_4 \cos(\omega_{300/3000} t)] \quad (II.18)$$

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

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

Le signal e_p , rayonné omni-directionnellement dans l'espace, devient à la distance :

$$e_p = \epsilon_r [1 + m_0 \cdot \cos(\omega_0 t + n \cdot \sin(\Omega t)) + m_2 \cos(\Omega t - \alpha) + m_3 \cdot \cos(\omega_{1020} t) + m_4 \cos(\omega_{300/3000} t)] \quad (II.19)$$

La séparation de ces différentes informations à bord de l'avion, après réception et démodulation, se fera par filtrage. [7]

➤ **Spectre de fréquence du signal VOR**

La Fig.II.17 montre le spectre du signal VOR avec ses différentes fréquences.

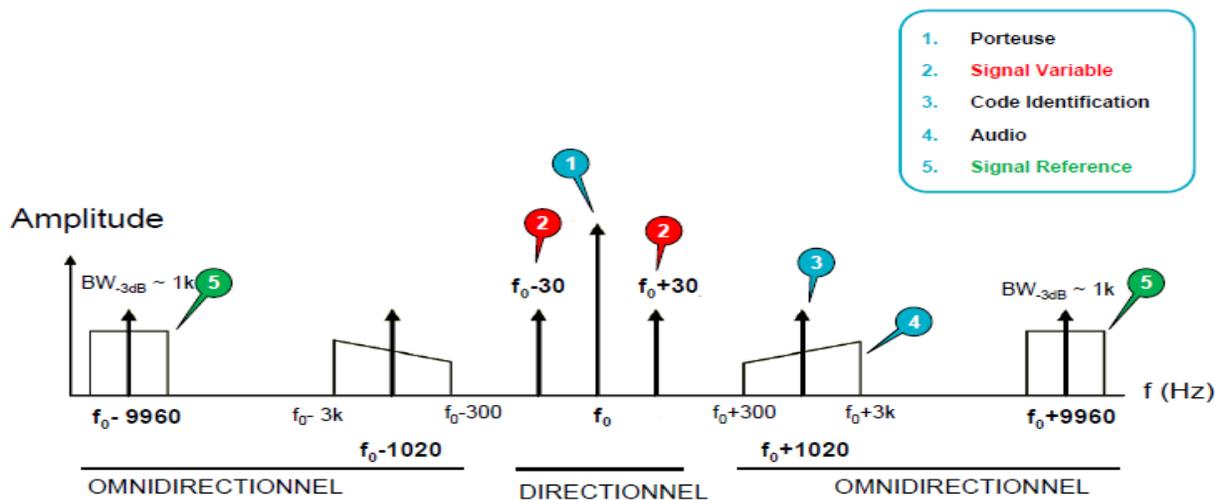


Fig.II.17 : Spectre d'émission de signal CVOR.

II.5.2 Diagramme de rayonnement de VOR

Jusqu'ici, les deux diagrammes en 8 ont été supposés orientés nord-sud et est-ouest. Pour des raisons qui n'apparaissent pas évidentes (assurer un contrôle sensiblement identique des deux rayonnements BL aux alentours de la direction du nord magnétique), l'orientation précédente ne correspond pas à l'orientation effective. Celle-ci est obtenue par rotation de $\pi/4$ dans le sens des azimuts décroissants de la figure utilisée jusqu'ici (Fig.II.18) [6].

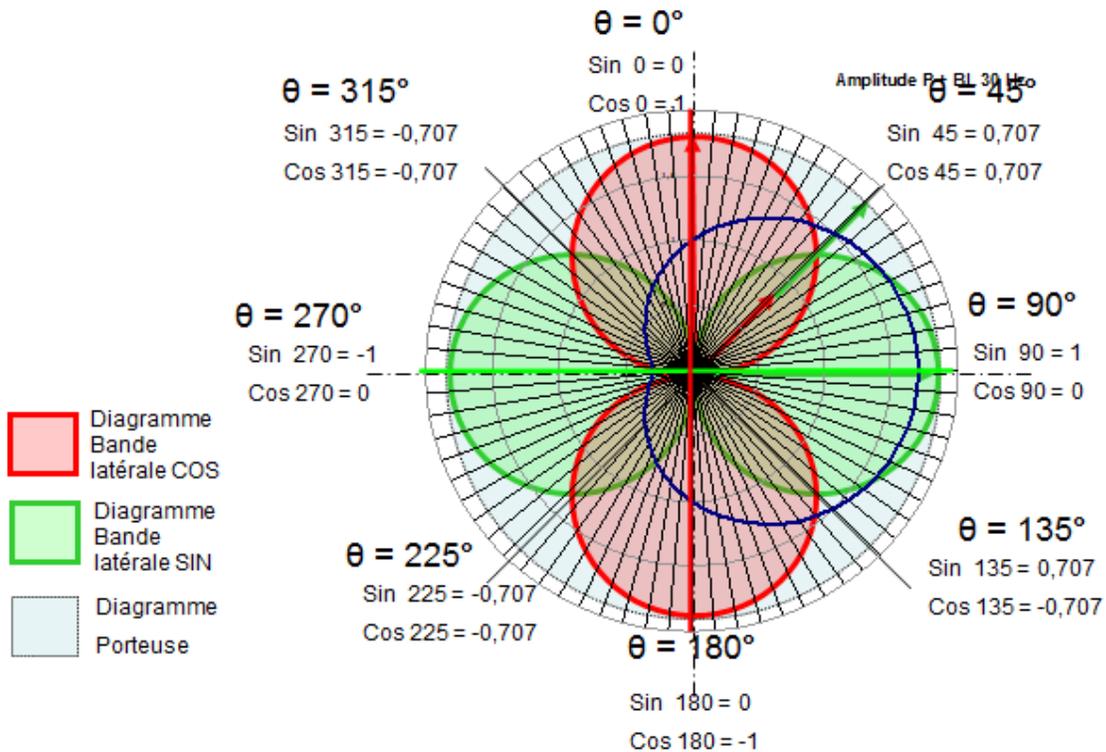


Fig.II.18: Diagramme de rayonnement du signal CVOR

Le diagramme 315/135 a pour équation : $\cos(\alpha + \pi/4)$;

Et le diagramme 45/225 : $\cos(\alpha - \pi/4) = \sin(\alpha + \pi/4)$ (Interprétation vectorielle voir annexe).

Les champs de bandes latérales émis deviennent :

$$E_{BL\ 315/135} = E_{BL1} = m \cdot \cos(\alpha + \pi/4) \cdot \cos \Omega t \cdot \epsilon_r \tag{II.20}$$

$$E_{BL\ 45/225} = E_{BL2} = m \cdot \sin(\alpha + \pi/4) \cdot \sin \Omega t \cdot \epsilon_r \tag{II.21}$$

ϵ_r par la suite :

$$E_{BL} = E_{BL1} + E_{BL2} = m (\cos \Omega t - (\alpha + \pi/4)) \cdot \epsilon_r \tag{II.22}$$

Repasser de cette équation à l'équation origine $m \cdot \cos(\Omega t - \alpha)$, ϵ_r peut se faire par déphasage de $\pi/4$ des deux enveloppes BF des deux signaux BL.

Si en effet à la sortie du générateur de BL, on a les deux signaux :

$$E_{BL1} = m \cdot \cos(\Omega t + \pi/4) \cdot \cos \omega t \quad (\text{II.23})$$

$$E_{BL2} = m \cdot \sin(\Omega t + \pi/4) \cdot \cos \omega t \quad (\text{II.24})$$

$$\text{Alors : } E_{BL1} = m \cdot \cos(\alpha + \pi/4) \cdot \cos(\Omega t + \pi/4) \cdot \epsilon_r \quad (\text{II.25})$$

$$E_{BL2} = m \cdot \sin(\alpha + \pi/4) \cdot \sin(\Omega t + \pi/4) \cdot \epsilon_r \quad (\text{II.26})$$

$$\text{Et : } E_{BL1} + E_{BL2} = m \cdot \cos[(\Omega t + \pi/4) - (\alpha + \pi/4)] \cdot \epsilon_r \quad (\text{II.27})$$

II.6 LE SYSTEME DVOR

II.6.1 Rappel de l'effet Doppler

L'effet Doppler est le décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. Cet effet fut découvert par le physicien allemand Christian Doppler en 1842 et fut également proposé par Hippolyte Fizeau pour les ondes électromagnétiques en 1848.

Pour comprendre ce phénomène, il s'agit de penser à une onde donnée qui est émise vers un observateur en mouvement ou vice-versa. La longueur d'onde du signal est constante mais si l'observateur se rapproche de la source, il se déplace vers les fronts d'ondes successifs et perçoit donc plus d'ondes par seconde que s'il était resté stationnaire, donc une augmentation de la fréquence. De la même manière, s'il s'éloigne de la source, les fronts d'onde l'atteindront avec un retard qui dépend de sa vitesse d'éloignement, donc une diminution de la fréquence. En termes mathématiques, la variation de fréquence peut être exprimée par :

$$F_d = 2 \cdot V_r / \lambda \quad (\text{II.28})$$

La vitesse V_r est la composante radiale de la vitesse réelle de l'observateur car la variation de fréquence est due au déplacement relatif entre la source et l'observateur.

II.6.2 Définition du DVOR

Le VOR Doppler DVOR est né de la recherche visant à réduire de façon significative les erreurs de réflexion qui perturbent le signal d'un VOR conventionnel. L'idée de départ de DVOR repose sur le constant qu'en CVOR. L'information d'azimut est transportée en modulation d'amplitude, tandis que le signal de référence est transmis en modulation de fréquence. Or, il s'avère que, par effet de capture, la modulation de fréquence est plus résistante aux interférences que la modulation d'amplitude.

Si l'on parvient à inverser les rôles, c'est-à-dire transmettre le signal variable porteur de l'information azimut en modulation de fréquence et le signal de référence en modulation d'amplitude, l'avantage qui en résulte est une amélioration de la précision du système VOR. De plus, on conserve un format de signal identique à celui rayonné par le CVOR, assurant de ce fait une compatibilité totale du DVOR vis-à-vis d'un récepteur VOR.

La solution trouvée, qui donne le nom à ce type de VOR, réside dans l'utilisation de l'effet Doppler (modification de la fréquence d'une source lorsque celle-ci et/ou le récepteur est en mouvement). Nous verrons que le mouvement uniforme d'une source VHF sur un cercle permet d'obtenir une modulation de fréquence selon une loi sinusoïdale dont la phase à l'origine varie comme l'azimut. Le revers de la médaille est que l'on obtient cette réduction d'erreurs de multi-trajets au prix d'une plus grande complexité de l'équipement et d'un plus grand encombrement du réseau d'aériens au sol.



Fig.II.19:Présentation d'une station DVOR

Le système DVOR peut être adjoint avec un DME (Distance Measuring Equipment) de manière à former une station DVOR/DME. L'avion peut déterminer sa position en se référant à l'emplacement de cette station.

Par l'intermédiaire du récepteur VOR installé dans l'avion, le DVOR ou le VOR fournit au pilote les informations suivantes :

1. L'indication d'azimut de la position de l'avion par rapport à la station au sol, c'est-à-dire l'angle entre le nord magnétique et la direction station au sol vers l'avion.
2. L'indication d'écart angulaire qui indique si l'avion vole à gauche ou à droite de la route présélectionnée (ligne de position) ou s'il la suit exactement.
3. L'indication de direction « TO/FROM » qui indique si l'avion se dirige vers la balise (D) VOR ou s'il s'en éloigne.

II.6.3 Principe de fonctionnement du DVOR

L'antenne du DVOR est montée sur un plan métallique réflecteur plus imposant que sur un CVOR. Ce "contrepois" sert également de toit d'abri de l'équipement.

Le DVOR est la deuxième génération de VOR. Il offre une qualité de signal et de précision supérieure à celles du CVOR. Le signal de référence 30Hz est transmis omni directionnellement par modulation d'amplitude de l'onde VHF et l'information d'azimut, c'est à dire le signal variable, est transmise par modulation de fréquence à 30 Hz des deux bandes latérales (9960 Hz) de l'onde porteuse. Ceci signifie que c'est l'inverse du CVOR où le signal omnidirectionnel est modulé en fréquence et le signal directionnel est modulé en amplitude. Le signal modulé en fréquence est moins sujet aux interférences que le signal modulé en amplitude et donc les signaux reçus sont plus précis et plus fiables.

Le DVOR est composé des éléments suivants :

- une antenne centrale omnidirectionnelle qui émet la porteuse modulée en amplitude à 30Hz.
- un nombre élevé d'antennes périphériques (48 pour le DVOR Thales) disposées sur un cercle de 13,4m de diamètre (Fig.II.19).

Le rayonnement provenant de cet anneau d'antennes est constitué de deux bandes de modulation d'amplitude et diamétralement opposées, qui émettent l'une en bande latérale supérieure à +9960Hz, l'autre sur la bande latérale inférieure à -9960Hz.

Celles-ci sont commutées d'antenne à antennes autour de l'anneau de manière à simuler une rotation de 30tr/sec autour de l'antenne centrale, ce qui engendre une modulation de fréquence.

Le signal modulé en fréquence est directionnel, donc variable et sa vitesse radiale est 1264 m /sec. Ce qui provoque une augmentation apparente de fréquence au fur et à mesure que le signal est tourné vers le récepteur et une diminution apparente de fréquence lorsque le signal "s'éloigne" du récepteur.

➤ **Analyse du signal à générer**

Rappelons maintenant l'expression du signal à générer (signaux de navigation uniquement):

$$e(t) = E_p.[1 + m_1.\cos[\omega t + n \sin(\Omega t + \alpha)] + m_4.\cos(\Omega t)].\cos \omega t \quad (II.29)$$

Le point de départ du problème est identique à celui rencontré en CVOR. On ne sait pas générer directement un tel signal. L'approche se fera de la même manière en décomposant ce signal en plusieurs :

- **Signal de REF** : C'est un signal très facile à réaliser. C'est une modulation d'amplitude avec un signal modulant fixe de 30 Hz, émis par une antenne omnidirectionnelle et donné comme suit :

$$E_{ref}(t) = E_p.\cos \omega t.[1 + m_4.\cos(\Omega t)] \quad (II.30)$$

- **Signal VAR** : Ce signal est une modulation trop complexe pour pouvoir être générée directement. Pour cela, on décompose cette bande latérale en deux composantes, une bande latérale supérieure et l'autre inférieure. Il s'exprime comme suit :

$$E_{var}(t) = E_b.\cos \omega t.\cos[\omega t + n \sin(\Omega t + \alpha)] \quad (II.31)$$

Avec: $E_b = m_1.E_p$

$$E_{BL} = 1/2 E_b.\cos[(\omega + \Omega)t + n.\sin(\Omega t + \alpha)] + 1/2 E_b.\cos [(\omega - \Omega)t - n.\sin(\Omega t + \alpha)] \quad (II.32)$$

Ces expressions correspondent à des signaux porteuses VHF (f+9960 et f-9960 Hz) modulés en fréquence par effet Doppler. Cet effet Doppler est obtenu par déplacement des sources d'émission. Il apporte ainsi l'information spatiale recherchée :

- Pour générer la bande latérale supérieure:

$$E_{BLS}(t) = E_b.\cos[(\omega + \Omega)t + n.\sin(\Omega t + \alpha)] \quad (II.33)$$

- Fréquence de la source : $f_s = f + f_0$ avec f fréquence de la station et $f_0 = 9960$ Hz.
- Vitesse de rotation : $\Omega = 2\pi \cdot 30$ rad/s.
- Calage de phase à l'origine du signal modulant : l'identité $n \cdot \sin(\Omega t + \alpha) = n \cdot \cos(\theta + \alpha)$
 $\Leftrightarrow n \cdot \cos(\Omega t + \alpha - \pi / 2) = n \cdot \cos(\theta + \alpha)$ n'est pas vérifiée pour $\theta = \Omega t$ contrairement aux hypothèses précédentes mais pour $\theta = \Omega t - \pi / 2$. Ce qui signifie qu'à l'instant $t=0$, la source doit positionner dans $\alpha = +90^\circ$. C'est cette opération de calage initial des 30 Hz que les signaux seront reçus en phase par l'avion.
- Phase radioélectrique à l'origine : φ_0 . Cette valeur représente le déphasage sur le trajet de référence. Elle est commune aux trois sources (FLI, FLS et FO). Si elles émettent en phase, alors elles se sommeront en phase dans l'espace. L'écriture peut alors avantageusement se simplifier en prenant φ_0 comme nouvelle origine de phase.
- L'indice de modulation : $n = 2\pi a / \lambda$. Le rayon est le seul paramètre de réglage $a = n\lambda / 2\pi$. Pour des raisons de simplification de la réalisation mécanique, le rayon ne sera pas adapté à la longueur d'onde en vigueur mais calculé d'après une longueur d'onde moyenne.

La bande de fréquence VOR va de 108 à 118 MHz. La fréquence moyenne est de 113 MHz, la longueur d'onde correspondante est : $\lambda = 2,65$ mètres, ce qui nous donne pour un indice $n=16$.

- Pour générer la bande latérale inférieure :

$$E_{BLI}(t) = E_b \cdot \cos[(\omega - \omega_c)t - n \cdot \sin(\Omega t + \alpha)] \quad (\text{II.34})$$

- Fréquence de la source : $f_s = f - f_0$ avec f fréquence de la station et $f_0 = 9960$ Hz.
- Calage de phase à l'origine : $-n \cdot \sin(\Omega t + \alpha) = n \cdot \cos(\theta + \alpha) \Leftrightarrow -n \cdot \cos(\Omega t + \alpha - \pi / 2) = n \cdot \cos(\theta + \alpha) \Leftrightarrow n \cdot \cos(\Omega t + \alpha - \pi / 2 + \pi) = n \cdot \cos(\theta + \alpha)$
 Soit $\theta = \Omega t + \pi / 2$, obtenu en positionnant la source à l'instant $t=0$ dans $\alpha = +270^\circ$. Ce qui veut dire que cette source est diamétralement opposée à la source qui génère la bande latérale supérieure. Les deux sources tournent à la même vitesse.
- Les autres paramètres (n et $\Omega \varphi$) sont identiques à l'autre source.

➤ Spectre de fréquence du signal DVOR

Le changement entre le signal de référence et le signal variable par rapport au CVOR est entouré en rouge (Fig.II.20).

