

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINSTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

**FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR**

**DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE**

**Projet de fin d'étude**

**En vue de l'obtention du diplôme des Etudes Universitaires Appliquées  
(DEUA) en aéronautique**

**OPTION : Avionique**

**THEME**

**ETUDE ET SIMULATION D'UN RECEPTEUR  
NUMERIQUE VOR**

**Présenté par :**

- KERROUCHE Zahia
- CHERIT Nadia

**Dirigé par :**

- Mr S. MEGUELATI

**Promotion 2007/2008**

# SOMMAIRE

<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>2</b>
<b>I. GENERALITES SUR LES MOYENS DE RADIONAVIGATION .....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Historique et évolution d'un système de navigation aérienne .....	3
I.3 Classification des moyens de radionavigation.....	5
I.3.1 Classification géométrique des systèmes .....	5
I.3.2 Classification opérationnelle .....	6
I.4 Définitions de termes de radionavigation .....	7
I.5 Radiophare omnidirectionnel VHF (VOR) .....	8
I.5.1 Principe de fonctionnement.....	9
I.5.2 Emission.....	9
I.5.3 Réception.....	11
I.5.4 Présentation des indications .....	12
I.5.5 Exemple d'utilisation du VOR: homing sur une station .....	13
I.5.6 Caractéristiques générales du VOR.....	14
I.6 Le DME (Distance Measuring Equipment) .....	15
I.6.1 But .....	15
I.6.2 Plan des fréquences .....	15
I.6.3 Codage des signaux .....	16
I.6.4 Principe de la mesure .....	16
I.6.5 Fonctionnement de l'interrogateur/récepteur de bord .....	16
I.6.6 Les caractéristiques du DME .....	17
I.7 L'ILS (Instrument Landing System) .....	18
I.7.1 Description du système .....	18
I.7.2 Principe de fonctionnement du Localizer .....	19
I.7.3 Principe de fonctionnement du Glide Slope .....	20
I.7.4 Fonction Marker .....	21
I.7.5 Capacités opérationnelles .....	21
I.7.6 Emploi de l'ILS .....	21
<b>II. GENERALITES SUR LES MODULATIONS .....</b>	<b>23</b>
II.1 Onde porteuse.....	23
II.2 Informations .....	23
II.2.1 Signal codé.....	23
II.2.2 Signal téléphonique.....	23
II.2.3 Signal image.....	23
II.3 Modulation .....	23
II.4 Modulation en Amplitude (AM) (ondes modulées en amplitude).....	24
II.4.1 Ondes modulées en fréquence .....	24
II.5 Spectre d'une onde modulée .....	25
II.5.1 Modulation d'amplitude (AM) .....	25
II.5.2 Modulation de fréquence (FM).....	27
II.6 Emission et réception .....	28
II.6.1 L'émetteur .....	28
II.6.2 Le Récepteur.....	30
<b>III. GENERALITES SUR LES FILTRES.....</b>	<b>34</b>

III.1 Introduction.....	34
III.2 Généralités .....	34
III.2.1 Filtre idéaux.....	34
III.2.2 Filtre réels.....	34
III.2.3 Fonction de transfert.....	36
III.2.4 Réalisation des filtres analogiques.....	37
III.3 Filtres numériques.....	37
III.3.1 Définition d'un filtre numérique .....	38
III.3.2 Organisation d'un filtre numérique.....	38
III.3.3 Caractéristiques des filtres numériques .....	39
III.4 Les principaux types de filtres numériques .....	39
III.4.1 Filtres à réponse impulsionnelle finie (RIF).....	39
III.4.2 Filtres à réponse impulsionnelle infinie (RII).....	40
III.5 Synthèse des filtres numériques.....	40
III.5.1 Synthèse des filtres RII .....	40
III.5.2 Synthèse des filtres RIF .....	41
<b>IV. SIMULATION D'UN RECEPTEUR VOR NUMERIQUE .....</b>	<b>42</b>
IV.1 Introduction.....	42
IV.2 Description du récepteur classique du VOR.....	42
IV.2.1 Signal VOR .....	42
IV.2.2 Spectre du signal VOR .....	42
IV.2.3 Description du récepteur .....	43
IV.3 Etude du récepteur numérique .....	45
IV.3.1 Choix de la fréquence d'échantillonnage .....	46
IV.3.2 Calcul du déphasage .....	47
IV.4 L'outil guide de Matlab .....	48
IV.5 Description des l'interfaces .....	50
IV.5.1 Interface « EMETTEUR » .....	50
IV.5.2 Interface « RECEPTEUR » .....	51
IV.6 Simulations .....	54
IV.6.1 Simulation interface EMETTEUR .....	54
IV.6.2 Simulation de l'interface RECEPTEUR .....	56
IV.7 Conclusion .....	61
CONCLUSION GENERALE.....	61
ANNEXE.....	62
BIBLIOGRAPHIE.....	64

## LISTE DES FIGURES

- Fig.I.1 : Lignes de position LOP
- Fig.I.2 : Directions relatives à l'aéronef
- Fig.I.3 : Informations VOR (QDR et QDM)
- Fig.I.4 : Signal VOR
- Fig.I.5 : Station sol du VOR
- Fig.I.6 : Rapports de phase entre 30Ref et 30Var
- Fig.I.7 : Schéma synoptique d'un récepteur VOR
- Fig.I.8 : Comparaison de phase
- Fig.I.9 : RMI
- Fig.I.10 : Homing sur station
- Fig.I.11 : Distance DME
- Fig.I.12 : Principe de la mesure
- Fig.I.13 : Interrogations/réponses
- Fig.I.14 : Balisage des voies aériennes
- Fig.I.15 : Composition d'un ILS
- Fig.I.16 : Faisceaux Localizer
- Fig.I.17 : Faisceaux Glide Slope
- Fig.I.18 : Procédure d'atterrissage ILS
- Fig.II.1 : Onde modulée en amplitude
- Fig.II.2 : Onde modulée en fréquence
- Fig.II.3 : Spectre du signal
- Fig.II.4 : Spectre du signal AM (Modulé par un signal téléphonique)
- Fig.II.5 : Spectre du signal FM
- Fig.II.6 : Schéma synoptique d'un émetteur
- Fig.II.7 : Schéma synoptique d'un récepteur direct
- Fig.II.8 : Sélectivité
- Fig.II.9 : Récepteur superhétérodyne
- Fig.III.1 : Les quatre catégories de filtres idéaux
- Fig.III.2 : Effet d'un filtre réel
- Fig.III.3 : Schéma fonctionnel d'un filtre numérique
- Fig.III.4 : Structure d'un filtre RIF
- Fig.III.5 : Structure d'un filtre RII
- Fig.IV.1 : Spectre du signal modulant VOR
- Fig.IV.2 : Schéma-bloc du récepteur
- Fig.IV.3 : Récepteur numérique
- Fig.IV.4 : Organigramme de calcul du déphasage
- Fig.IV.5 : Interface « Emetteur »
- Fig.IV.6 : Interface
- Fig.IV.7 : Indications VOR
- Fig.IV.8 : CRS=60° radial=59°
- Fig.IV.9 : CRS=60° radial=61°
- Fig.IV.10 : CRS=60° radial=239°
- Fig.IV.11 : CRS=60° radial=241°

## INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre de fin de cycle d'étude de technicien supérieur en aéronautique, nous nous sommes intéressées à la simulation d'un démodulateur numérique de signal VOR.

Depuis l'apparition de la navigation, les avions furent munis d'équipement de électroniques leur permettant de recevoir des directives de navigation depuis le sol pour pouvoir s'orienter, suivre de routes, atterrir ou décoller.

Les progrès dans le domaine techniques ont permis de remplacer les systèmes analogiques par des nouveaux systèmes numériques moins couteux, plus fiables, moins volumineux et plus performants.

Notre travail consiste à étudier la numérisation du récepteur VOR qui est un indicateur donnant l'information de QDR au pilote pour pouvoir suivre des itinéraires prédéfinis et de développer une interface de visualisation des signaux du VOR. Nous nous sommes basés sur un algorithme réalisé à l'ENAC de Toulouse.

Dans ce mémoire on s'intéressera surtout à l'étude d'un démodulateur de signal VOR. Ce mémoire est réparti comme suit :

Le premier chapitre traite des généralités sur les moyens de radionavigation en décrivant le fonctionnement des différents systèmes de radionavigation comme le VOR, le DME et l'ILS.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons aux techniques de modulation et à la structure et le fonctionnement général des émetteurs et des récepteurs.

Le troisième chapitre traite des techniques de filtrage analogique et numériques.

Le dernier chapitre est consacré à la description de fonctionnement du récepteur numérique et de l'interface.

# **I.GENERALITES SUR LES MOYENS DE RADIONAVIGATION**

## **I.1 Introduction**

La navigation aérienne est un ensemble de techniques consistant à relever la position d'un mobile (avion), et à déterminer son itinéraire d'un point à un autre. La pratique de navigation demande à la fois, une connaissance des théories qui la régissent, une solide expérience et du jugement personnel.

Etant donné que ce travail s'inscrit dans le domaine de la radionavigation, il est nécessaire de rappeler quelques notions sur les moyens de radionavigation.

## **I.2 Historique et évolution d'un système de navigation aérienne**

### **■ Génération zéro**

Comme son nom l'indique, c'est le début de l'aviation en général, et à cette époque, le pilote utilisait ces facultés physiologiques comme capteurs (vue, l'ouïe)

### **■ Première génération (1950)**

Dans les années cinquante, il y a eu l'apparition des systèmes de navigation et des aides à la navigation et de communication. Il est à signaler qu'à cette époque, les avions volaient à faibles altitudes.

La technologie utilisée était mécanique et électromécanique et donc caractérisée par :

■ Un coût élevé.

■ Une fiabilité médiocre de ces instruments.

### **■ Deuxième génération (1960-1970)**

Cette époque était caractérisée par l'apparition d'avions volant à plus de 40000 pieds et des vitesses dépassant MACH 2 avec l'apparition de la technologie de l'électronique et de l'automatique. Cette génération était caractérisée par :

■ Une intégration partielle des systèmes et des instruments

■ Transmission de données électrique, analogique, et aussi hydromécanique.