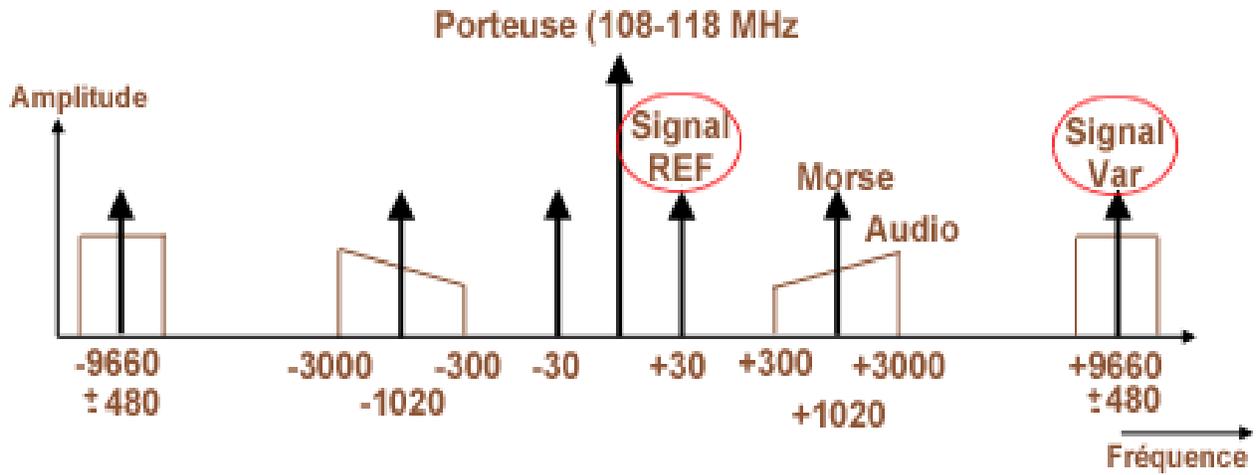


Fig.II.20 : Spectre du signal DVOR émis par la balise

II.6.4 Diagramme de rayonnement d'un DVOR

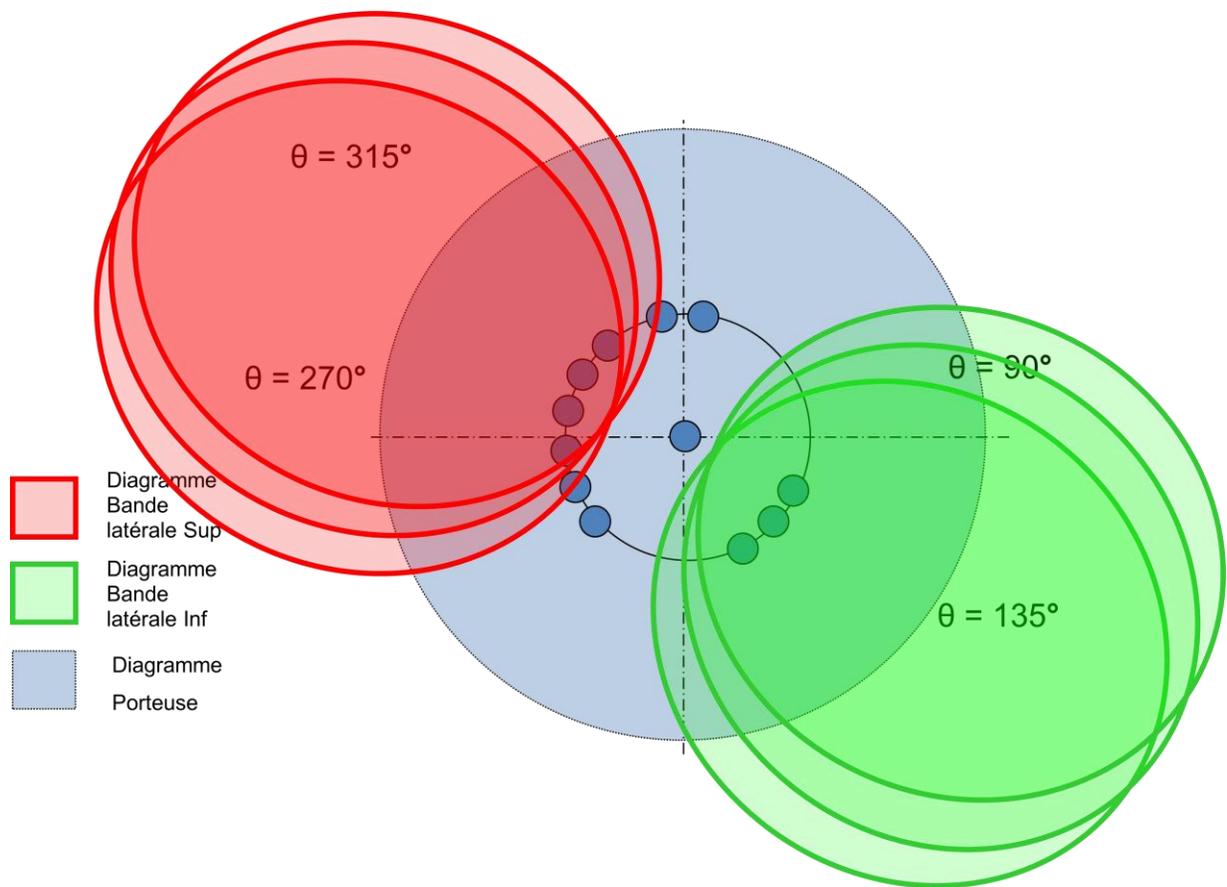


Fig.II.21 : Diagramme de rayonnement du Signal DVOR

➤ **Interprétation du diagramme de rayonnement du signal DVOR**

Le DVOR est constitué de 48 antennes. Chaque antenne transmet pour une durée égale à 2 périodes de commutation, ce qui permet de créer une antenne virtuelle. La commutation des antennes intervient lorsque le signal RF est à son minimum. Deux antennes émettent simultanément les signaux, par conséquent on obtient une rotation continue.

II.7 Comparaison entre le CVOR et le DVOR

D’après l’étude théorique apportée sur le système CVOR et DVOR, on a pu résumer les principales différences et caractéristiques entre ces deux systèmes (voir le tableau II.1).

Tableau II.1 : Comparaison entre CVOR et DVOR.

Erreurs	CVOR	DVOR
Signal référence	<p>30Hz FM Sous porteuse à 9960Hz Diagramme omnidirectionnel</p>	<p>30HZ AM Porteuse RF Diagramme omnidirectionnel</p>
Signal variable	<p>30Hz AM Diagramme Sinus + Cosinus</p>	<p>30Hz FM Sous porteuse à 9960Hz Antennes Bandes Latérales</p>
caractéristiques	<p>Antennes de tailles réduites Système sensible aux multi-trajets Précision $\approx 2^0$</p>	<p>Systèmes d’antennes de grande envergure Meilleures performances de protection face aux multi-trajets Précision $\approx 0.5^0$</p>

Par ailleurs, la Fig.II.22 donne une comparaison spectrale des deux signaux CVOR et DVOR.

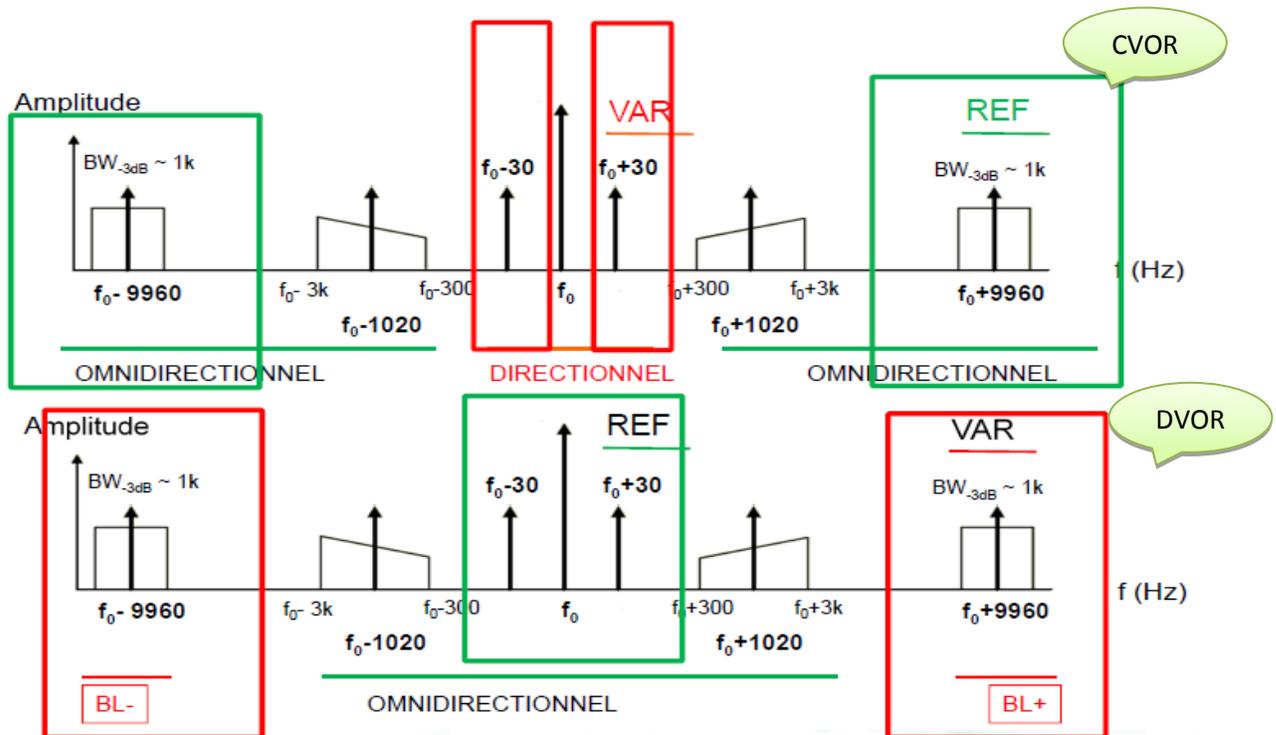


Fig.II.22 : Comparaison spectrale des deux signaux CVOR et DVOR.

II.8 INSTRUMENT DE BORD – RECEPTEUR

II.8.1 Présentation de l'équipement

L'indicateur VOR est composé de:

- Sélecteur de route **OBS** (**O**mnibearing **S**elector). En tournant ce bouton vers la droite ou vers la gauche, le pilote sélectionne l'azimut radial sur lequel l'aéronef se trouve. Simultanément une couronne de l'indicateur (rosace) graduée de 0 à 360° tourne pour afficher la valeur du radial.
- Indicateur d'écart de route **CDI** (**C**oarse **D**eviation **I**ndicator). Cette barre, se déplaçant vers la gauche ou vers la droite, indique au pilote quelle direction il faut suivre pour rejoindre le radial choisi par l'OBS.
- TO/FROM. Ce triangle indique si l'aéronef se rapproche de la station sol ou s'il s'en éloigne.
- Drapeau FLAG, Indicateur de Marche/Arrêt. Il indique également si le signal reçu est fiable ou si l'instrument est en panne.

La série de points au milieu de l'écran représente la déviation de l'aéronef par rapport au radial sélectionné par l'OBS. Chaque point représente généralement une déviation de 2° soit une déviation de 10° de part et d'autre de l'axe sélectionné.

L'indicateur VOR peut être avec une barre CDI à déviation verticale (ci-dessous à gauche) ou à déviation oblique (ci-dessous à droite). Actuellement les indicateurs à déviation oblique ne sont plus fabriqués.



Fig.II.23 : Indicateur VOR

II.8.3 Le but du récepteur à bord d'un aéronef

Il permet de mesurer l'angle de déphasage entre le signal de référence et le signal variable. A noter qu'il interprète aussi bien les signaux venant d'un CVOR que d'un DVOR et qu'il fonctionne parfaitement avec les deux. De nombreux types d'instruments pour l'affichage du VOR sur le tableau de bord existent. Cependant, tous sont semblables dans l'exploitation et l'interprétation.

Le récepteur doit remplir cinq fonctions :

- Capturer les signaux VHF
- Amplifier convenablement tous les signaux sur lequel il est accordé
- Détecter les modulations
- Séparer par ces signaux le signal de référence et le signal variable.
- Comparer les phases respectives de ces signaux afin de fournir des indications facilement exploitables.

- Le signal reçu par l'avion s'écrit :

$$E(t) = E_p [1 + m_{ref} \cdot \cos(\omega_{sp} t + n \cdot \sin \Omega t) + m_{idt} \cdot \cos(\omega_{idt} t) + m_{var} \cdot \cos(\Omega t - \dots)] \quad (II.35)$$

II.8.4 Principe du récepteur

Après réception des ondes par l'antenne, le signal de la balise accordée au récepteur est syntonisé, amplifié et filtré. Le détecteur de modulation d'amplitude (AM) effectue la démodulation de la porteuse pour récupérer les signaux la modulant : l'un des deux signaux de 30Hz, la sous porteuse de 9960Hz, le signal d'identification 1020Hz et le signal de la phonie 300/3000Hz. Le détecteur de modulation de fréquence (FM) récupère le 30Hz modulant la sous porteuse. Le comparateur calcule ensuite le déphasage entre les deux signaux de 30Hz et le transmet à la chaîne automatique et à la chaîne manuelle.

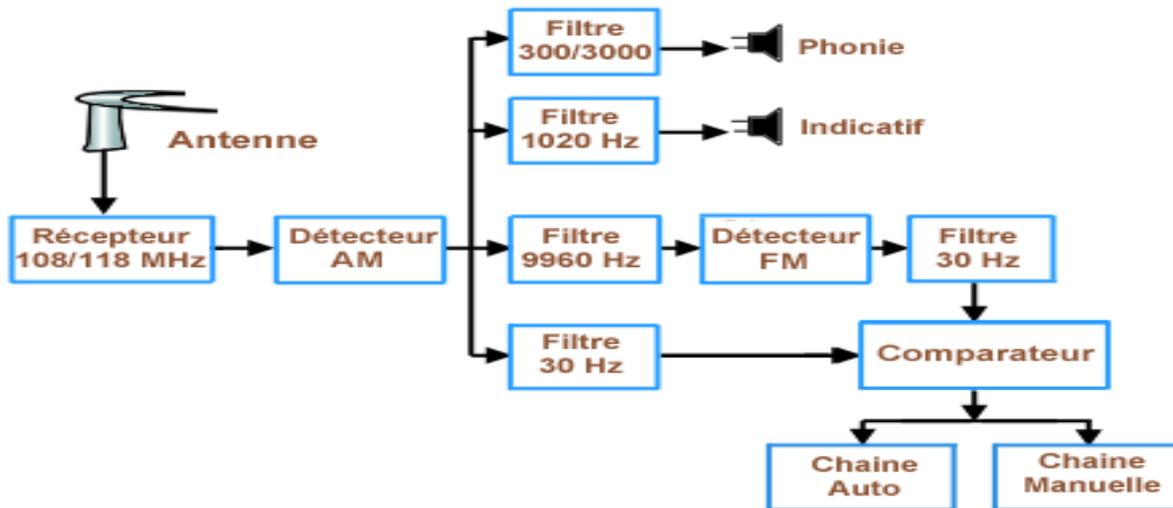


Fig.II.24 : Synoptique du principe d'un récepteur VOR

II.8.5 Constitution du récepteur

- **Une antenne** : l'antenne utilisée est horizontale et a la forme d'un doublet replié. Elle est utilisée pour la fonction VOR, elle est en général située sur la dérive.

- **Un récepteur VHF**: c'est un récepteur permettant de recevoir la gamme 108-136 Mhz.

Le récepteur est d'un type classique et adjoint de chaîne d'instrumentation :

- Chaîne manuelle VOR et circuit auxiliaire TO/FROM
- Chaîne automatique VOR
- Circuit ILS

La chaîne manuelle du VOR permet de suivre une route pré-sélectionnée grâce à un indicateur d'écart gauche-droite, le pilotage s'effectuant en rattrapage d'aiguille pour annuler l'écart sur l'indicateur.

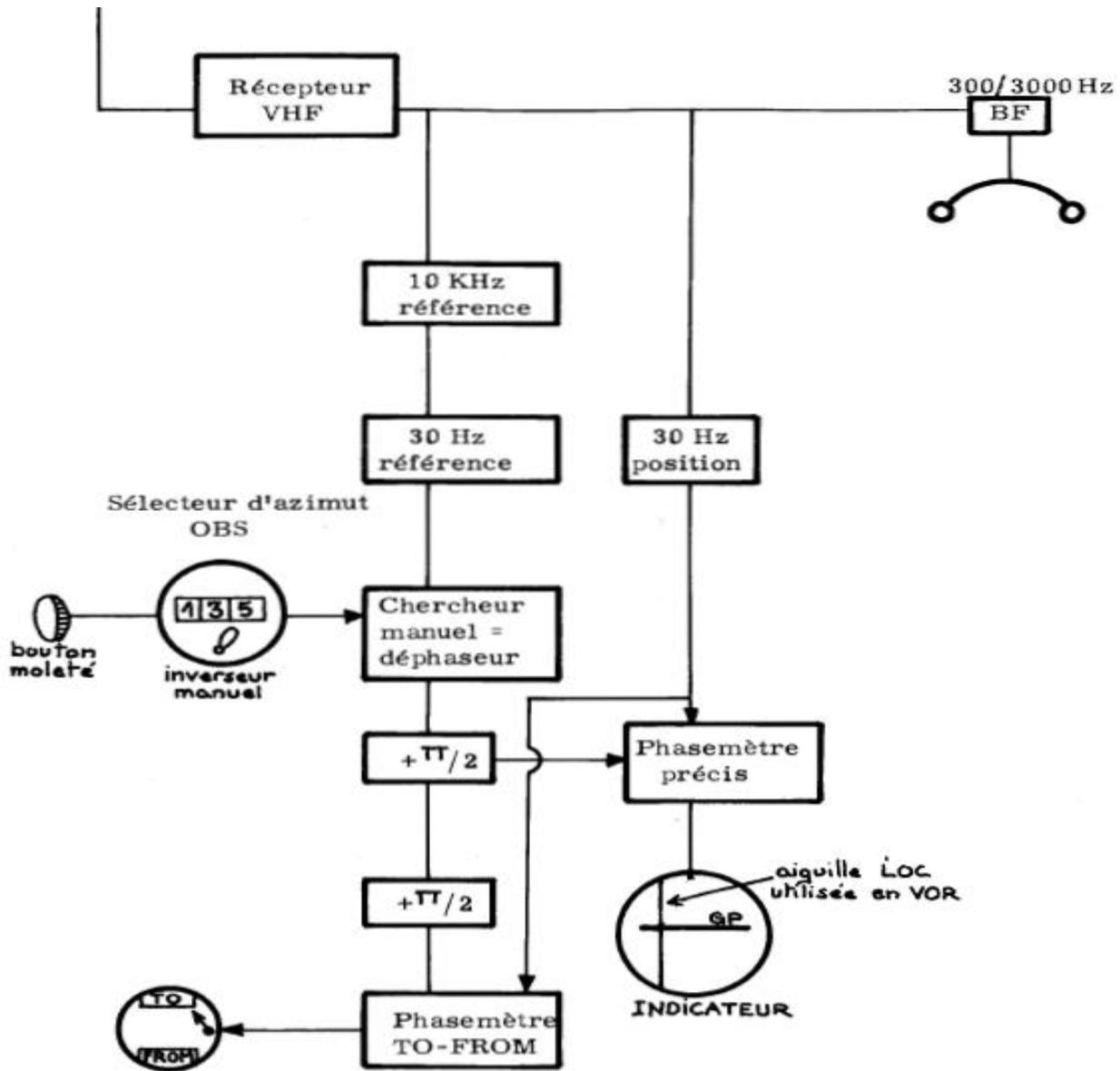


Fig.II.25 : Fonctionnement du VOR en chaîne manuelle

Rappelons que la mesure de QDR correspond à une mesure de déphasage entre un signal de référence et un signal de position. En fait, le phasemètre pour être d'une grande précision cherchera à mesurer une quadrature (tension de sortie, pour la commande de la barre de tendance, nulle). A la sortie du récepteur VHF, les signaux de référence et de position doivent être séparés, ceci est réalisé par :

-un filtre 10 KHz – amplification 10 KHz – écrêtage- discrimination 30 Hz – amplification 30 Hz → signal de référence.

-un filtre 30 Hz – amplification 30 Hz → signal de position.

La mesure de déphasage entre signal de référence et signal de position est alors conduite de la façon suivante : Un chercheur manuel (déphaseur) déphase le signal de référence de la quantité affichée à l'OBS (route sélectionnée).

Le signal de référence, déphasé à nouveau de $+\frac{\pi}{2}$, est comparé dans le phasemètre de la chaîne manuelle au signal de position. Ce phasemètre élabore un signal d'écart qui apparaît sur la barre verticale de l'indicateur ILS (indicateur d'écart). Lorsque le phasemètre mesure une quadrature, l'aiguille de l'indicateur est centrée. Toutefois cette mesure précise de phase n'est pas suffisante car il y a eu mesure de quadrature qui peut être avant ou arrière ($\pm\frac{\pi}{2}$) ce qui veut dire que l'aiguille de l'indicateur peut être centrée pour deux valeurs différentes de 180° , il faut donc lever le doute. Ce dernier est réalisé par le circuit auxiliaire TO/FROM. Il est levé par l'intermédiaire d'un phasemètre qui n'a pas besoin de précision. Pour cela, le signal de référence est à nouveau déphasé de $+\frac{\pi}{2}$.

Le phasemètre grossier mesure donc la différence de phase entre :

- Signal de position
- Signal de référence déphasé de la quantité affichée à l'OBS $+180^\circ$

L'instrumentation de bord en chaîne manuelle est la cause d'une erreur moyenne de $\pm 0.5^\circ$. Cette erreur s'ajoutera aux erreurs propres à la station VOR qui seront présentés en chapitre III.

La chaîne automatique du VOR a pour but de présenter au pilote une information permanente de QDM (en fait QDR $\pm 180^\circ$). Le fonctionnement de cette chaîne est indépendant de celui de la chaîne manuelle, bien que branchée en parallèle. Le principe utilisé est le même, mais cette fois le déphasage du signal de référence doit être automatique et continu. Il est réalisé par un chercheur automatique commandé par un moteur d'asservissement. Ce moteur est commandé par le signal d'erreur sortant de phasemètre automatique. Le moteur pouvant tourner dans un sens ou dans un autre (ce qui réalise le lever de doute comme dans le radiocompas automatique). Le branchement est tel que l'indication fournie est le QDM affiché sur l'OBI. Il faut bien remarquer que l'information présentée à l'OBI ne dépend absolument pas de la direction de vol de l'avion (cap).

Sur les installations modernes, l'OBI disparaît et est remplacé par un RMI. Le RMI reçoit outre les informations VOR, des informations de cap en provenance d'une centrale de cap. Un synchro différentiel élabore le QDM- CAP = gisement

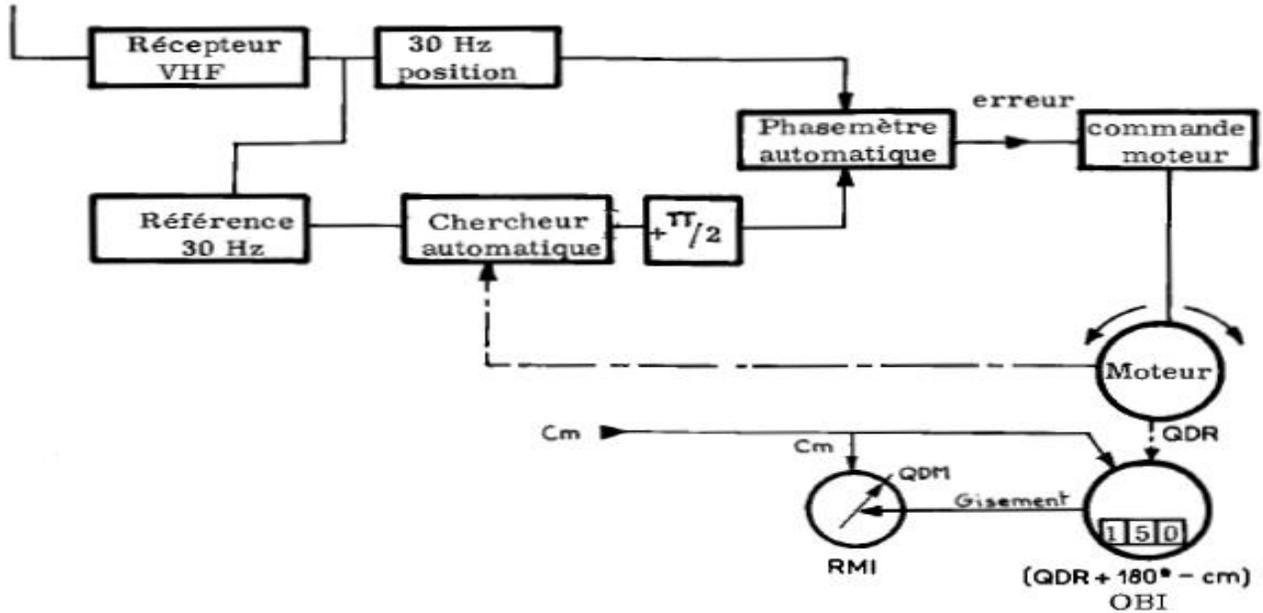


Fig.II.26 : Fonctionnement du VOR en chaîne automatique

Le signal de gisement est envoyé sur le RMI et commande une aiguille mobile. Le RMI est lui-même un compas magnétique où la rose est mobile donnant une lecture de cap. La lecture de QDM se fait sur le RMI.

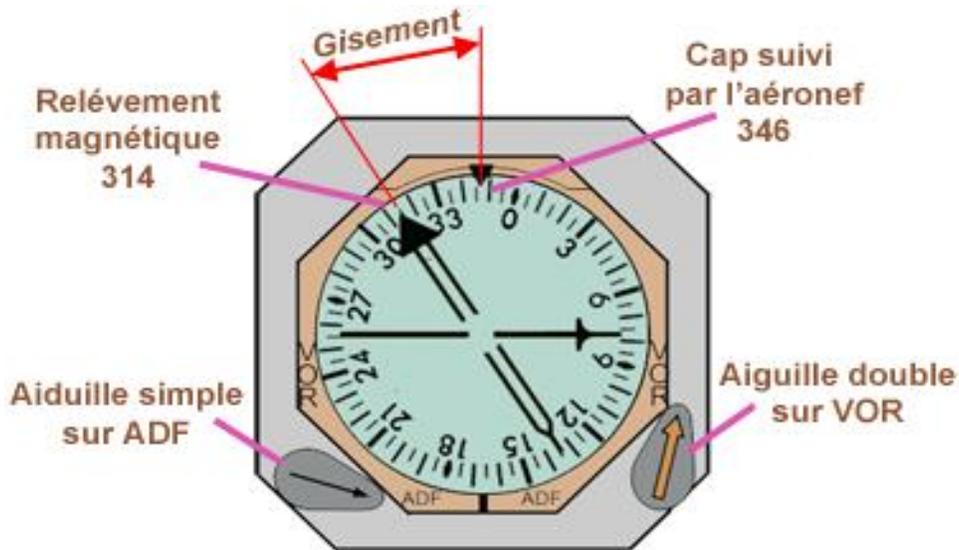


Fig.II.27 : Figuration du RMI

L'instrumentation de bord en chaîne automatique est la cause d'une erreur moyenne de $\pm 1.5^\circ$.

II.9 NORMES ET RECOMMANDATIONS

On rappelle que les normes et recommandations fixent les différentes valeurs nominales et tolérances sur différents paramètres du signal VOR. L'utilité en apparaîtra d'avantage au chapitre III (Erreurs du système VOR)

Le tableau ci-dessous résume les principales normes et recommandations qui sont été reproduites dans l'annexe 10-OACI qui les définit. (Voir Annexe) [1].

Tableau II.2 : Normes et Recommandation.

Fréquence	Tolérances sur la fréquence	Taux de modulation nominal de F_0	Tolérances sur le taux de modulation	Seuil d'alarme sur les niveaux
Porteuse F_0 $111,975 \leq F_0 \leq 117,975$ (Sauf VOR approche des bandes ILS)	$\pm 0.005\%$ Ou (1) $\pm 0.00\%$			
Fréquence centrale sous porteuse 9960Hz	± 1	30%	$28\% \leq M \leq 32\%$	$N < 15\%$ de 9960 $N_{\text{normal}} 9960$
Indice de modulation du 9960 : n		n=16	$15 \leq n \leq 17$	
Signal REF et VAR 30Hz	$\pm 1\%$	30%	$28\% \leq M \leq 32\%$	$N_{\text{VAR}} < 15\%$ de $N_{\text{VAR}} \text{ normal}$
Indicatif : 1020Hz		10 % ou (2) 20%	$M \leq 10\%$ ou (2) $M \leq 20\%$	
Voie phonie $300\text{Hz} \leq F_{\text{ph}} \leq 3000\text{Hz}$		30 %	$M \leq 30\%$	

(1) : espacement des canaux 50Hz

(2) 20% si la phonie n'est pas utilisée

II.10 CONCLUSION

Fondamentalement, le VOR définit une correspondance biunivoque entre l'azimut α et la différence de phase $\Delta\Phi$ mesurée dans ce même azimut (différence entre la phase du 30 Hz de référence et la phase du 30 Hz variable) avec :

$$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$$

$$0^\circ \leq \Delta\Phi \leq 360^\circ$$

Pour différentes raisons, cette relation peut se trouver mise en défaut. Dans ce cas on parlera d'erreur VOR. Lorsqu'on cherche à évoluer la précision globale d'un système en vue d'en améliorer les performances ou d'en fixer les limites d'utilisation, il s'avère utile de décomposer l'erreur du système, si c'est possible, en différentes erreurs élémentaires et de les classer selon leurs origine. Dans le chapitre qui suit, nous expliquerons cette partie en détails.

CHAPITRE III

ERREURS DU VOR ET ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

III.1 INTRODUCTION

Ce présent chapitre définit l’erreur en citant les différentes erreurs intrinsèques de l’équipement VOR, ainsi il définit notre outil de programmation GNU RADIO.

III.2 DEFINITION

On appelle une erreur l’écart de la valeur mesurée par rapport à la valeur exacte. Elle est égale à la différence entre le relèvement magnétique $\Delta\phi$ d’un point fourni par le signal issu d’une station VOR et le relèvement magnétique réel α de ce même point, tel que :

$$\varepsilon = \Delta\phi - \alpha.$$

La précision d’emploi du système VOR représente la probabilité qu’à un avion navigant sur un radial α donnée de ne pas s’en écarter d’une certaine valeur pendant 95% du temps. Elle est estimée à environ $\pm 5^\circ$

Pour un système de radionavigation et le VOR en particulier, le schéma ci-dessous permet de repérer et préciser les différents segments d’erreur participant à l’erreur globale.

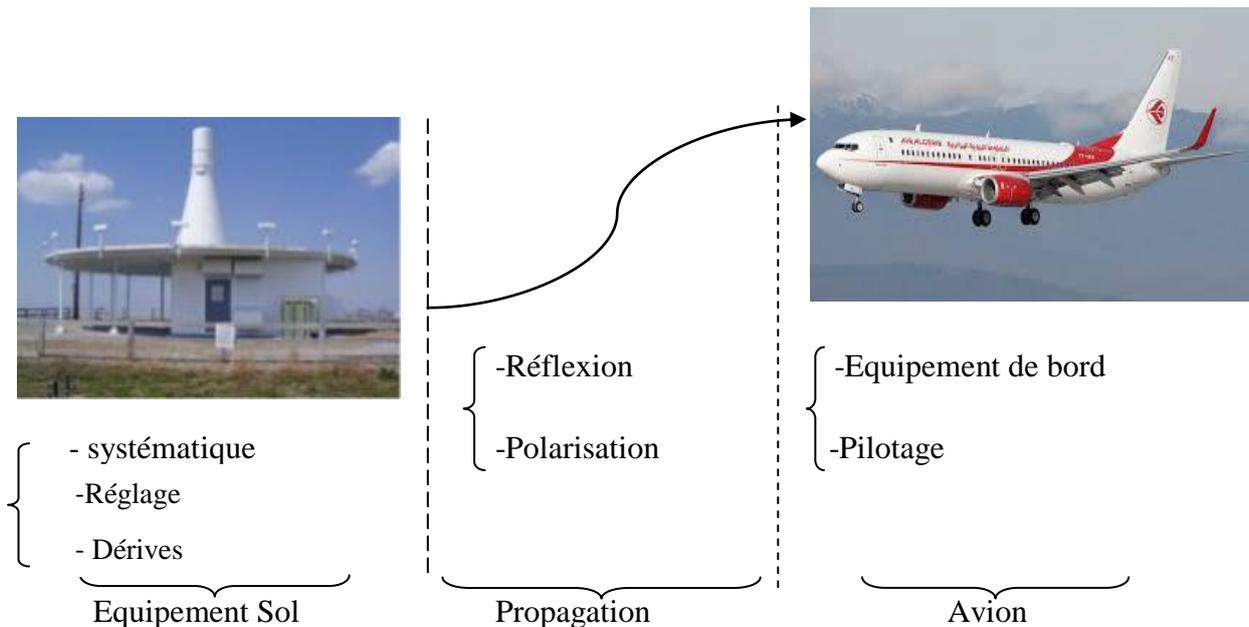


Fig.III.1 : Différentes origines d’erreurs

Ces erreurs étant indépendantes. L’erreur totale est obtenue en faisant la moyenne quadratique des erreurs élémentaires dues seulement à l’équipement sol et au segment de propagation.

III.3 ERREURS INTRINSEQUES A L'EQUIPEMENT SOL

A toute altération des différents termes de l'équation du signal VOR correspondra en général une erreur. L'expression du signal VOR étant une expression trigonométrique. Ces altérations portant sur cette expression peuvent être classées selon deux types :

- Type « Non linéaire » : les lois ne sont pas parfaitement sinusoïdales.
- Type « linéaire » : les amplitudes et les angles des différentes fonctions sinusoïdales ne sont pas nominales [5].

L'expression du signal VOR portant tous les défauts de type « linéaire » s'écrit :

$$e(t)_{ref} = E_p \cdot f(\alpha) [1 + m_1 \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t \tag{III.1}$$

$$e(t)_{cos} = E_{b1} \cdot \cos(\alpha + 45^\circ + \alpha_1) \cos(\Omega t + 45^\circ + \phi_1) \cdot \cos(\omega t + \varphi_1). \tag{III.2}$$

$$e(t)_{sin} = E_{b2} \cdot \sin(\alpha + 45^\circ + \alpha_2) \sin(\Omega t + 45^\circ + \phi_2) \cdot \cos(\omega t + \varphi_2). \tag{III.3}$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{b1} \neq E_{b2} \neq E_b \text{ ou } E_b = 0.3 * E_p \\ (\alpha_1, \alpha_2) \neq 0, \text{ défauts d'orientation des diagrammes} \\ (\phi_1, \phi_2) \neq 0, \text{ défauts des phases B.F / référence} \\ (\varphi_1, \varphi_2) \neq 0, \text{ défauts des phases H.F / référence} \end{array} \right.$$

Les différents types d'erreurs sont répertoriés et classés ci-dessous.

III.3.1 Erreur Duantale

➤ Erreur Duantale Cosinus

C'est une erreur qui présente deux maximums dans les azimuts 45° et 225°. Elle est provoquée par un déséquilibre des courants d'alimentation du groupement d'antenne générant le diagramme de rayonnement « cosinus ».

L'équation du diagramme de rayonnement de l'antenne « cosinus » affecté du défaut s'écrit :

$$|g(\alpha)| = |\cos(\alpha + 45^\circ) - k_c|$$

Les équations des signaux rayonnés sont :

$$e(t)_{ref} = E_p \cdot f(\alpha) [1 + m_1 \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t \tag{III.4}$$

$$e(t)_{cos} = E_b \cdot [\cos(\alpha + 45^\circ) - k_c] \cos(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos \omega t. \tag{III.5}$$

$$e(t)_{sin} = E_b \cdot \sin(\alpha + 45^\circ) \sin(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos \omega t. \tag{III.6}$$

On montre que la déviation des directions de nul de champ $\Delta\alpha$, exprimée en radians, est égale à k'' et l'amplitude de l'erreur ε est égale au signe près à k_c et donc à $\Delta\alpha$.

On observe vis à vis de la **Fig.III.2** que l'erreur :

- Pour $\alpha=45^\circ - \Delta\alpha$, première direction de nul de champ, $\Delta\phi = 45^\circ$ soit $\varepsilon = +\Delta\alpha$.
- Pour $\alpha=225^\circ + \Delta\alpha$, deuxième direction de nul de champ, $\Delta\phi = 255^\circ$ soit $\varepsilon = -\Delta\alpha$

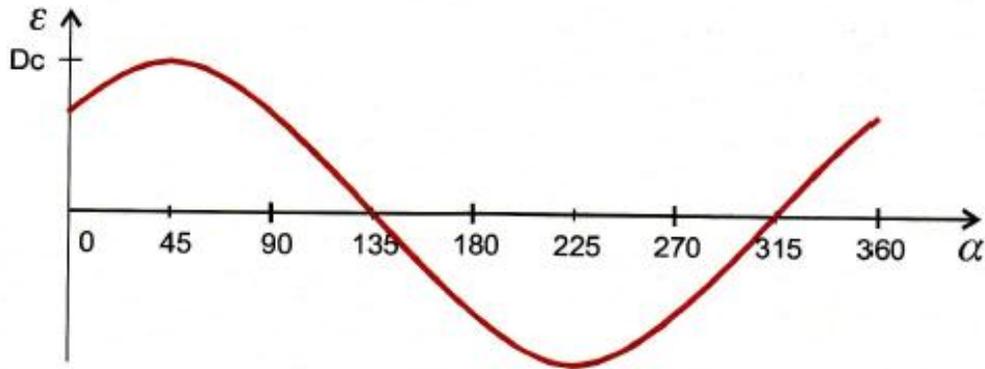


Fig.III.2: Courbe de l'erreur Duantale cosinus

➤ **Erreur Duantale Sinus**

C'est une erreur qui représente deux maximums dans les azimuts 135° et 315° . Elle est due à l'antenne sinus et les remarques qui s'y appliquent sont en tous points analogues à celles qui ont été faites pour l'antenne cosinus.

L'équation du diagramme de rayonnement de l'antenne « sinus » affecté du défaut s'écrit :

$$|g(\alpha)| = |\sin(\alpha+45^\circ) - k_c|$$

Les équations des signaux rayonnés dans ce cas sont :

$$e(t)_{ref} = E_p \cdot f(\alpha) [1 + m_1 \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t \tag{III.7}$$

$$e(t)_{cos} = E_b \cdot \cos(\alpha+45^\circ) \cdot \cos(\Omega t+45^\circ) \cdot \cos \omega t. \tag{III.8}$$

$$e(t)_{sin} = E_b \cdot [\sin(\alpha+45^\circ) - k_c] \cdot \sin(\Omega t+45^\circ) \cdot \cos \omega t. \tag{III.9}$$

En effet la courbe d'erreur est de la forme suivante :

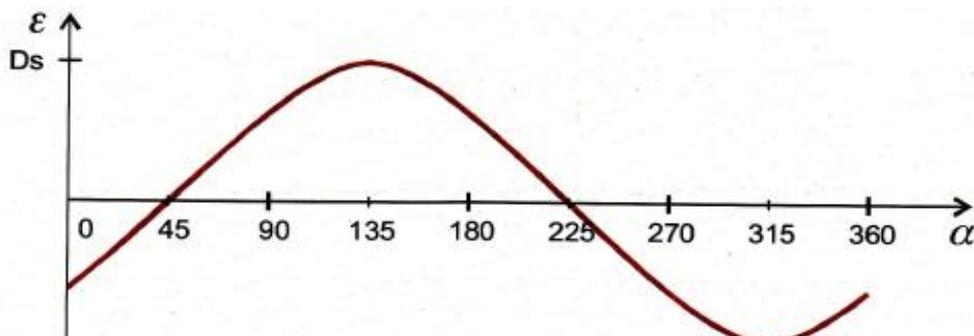


Fig.III.3 : Courbe de l'erreur Duantale sinus.

III.3.2 Erreur Quadrantale Semi-Cardinale

L'erreur Quadrantale Semi-Cardinale est une erreur qui est maximum dans les points semi-cardinaux. Sur nos équipements, on recense deux causes d'erreurs, l'une due à l'antenne, l'autre due au « gonio » (ou générateur de bandes latérales).

➤ **Erreur Quadrantale Semi-Cardinale B.F (Q_{SBF})**

C'est une erreur due à un défaut de quadrature de la phase des modulations BF des BL. Une telle anomalie modifie les valeurs nominales de la phase à l'origine des termes BF de l'équation du signal.

Avec un défaut de quadrature de $2\phi_d$, les équations des signaux rayonnés deviennent :

$$e(t)_{ref} = E_p \cdot f(\alpha) [1 + m_1 \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t$$

$$e(t)_{cos} = E_b \cdot \cos(\alpha + 45^\circ) \cdot \cos(\Omega t + 45^\circ + \phi_d) \cdot \cos \omega t.$$

$$e(t)_{sin} = E_b \cdot \sin(\alpha + 45^\circ) \cdot \sin(\Omega t + 45^\circ - \phi_d) \cdot \cos \omega t .$$

Une courbe d'erreur nous donnera la valeur globale de Q_s qui n'est autre que la somme de la Q_{Sant}, qui pourra être évaluée par un relevé de directions de nul de champ, et Q_{SBF} par la mesure des phases BF des bandes latérales sinus et cosinus.