**■ Troisième génération (1980)**

Dans les années quatre-vingt, avec l'accroissement du trafic aérien les ingénieurs étaient confrontés de plus aux problèmes de gestion de vol tout en assurant un confort aux passagers et à des coûts raisonnables. Donc cette époque était caractérisée par l'utilisation généralisée de l'informatique, de l'automatique et on remarquera les points essentiels suivants :

- L'automatisation complète des systèmes.
- Intégration totale de tous les systèmes de pilotage (guidage, échanges air-sol, surveillance ...etc.).
- Communication NAV (surveillance ...).
- Gestion du trafic aérien ATM.

Toutes les fonctions sont pilotées par des micro-ordinateurs ou des algorithmes de traitement élaborés à partir des modèles approfondis qui peuvent prendre en compte des données concernant le vol.

Un avion de la troisième génération équipé de ces nouveaux systèmes instruments de navigation aérienne peut assurer les opérations complexes associées, y compris le décollage et l'atterrissage.

Parmi les nouveautés apparus dans la gamme des systèmes de navigation, le système TCAS.

Le système TCAS est un système d'anticollision entre avion /obstacle. Il est à base d'un transpondeur (émetteur/récepteur); son principe est basé sur le calcul d'une distance entre l'avion et le reste de flotte ou avec un obstacle. Pour une distance minimale une alarme sonore et un voyant sont déclenchés, donc le pilote doit changer de cap ou d'altitude.

Ce système offre une certaine autonomie à l'équipage de bord dans la gestion du vol.

La révolution du siècle est l'apparition du GPS qui consiste à donner au pilote des paramètres concernant le vol en temps réel. Les informations fournies au pilote sont : la position, le cap, l'attitude, vitesse avion.

En conclusion, on peut dire que les instruments de radionavigation ne cessent d'évoluer, ce qui rend la tâche du pilote moins ardue.

L'avenir va peut être nous réserver de nouvelles découvertes qui vont faciliter d'avantage la navigation aérienne.

### **I.3 Classification des moyens de radionavigation**

#### **I.3.1 Classification géométrique des systèmes**

Tous les systèmes de radionavigation consistent à mesurer des temps de propagation ou des différences de temps de propagation de signaux radioélectriques. D'après la mesure effectuée et la nature géométrique des lignes de position (LOP), on distingue (figure I-1) :

##### ■Système circulaire

Entre le mobile et la station au sol une mesure de temps de propagation aller-retour dans la distance LOP ; cercles centrés sur le point où s'effectue la mesure (sol ou bord), correspondant à un certain temps  $t$  :

$$t = \frac{2D}{c}$$

où  $c$  est la vitesse des ondes électromagnétiques.

C'est le principe général des radars et des mesures de distance.

##### ■Système hyperbolique

A grande distance, il est avantageux de mesurer à bord la différence des temps de propagation à partir de stations synchrones largement espacées, c'est-à-dire de mesure le temps qui s'écoule entre la réception des deux signaux émis en même temps (ou avec un décalage de temps connu) :

$$t = \frac{D_1 - D_2}{c}$$

Les LOP  $t=\text{constante}$  sont des hyperboles (géodésiques) de foyer des stations.

##### ■Système angulaire

Si la distance entre deux stations devient très petite par rapport aux distances au mobile, les hyperboles peuvent être confondues avec leurs asymptotes ; les LOP sont alors des (radiales) passant par la station et définies par leur azimuth. En pratique, la mesure se fait sur le signal d'interférence des deux signaux radio, dont l'amplitude, par exemple est fonction de l'azimut; on peut former ce signal soit à la réception, soit à l'émission : d'où des diagrammes de réception ou d'émission directifs.



A la réception : diagrammes mobiles en azimuth utilisés par les radiogoniomètres (VDF, ADF).

A l'émission : diagramme fixes des radioalignements (ILS) ou diagrammes tournant des radiophares tournant (VOR).

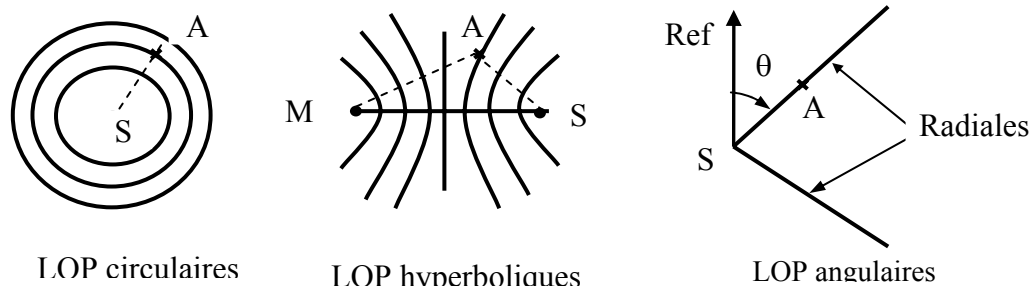


Fig.I.1 : Lignes de position LOP

### **I.3.2 Classification opérationnelle**

On peut classer les aides de radionavigation en trois catégories en fonction de la portée :

#### ■ Aides à grande distance

Ces aides correspondent à des distances supérieures à 300 nautiques miles (Nm). Elles sont utilisables pour la navigation long-courrier au dessus des grandes étendues désertiques ou maritimes; précision attendue de 5 à 10 Nm.

Ces aides ne peuvent utiliser que les fréquences VLF, LF ou MLF et sont de la famille hyperbolique en général : LORAN, Oméga.

#### ■ Aides à moyenne distance

Ces aides correspondent à des distances inférieures à 300 nautiques miles (Nm). Elles sont utilisées pour la navigation sur routes aériennes et dont la précision doit être de quelques NM ou quelque degrés. Fréquences utilisées : MF (radiophares) mais surtout VHF et UHF (VOR/DME). Dans ce cas la portée est limitée à la visibilité radioélectrique fonction de l'altitude de vol.

#### ■ Aides à courte distance, approche et atterrissage

Utilisée dans les régions terminales et au voisinage des aérodromes : les aides à moyenne distance ci-dessus sont utilisées (radiobalises, VOR, DME) mais sont complétées par des aides spécifiques à l'atterrissage (ILS, GCA) capables de précisions supérieures (quelques centaines de mètres, quelques dixièmes de degré).

## I.4 Définitions de termes de radionavigation

Les directions de référence util

isées en aéronautique sont constituées par les directions du nord. On distingue :

■ Le nord vrai (NV)

C'est la direction du pôle nord.

■ Le nord magnétique (NM)

C'est la direction de la projection horizontale du champ magnétique terrestre.

■ Le nord compas (NC)

C'est la direction du nord magnétique indiqué par le compas de bord.

■ Les caps (C)

Ce sont les angles entre la direction de référence et l'axe longitudinal de l'aéronef.

Si la direction de référence est le nord magnétique, on parlera de cap magnétique  $C_m$ .

Le vecteur vitesse porté par le cap est la vitesse propre de l'avion, appelée aussi vitesse air.

■ Les routes (R)

Ce sont les angles de la trajectoire sol avec la direction de référence. Route et cap sont confondus en l'absence de vent et de dérapage. Si la direction de référence est le nord magnétique, on parlera de route magnétique.

Le vecteur vitesse tangent à la route est la vitesse sol.

La dérive  $X$  est l'écart angulaire entre la route et le cap. En vol normal sans dérapage, la dérive est fonction du vent.

La figure I.2 récapitule ces définitions.

Les abréviations suivantes sont très utilisées:

QDM : c'est la route magnétique à suivre pour se diriger vers une station, c'est aussi le relèvement de la station par avion.

QDR : c'est la route magnétique à suivre pour s'éloigner de la station, c'est aussi le relèvement de l'avion par station.

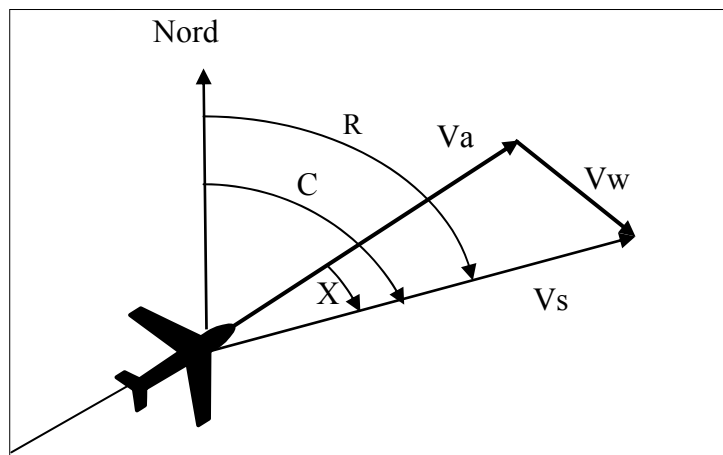


Fig.I.2 : Directions relatives à l'aéronef

### I.5 Radiophare omnidirectionnel VHF (VOR)

Le système VOR (VHF omnidirectional range) a pour vocation de fournir aux pilotes, qui volent avec un plan de vol I.F.R., des signaux radioélectriques (QDR et QDM figure I.3) leur permettant de maintenir leur aéronef sur sa route, de rallier l'aérodrome de destination, et d'exécuter le début de la procédure d'approche. Les VOR utilisés pour le ralliement et la procédure d'approche d'un aérodrome sont installés à l'intérieur de son emprise, ou à proximité. Les VOR qui balisent les itinéraires en route sont installés en pleine campagne, sur des sites choisis pour leur situation par rapport aux itinéraires à baliser et leur aptitude à la diffusion d'ondes radioélectriques.