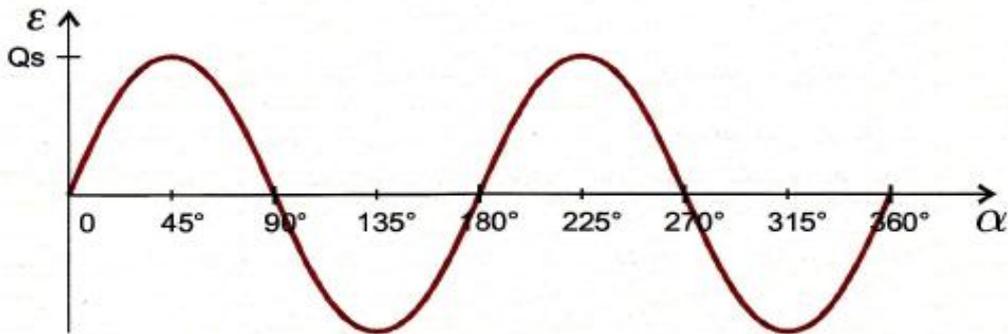


Fig.III.4 : Courbe d'erreur Quadrantale Semi-Cardinale B.F (Q_{SBF})

➤ **Erreur Quadrantale Semi-Cardinale Antenne (Q_{Sant})**

Elle est due à un défaut d'orthogonalité des diagrammes de rayonnement de l'antenne VAR. Les équations des diagrammes de rayonnement des antennes VAR affectées du défaut s'écrivent :

$$|g(\alpha)| = |\cos(\alpha + 45^\circ + \alpha_d)| \tag{III.10}$$

$$|g(\alpha)| = |\sin(\alpha + 45^\circ - \alpha_d)| \tag{III.11}$$

Les équations des signaux rayonnés (Q_s > 0) sont :

$$e(t)_{ref} = E_p \cdot f(\alpha) [1 + m_1 \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t \tag{III.12}$$

$$e(t)_{\cos} = E_b \cdot \cos(\alpha + 45^\circ + \alpha_d) \cdot \cos(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos \omega t. \tag{III.13}$$

$$e(t)_{\sin} = E_b \cdot \sin(\alpha + 45^\circ - \alpha_d) \cdot \sin(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos \omega t. \tag{III.14}$$

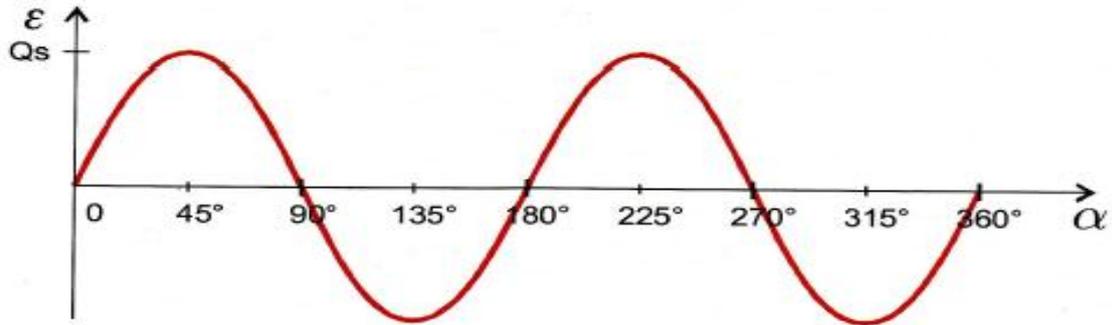


Fig.III.5 : Courbe de l'erreur Quadrantale Semi-Cardinale antenne (Qs_{ant})

III.3.3 Erreur Quadrantale Cardinale (Qc)

L'erreur Quadrantale Cardinale est une erreur qui est maximum dans les points cardinaux. Elle provient de l'inégalité d'amplitude des bandes latérales émises. Les causes de cette inégalité peuvent être multiples :

- ROS des antennes VAR inégaux.
- Différence de phase VHF entre les bandes latérales sinus et cosinus.
- Différence d'amplitude entre les bandes latérales sinus et cosinus appliquées aux antennes

L'équation des signaux rayonnés affectées de différents défauts devient :

$$e(t)_{\text{ref}} = E_p \cdot f(\alpha) [1 + m_1 \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t \tag{III.15}$$

$$e(t)_{\cos} = E_{b1} \cdot \cos(\alpha + 45^\circ) \cdot \cos(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos(\omega t + \phi_1). \tag{III.16}$$

$$e(t)_{\sin} = E_{b2} \cdot \sin(\alpha + 45^\circ) \cdot \sin(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos(\omega t + \phi_2). \tag{III.17}$$

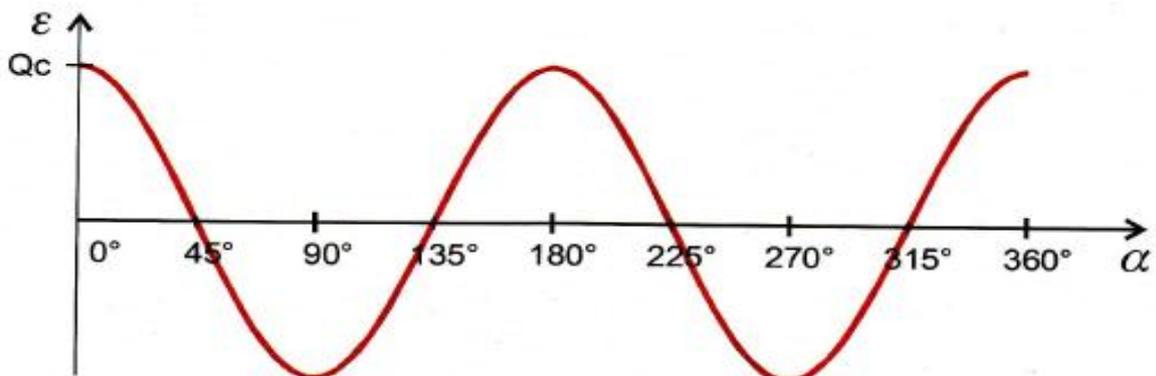


Fig.III.6 : Courbe de l'erreur Quadrantale Cardinale (Qc)

On montre que l'amplitude de l'erreur tant qu'elle est de faible valeur exprimée en radians est égale à :

$$Q_c = \frac{Eb_2 \cos \varphi_2 - Eb_1 \cos \varphi_1}{Eb_2 \cos \varphi_2 + Eb_1 \cos \varphi_1} \tag{III.18}$$

III.3.5 Erreur Octantale

L'erreur Octantale est une erreur qui présente huit maximums dans les azimuts : 22,5° ; 67,5° ; 112,5° ; 157,5° ; 202,5° ; 247,5° ; 292,5° et 337,5°.

C'est une erreur liée à la conception même des antennes. La fonction caractéristique idéale des diagrammes de rayonnement des antennes bandes latérales sinus et cosinus devrait suivre des lois parfaitement sinusoïdales, comme celles que l'on obtiendrait d'un doublé de longueur théoriquement nulle. Les dimensions transversales non nulles de nos antennes (antennes à fentes) ne permettent qu'une approximation de cette loi sinusoïdale idéale, approximation d'autant meilleure que la distance entre les deux fentes rayonnantes d'une même paire est faible.

L'amplitude de l'erreur octantale exprimée en radians est : $O_c = - \frac{n^2}{24}$

avec $n = \frac{2\pi d}{\lambda}$, et 2d la distance entre les deux fentes rayonnantes.

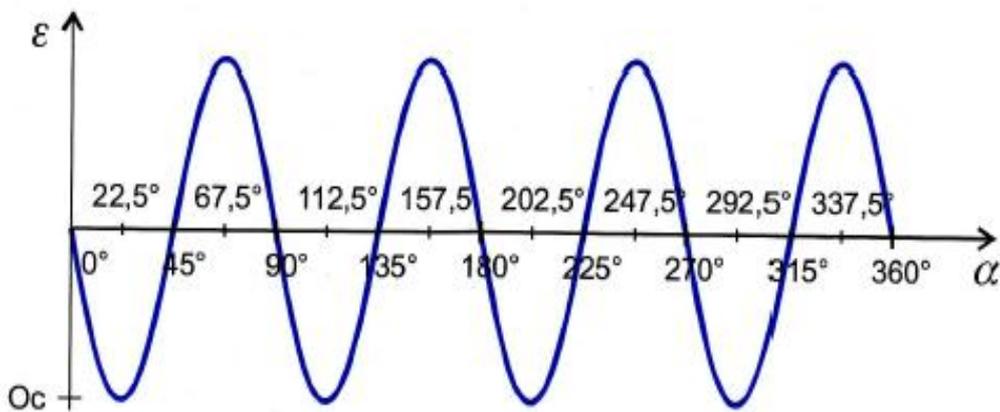


Fig.III.7 : Courbe de l'erreur Octantale

On remarque que l'erreur est toujours négative et on peut écrire :

$$e(t)_{ref} = E_p \cdot f(\alpha) [1 + m_1 \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t \tag{III.19}$$

$$e(t)_{cos} = E_b \frac{1}{\sin(\frac{2\pi d}{\lambda})} \cdot \sin(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\alpha + 45^\circ)) \cos(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos \omega t \tag{III.20}$$

$$e(t)_{sin} = E_b \frac{1}{\sin(\frac{2\pi d}{\lambda})} \cdot \sin(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\frac{2\pi d}{\lambda} + 45^\circ)) \sin(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos \omega t. \tag{III.21}$$

III.3.4 Erreur Constante

L'erreur constante est une erreur qui est constante quel que soit l'azimut. Elle est due à un mauvais calage du VOR, ce qui signifie que la direction de référence du VOR n'est pas confondue avec la direction nord magnétique. Elle est égale à l'écart angulaire entre ces deux directions. Cette erreur a deux origines possibles qui sont le calage de phase BF ou bien le calage de l'antenne.

Dans le cas d'un calage standard, on distinguera deux causes possibles d'erreur. On parlera d'erreur constante BF lorsque $\phi_0 = 45^\circ$ et d'erreur constante antenne lorsque $\alpha_0 \neq 45^\circ$, avec $E_{c_{BF}} = 45^\circ - \phi_0$ et $E_{c_{Ant}} = \alpha_0 - 45^\circ$. L'erreur constante globale étant la somme des deux termes, [5] :

$$E_c = E_{c_{BF}} + E_{c_{Ant}}$$

III.4. PARTIE LOGICIELLE

En tenant compte des fréquences et du débit d'informations mis en jeu lors des transmissions sans fil radiofréquences, il a été classiquement nécessaire de traiter un maximum d'informations par un matériel dédié pour ne pas finalement qu'éventuellement traiter par logiciel le flux d'informations brut issu du récepteur radio. Ce flux est traité par des blocs implémentant les fonctionnalités les plus classiques dans le logiciel GNU Radio et son interface graphique GNU Radio-Companion. Nous nous intéresserons en particulier au GNU Radio-Companion et la clé RTL-SDR.

III.4.1 Radio Logiciel

Un radio logiciel est un système Radio qui effectue le traitement de signal requis dans un logiciel au lieu d'utiliser des circuits intégrés dédiés dans le matériel.

L'avantage est que les logiciels peuvent être facilement remplacés dans le système Radio, le même matériel peut être utilisé pour créer de nombreux types de Radios pour différentes normes de communication, ainsi un logiciel Radio peut être utilisé pour une variété d'applications.

III.4.2 GNU Radio

GNU Radio est une suite logicielle dédiée à l'implémentation de radio logiciel et de systèmes de traitement du signal. Il peut être utilisé avec du matériel RF externe peu coûteux et facilement disponible pour créer des Radios définies par logiciel, ou sans matériel dans un environnement de type simulation. Il est largement utilisé dans les milieux de la recherche, de

l'industrie, des universités, des gouvernements et des passionnés pour soutenir à la fois la recherche sur les communications sans fil et les systèmes Radio du monde réel [9].

Les fonctions de traitement du signal sont implémentées en C++ et les modules complémentaires sont en Python. Une interface graphique (GNU Radio-Companion) permet d'assembler les modules graphiquement. Cet ensemble d'outils permet d'effectuer des simulations ou de fonctionner sur des signaux réels.



Fig.III.8 : Interface GNU Radio

III.4.3 GNU Radio-Companion

GNU Radio-Companion est une interface graphique pour accéder aux modules de traitement du signal. Comme il est plus facile de gérer graphiquement les flux d'informations, GNU Radio offre avec son application GNU Radio-Companion la possibilité de former un organigramme avec des éléments de blocs graphiques.

Cette application fournit de nombreux blocs prédéfinis organisés en différents groupes tels que les sources de signal, les puits de signal ainsi que les fonctions de modulation et de démodulation dont nous ferons intensivement usage dans la suite de ce travail.

III.4.4 Applications de GNU Radio

GNU Radio effectue tout le traitement du signal. On peut l'utiliser pour écrire des applications afin de recevoir des données de flux numériques ou pour transférer des données dans des flux numériques, qui sont ensuite transmis à l'aide de matériel.

GNU Radio contient des filtres, des codes de canaux, des démodulateurs, des décodeurs et de nombreux autres éléments qui se trouvent généralement dans les systèmes Radio. Plus important encore, il inclut une méthode de connexion de ces blocs et gère ensuite la manière dont les données sont transmises d'un bloc à un autre. N'importe quel type de données numériques peut être transmis d'un bloc à un autre, qu'il s'agisse de bits, d'octets, de vecteurs, de rafales ou de types de données plus complexes [10].

III.4.5 Dispositif RTL-SDR

La radio définie par logiciel SDR (Software Defined Radio) est une approche au traitement de données Radiofréquences déportant un maximum de traitement sur du logiciel au lieu de dépendre du matériel.

La clé RTL-SDR est la nouvelle version améliorée de la célèbre clé USB RTL-SDR avec le chipset RTL2832U et le tuner R820T2, pour recevoir généralement toutes les fréquences de 22 à 1750Mhz (sans trou). Cette gamme varie de clé en clé, dépendant des composants qui ont été utilisés.

L'architecture globale des clés RTL-SDR est basée sur un récepteur superhétérodyne qui est un design populaire pour les récepteurs qui doivent pouvoir traiter des signaux à une large gamme de fréquences sélectionnées par l'utilisateur, les isoler des autres signaux et les amplifier. Par exemple, de nombreux récepteurs Radio AM/FM conventionnels permettent à l'utilisateur de sélectionner un canal en accordant la Radio à sa fréquence d'onde porteuse.

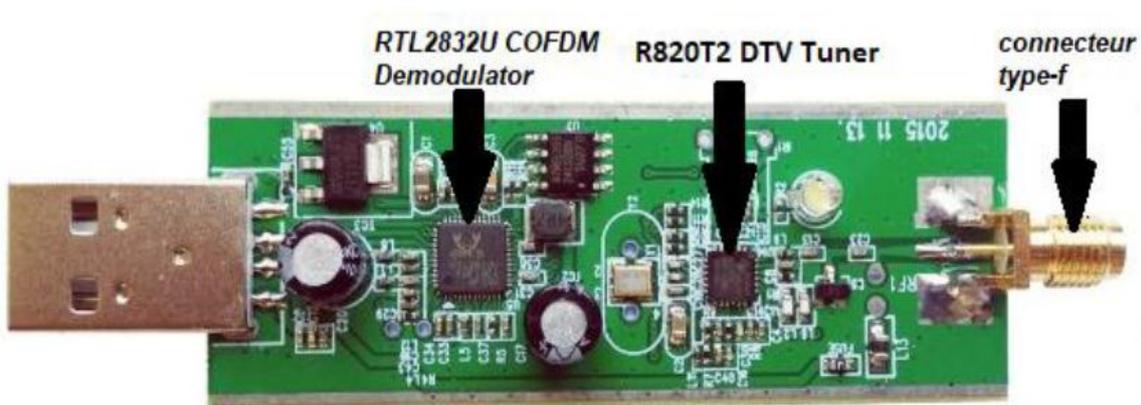


Fig.III.14 : Composition interne de la clé RTL-SDR

Un filtre suffisamment sélectif doit être appliqué au signal provenant de l'antenne pour filtrer les autres signaux et le bruit en dehors de la bande d'intérêt avant la démodulation. Pour le but décrit ci-dessus, il doit également avoir une fréquence centrale accordable qui rend sa mise en œuvre difficile. Les architectures superhétérodynes résolvent ce problème en convertissant d'abord vers une fréquence intermédiaire (IF) dans laquelle des étapes de filtrage et d'amplification plus rigoureuses peuvent être appliquées maintenant que le signal est à une fréquence prédéfinie fixe (voir **Fig.III.14**) [13].

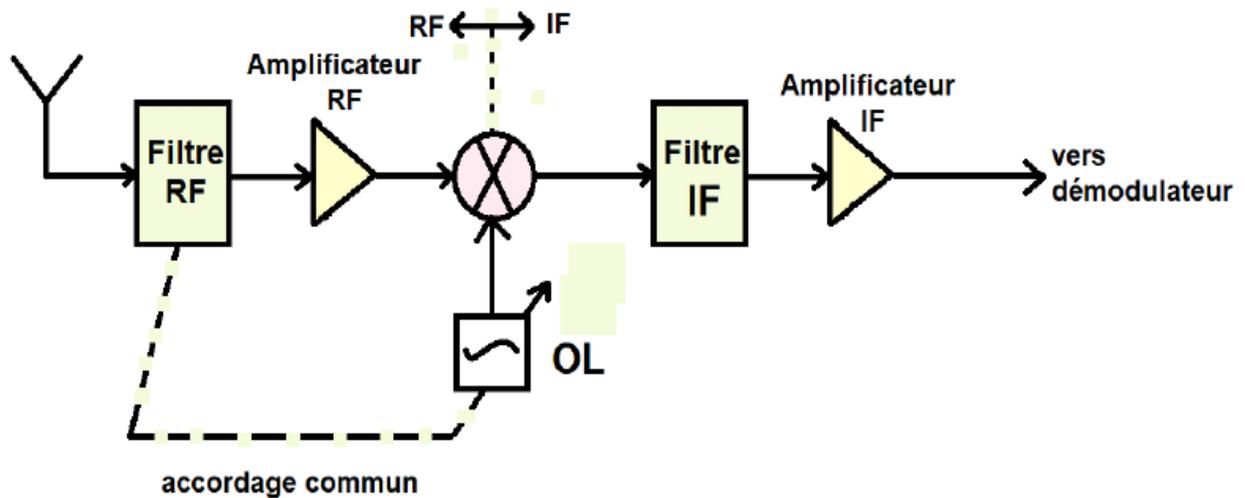


Fig.III.15 : Diagramme de fonctionnement de la clé RTL-SDR

III.5 CONCLUSION

Différentes erreurs peuvent se produire dans le système VOR. Chaque erreur a ses principales causes et conséquences ce qui exige une maintenance périodique pour bien assurer le bon fonctionnement des stations VOR.

L'accumulation des différentes erreurs sur l'information VOR fait qu'il existe une différence sensible entre la radiale α sélectionnée et la trajectoire réelle suivie par l'avion.

Pour clôturer ce chapitre, on a présenté le système GNU Radio ainsi que tout le matériel et application exploités dans la partie pratique.

CHAPITRE IV

SIMULATION DU RECEPTEUR VOR ET METHODES DE CALCULS
D'ERREURS INTRINSEQUES

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce présent chapitre nous allons réaliser un récepteur de signal VOR, notre récepteur est composé d'une clé RTL-SDR, une antenne adapté les deux reliées à un ordinateur auquel GNU RADIO a été préinstallé. Ensuite présentation de la méthode utilisée pour l'étude et simulation des erreurs intrinsèques à l'équipement au sol.

IV.2 SIMULATION D'UN RECEPTEUR A DEMODULATION DIRECTE

Le récepteur à simuler est un appareil électronique destiné à capter, sélectionner et décoder les ondes radioélectriques émises par les émetteurs radio. Les signaux formés par les ondes électromagnétiques sont captés par une antenne. Donc l'antenne reçoit de nombreux signaux qu'il faut différencier. Ce récepteur doit donc être capable de :

- Sélectionner, parmi les nombreux signaux, le signal désiré.
- Amplifier ce signal afin de permettre son traitement ultérieur.
- Démoduler le signal, qui est modulé en amplitude, en fréquence, en phase ou de type numérique, afin de récupérer une copie fidèle du signal original, appelé signal modulant.

IV.2.1 Principe de fonctionnement d'un récepteur à démodulation directe

Nous avons choisi de commencer par la réalisation d'un récepteur de signal FM dans le but d'avoir une maîtrise de logiciel, ce récepteur est très simple à réaliser car il démodule directement le signal capté à son entrée après une amplification.

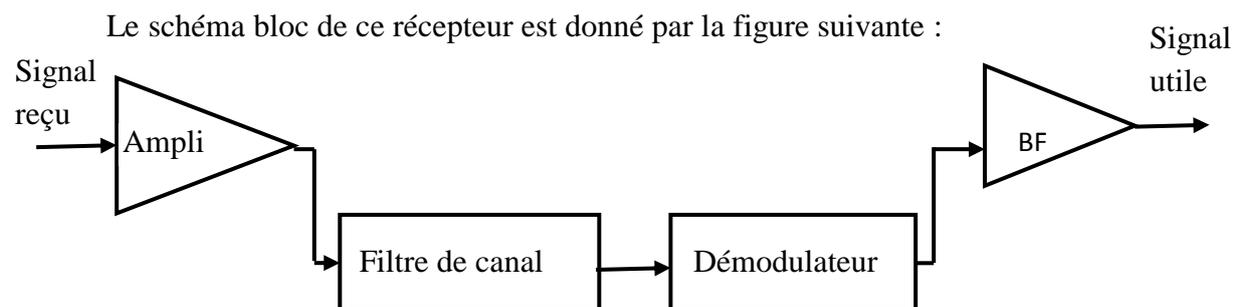


Fig.IV.1. Schéma bloc d'un récepteur à démodulation directe.

- Amplificateur d'entrée : est un amplificateur radio fréquence, il amplifie le signal capté, il est très sensible qui assure une première amplification et améliore le rapport signal sur bruit.
- Filtre de canal : il permet de sélectionner le canal désiré et d'éliminer les signaux indésirables.
- Démodulateur : c'est un démodulateur AM/FM/PM qui extrait le signal modulant du signal modulé (selon l'émetteur, dans ce cas nous utiliserons un démodulateur FM).
- L'amplificateur BF : c'est un amplificateur basse fréquence, son rôle est d'amplifier le signal démodulé

IV.2.2 Simulation d'un récepteur à démodulation directe à l'aide d'une clé RTL-SDR

Nous allons tout d'abord présenter chaque bloc qu'on a utilisé pour simuler le récepteur, puis donner son schéma global:

➤ Le bloc RTL-SDR source

C'est le bloc qui représente la clé utilisée, elle reçoit le signal analogique à l'aide d'une antenne réceptrice et le transforme en un signal numérique.

Ce bloc est composé de plusieurs champs, nous nous intéressons au taux d'échantillonnage (sample rate) et la fréquence de signal.