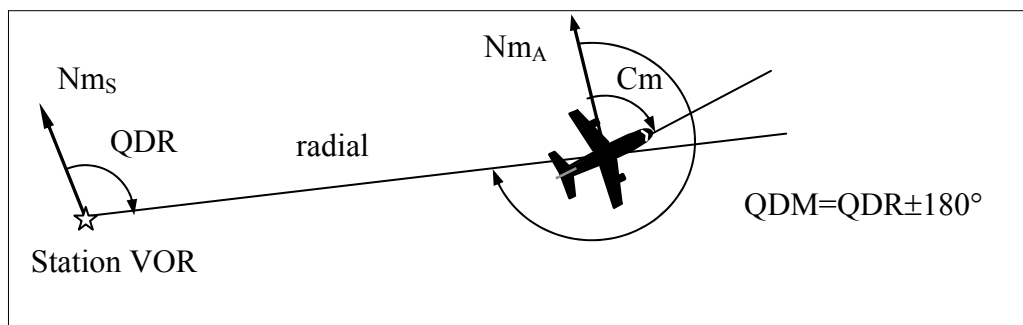


Fig.I.3 : Informations VOR (QDR et QDM)

Le VOR normalisé en 1949 en qualité à la navigation à moyenne distance, est un radiophare tournant. Il émet une fréquence VHF, comprise entre 108 et 118 MHz,

modulée de manière à transmettre simultanément et indépendamment deux signaux à 30 Hz, dont la différence de phase dans un azimut donné caractérise cet azimut. Pour obtenir ce résultat, le VOR rayonne le 30 Hz variable suivant un digramme systématique en forme de cardioïde, animé d'une vitesse de rotation de 30 tours par seconde, et en même temps, suivant un diagramme omnidirectionnel par l'intermédiaire d'une sous porteuse, un signal de 30 Hz de référence dont la phase est identique dans tous les azimuts.

Les émetteurs VOR se réfèrent toujours au nord magnétique, sauf dans les régions polaires. Le récepteur de bord présente la différence de phase mesurée, d'une part, sur un indicateur de relèvement d'autre part sur un sélecteur d'azimut dont la référence au lieu d'être le nord magnétique est une direction choisie par l'utilisateur. Si cette direction choisie est le relèvement de la station VOR le signal de déphasage est nul lorsque l'aéronef fait route sur l'émetteur. Cet équipement est complété par un indicateur d'écart latéral.

Ce système est souvent associé à un équipement de mesure de distance (DME).

### **I.5.1 Principe de fonctionnement**

#### **I.5.2 Emission**

Le réseau de trafic aérien actuel se caractérise par un certain nombre de balise VOR au sol fonctionnant dans la gamme de fréquence de 108 à 118 MHz et ayant une portée allant jusqu'à 300 Km.

Le signal RF émis par un VOR est modulé par deux ondes sinusoïdales de 30 Hz. Celles-ci ont une position de phase donnée l'une par rapport à l'autre qui dépend de la direction dans laquelle le signal est reçu. Le rapport de phase est identique à l'angle géographique entre le nord et la direction de l'avion par rapport à la balise au sol (azimut). L'une des deux oscillations à 30 Hz est totalement indépendante de l'azimut (30 de référence), alors que le rapport de phase entre la seconde oscillation à 30 Hz et le signal de référence varie avec l'azimut (signal variable).

La fréquence du signal, indépendant de la direction (référence) module en FM une sous porteuse de 9960 Hz, avec une déviation maximum de fréquence de 480Hz. La sous porteuse est émise en modulation d'amplitude de la porteuse avec un taux de modulation de 30% par une antenne omnidirectionnelle polarisée horizontalement. De

plus, la porteuse est modulée avec un code d'identité (1020Hz) et également à la fréquence vocale (300 à 3000Hz).

L'expression du signal VOR est la suivante :

$$E = E_0 \cdot \cos(2\pi ft) \left\{ 1 + \underbrace{0,3 \cdot \cos(2\pi \cdot 30t - \theta)}_{30 \text{ Var}} + \underbrace{0,3 \cdot \cos(2\pi \cdot 9960t + 16 \cdot \sin(2\pi \cdot 30t))}_{30 \text{ Ref}} + \underbrace{0,3 \cdot \cos(2\pi \cdot 1020t)}_{\text{indicatif}} \right\}$$

La figure I.4 donne l'allure du signal VOR.

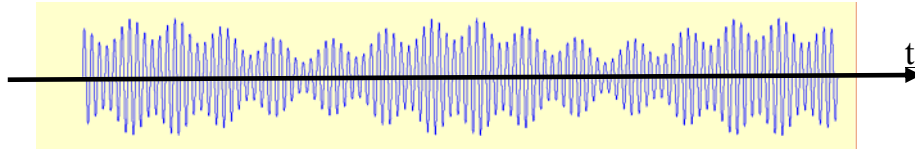


Fig.I.4 : Signal VOR

Le signal variable est émis par deux dipôles croisés recevant des signaux bandes latérales en provenance de deux émetteurs bandes latérales. Ceci a pour résultat un signal dans l'espace, ayant un (diagramme cardioïde) effectuant 30 rotations par seconde.

La figure I-5 donne un schéma synoptique de la station VOR au sol.

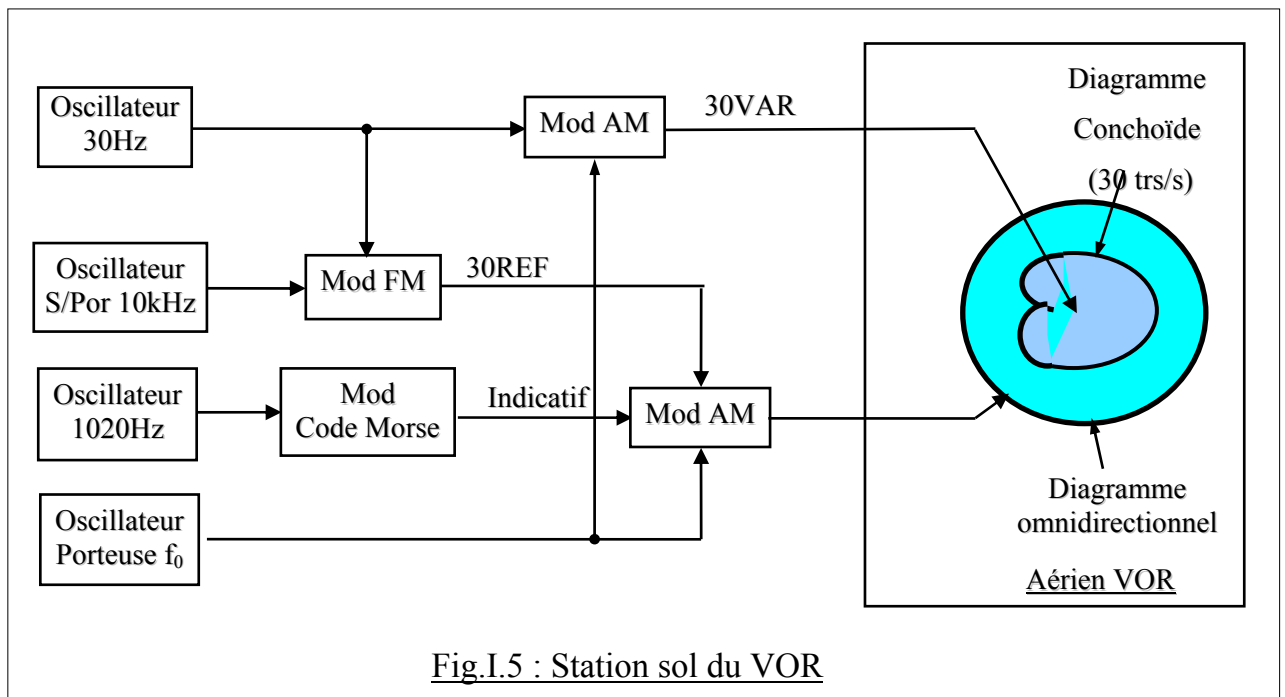


Fig.I.5 : Station sol du VOR

Etant donné que la porteuse est émise par une antenne omnidirectionnelle, la superposition de la porteuse et les bande latérales à 30Hz dans le champ (si la phase est correctement ajustée) produit une modulation d'amplitude pure, dont la phase du signal résultant à 30Hz dépend de l'azimut, par rapport au signal référence à 30Hz. Les rapports de phase entre le signal de référence et le signal variable, dans plusieurs directions sont les suivant :

Sous un angle d'azimut de  $0^\circ$  (Nord), l'angle de phase entre les deux signaux est de  $0^\circ$ , au sud (azimut= $180^\circ$ ), l'angle de phase est de  $180^\circ$ , à l'est (azimut= $90^\circ$ ), il est de  $90^\circ$  et à l'Ouest (azimut= $270^\circ$ ), il est de  $270^\circ$ . Les directions le long desquelles l'angle d'azimut reste constant sont en position radiale par rapport à la balise du VOR (figure I-6).

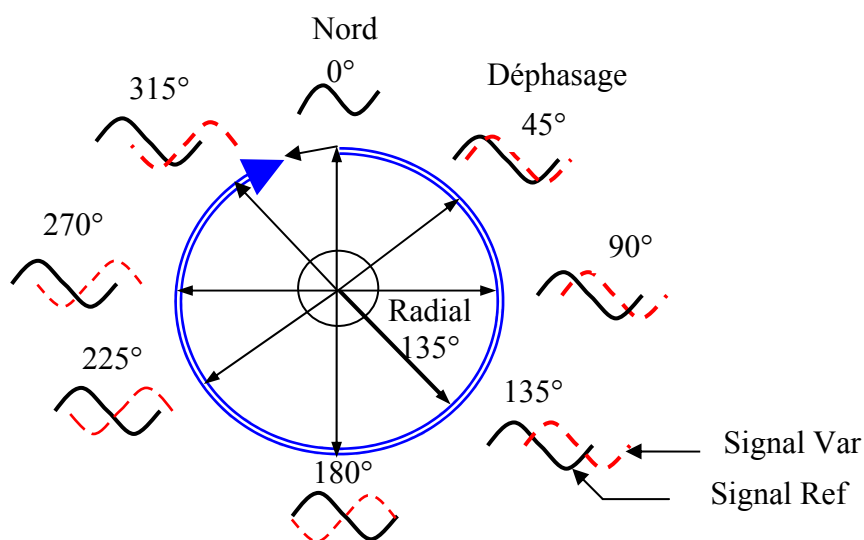


Fig.I.6 : Rapports de phase entre 30Ref et 30Var

### I.5.3 Réception

La détermination de l'azimut de l'avion (QDR) s'effectue au niveau du récepteur de l'avion par comparaison des phases des signaux 30Ref et 30Var :

- L'information de position est contenue dans l'évolution de l'amplitude du signal reçu.
- L'information de référence est contenue dans la modulation 9960Hz de la sous-porteuse VHF.