➤ **Sample rate** : on prend 2Mhz (est celle de la clé, c'est pour ça qu'on écrit l'ID de cette dernière dans ce champ, il va être remplacé directement par sa valeur).

➤ **La fréquence** : la fréquence doit être variable et manuellement sélectionné pour cela on utilise le bloc **Chooser** en copiant son ID (tuner) dans la valeur que nous souhaitons être variable (frequency). les fréquences choisies sont : 95.6 Mhz, 94.7Mhz, 94.2Mhz, 98.0Mhz correspondantes à la chaine 3, JilFM, EL-bahdja et la chaine 1.

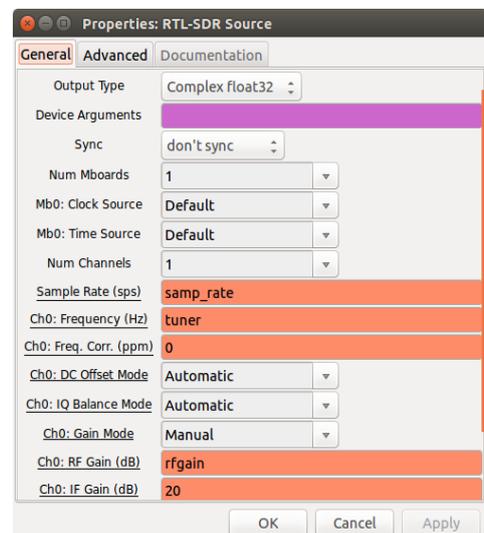


Fig.IV.2 : Bloc RTL-SDR

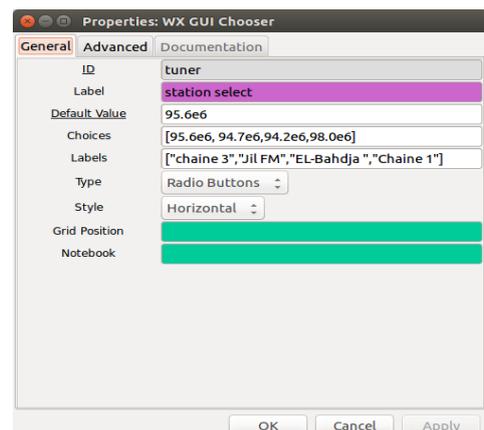


Fig.IV.3: WX GUI Chooser

➤ Le bloc variable

Le taux d'échantillonnage est tout simplement le nombre de mesures qui sont faites à chaque seconde. Le travail sous le logiciel GNU RADIO nécessite un taux précis, lorsqu'on ouvre le logiciel la valeur de taux d'échantillonnage est par défaut 32Khz. Mais la clé RTL-SDR nécessite un taux plus grand, le taux d'échantillonnage de la clé utilisé dans notre projet est de 2Mhz.

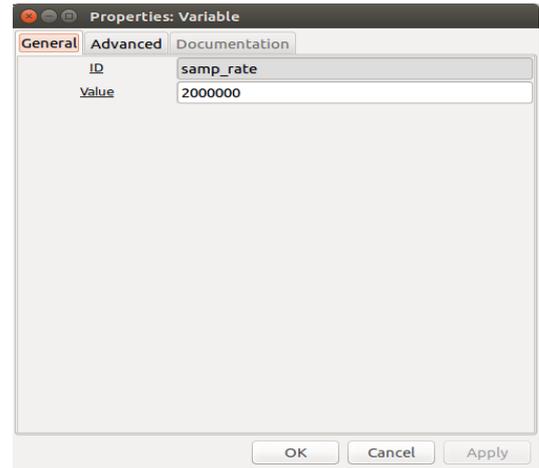


Fig.IV.4: Bloc Variable

➤ Le bloc FFT SINK

Pour observer le domaine fréquentiel correspondant au signal base bande, dans ce bloc on s'intéresse à la fréquence en bande de base qui est la fréquence de tuner.

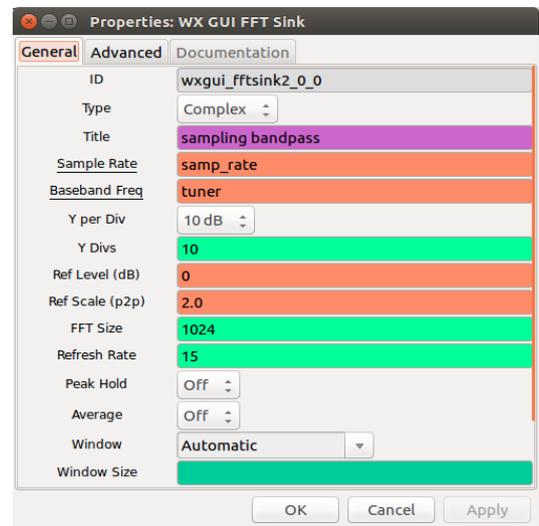


Fig.IV.5: Bloc FFT Sink

➤ Le bloc Low Pass Filter

C'est le bloc qui représente le filtre de canal. Il est composé de plusieurs champs nous on s'intéresse au :

- Gain : on le prend 2 (l'amplification n'est pas importante dans cette étape).
- Sample rate : 2Mhz (même chose, il suffit d'écrire l'ID)
- Cutoff freq : on prend 100khz c'est la bande passante.

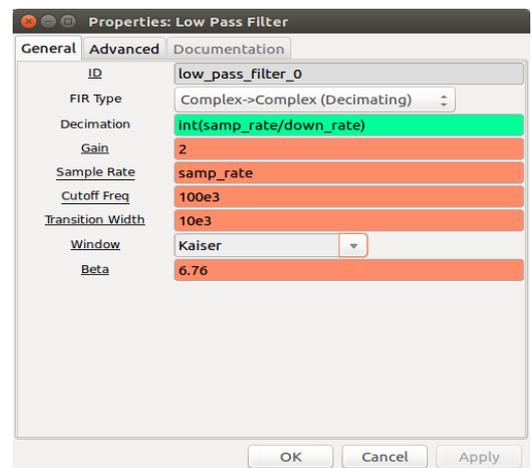


Fig.IV.6: Bloc low Pass Filter

➤ Le bloc Wide-Band FM Receiver

C'est le bloc qui facilite l'écoute des stations dans la bande FM de diffusion normale, le taux d'échantillonnage entrant doit être égale au taux d'échantillonnage à la sortie de bloc précédent, qui est $\text{samp_rate} / \text{décimation} = \text{down_rate} = 250\text{K}$

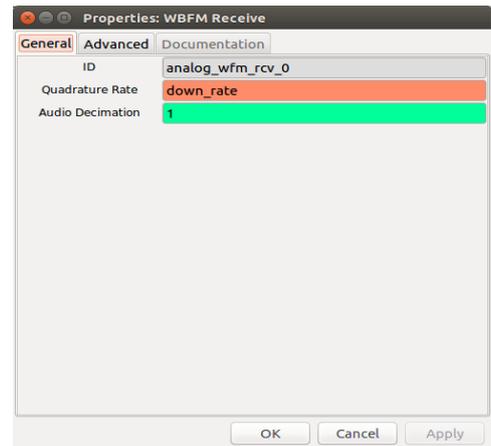


Fig.IV.7: Bloc Wide-Band FM Receiver

➤ Le bloc Rational Resampler

Ce bloc adaptera le taux entrant d'un flux en interpolant/décimant globalement, si nécessaire. Cela est nécessaire ici car les taux de bloc précédent ne sont pas des multiples entier des taux de l'haut-parleur

Le taux d'échantillonnage par défaut est 250k qui fixe le taux à partir duquel le récepteur FM produit des échantillons. L'haut parleur est configuré pour un taux de 24k mais $(250000/24000)$ n'est pas un entier. Nous pouvons mettre la décimation égale au taux d'échantillonnage entrant (250k) et l'interpolation d'être différent (non divisible).



Fig.IV.8: Bloc Rational Resampler

➤ Le bloc Audio Sink

Et enfin, on doit utiliser un bloc qui nous permet d'écouter le signal c'est l'haut-parleur.

On prend la fréquence d'échantillonnage égale à 24Khz, c'est la fréquence d'échantillonnage audio normalisée.

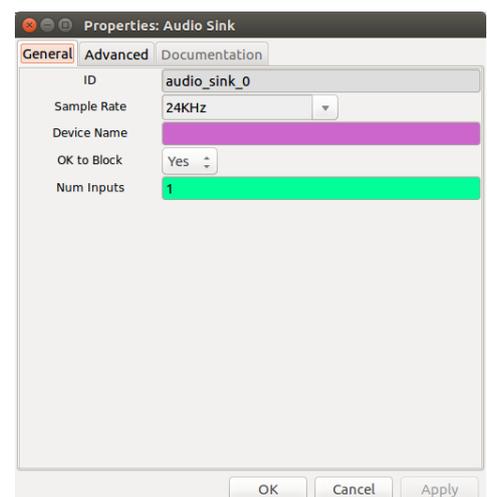


Fig.IV.9: Bloc Audio Sink

Après avoir présenté les blocs essentiels pour la réalisation d'un récepteur FM, ci-dessous les figures qui montrent l'installation de récepteur et le schéma global sur l'interface de GNU Radio :

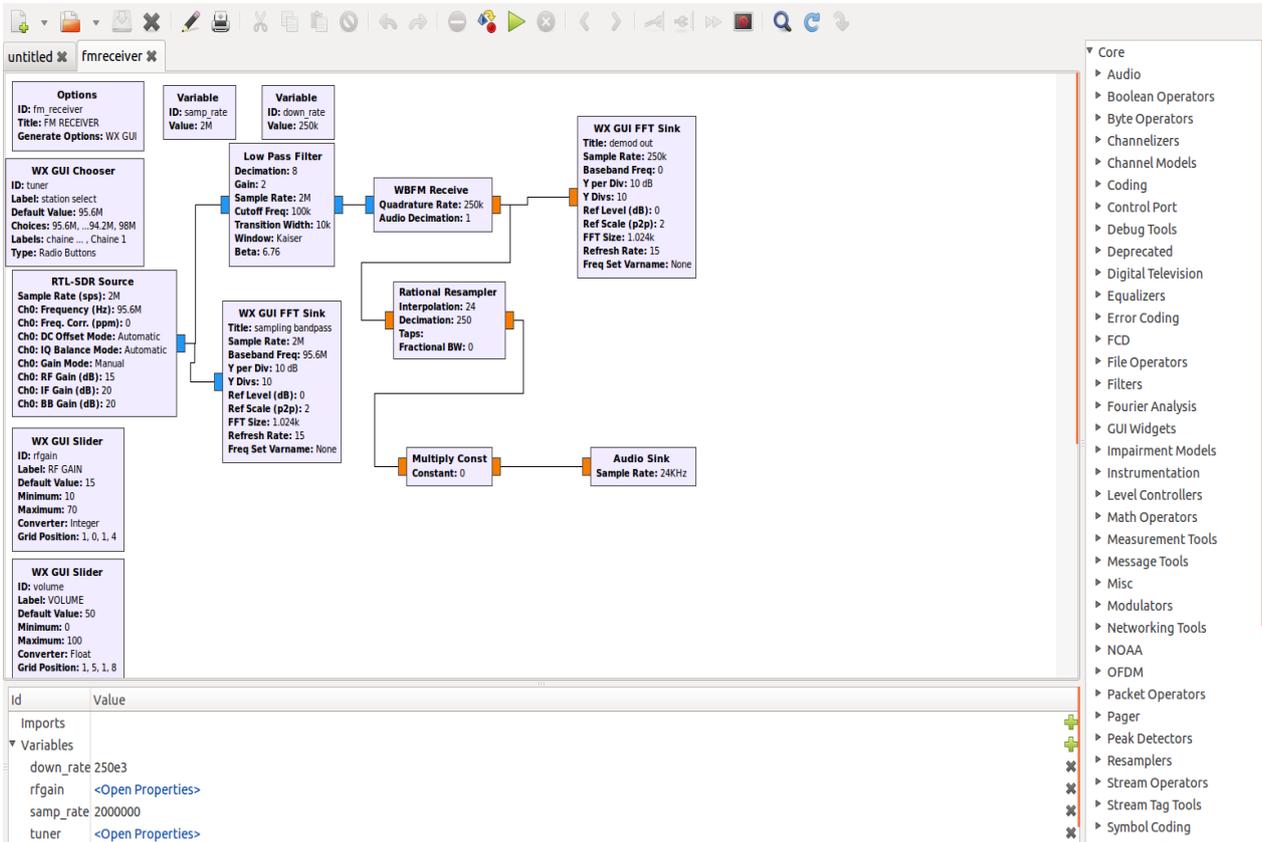


Fig.IV.10: Schéma global de récepteur FM

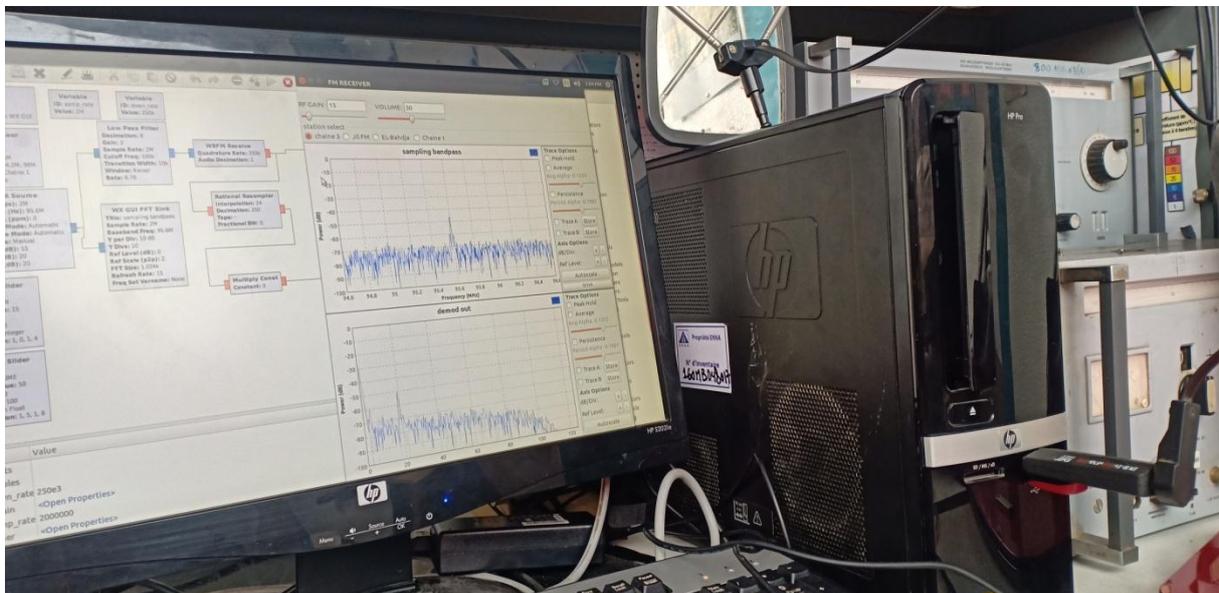


Fig.IV.11: Installation de récepteur FM

IV.2.3 Le résultat obtenu :

D'après la simulation du récepteur, nous avons pu visualiser le spectre en bande de base (une station de radio locale) comme indiqué sur le tracé FFT et le signal démodulé qui produit un son sortant de la carte son.



Fig.IV.12: Tracés de la FFT et le signal démodulé d'un récepteur FM

IV.3 REALISATION D'UN RECEPTEUR DE SIGNAL VOR

IV.3.1 Principe de fonctionnement d'un récepteur de signal VOR

Le signal rayonné U_t est reçu par l'avion. Les antennes utilisées pour recevoir le signal VOR sont quasi-omnidirectionnelles afin de pouvoir recevoir les signaux quelque soit l'orientation de l'avion.

Une fois le signal en bande de base retrouvé, il s'agit de retrouver la suite des caractères en échantillonnant le signal en bande de base aux bons instants. Pour récupérer l'information transmise, l'inverse de l'opération de l'émission est effectué.

Le schéma bloc de ce récepteur est donné par la figure suivante :

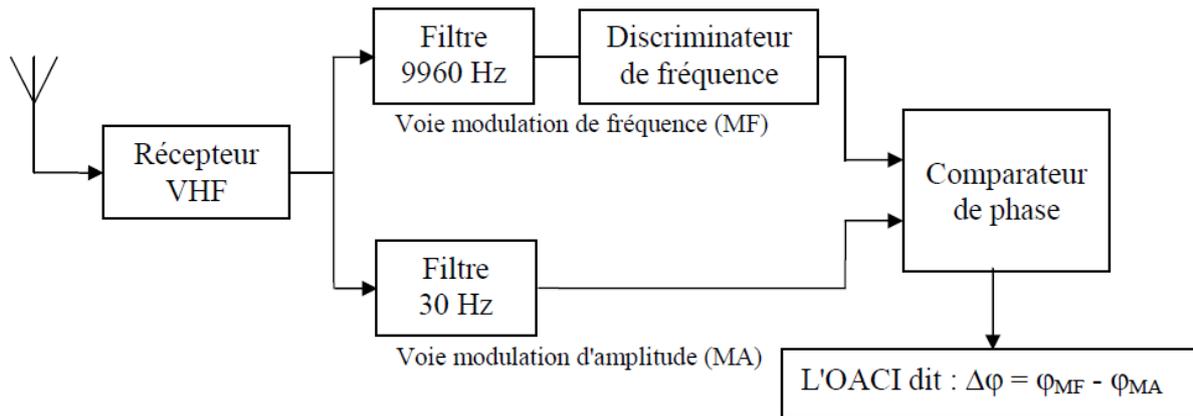


Fig.IV.13: Schéma synoptique d'un récepteur VOR

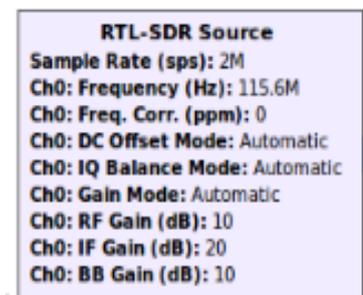
Le récepteur se divise après le détecteur AM en 2 voies. Dans le cas d'un VORC le signal REF est traité sur la voie 1(MF) et le VAR sur la voie 2(MA), le cas contraire dans le cas d'un VORD.

IV.3.2 Réalisation de récepteur

Dans cette partie nous allons présenter notre récepteur réalisé sur l'interface de GNU RADIO, en détaillant les blocs essentiels et leurs paramétrages :

➤ **Bloc RTL-SDR Source**

Représente le dispositif (clé) USB utilisé dans notre récepteur qui permet de réceptionner le signal VOR qui sera par la suite traité par le logiciel. Cette clé est capable de recevoir n'importe quel signal dans la gamme qu'opère leur tuner (2Mhz).



Dans ce bloc on s'intéresse à la fréquence : la fréquence du signal choisie est 115.6 Mhz.

Fig.IV.14: Bloc RTL-SDR Source

➤ **Le bloc Throttle**

Le logigramme va être exécuté en boucle par l'ordinateur, à la vitesse maximale autorisée par le processeur ce qui pourrait entrainer un plantage de la machine. Pour limiter la vitesse d'exécution on limite le taux d'échantillonnage (sampRate*8).

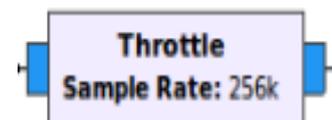


Fig.IV.15: Bloc Throttle

➤ **Le bloc complex to Mag**

Calcule la magnitude des échantillons complexes. Peut aussi travailler sur des vecteurs.



Fig.IV.16: Bloc AM Demod

➤ **Le bloc Low Pass Filter**

Ce bloc filtre le signal reçu et limite la puissance du bruit.



Fig.IV.17: Bloc Low Pass Filter

➤ **Le bloc AM demod**

Notre signal VOR à la réception c'est un signal modulé en amplitude. La démodulation permet d'abord de retrouver le signal en bande de base en le ramenant au voisinage de 0.

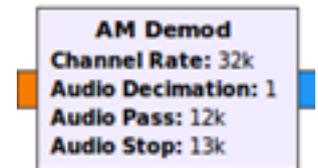


Fig.IV.18: Bloc AM Demod

➤ **Le bloc Band Pass Filter**

Ce filtre permet d'extraire le signal en bande de base (30var), la bande de fréquence varie entre 25-35 Hz.



Fig.IV.19: Bloc Band Pass Filter

➤ **Le bloc DC Blocker**

La magnitude de l'enveloppe sera toujours positive et introduira donc une polarisation continue sur le signal.



Fig.IV.20: Bloc DC Blocker

➤ **Le bloc Multiply**

La démodulation est réalisée en multipliant le signal reçu par la fréquence porteuse (9960Hz)- qu'il faut récupérer - et en ne conservant que le signal en bande de base à l'aide d'un filtre passe-bas.