A la sortie du récepteur (figure I.7), on compare les phases des deux signaux : position et référence. Ils ont l'allure indiquée sur la figure I.8.

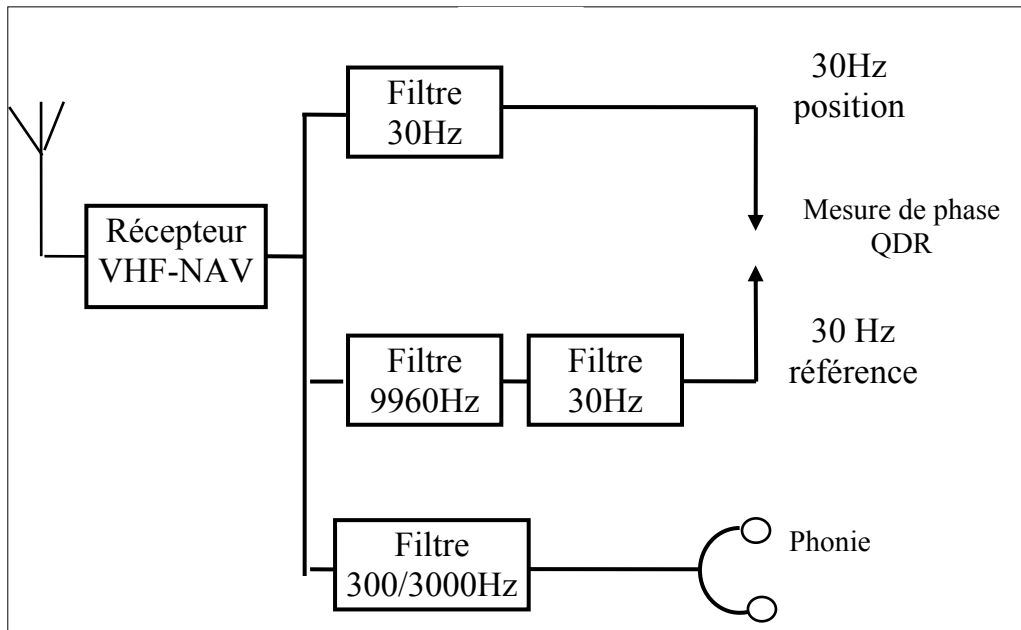


Fig.I.7 : Schéma synoptique d'un récepteur VOR

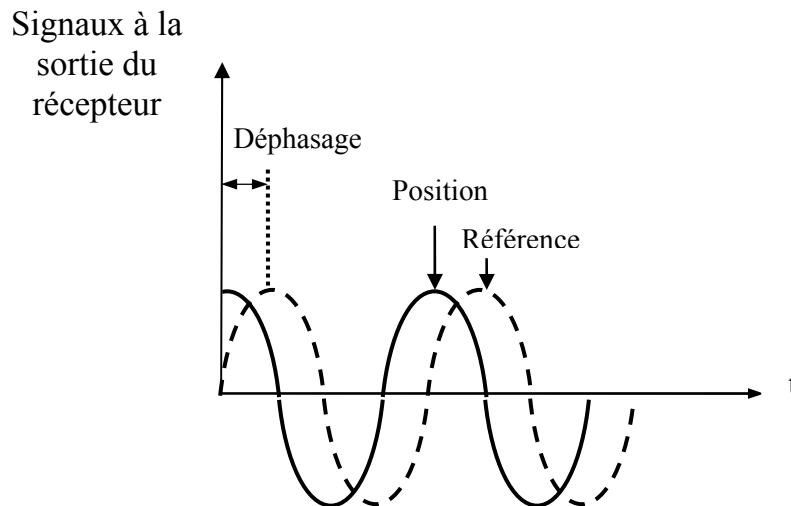


Fig.I.8 : Comparaison de phase

#### **I.5.4 Présentation des indications**

Les indications tirées du signal VOR reçue par l'avion peuvent alimenter soit un directeur de vol, soit les indicateurs plus simples décrits ci-dessous.

Le pilote dispose de plusieurs moyens pour visualiser et exploiter les informations du VOR :

Le RMI ((Radio Magnetic Indicator) qui combine les informations du VOR et du compas magnétique et dont la pointe de l'aiguille indique le QDM (figure I.9).

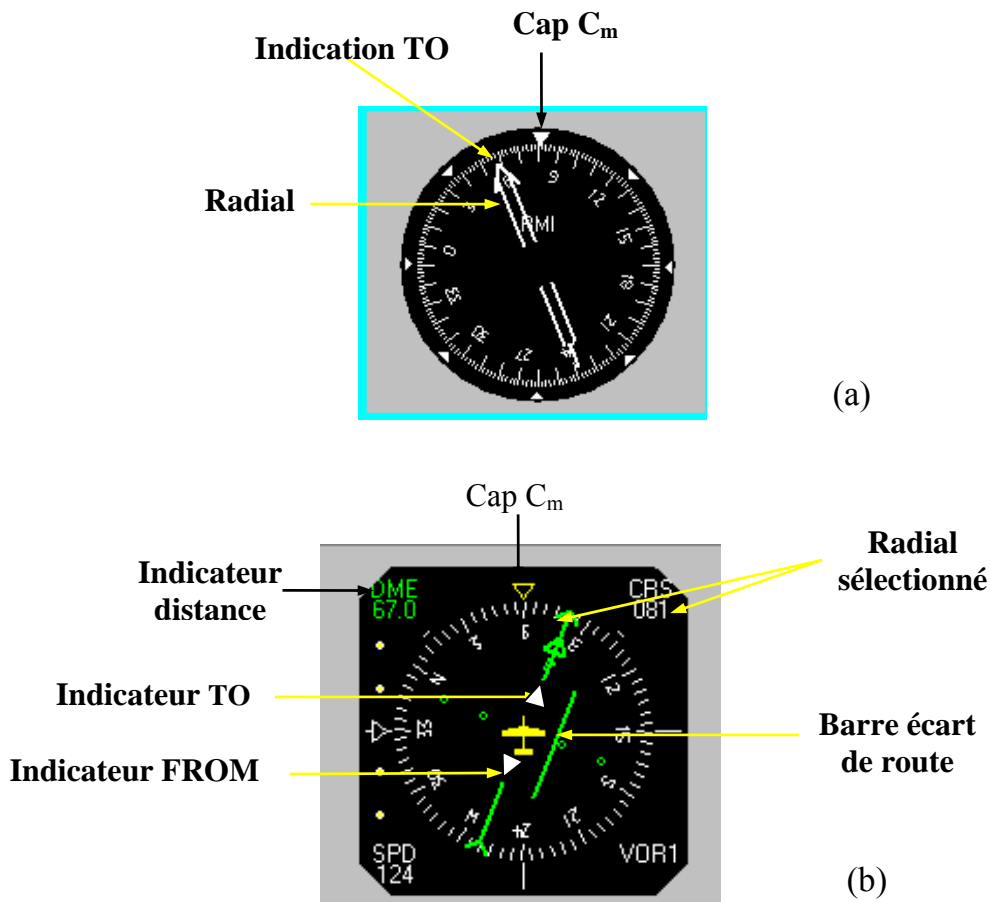


Fig.I.9 : RMI (a) et HSI (b)

Le HSI (Horizontal Situation Indicator) : c'est un instrument qui rassemble plusieurs informations (fig. I.9).

- Le cap magnétique
- L'indication VOR comprenant le radial sélectionné (CRS), l'indication TO/FROM, l'écart angulaire par rapport au radial sélectionné...

### **I.5.5 Exemple d'utilisation du VOR: homing sur une station**

Le VOR est utilisé principalement pour suivre des routes aériennes.

- si l'indicateur TO est apparent, les indications données par l'instrument sont relatives au QDM,
- si l'indicateur FROM est apparent, les indications données par l'instrument sont relatives au QDR,



Un avion se trouve au sud-est d'une station (sur le radial 160) et désire rejoindre la station en suivant la route magnétique 315 le pilote affiche 315 à l'OBS. La figure I.10 fournit les indications des instruments pour 3 positions de l'avion

- Position 1 : l'avion va regagner l'axe,
- position 2 : l'avion est sur l'axe et va vers la station,
- position 3 : l'avion est sur l'axe et a dépassé la station.