Fig.IV.21: Bloc Multiply

➤ **Le bloc FM Demod**

Ce bloc démodule un canal FM complexe, limité en bande et converti en signal de bande de base original (récupération de 30Ref), en appliquant éventuellement des taux d'échantillonnage entrant de la bande de base FM.



Fig.IV.22: Bloc FM Demod

➤ **Le bloc Multiply**

Dans cette partie le mélangeur va multiplier les deux signaux variable et référence, une telle opération est utile dans le but de récupérer des informations précises sur l'angle de phase entre ces deux signaux.



Fig.IV.23: Bloc Multiply

➤ **Le bloc Float to complex**

Ce bloc convertit les deux signaux var. et réf. en un signal complexe (réel+imaginaire).



Fig.IV.24: Bloc Float To Complex

➤ **Le bloc Complex to Arg**

Ce bloc permet de récupérer l'angle de vecteur.



Fig.IV.25: Bloc Complex to Arg

➤ **Le bloc GUI Scope Sink**

C'est un oscilloscope de type bande dessinée qui nous permet de visualiser nos signaux.



Fig.IV.26: Bloc GUI Scope Sink

Après avoir présenté les blocs essentiels pour la réalisation d'un récepteur de signal VOR, ci-après les figures qui montrent l'installation de récepteur et le schéma global sur l'interface de GNU Radio :

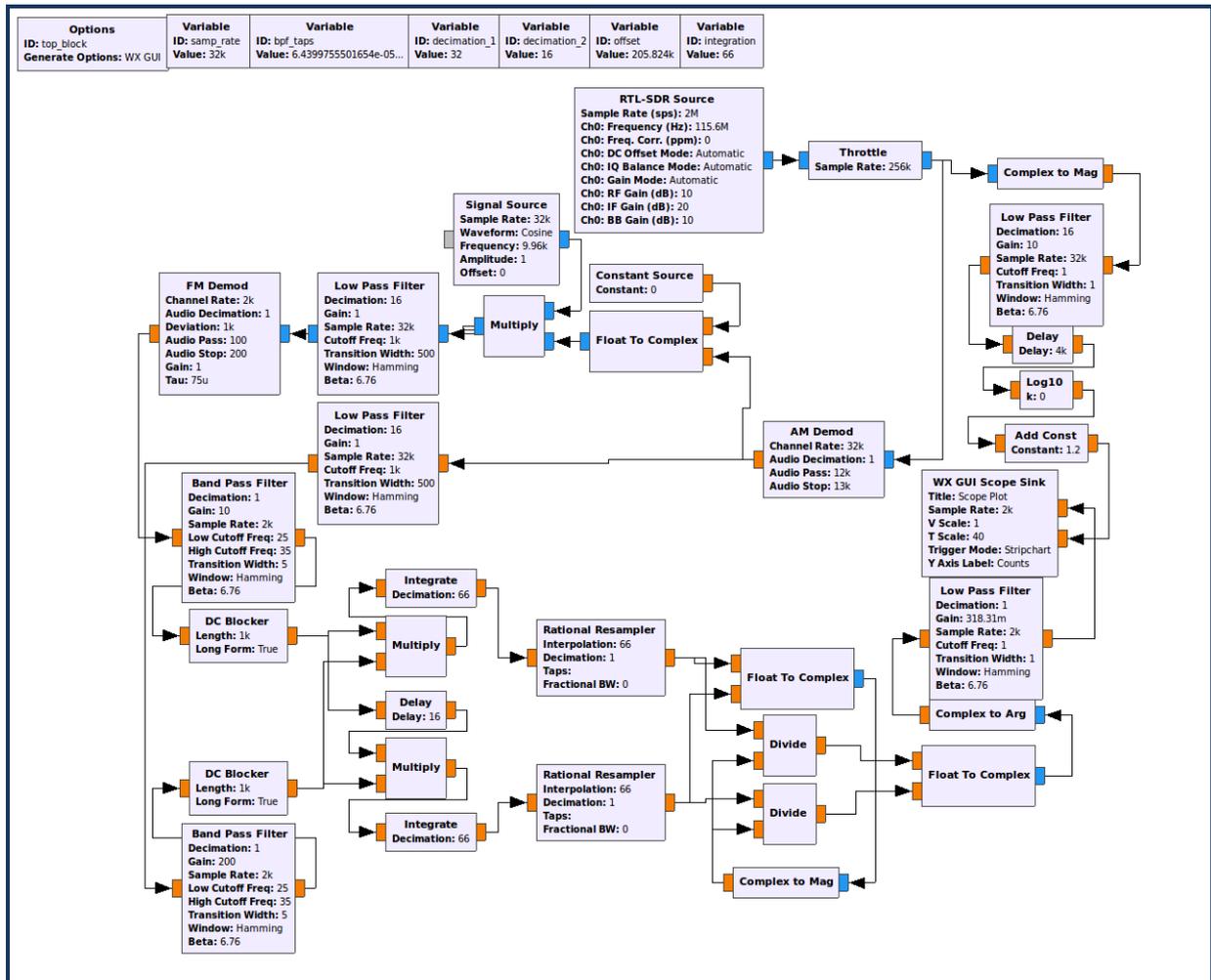


Fig.IV.27 : Schéma global de récepteur signal VOR sur GNU Radio.

IV.3.3 Génération du signal VOR

Après la réalisation de notre récepteur, nous aurons besoin de signal VOR émet pour l'étude de fonctionnement de notre récepteur. Pour cela nous avons générer le signal à l'aide d'un générateur de DETR de la marque ROHDE&SCHWARZ avec une bande de fréquence 9KHz-3GHz.



Fig.IV.28: Générateur de signal VOR

IV.3.4 Réception de signal VOR

a. Récepteur Immobile

Le signal analogique émet par le générateur est reçu par une antenne réceptrice (dipôle) construite pour la bande aviation VHF 108-136MHz, il est convertit en un signal numérique à l'aide de la carte d'acquisition (clé RTL-SDR) puis traité par les blocs choisis comme nous le montre la figure ci-dessous :

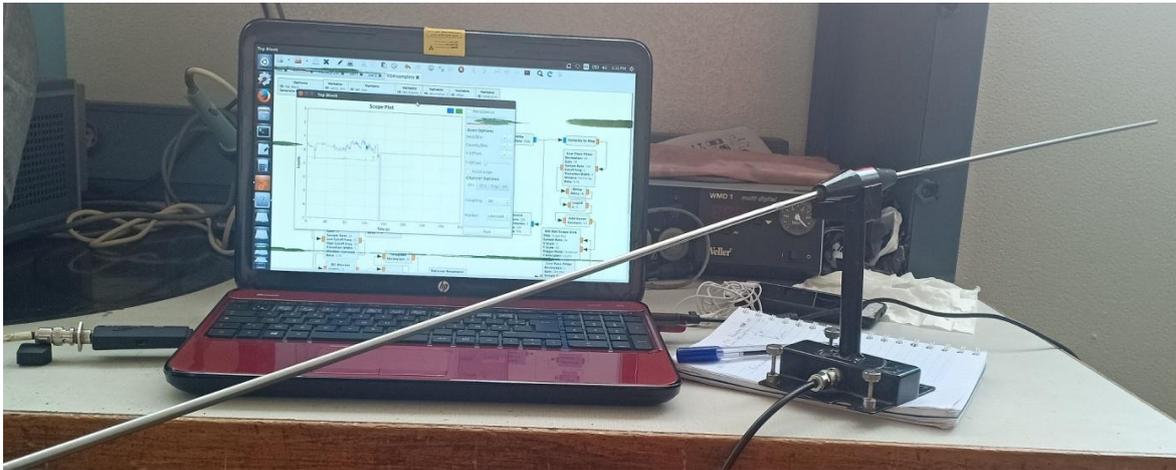


Fig.IV.29: Installation de récepteur signal VOR

La fenêtre ci-dessous est celle affichée à l'exécution du programme :

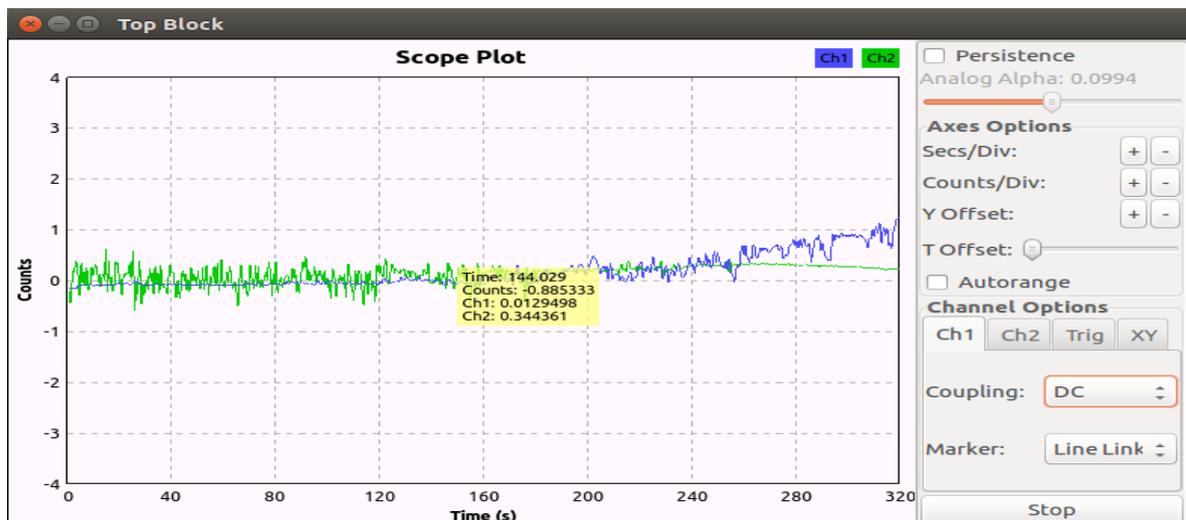


Fig.IV.30: Résultats d'exécution du programme pour un récepteur VOR immobile.

➤ Interprétation :

La chaine 1 représente la puissance du signal tandis que la chaine2 représente l'azimut entre le générateur et le récepteur. Les deux grandeurs sont dans un état stable vu que le récepteur est stable.

Le signal est aussi reçu par un récepteur professionnel de DETR de type NORMARC7710, dont nous pouvons afficher tout les informations contenant dans le signal envoyé.



Fig.IV.31: Récepteur professionnel de DETR.

b. Récepteur mobile

Après l'exécution du programme ci-dessous, nous avons pu enregistrer et récupérer un signal VOR lors d'un déplacement d'un véhicule équipé de la clé RTL-SDR vers une station VOR.

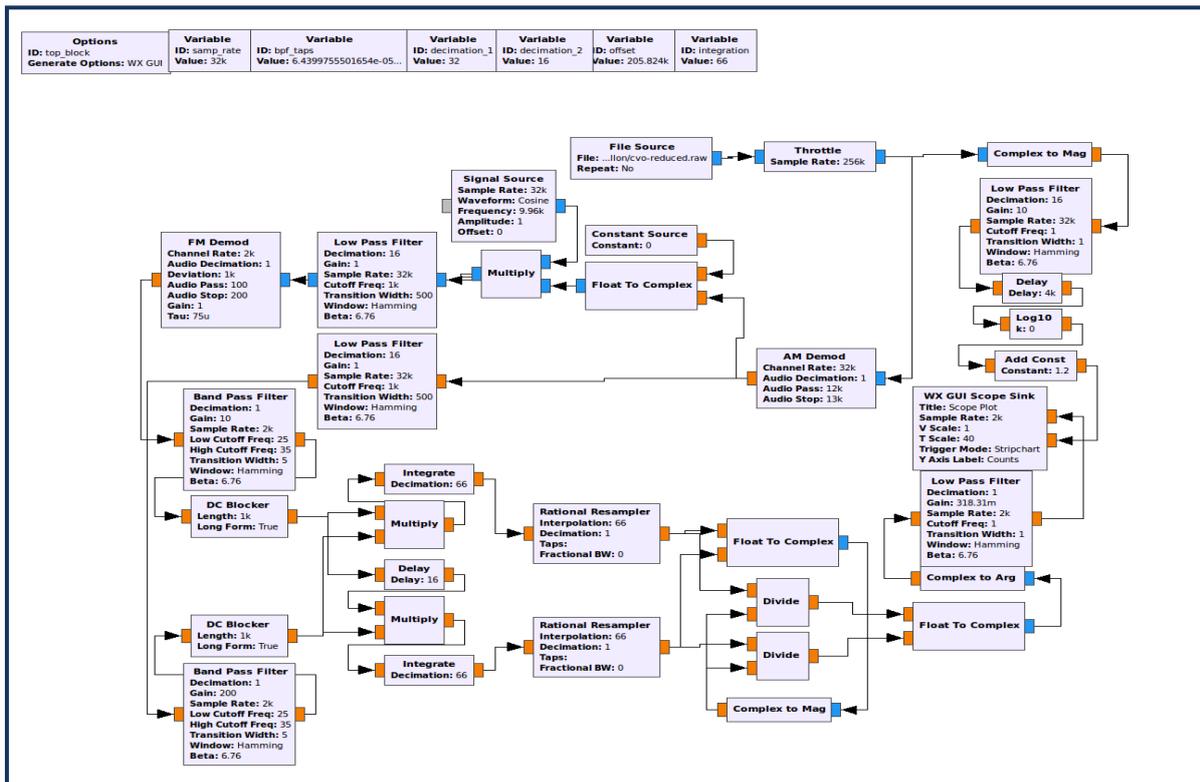


Fig.IV.32: Schéma global de recepteur d'un signal VOR

Nous visualisons les résultats suivants :

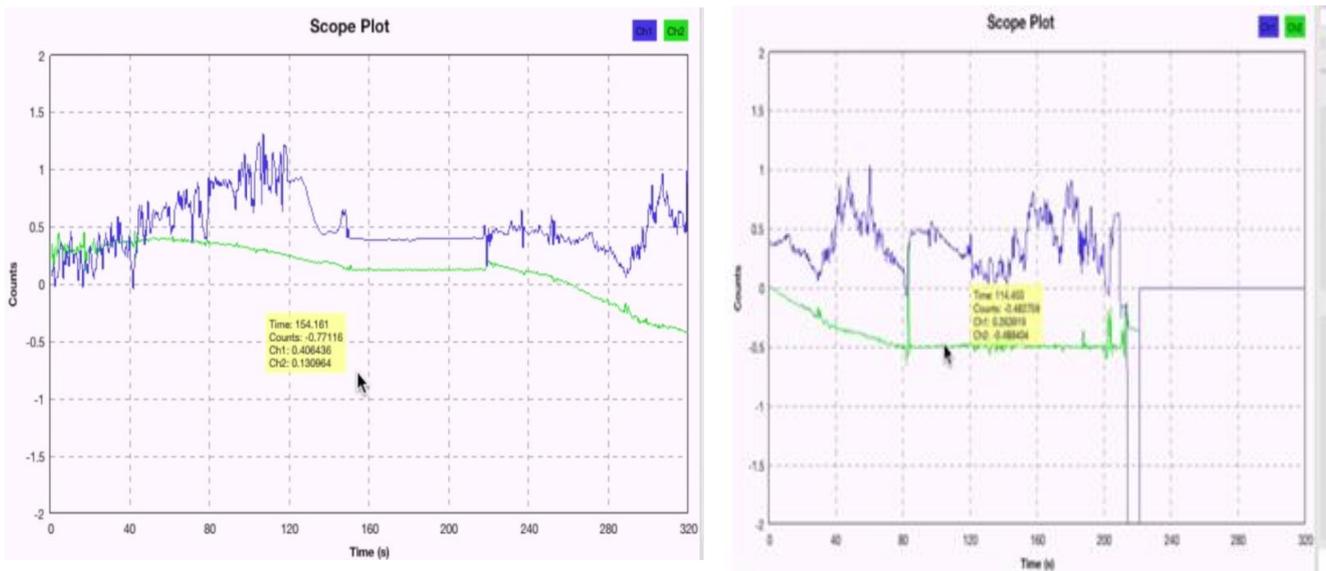


Fig.IV.33: Résultats d'exécution du programme d'un récepteur VOR mobile.

➤ Interprétation des résultats :

La chaîne 1 représente la puissance de signal, comme nous pouvons le remarquer le signal est sporadique et ceci à cause de la présence des arbres et maisons et tout le reste sur le chemin vers la station VOR.

La chaîne 2 représente la variation de l'azimut entre la station et le récepteur mobile. dans la 1^{er} partie du graphique le récepteur dirige droit vers la station , une accélération de vitesse de récepteur nous donne une variation remarquable de l'azimut au voisinage de zero. A la 2eme partie du graphique le récepteur conduis vers le nord puis s'eloigne de la station, ce qui donne un signal très faible.

IV.4 CALCUL ET SIMULATION DES ERREURS INTRINSEQUES A L' EQUIPEMENT VOR

Nous avons utilisé le Microsoft Excel comme le montre la figure suivante pour calculer, simuler et dessiner les diagrammes de rayonnement de la plupart des erreurs pour enfin donner les conséquences et les réglages appropriés pour chaque type.

1	α degré	α radian	$\cos(\alpha+45)$	$\sin(\alpha+45)$	$0,3 \cos(\alpha+45)$	$0,3 \sin(\alpha+45)$	Ωt	$\pi/4$	$\cos(\Omega t+\pi/4)$	$\cos(\Omega t-\pi/4)$
2	0	0,00	0,707	0,707	0,212132034	0,141421356	0,00	0,79	0,70710678	0,70710678
3	11,25	0,20	0,556	0,831	0,16667107	0,166293922	0,20	0,79	0,55557023	0,83146961
4	22,5	0,39	0,383	0,924	0,11480503	0,184775907	0,39	0,79	0,38268343	0,92387953
5	33,75	0,59	0,195	0,981	0,058527097	0,196157056	0,59	0,79	0,19509032	0,98078528
6	45	0,79	0,000	1,000	1,83772E-17	0,2	0,79	0,79	9,4944E-16	1
7	56,25	0,98	-0,195	0,981	-0,058527097	0,196157056	0,98	0,79	-0,1950903	0,98078528
8	67,5	1,18	-0,383	0,924	-0,11480503	0,184775907	1,18	0,79	-0,3826834	0,92387953
9	78,75	1,37	-0,556	0,831	-0,16667107	0,166293922	1,37	0,79	-0,5555702	0,83146961
10	90	1,57	-0,707	0,707	-0,212132034	0,141421356	1,57	0,79	-0,7071068	0,70710678
11	101,25	1,77	-0,831	0,556	-0,249440884	0,111114047	1,77	0,79	-0,8314696	0,55557023
12	112,5	1,96	-0,924	0,383	-0,27716386	0,076536686	1,96	0,79	-0,9238795	0,38268343
13	123,75	2,16	-0,981	0,195	-0,294235584	0,039018064	2,16	0,79	-0,9807853	0,19509032
14	135	2,36	-1,000	0,000	-0,3	2,4503E-17	2,36	0,79	-1	-8,269E-16
15	146,25	2,55	-0,981	-0,195	-0,294235584	-0,03901806	2,55	0,79	-0,9807853	-0,1950903

Fig.4.34.Méthode de calculs des erreurs.

IV.4.1.Simulation des erreurs avec Microsoft Excel

L'examen du signal variable VOR porteur de l'information d'azimut obtenu par sommation spatiale des bandes latérales cosinus et des bandes latérales sinus en phase entre-elles et en tout point de l'espace, montre le lien entre le calage du VOR et les deux paramètres de l'équation qui sont la phase à l'origine des signaux BF d'une part et l'orientation des diagrammes de rayonnement de l'antenne d'une autre part.

L'équation standard des deux bandes latérales est la suivante :

$$E(t)_{\cos}=E_b \cos(\alpha+45^\circ) \cdot \cos(\Omega t+45^\circ) \cos \omega t$$

$$E(t)_{\sin}=E_b \sin(\alpha+45^\circ) \cdot \sin(\Omega t+45^\circ) \cos \omega t.$$

A l'aide de Microsoft Excel, on a pu visualiser le diagramme de rayonnement du signal VOR idéal, contenant les deux bandes latérales cosinus et sinus. (Voir Fig.IV.34).

On remarque que les lobes des BL sont symétriques les uns les autres, en effet absence de toute erreur qui pourra influencer le rayonnement des BL. Dans ce cas-là on peut dire que le VOR émit un signal idéal.