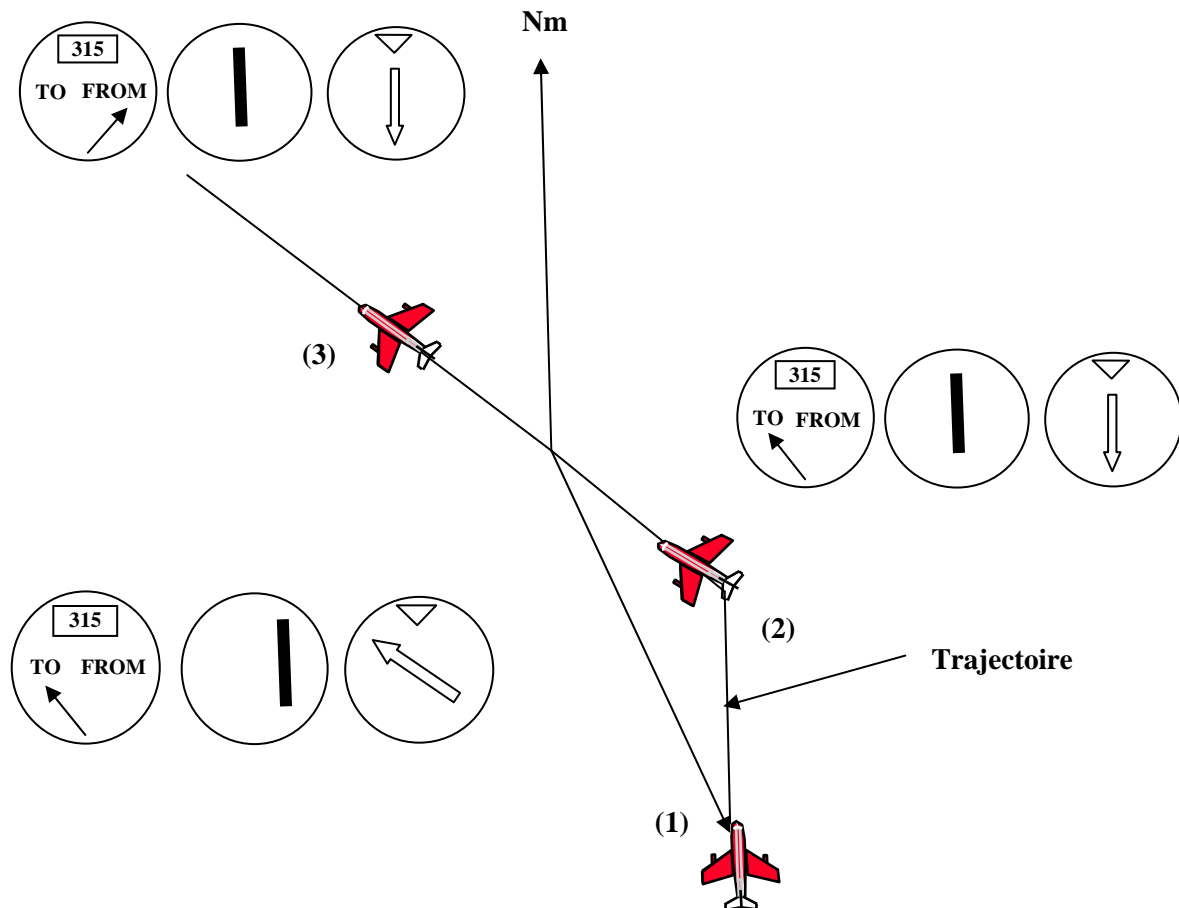


Fig. I.10 : Homing sur station

### **I.5.6 Caractéristiques générales du VOR**

Gamme de fréquences : 108 -118MHz.

- Portée d'utilisation fonction de l'altitude de l'avion.
- Portée maximum : 250 NM.
- Précision : environ 2° et de toute façon supérieure à celle des radiocompas MF.

–Sensibilité de l'indicateur G/D : l'aiguille arrive en butée à gauche ou à droite pour un écart égal ou supérieur à  $10^\circ$  du radial choisi.

#### ■ Avantages

C'est un appareil VHF qui n'est donc pas influencé par les parasites atmosphériques. Les indications sont visuelles et continues, donc directement exploitables par le pilote.

Associé à un DME (appareil donnant la distance d'une station), il permet de résoudre le problème du "point".

#### ■ Inconvénients

–portée optique

–Implantation de l'émetteur au sol : nécessite l'utilisation d'un terrain plat sans obstacles jusqu'à 500m de la station.

#### ■ Antenne de réception

Une antenne particulière au récepteur VOR a été créée. Elle a la forme d'un doublet replié et n'est utilisée que pour les fonctions VOR et LOC en raison de sa directivité. Une deuxième antenne est nécessaire pour recevoir les communications VHF. Un relais permet dans le cas de brancher soit l'une, soit l'autre.

## I.6 Le DME (Distance Measuring Equipment)

### I.6.1 But

C'est un équipement de mesure de distance directe (oblique) entre l'avion et la station sol (fig. I.11).

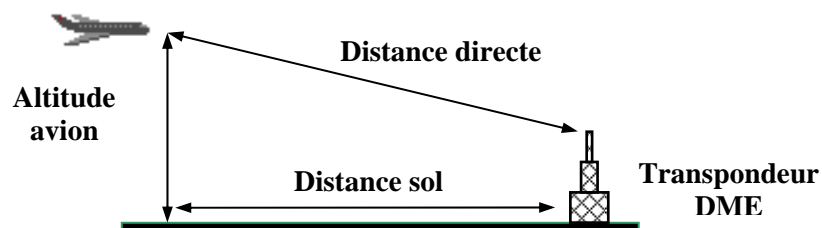


Fig. I.11 : Distance DME

### I.6.2 Plan des fréquences

Porteuses UHF entre 962 et 1213 MHz

La différence entre les fréquences d'émission et de réception est de 63MHz :  
 $f_r = f_e \pm 63\text{MHz}$ .

La largeur du canal est de 1MHz.

On dispose au total de 252 canaux dont 200 sont appariés à des fréquences VOR.

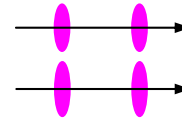
### I.6.3 Codage des signaux

Le DME émet périodiquement des paires d'impulsions de  $3,5\mu\text{s}$  de durée selon deux modes :

#### ■ Canal X :

-En Interrogation  $12\mu\text{s}$  d'espacement

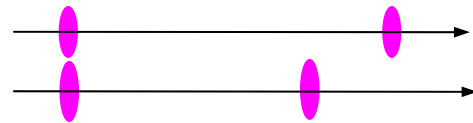
-En réponse  $12\mu\text{s}$  d'espacement



#### ■ Canal Y

-En Interrogation  $36\mu\text{s}$  d'espacement

-En réponse  $30\mu\text{s}$  d'espacement



### I.6.4 Principe de la mesure

Le principe est celui des interrogations-réponses : l'émetteur de bord interroge la station sol en lui envoyant des impulsions UHF répétées irrégulièrement que la station renvoie sur une autre fréquence avec un retard systématique de  $50\mu\text{s}$ .

Le récepteur de bord mesure le temps aller-retour  $\Delta t$  des signaux et en déduit la distance oblique  $D$  entre l'avion et la station à partir de la relation  $D = c(\Delta t - 50\mu\text{s})/2$  (fig.I.12)

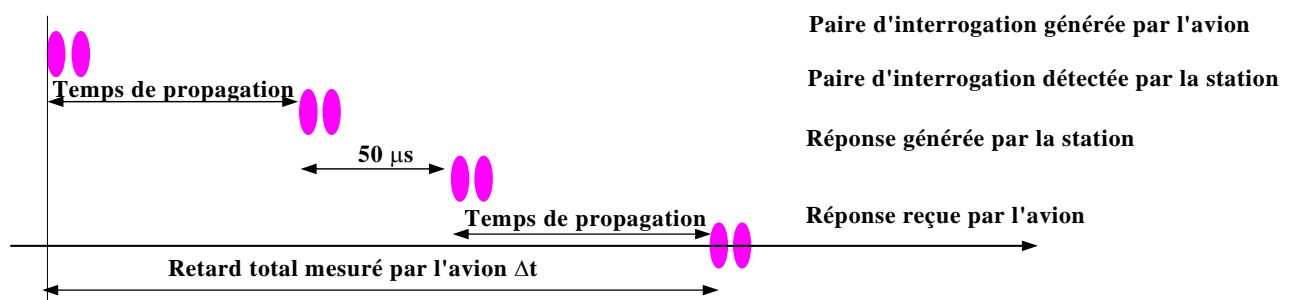


Fig. I.12 : Principe de la mesure

### I.6.5 Fonctionnement de l'interrogateur/récepteur de bord

Comme on le voit sur la figure I-13, plusieurs avions peuvent interroger simultanément la station qui renvoie les réponses dans toutes les directions : l'avion reçoit donc les réponses à ses propres interrogations, mais aussi les réponses destinées aux autres avions. L'avion doit donc en premier lieu identifier ses propres réponses,

cette phase constitue la « recherche », elle est effectuée à une cadence assez élevée (jusqu'à 150 interrogation /seconde). Cette phase étant terminée, la phase de poursuite peut commencer (cadence autour de 10 interrogations/seconde) qui consiste à suivre l'évolution de la réponse.

Dans les récepteurs modernes, la phase de recherche consiste à émettre 10 interrogations successives et à mémoriser les instants d'arrivée de toutes les réponses pour chaque récurrence. Ensuite, le récepteur cherche la réponse qui présente le même retard par rapport aux instants d'émission : cette réponse est celle destinée à l'avion.

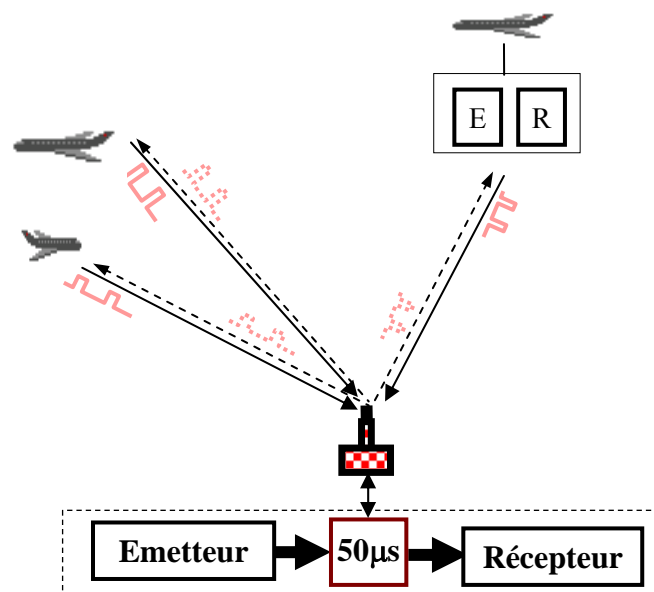


Fig. I.13 : Interrogations/réponses

### I.6.6 Les caractéristiques du DME

La capacité d'un équipement DME est conçue pour répondre à une centaine d'avion simultanément (95 en poursuite et 5 en recherche), ce qui peut être souvent insuffisant.

Les erreurs de réflexion sont faibles du fait de l'utilisation de fréquences différentes à l'émission et à la réception.