1	α degré	α radian	$\cos(\alpha+45)$	$\sin(\alpha+45)$	$0,3 \cos(\alpha+45)$	$0,3 \sin(\alpha+45)$	Ωt	$\pi/4$	$\cos(\Omega t+\pi/4)$	$\cos(\Omega t-\pi/4)$	Bl cos sans m	Bl sin sans m
2	0	0,00	0,707	0,707	0,212132034	0,141421356	0,00	0,79	0,70710678	0,70710678	0,5	0,5
3	11,25	0,20	0,556	0,831	0,16667107	0,166293922	0,20	0,79	0,55557023	0,83146961	0,308658284	0,691341716
4	22,5	0,39	0,383	0,924	0,11480503	0,184775907	0,39	0,79	0,38268343	0,92387953	0,146446609	0,853553391
5	33,75	0,59	0,195	0,981	0,058527097	0,196157056	0,59	0,79	0,19509032	0,98078528	0,038060234	0,961939766
6	45	0,79	0,000	1,000	1,83772E-17	0,2	0,79	0,79	9,4944E-16	1	5,816E-32	1
7	56,25	0,98	-0,195	0,981	-0,058527097	0,196157056	0,98	0,79	-0,1950903	0,98078528	0,038060234	0,961939766
8	67,5	1,18	-0,383	0,924	-0,11480503	0,184775907	1,18	0,79	-0,38268343	0,92387953	0,146446609	0,853553391
9	78,75	1,37	-0,556	0,831	-0,212132034	0,141421356	1,37	0,79	-0,55557023	0,83146961	0,308658284	0,691341716
10	90	1,57	-0,707	0,707	-0,212132034	0,141421356	1,57	0,79	-0,70710678	0,70710678	0,5	0,5
11	101,25	1,77	-0,831	0,924	-0,247516023	0,11480503	1,77	0,79	-0,83146961	0,92387953	0,691341716	0,308658284
12	112,5	1,96	-0,924	0,981	-0,277202058	0,058527097	1,96	0,79	-0,92387953	0,98078528	0,853553391	0,146446609
13	123,75	2,16	-0,981	0,981	-0,292398229	0,000000000	2,16	0,79	-0,98078528	0,98078528	0,961939766	0,038060234
14	135	2,36	-1,000	0,924	-0,299999999	-0,11480503	2,36	0,79	-1,00000000	0,92387953	1	-1,0131E-31
15	146,25	2,55	-0,981	0,831	-0,292398229	-0,058527097	2,55	0,79	-0,98078528	0,83146961	0,961939766	0,038060234
16	157,5	2,75	-0,924	0,707	-0,277202058	-0,11480503	2,75	0,79	-0,92387953	0,70710678	0,853553391	0,146446609
17	168,75	2,95	-0,831	0,556	-0,247516023	-0,16667107	2,95	0,79	-0,83146961	0,55557023	0,691341716	0,308658284
18	180	3,14	-0,707	0,407	-0,212132034	-0,141421356	3,14	0,79	-0,70710678	0,40710678	0,5	0,5
19	191,25	3,34	-0,556	0,258	-0,16667107	-0,11480503	3,34	0,79	-0,55557023	0,25841961	0,308658284	0,691341716
20	202,5	3,53	-0,383	0,109	-0,11480503	-0,058527097	3,53	0,79	-0,38268343	0,10973953	0,146446609	0,853553391
21	213,75	3,73	-0,195	-0,040	-0,058527097	-0,000000000	3,73	0,79	-0,19509032	-0,04078528	0,038060234	0,961939766
22	225	3,93	0,000	-0,109	-0,000000000	-0,11480503	3,93	0,79	0,00000000	-0,10973953	1,96995E-31	1
23	236,25	4,12	0,195	-0,258	0,058527097	-0,196157056	4,12	0,79	0,19509032	-0,9807853	0,038060234	0,961939766
24	247,5	4,32	0,383	-0,407	0,11480503	-0,18477591	4,32	0,79	0,38268343	-0,9238795	0,146446609	0,853553391

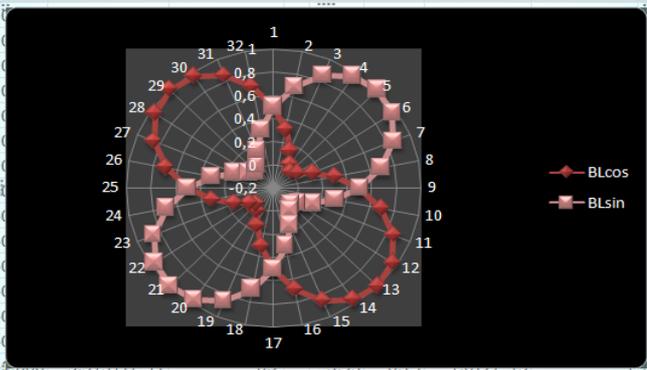


Fig.IV.35 : Diagramme de rayonnement des BL cosinus et sinus dans le cas idéal.

IV.4.2 Erreurs intrinsèques à l'équipement sol :

Dans cette partie, nous allons simuler les différentes erreurs intrinsèques dues à l'équipement sol, et cela à l'aide d'un tableau Excel, où on injecte les différents termes exprimant les équations de ces erreurs.

IV.4.2.1 Erreur Duantale Cosinus Dc :

Etant donné et les équations des signaux rayonnés s'expriment par :

$$E(t)_{ref} = E_p \cdot f(\alpha) \cdot [1 + m \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t$$

$$E(t)_{cos} = E_b \cdot [\cos(\alpha + 45^\circ) - k_c] \cdot \cos(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos \omega t$$

$$E(t)_{ref} = E_b \cdot \sin(\alpha + 45^\circ) \cdot \sin(\Omega t + 45^\circ) \cos \omega t.$$

Et l'équation du diagramme de rayonnement de l'antenne « cosinus » affecté du défaut s'écrit :

$$|g(\alpha)| = |[\cos(\alpha + 45^\circ) - k_c]|$$

La simulation de cette erreur nous a permis d'avoir ce diagramme de rayonnement en « huit » qui est déformé, il est caractérisé par une dissymétrie des deux lobes faisant apparaître une déviation des deux directions de nul de champ qui ne sont plus alignées (voir Fig.IV.36) :

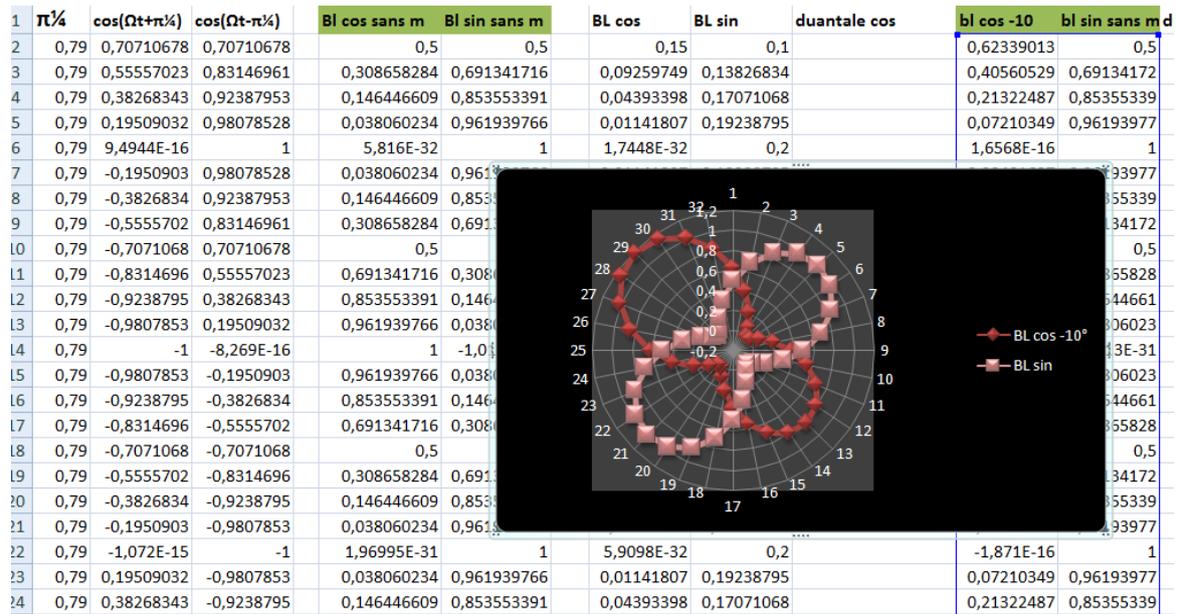


Fig.IV.36 : Diagramme de rayonnement de l'erreur Duantale Cosinus Dc.

➤ Solutions :

Pour l'antenne du CVOR la correction de l'erreur peut être obtenue en agissant en sens inverse et légèrement sur la position des courts-circuits des deux fentes de l'antenne « cosinus ».

La pratique a montré qu'il faut lever le court-circuit « de la fente rayonnant le plus » et baisser le court-circuit « de la fente rayonnant le moins ».

IV.4.2.2 Erreur Duantale Sinus Ds :

Sachant que c'est une erreur qui présente deux maximums dans les azimuts suivants : 135° et 315°, Les équations des signaux rayonnés sont :

$$E(t)_{ref} = E_p \cdot f(\alpha) \cdot [1 + m \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t$$

$$E(t)_{cos} = E_b \cdot \cos(\alpha + 45^\circ) \cdot \cos(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos \omega t$$

$$E(t)_{ref} = E_b \cdot [\sin(\alpha + 45^\circ) - k_s] \cdot \sin(\Omega t + 45^\circ) \cdot \cos \omega t$$

Et l'équation du diagramme de rayonnement de l'antenne « sinus » affecté du défaut s'écrit :

$$|g(\alpha)| = |[\sin(\alpha + 45^\circ) - k_s]|$$

En simulant cette erreur, on obtient le diagramme de rayonnement suivant :

1	$\pi/4$	$\cos(\Omega t + \pi/4)$	$\cos(\Omega t - \pi/4)$	Bl cos s	Bl sin sans r	BL co	BL sin	duar	bl cos	bl sin	duantale sinus	BL cos	BL sinus -10°
2	0,79	0,70710678	0,70710678	0,5	0,5	0,15	0,1	0,623	0,5			0,5	0,62339013
3	0,79	0,55557023	0,83146961	0,3087	0,69134	0,09	0,138	0,406	0,7			0,30865828	0,83643316
4	0,79	0,38268343	0,92387953	0,1464	0,85355	0,04	0,171	0,213	0,9			0,14644661	1,01477037
5	0,79	0,19509032	0,98078528	0,0381	0,96194	0,01	0,192	0,072	1			0,03806023	1,1330868
6	0,79	9,4944E-16	1	6E-32	1	0	0,2	2E-16	1			5,816E-023	1,1745
7	0,79	-0,1950903	0,98078528	0,0381	0,96194	0,01	0,192	0,004	1			0,03806023	1,1330868
8	0,79	-0,3826834	0,92387953	0,1464	0,85355	0,04	0,171					0,14644661	1,01477037
9	0,79	-0,5555702	0,83146961	0,3087	0,69134	0,09	0,138					0,30865828	0,83643316
10	0,79	-0,7071068	0,70710678	0,5	0,5	0,15	0,1					0,5	0,62339013
11	0,79	-0,8314696	0,55557023	0,6913	0,3087	0,09	0,138					0,69134	0,40560529
12	0,79	-0,9238795	0,38268343	0,8536	0,1464	0,04	0,171					0,85339	0,21322487
13	0,79	-0,9807853	0,19509032	0,9619	0,0381	0,01	0,192					0,93977	0,07210349
14	0,79	-1	-8,269E-16	1	-1	0	0,2					1	-1,443E-16
15	0,79	-0,9807853	-0,1950903	0,9619	0,0381	0,01	0,192					0,93977	0,00401697
16	0,79	-0,9238795	-0,3826834	0,8536	0,1464	0,04	0,171					0,85339	0,07966835
17	0,79	-0,8314696	-0,5555702	0,6913	0,3087	0,09	0,138					0,69134	0,21171128
18	0,79	-0,7071068	-0,7071068	0,5	0,5	0,15	0,1					0,5	0,37660987
19	0,79	-0,5555702	-0,8314696	0,3087	0,69134	0,09	0,138					0,30865828	0,54625027
20	0,79	-0,3826834	-0,9238795	0,1464	0,85355	0,04	0,171					0,14644661	0,69233641
21	0,79	-0,1950903	-0,9807853	0,0381	0,96194	0,01	0,192					0,03806023	0,79079273
22	0,79	-1,072E-15	-1	2E-31	1	0	0,2					1,9099E-31	0,8255
23	0,79	0,19509032	-0,9807853	0,0381	0,96194	0,01	0,192	0,072	1			0,03806023	0,79079273
24	0,79	0,38268343	-0,9238795	0,1464	0,85355	0,04	0,171	0,213	0,9			0,14644661	0,69233641

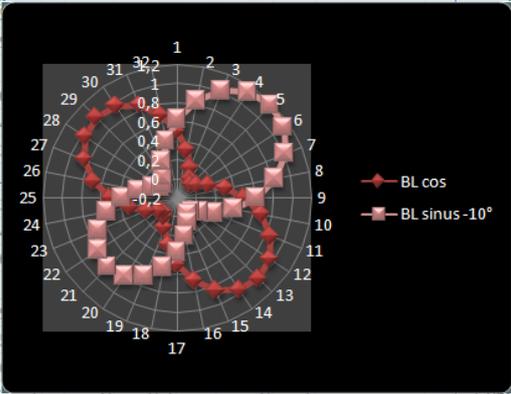


Fig.IV.37 : Diagramme de rayonnement de l'erreur Duantale Sinus Dc.

➤ Solutions :

Pour l'antenne du CVOR la correction de l'erreur peut être obtenue en agissant en sens inverse et légèrement sur la position des courts-circuits des deux fentes de l'antenne « cosinus ».

IV.4.2.3 Erreur Quadrentale semi-cardinale antenne (QS_{ant}) :

C'est une erreur qui est maximale dans les points semi-cardinaux, elle est due à un défaut d'orthogonalité des diagrammes de rayonnement de l'antenne VAR.

Les équations des diagrammes de rayonnement des antennes VAR affectées du défaut s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} |g(\alpha)| = |\cos(\alpha + 45^\circ + \alpha_d)| \\ |h(\alpha)| = |\sin(\alpha + 45^\circ - \alpha_d)| \end{array} \right.$$

Les directions de nul de champ des antennes ne sont plus « 315-135 » pour l'une et « 45-25 » pour l'autre, mais sont décalées par rapport à leur valeur nominale et en sens inverse l'une par rapport à l'autre.

Le Diagramme de rayonnement de l'erreur Quadrentale semi-cardinale antenne obtenu est de la forme suivante :

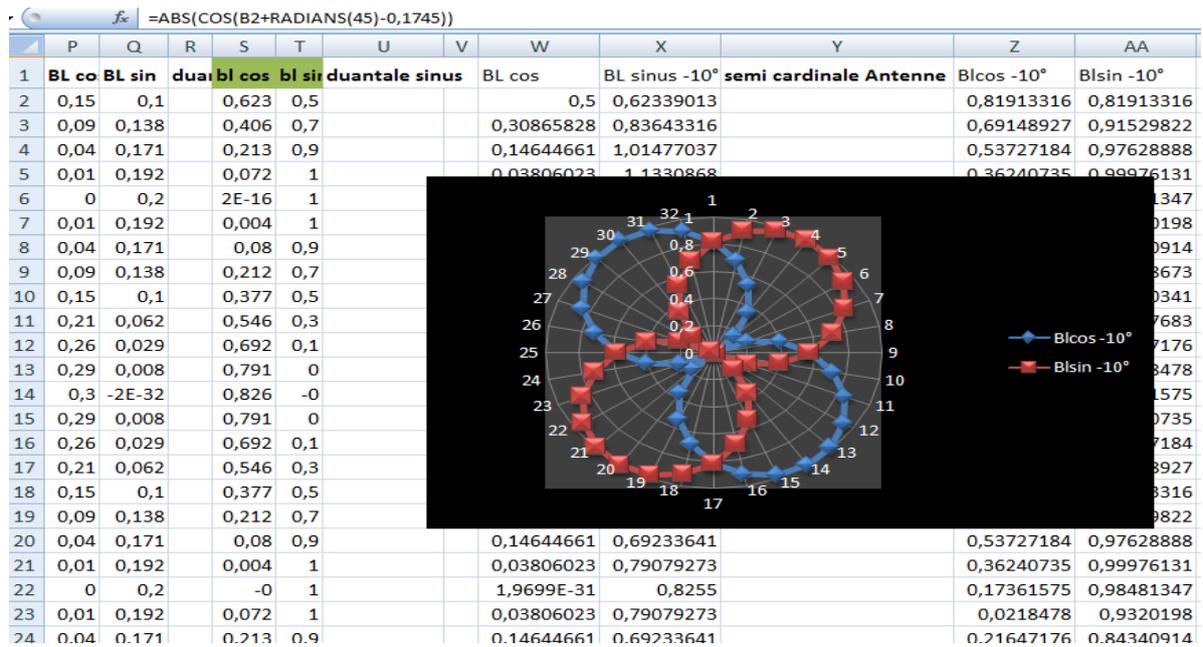


Fig.IV.38 : Diagramme de rayonnement de l'erreur Quadrentale semi-cardinale antenne (QS_{ant})

➤ **Conséquences :**

- Les directions de nul de champ des antennes ne sont plus « 315 ; 135 » pour l'une et « 45 ; 225 » pour l'autre, mais sont décalées par rapport à leur valeur nominale et en sens inverse l'une par rapport à l'autre, la valeur de ce décalage Δα au signe près est égale à α_d. On montre également qu'au signe près, l'amplitude de l'erreur est Δα.
- Les directions de nul de champ de VOR mesurée est respectivement :

$$\alpha_1 = 45 - \alpha_d \quad , \quad \alpha_2 = 135 + \alpha_d \quad , \quad \alpha_3 = 225 - \alpha_d \quad , \quad \alpha_4 = 315 + \alpha_d$$

- Dans ces directions de nul de champ, la phase VOR mesurée est respectivement :

$$\Delta\phi_1 = 45 \quad , \quad \Delta\phi_2 = 135 \quad , \quad \Delta\phi_3 = 225 \quad , \quad \Delta\phi_4 = 315$$

- L'erreur correspondante (ε = Δφ - α) est :

$$\epsilon_1 = + \alpha_d \quad , \quad \epsilon_2 = - \alpha_d \quad , \quad \epsilon_3 = + \alpha_d \quad , \quad \epsilon_4 = - \alpha_d$$

➤ **Solutions:**

C'est une erreur directement liée à la géométrie même de l'antenne, dans le cas du CVOR à la précision d'assemblage des tubes, il n'y a pas de réglage, cette erreur est ce qu'elle est, on peut simplement vérifier que les directions de nul de champ sont dans les tolérances fixées par le constructeur.

IV.4.2.4 Erreur Quadrantale Cardinale Qc :

C'est une erreur qui est maximum dans les points cardinaux. Elle provient de l'inégalité d'amplitude des bandes latérales émises.

L'équation des signaux rayonnés affectés de différents défauts devient :

$$e(t)_{ref} = E_p \cdot f(\alpha) \cdot [1 + m \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t$$

$$e(t)_{cos} = E_{b1} \cdot \cos(\alpha + 45^\circ) \cdot \cos(\Omega t + 45^\circ) \cos(\omega t + \phi_1)$$

$$e(t)_{sin} = E_{b2} \cdot \sin(\alpha + 45^\circ) \cdot \sin(\Omega t + 45^\circ) \cos(\omega t + \phi_2)$$

la simulation de cette erreur nous permet de visualiser le diagramme de rayonnement de signal affecté par cette erreur :

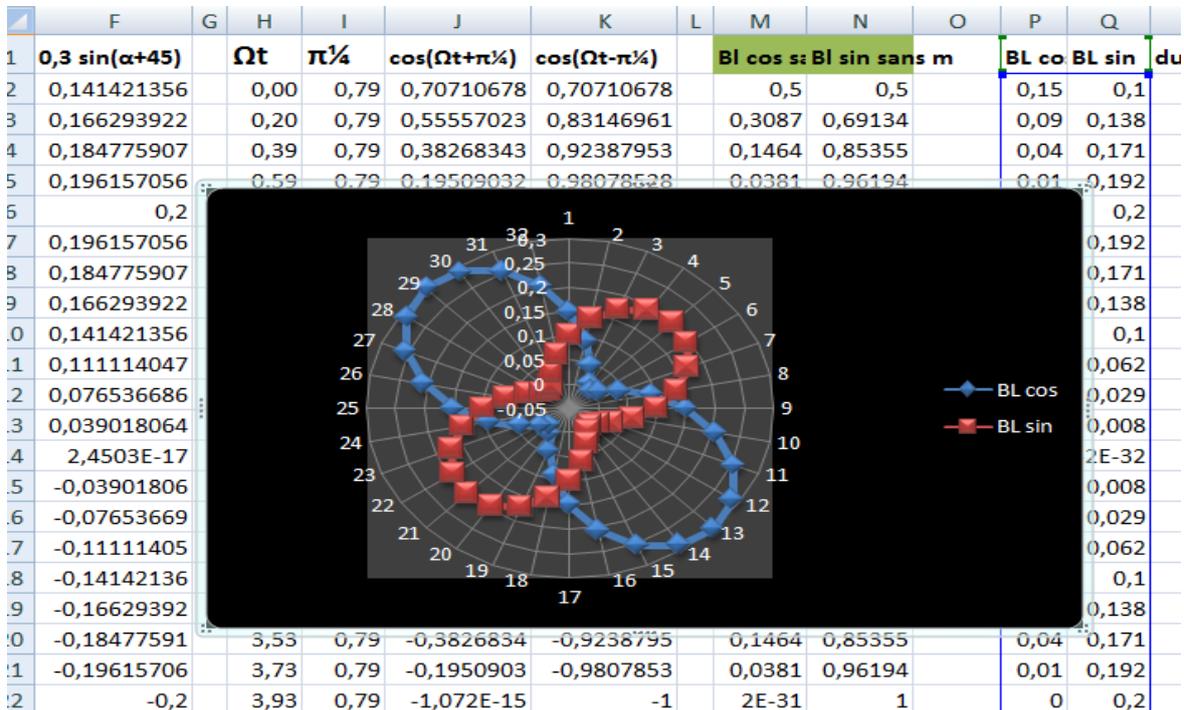


Fig.IV.39 : Diagramme de rayonnement de l'erreur Quadrantale Cardinale Qc.