La précision courante est de l'ordre de 0,2NM, ce qui fait du DME, un système assez précis.

Les DME sont souvent associés à des VOR, cela donne un système de référence en coordonnées polaires (fig.I.14).

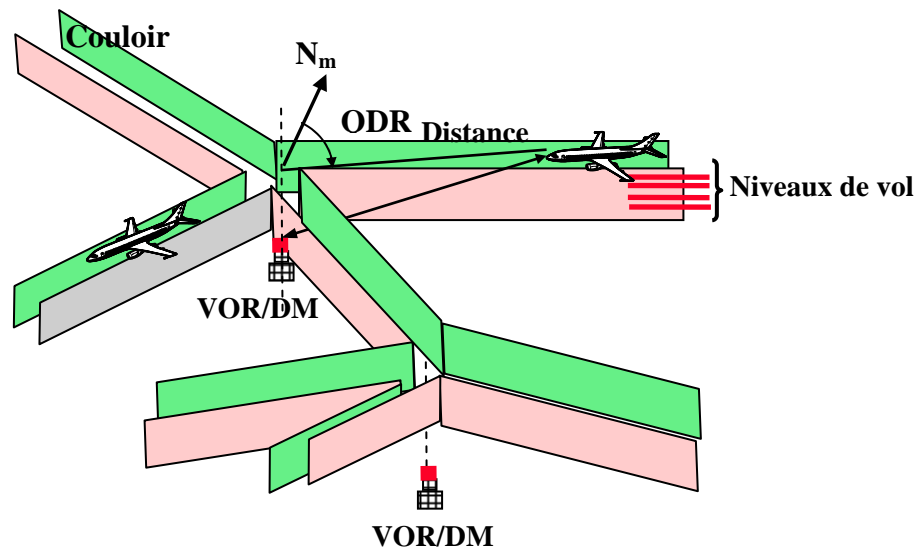


Fig. I.14 : Balisage des voies aériennes

## I.7 L'ILS (Instrument Landing System)

### I.7.1 Description du système

L'ILS (Instrument Landing System) est un système d'aide à la navigation utilisé au niveau international pour l'approche de la piste. Il se compose des éléments suivants : radiophare d'alignement de piste (localizer), radiophare d'alignement de descente (glide slope) et du radioborne à utilisations multiples Outer Marker (radioborne extérieur) et Middle Marker (radioborne intermédiaire), ainsi que Inner Marker (radioborne intérieur) comme cas spécial.

La définition de la trajectoire de descente est une pente de 3 degrés environ passant à 15 mètre au dessus du seuil de piste et aboutit à 300 mètres après le seuil; c'est l'intersection de 2 plans (figure I.15)

- Un plan vertical passant par l'axe de piste : le localizer ou LOC
- Un plan oblique perpendiculaire au LOC : le Glide

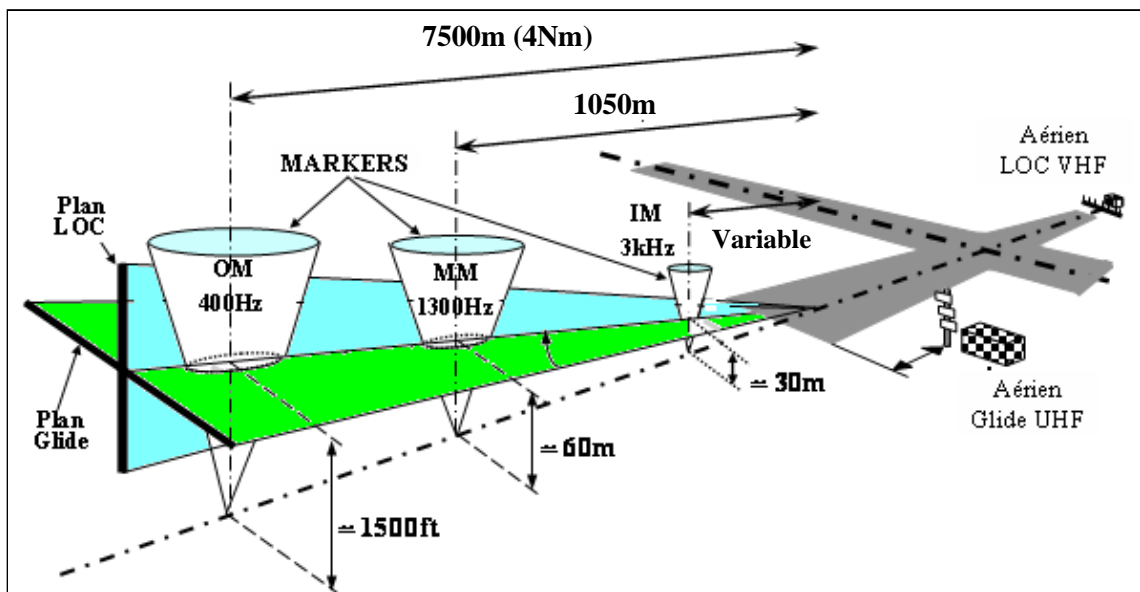


Fig. I.15 : Composition d'un ILS

Généralement le réseau d'antennes du LOC mesure environ 25 mètres de largeur et se situe à 300 mètres de l'extrémité de piste.

Les aériens du Glide sont montés sur un mât d'environ 9 mètres, généralement situé à 300 mètres en aval du seuil de piste.

Le radioborne se trouve entre 75 et 450 m (Inner marker (IM), 1050m (middle marker (MM) 7200m (Outer marker (OM)) devant le seuil de la piste d'atterrissage, sur la ligne médiane prolongée de la piste d'atterrissage. Seul le marqueur médian et le marqueur extérieur sont mis en œuvre dans la majorité des cas.

Les fréquences VHF et UHF allouées au system ILS sont les suivantes :

- Markers : 75MHz
- LOC : 108-111,95MHz
- GLIDE : 328,6-335,4MHz

### I.7.2 Principe de fonctionnement du Localizer

Ces radiophares émettent dans la bande VHF sur 20 fréquence s'échelonnant entre 108 et 112 MHz, les décimales sont impaires et espacées de 20KHz (108,1, 108,3,...).

Le réseau d'antennes du radiophare d'alignement de piste émet deux lobes qui se recoupent. Les lobes ont les mêmes fréquences porteuse, mais ils ont des modulations différentes, 150Hz et 90Hz, comme on peut le voir sur le diagramme polaire (diagramme de rayonnement) représenté à la figure I-16.

Le récepteur de bord compare la force des deux modulations ou, plus exactement la différence des taux de modulation (DDM). Cette comparaison est utilisée pour produire une tension proportionnelle à l'écart angulaire par rapport à l'axe de piste et qui alimente l'aiguille d'alignement de piste. Si l'avion est sur l'alignement de piste, les taux de modulation sont égaux et une tension nulle est envoyée à l'aiguille d'alignement de piste qui reste donc en position neutre, c'est-à-dire au centre.

Le faisceau de LOC offre un guidage en azimuth grâce à l'aiguille de l'indicateur ILS de bord (ou autre indicateur semblable).

Si l'alignement de piste est à gauche en approche finale, la modulation 150Hz est plus forte que la modulation 90Hz et une tension représentant cette différence est envoyée à l'aiguille d'alignement de piste qui dévie à gauche, signifiant que l'axe de piste est à gauche ; de même, si l'alignement de piste est à droite en approche finale, la modulation à 90Hz sera prédominante et l'aiguille déviera à droite, signifiant que l'axe de piste est à droite.

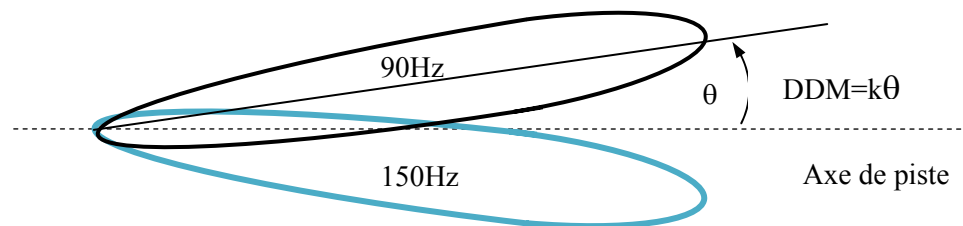


Fig. I.16 : Faisceaux Localizer

### **I.7.3 Principe de fonctionnement du Glide Slope**

Ces radiophares émettent dans la bande UHF sur 20 fréquences espacées de 300KHz jusqu'à 335 MHz.

Les radiophares LOC et Glide ont des fréquences appariées, par exemple un LOC dont la fréquence est de 110,3MHz sera couplée à un Glide dont la fréquence sera de 335MHz.

Le même principe s'applique aux indications d'axe de descente, si ce n'est que les lobes se recourent dans le plan vertical.

La figure I-17 montre le diagramme polaire de l'alignement de descente.

Le faisceau du radiophare d'alignement de descente assure le guidage dans le plan vertical grâce à l'aiguille correspondant de l'indicateur ILS de bord.

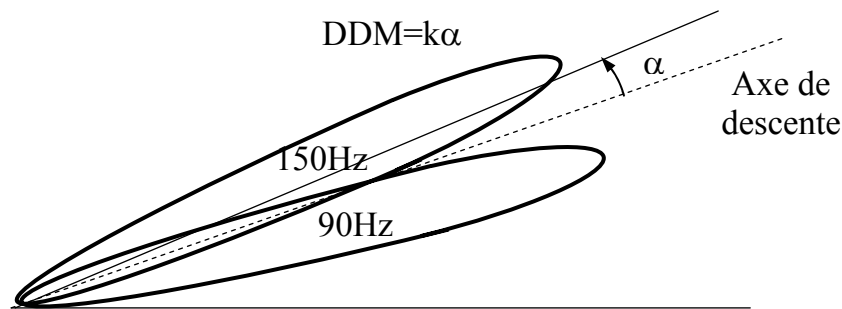


Fig. I.17 : Faisceaux Glide Slope

#### **I.7.4 Fonction Marker**

La fonction Marker doit donner au pilote des repères visuels et sonores par rapport au seuil de piste. Trois balises situées respectivement à 7250, 1300 et 75 mètres du seuil de piste émettent un signal de fréquences 75MHz à modulée à 400Hz pour la Outer Marker (la plus éloignée), à 1300Hz pour la Middle Marker (intermédiaire) et à 3000 Hz pour la Inner Marker (la plus proche). Quand l'avion passe au dessus d'une des balises, son pilote détermine ainsi son éloignement du seuil de piste

#### **I.7.5 Capacités opérationnelles**

La précision globale du système ILS est fonction de la catégorie d'exploitation à laquelle appartient le système.

L'OACI a adopté une classification des équipements ILS en catégories de performance définies par la hauteur de décision DH et la portée visuelle de piste (RVR). Ces paramètres permettent au pilote de prendre la décision de continuer ou non la phase d'atterrissage.

#### **I.7.6 Emploi de l'ILS**

La procédure d'atterrissage consiste à capturer d'abord l'alignement de piste (LOC) à 10 ou 15 km du terrain, puis l'alignement de descente (Glide) (fig.I.18). L'information du Glide est inutilisable au-dessous de 30 m de hauteur (trajectoire hyperbolique).



Affichage sur indicateurs électromécaniques (ADI : Attitude Director Indicator et HSI) et indicateurs à tubes cathodiques (PFD (ADI évolué) et ND (HSI évolué des EFIS)).

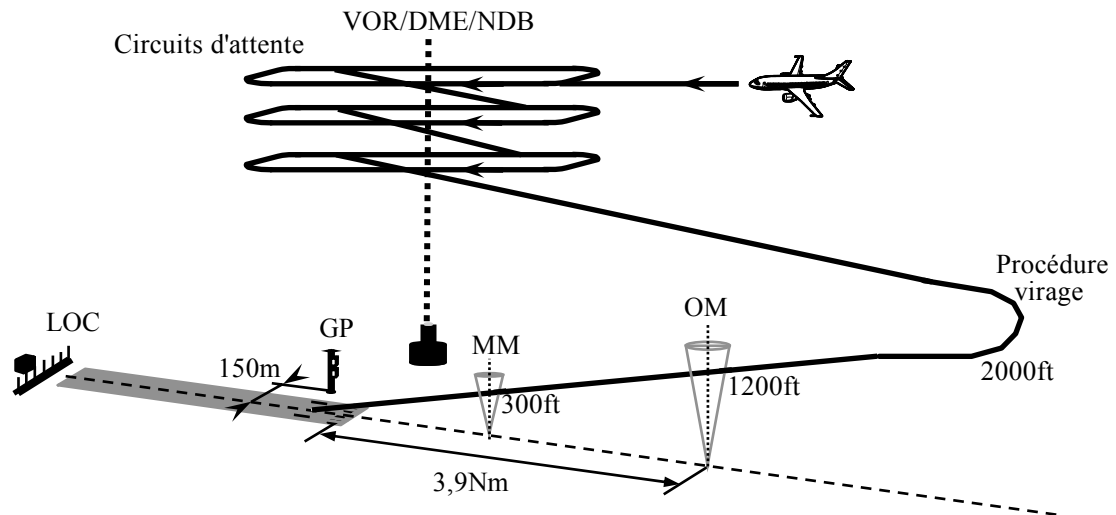


Fig. I.18 : Procédure d'atterrissage ILS

## II. GENERALITES SUR LES MODULATIONS

### II.1 Onde porteuse

Les ondes radioélectriques autorisant des liaisons sans fil entre un émetteur et un récepteur avec des portées parfois considérables permettent le transport de l'information plus ou moins élaborée. Chaque liaison est caractérisée par la fréquence de l'onde utilisée (elle individualise la station d'émission).

L'onde choisie pour assurer une liaison donnée est dite « onde porteuse » car elle sert de support à l'information qu'il faut transmettre.

### II.2 Informations

L'information se présente sous les trois formes suivantes :

#### II.2.1 Signal codé

C'est l'information la plus élémentaire obtenue par établissement (ou coupure) d'un courant constant selon un rythme particulier (code morse par exemple).

#### II.2.2 Signal téléphonique

Il s'agit d'un courant d'amplitude et de fréquence variable fournie par un microphone. En générale, la fréquence est inférieure à 15 KHz (parole 300 à 3000Hz, musique entre 50 à 15000 Hz)

#### II.2.3 Signal image

Il s'agit d'un courant d'amplitude et de fréquence variable représentative de la luminosité d'une image analysée point par point et ligne par ligne. Ce signal appelé aussi VIDEO doit comprendre les fréquences 50Hz et 5 à 10 MHz pour la TV.

### II.3 3 Modulation

L'impression d'une information sur une onde porteuse s'appelle la modulation.

L'équation d'une onde radioélectrique :

$$e = E \cos( 2 \pi ft - \varphi )$$

La modulation est effectuée en faisant varier l'amplitude  $E$  ou la fréquence  $f$  ou la phase  $\varphi$  au rythme (en fonction) de l'information, en général  $E$  varie,  $f$  est maintenue constante et inversement.

C'est pourquoi l'on trouve trois types de modulations différents :

- Modulation d'amplitude : AM
- Modulation angulaire : FM et PM
- Modulation en impulsion : IM.

#### II.4 Modulation en Amplitude (AM) (ondes modulées en amplitude)

Ces ondes sont dites de type A, un indice caractéristique de l'information à transmettre est accolé à la lettre du type d'onde (A); la fréquence de l'onde porteuse est constante.

Cette onde est destinée à transmettre une information téléphonique (communication et radiodiffusion).

L'amplitude de l'onde porteuse varie au rythme de l'information téléphonique.

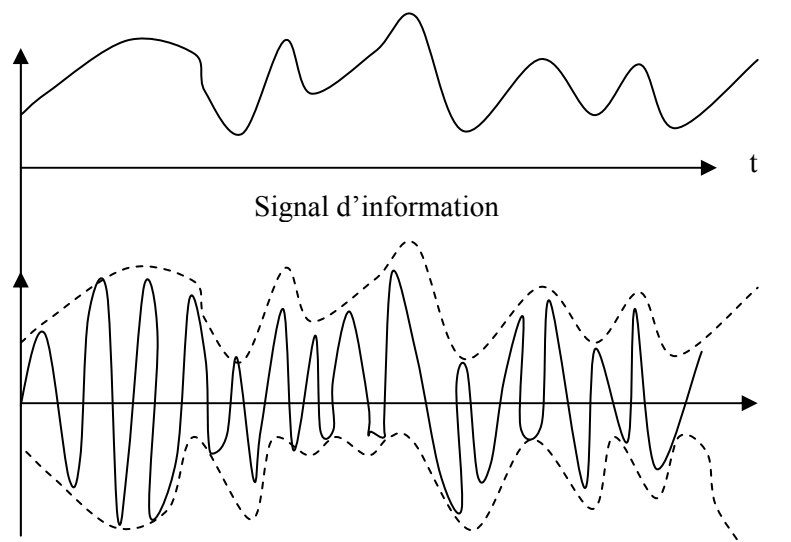


Fig. II.1 : Onde modulée en amplitude

##### II.4.1 Ondes modulées en fréquence

Ces ondes sont dites de type F, elles sont surtout utilisées pour transmettre des informations téléphoniques, l'amplitude de l'onde porteuse est maintenue constante.

La fréquence de l'onde porteuse varie au rythme de l'information à transmettre et l'émission s'étale en fréquence de part et d'autre d'une fréquence moyenne, et la fréquence est proportionnelle à l'amplitude du signal modulant :

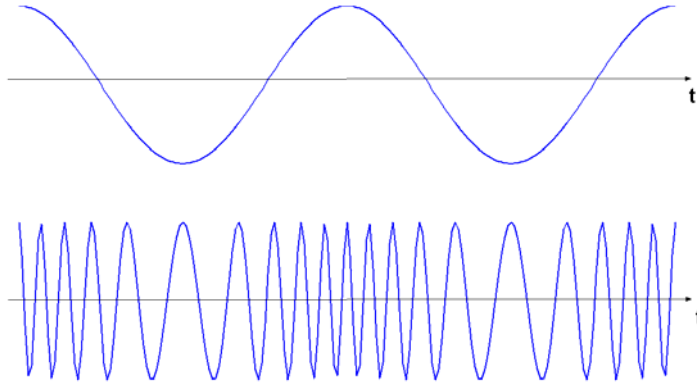


Fig. II.2 : Onde modulée en fréquence

Dans la modulation de phase, la variation de phase est proportionnelle à l'amplitude du signal modulant, la modulation de phase et la modulation de fréquence sont très voisines.

## II.5 Spectre d'une onde modulée

### II.5.1 Modulation d'amplitude (AM)

L'émission d'une onde entretenue pure de la forme  $e = E_m \cos(\omega t - \phi)$  est caractérisée par le rayonnement d'un signal de fréquence unique  $f$ .