➤ Conséquences :

Les amplitudes effectives des bandes latérales rayonnées deviennent respectivement $E_{b1} \cos \phi_1$ et $E_{b2} \cos \phi_2$, le poids de cette différence d'amplitude dans l'erreur VOR est maximum dans les points cardinaux lorsque l'amplitude des deux bandes latérales est comparable (les BL sont multipliées par le même coefficient : $\frac{1}{2} = \cos 45^\circ = \sin 45^\circ$) et, au contraire, nulle dans les points semi-cardinaux où une des deux bandes latérales selon le cas est d'amplitude nulle.

➤ Remèdes :

La correction de cette erreur se fera en reprenant les réglages des trois paramètres responsables de cette erreur, en respectant l'ordre suivant ROS, phase HF et égalité d'amplitude.

IV.4.2.5 Erreur Constante Ec :

L'erreur constante globale étant la somme des termes : $E_c = E_{c_{BF}} + E_{c_{ant}}$.

Avec : $E_{c_{BF}} = 45^\circ - \phi_0$ et $E_{c_{ant}} = \alpha_0 - 45^\circ$.

Les équations des signaux rayonnés ou existe une erreur constante sont données par :

$$E(t)_{ref} = E_p \cdot f(\alpha) \cdot [1 + m \cdot \cos(\omega_0 t + n \sin \Omega t)] \cos \omega t$$

$$E(t)_{cos} = E_b \cdot \cos(\alpha + (45^\circ + \alpha_0)) \cdot \cos(\Omega t + 45^\circ) \cos \omega t$$

$$E(t)_{sin} = E_b \cdot \sin(\alpha + (45^\circ + \alpha_0)) \cdot \sin(\Omega t + 45^\circ) \cos \omega t$$

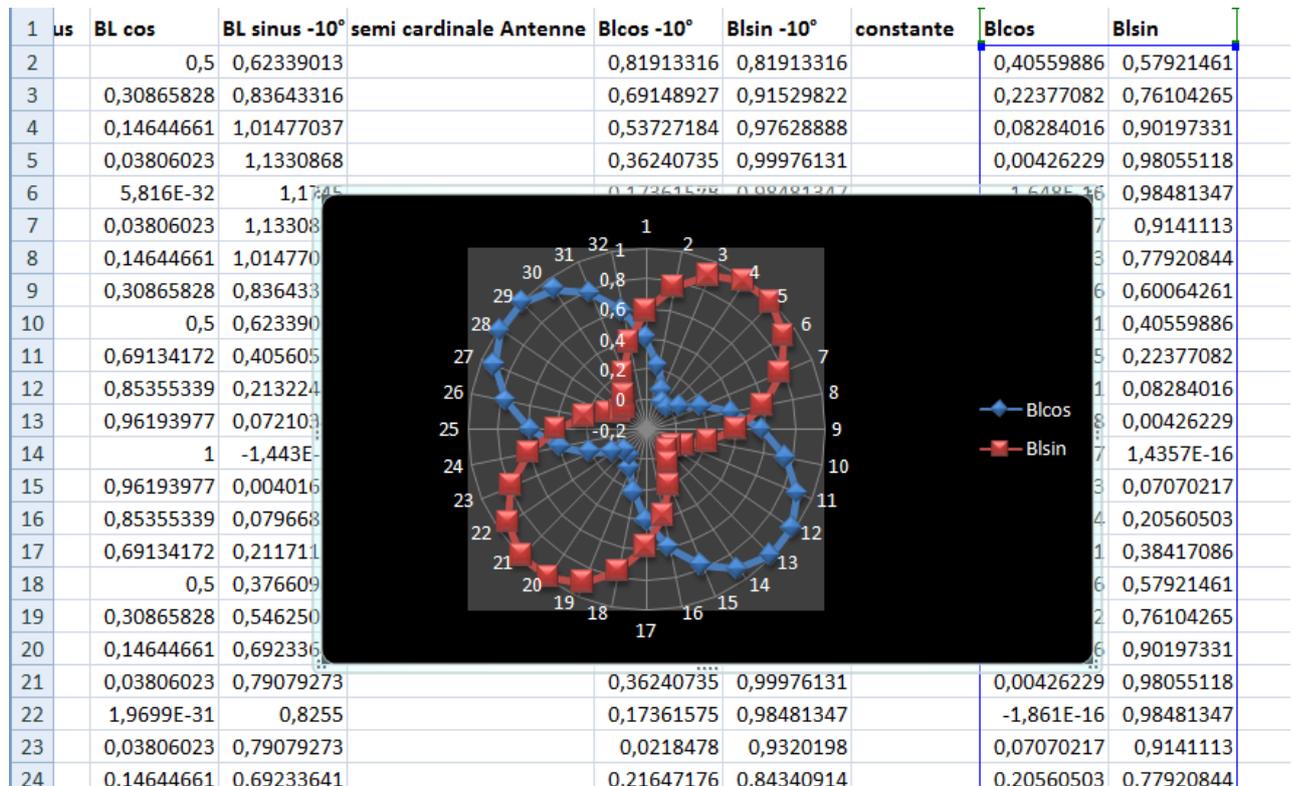


Fig.IV.40 : Diagramme de rayonnement de l'erreur constante Antenne.

➤ **Remèdes :**

Le relevé d'une courbe d'erreur nous fournit l'erreur constante globale, pour corriger cette erreur constante il est nécessaire de faire la part de l'erreur constante BF, de celle due à l'antenne.

Or il est toujours possible de mesurer l'erreur constante BBF, pour cela il suffit de ne rayonner qu'une seule des deux BL, par exemple la BL sinus, de placer le capteur de mesure à peu près dans le maximum de champs de cette antenne $\alpha=45^\circ$, la phase VOR $\Delta\phi$ mesurée est alors celle de cette BL. On en déduit $E_{c_{BF}}=\Delta\phi-45^\circ$ et $E_{c_{ant}}=E_c-E_{c_{BF}}$.

Deux cas sont à considérer quand il s'agit de corriger une erreur constante antenne, selon que le relevé de la courbe d'erreur est effectué à partir de plots de mesure implantés autour de l'antenne ou que le relevé est effectué à partir d'un capteur fixe et d'une antenne montée sur une colonne rotative munie d'une rose de mesure. Dans le premier cas de l'erreur constante est à corriger en reprenant le positionnement de l'antenne, dans le deuxième cas il s'agit d'un mauvais calage de rose de mesure qui doit être repris en faisant coïncider l'origine de la rose avec la direction de référence antenne communément appelé « nord antenne » (direction de référence propre de l'antenne)

IV.5 Conclusion :

Pour clôturer ce chapitre qui a représenté une réalisation de deux récepteurs, le 1^{er} était un récepteur FM dans le but d'introduire et mieux comprendre le fonctionnement des filtres et des démodulateurs software sur l'interface de GNU Radio, le deuxième s'agit d'un récepteur de signal VOR qui peut être utilisé dans l'encadrement pédagogique vu les prix très élevés des récepteurs professionnels utilisés par les ingénieurs de DETR.

En dernier, on a fait une approche visant à expliquer une méthode de calculs et les remèdes des erreurs qui peuvent se produire pour un système VOR, on tire les conclusions suivantes :

- Une station VOR doit être maintenue chaque 6 mois minimum.
- La moindre erreur peut causer des anomalies énormes pour le signal.
- Chaque type d'erreur a une manière précise de réglage qui nécessite le déplacement à la station.

CONCLUSION GENERALE

Durant le présent projet de fin de cycle, il nous a été confié la mission, au sein de l'équipe de service radionavigation à la direction technique de la navigation aérienne de l'ENNA, d'étudier le système VOR. Notre travail a été décomposé en deux étapes majeures. La première avait pour but de réaliser un récepteur de signal VOR à l'aide d'une clé d'acquisition RTL-SDR. Le second travail avait pour but l'étude des erreurs VOR et la présentation d'un canevas de calculs d'erreurs et de diagrammes de rayonnements.

Le récepteur VOR réalisé, démontre la capacité à implémenter des traitements en temps réel sur le flux d'informations issu. Il nous permet de visualiser la variation de l'azimut entre le récepteur et la station dont nous pouvons voir si nous sommes sur le chemin vers la station ainsi la puissance de signal. Le canevas sur Microsoft Excel, nous permet de dessiner les courbes d'erreurs et les diagrammes de rayonnement des deux bandes latérales sinus et cosinus à la présence des différentes erreurs dans le but de détecter le type de l'erreur et procéder aux réglages appropriés pendant la maintenance d'une station.

Le travail que nous avons réalisé pourrait être complété et poursuivi sous différents aspects notamment :

- Ajouter au récepteur réalisé la visualisation des autres paramètres comme la valeur exacte de l'azimut, l'identifiant de la station, détection de brouillage, sensibilité.
- Simulation des autres composants électroniques de la station VOR comme le distributeur de puissance et le module de surveillance (Monitoring).
- L'exploitation de GNU Radio sur des signaux plus intéressants que sont le GPS ou le GSM serait ambitieuse, certainement source de nombreuses découvertes.
- Automatisation de la méthode de calcul d'erreurs par une application.

L'élaboration de ce travail nous a permis, d'approfondir les connaissances et le savoir-faire acquis durant les années de la formation à l'IAESB, et d'autre part, de préparer notre intégration à la vie professionnelle et de se situer sur le marché de radionavigation et télécommunication.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Cours radionavigation, ESMA, Ecole Supérieure des Métiers de l'Aéronautique, Édition 01-06.
- [2] E.SARTORIUS, Radionavigation, Institut France Aviation (Ecole INFRA), Paris, 1972.
- [3] B.SERABIAN, La Radionavigation, Editions Du Cosmos, 1969.
- [4] J-P CORBIER, Les Balises De Radionavigation, 2012.
- [5] VOR Tome II, Le système, Département d'électronique de l'ENAC.
- [6] DVOR NORMAC VRB-53D, Cours de Formation : Aides à la Navigation / Mai 2015, fait par Pascal Le Hérissé & R. Torres Benito.
- [7] Radio navigation et équipements sol : VOR : Principe, Emission et Maintenance, Licence Pro Maintenance Aéronautique, Institut de Maintenance Aéronautique et Radionav et Com, Université de Bordeaux I.
- [8] Doppler Very High Frequency Omnidirectional Radio Range, Edition THALES, January 2002, Germany.
- [9] GNU Radio Tutorials Labs 1–5, Balint Seeber et Ettus Research, Version 1.0 (18th April 2014).
- [10] www.maintenance-aeronautique.com
- [11] gnuradio.org
- [12] <http://www.joshknows.com/grc>
- [13] <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/OutOfTreeModules>

Annexe 01 : Etablissement National de la Navigation Aérienne ENNA

I. Introduction

L'ENNA (Etablissement Nationale de la Navigation Aérienne) que nous allons présenter, dispose d'un ensemble d'équipements et de personnels permettant de bien maîtriser la navigation aérienne. Cette présente annexe est divisée en deux parties, dont la première est consacrée à une présentation générale de l'ENNA et ses différents services. La deuxième partie s'agit d'une description du département technique DETR.

I. PRESENTATION DE L'ENNA

L'établissement national de la navigation aérienne (ENNA) dans sa nature juridique, est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), sous tutelle du ministère des transports, il est dirigé par un directeur général et administré par un conseil d'administration.

II.1. Historique

Depuis l'indépendance, cinq organismes ont été chargé de la gestion, de l'exploitation et du développement de la navigation aérienne en Algérie : OGSA, ONAM, ENEMA, ENESA, ENNA.

De 1962 à 1968 c'est l'Organisation de Gestion et de Sécurité Aéronautique (OGSA), organisme Algéro-Français, qui a géré l'ensemble des services d'Exploitation de l'Aviation Civile en Algérie.

Le 1 Janvier 1968, l'OGSA a été remplacé par l'Office de la Navigation Aérienne et de la Météorologie (ONAM). Ce dernier a été remplacé, en 1969, par l'Etablissement National pour l'Exploitation Météorologique et Aéronautique (ENEMA) qui a géré la navigation aérienne jusqu'à 1983.

En 1975, les activités de météorologie ont été transférées à l'Office National de Météorologie créé le 29 Avril 1975, sous forme d'Etablissement Public à caractère administratif.

Le décret N°83.311 du 07/05/1983 a réaménagé les structures de L'ENEMA et modifié sa dénomination pour devenir ENESA « Entreprise Nationale d'Exploitation et de Sécurité Aéronautique » avec statut d'entreprise nationale à caractère économique. Afin de clarifier les attributions de l'ENESA, il a été procédé aux réaménagements de ses statuts ainsi qu'au changement de dénomination en « ENNA » par décret exécutif N° 91-149 du 18 mai 1991.

I.3. L'organisation de l'ENNA

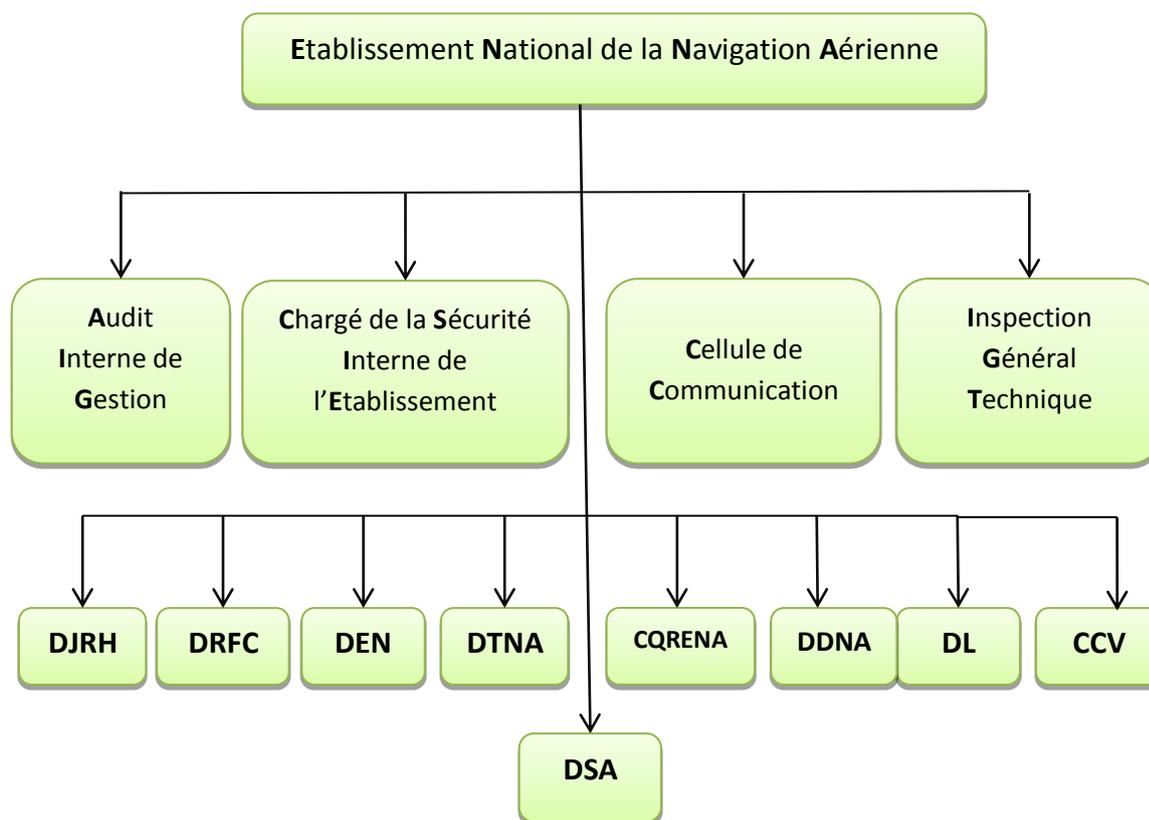


Figure1.1 : Organigramme de l'ENNA

DDNA: Direction du **D**éveloppement de la **N**avigation **A**érienne.

DENA: Direction de l'**E**xploitation de la **N**avigation **A**érienne.

DTNA: Direction **T**echnique de la **N**avigation **A**érienne.

DRFC: Direction des **R**essources, des **F**inances et de la **C**omptabilité.

DJRH : Direction **J**uridique et des **R**essources **H**umaines.

CQRENA : Centre de **Q**ualification, de **R**ecyclage et d'**E**xpérimentation de la **N**avigation **A**érienne.

DL : **D**irection de la **L**ogistique.

CCV: Centre de **C**alibration en **V**ol

DSA : **D**irections de **S**écurité **A**éronautique.

II. Les Départements Techniques de la Navigation Aérienne DTNA

Il comprend à son tour deux départements qui sont :

- Département des équipements de Télécommunication et de radionavigation DETR.
- Département de l'Energie et du Balisage DEB.

Dans cette partie nous intéressons au département radionavigation et télécommunication que nous présenterons au-dessous :

II.1. Service radionavigation

Le service radionavigation est chargé de l'étude, installation et la maintenance des équipements d'aide à la navigation aérienne.

Ces équipements sont répartis en trois catégories :

- La classe des émetteurs : VOR, ILS, NDB, ...etc.
- La classe des récepteurs : Radiogoniomètre, récepteur GPS, ...etc.
- La classe des émetteurs/récepteurs : DME, ...etc.

II.2. Service télécommunication

Ce service est chargé essentiellement de l'installation et la maintenance des équipements télécommunication et assure leurs bons fonctionnements.

II.2.1 Les équipements télécommunication

Les équipements tours sont repartis selon leurs installations comme suit :

- **Les équipements tours**

- Au niveau de la vigie on retrouve : le pupitre qui regroupe les accessoires télécommunications (HP, micro main....). dans certains pupitres on trouve un poste opérateur VCCS qui permet au contrôleur d'accéder à plusieurs fonctions tel que le choix des fréquences.

- Au niveau de la salle radio on retrouve :

- **La baie VHF** : utilisée pour des besoins de contrôle tour et approche, composée de deux émetteurs et deux récepteurs séparés par des basculeurs. La bande de fréquence utilisée couvre : 118-137 Mhz, elle est caractérisée par sa stabilité et sa fiabilité.



Figure1.10: Banc d'essai de la VHF

- **Le VCCS** : c'est un système de traitement, de contrôle et de commutation automatique des voix téléphoniques et radiophoniques issues des différents équipements de télécommunication. Il est composé de trois ensembles :
 - L'équipement central qui a pour rôle de convertir toutes les communications analogiques en signaux numériques et en suite les affecté a leurs propre emplacement.
 - La station de supervision contrôle et supervise le bon fonctionnement de chaque module tout en détectant les alarmes et les erreurs du système, ses dernières seront visualisés au niveau de la visu et corrigé automatiquement par le système.
 - Le poste opérateur définit précédemment.



Figure 1.11 : Armoire du VCCS

- **L'alimentation** : elle alimente tout le matériel de télécommunication, secourue par des batteries pour assurer le fonctionnement permanent des équipements en cas de coupure du secteur.
- **Système d'enregistreur** : permet l'enregistrement et l'archivage de toutes les voix de communication (téléphonique ou radiophonique). Pour des raisons de sécurité. On trouve deux génération l'une est à base de bandes magnétiques, l'autre est informatisée offre plus de capacité et d'option d'enregistrement et d'archivage.



Figure 1.12 : Systèmes d'enregistrement des communications

- **La HF** :

Elle est utilisée comme moyen de secours et pour couvrir les zones désertiques non couverte par l'antenne avancée. La bande de fréquence utilisée est de 3-30 Mhz. Elle est

caractérisée par sa très grande portée (ses ondes utilisent les couches ionosphériques pour se propager), mais pour la même raison elle est influencée par les changements climatiques.



Figure 1.13: Baie radio HF et son antenne.