Dés qu'une information module l'onde porteuse, il n'en est plus de même, il y a émission d'un spectre de fréquence de valeurs voisines. Les différents cas sont les suivants :

#### ■ Modulation par un signal sinusoïdal

La modulation d'une onde porteuse sinusoïdale de la forme  $e = E_1 \cos(\omega t)$  avec  $\omega = 2\pi f$  par une information sinusoïdale de la forme  $a = A \cos(\Omega t)$  avec  $\Omega = 2\pi F$  donne une onde modulée en amplitude de la forme  $e = E(t) \cos(\omega t)$

avec  $E(t)$  l'amplitude de l'onde modulée, elle varie dans le temps au rythme de l'information à transmettre et peut s'écrire :  $E(t) = E_1 + A \cos(\Omega t)$

$$E(t) = E_0 \left( 1 + \frac{A}{E_0} \cos(t) \right) = E_0 (1 + m \cos 2(ft))$$

Le rapport  $\frac{A}{E_0} = m$  est appelé taux de modulation ; m varie entre (0 à 100) %

La valeur instantanée du signal modulé est :

$$E(t) = E_0 \cos 2(ft + (mE_0)/2 \cos 2((f + F)t + (mE_0)/2 \cos 2((f - F)t$$

Sous cette dernière forme, l'expression du signal modulé fait apparaître 3 composantes sinusoïdales (fig.II.3) :

- L'onde porteuse d'amplitude  $E_0$  et de fréquence  $f$  (composante fondamentale)
- Une raie latérale supérieure d'amplitude  $\frac{mE_0}{2}$  et de fréquence  $(f+F)$
- Une raie latérale inférieure d'amplitude  $\frac{mE_0}{2}$  et de fréquence  $(f-F)$

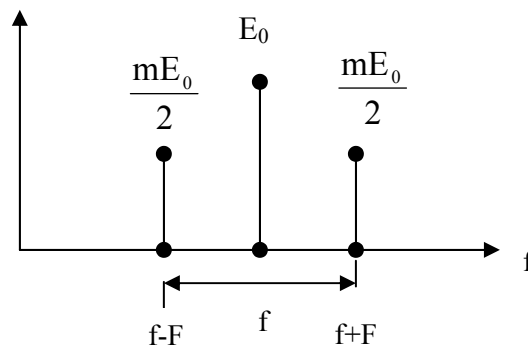


Fig. II.3 : Spectre du signal

La bande de fréquence occupée par un tel signal va de  $(f - F)$  à  $(f + F)$  elle est de largeur  $B=2F$ .

### II.5.1.1 Modulation par un signal téléphonique

L'amplitude  $A$  du signal modulant et sa fréquence  $F$  varie dans le temps, donc le signal modulant comporte plusieurs fréquences  $F_{\min}$  à  $F_{\max}$ .

Le spectre du signal modulé comporte deux bandes (BLD), une bande latérale supérieure et une bande latérale inférieure (BLSup et BLInf) et la largeur du spectre  $B=2F_{\max}$  (fig. II.4).

En téléphonie, l'information (le signal modulant) couvre les fréquences de 300 à 3000 Hz, la BL Sup comprend toutes les fréquences entre  $f+300$  et  $f+3000$ , la BL inf de  $f-3000$  à  $f-300$ .

La largeur du spectre  $B = 2 F_{\max} = 2 \cdot 3000 = 6 \text{ KHz}$  il est possible de ne transmettre qu'une seule bande latérale (BLU).

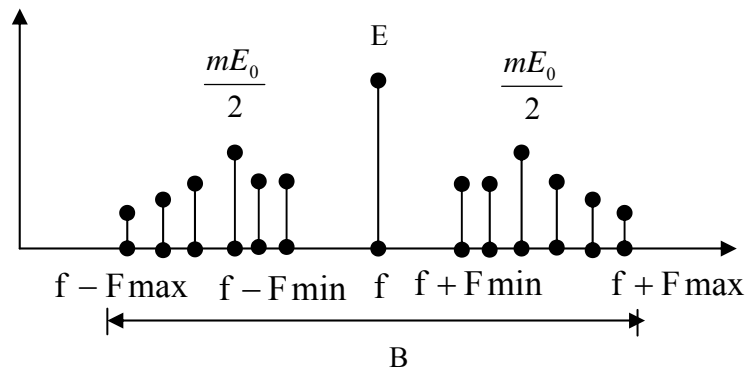


Fig II.4 : Spectre du signal AM (Modulé par un signal téléphonique)

### II.5.2 Modulation de fréquence (FM)

la fréquence de l'onde modulée varie dans le temps au rythme de l'information à transmettre.

Pour une onde porteuse de la forme :

$$e = E_0 \cos \omega t = E_0 \cos 2 \pi f t$$

et une information sinusoïdale  $a = A \cos \Omega t = A \cos 2 \pi F t$  :

la fréquence peut s'écrire sous la forme :

$$f(t) = f + \Delta f \cdot \cos \Omega t = f + \Delta f \cdot \cos 2 \pi F t$$

$\Delta f$  est la déviation de fréquence proportionnelle à  $A$  (amplitude du signal modulant).

La forme de l'onde émise est complexe de la forme :

$$e = E_0 \cos (\omega t + m \cos \Omega t) = E_0 \cos (2 \pi f t + m_f \cos 2 \pi F t)$$

avec :  $m_f = \Delta f / F > 1$  Indice de modulation.

$\Delta f = f_{\max} - f = f - f_{\min}$ , la déviation de fréquence

$2 \Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ , excursion de fréquence.

Le spectre de fréquence (fig.II.5) comporte une infinité de raies latérales sur les fréquences

(  $f \pm F$  ,  $f \pm 2F$  ,  $f \pm 3F$  ....  $f \pm nF$ ), mais leurs amplitude s'atténue en s'écartant de  $f$ , en pratique la bande occupée est calculée avec la formule suivante :

$$B = 2 (\Delta f + 2F).$$

La bande occupée nécessite une porteuse de fréquence élevée, VHF et plus.

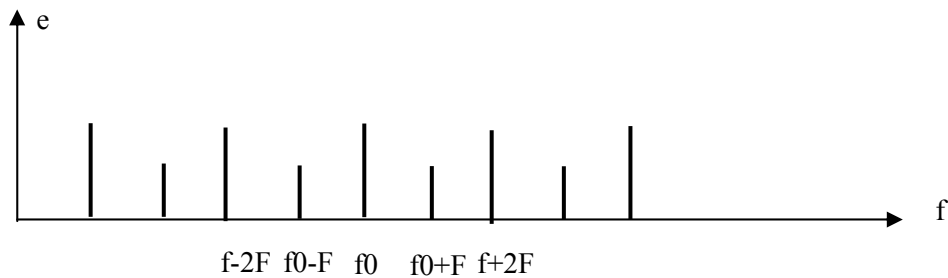


Fig II.5 : Spectre du signal FM

## II.6 Emission et réception

### II.6.1 L'émetteur

Le schéma synoptique d'un émetteur est représenté dans la figure II.6.

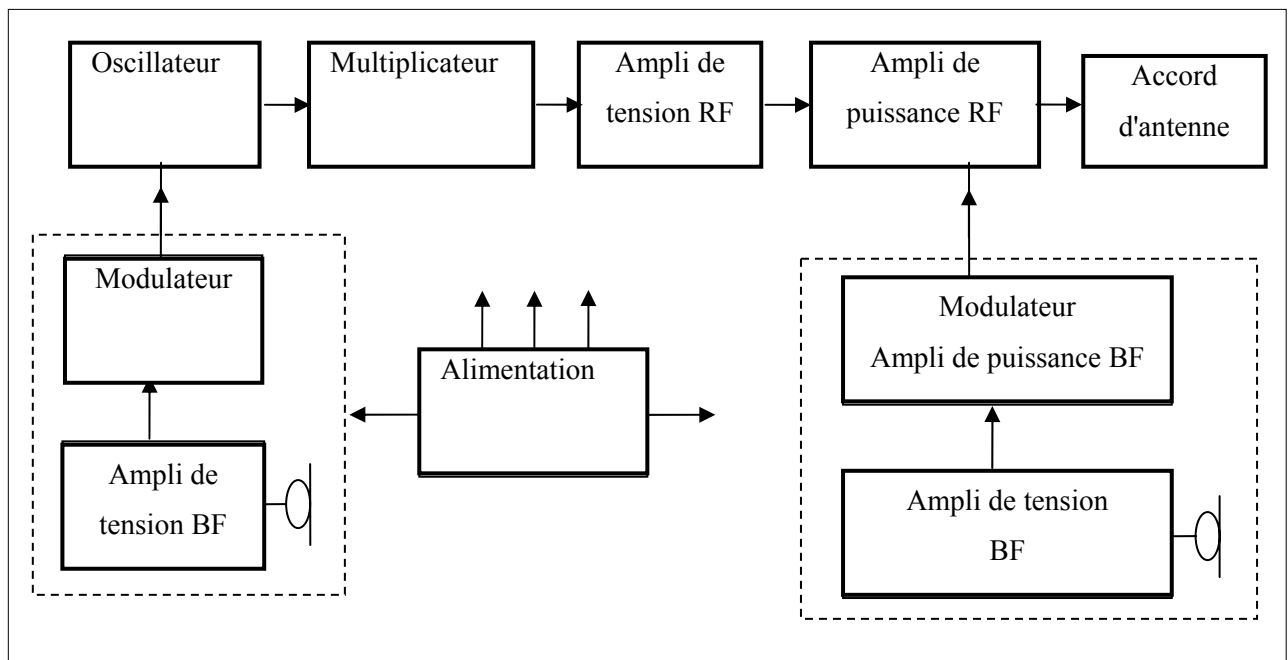


Fig II.6 : Schéma synoptique d'un émetteur

Le rôle des différents blocs est le suivant :

#### ■ Oscillateur

C'est un générateur de signal de fréquence porteuse.

Si l'émetteur doit produire des fréquences différentes le circuit oscillant est à accord variable et dans ce cas on obtient une variation de fréquence continue dans une gamme donnée par un condensateur ou une inductance variable (variable Fréquence Oscillator VFO).

#### ■ Multiplicateurs

Pour simple raison de construction, on est limité en pratique de générer des fréquences élevées (de l'ordre de 20 MHz). Lorsqu'on doit travailler à des fréquences plus élevées, on utilise des étages multiplicateurs.

#### ■ Amplificateur de tension étages séparateurs

Le signal généré étant de faible niveau, il est nécessaire de l'amplifier, il s'agit d'un ou plusieurs étages amplificateurs de tension intercalés entre l'oscillateur et l'amplificateur de puissance (sépare l'étage oscillateur de l'étage de puissance).

#### ■ Amplificateur de puissance

Il a pour but d'amplifier le signal modulé pour obtenir le niveau d'énergie nécessaire à l'émission, la modulation AM se fait sur cet étage.

#### ■ Circuit d'accord d'antenne

Pour accorder l'antenne dont la longueur est généralement fixe, à la fréquence fournie par l'émetteur, on dispose entre l'ampli de puissance et l'antenne des circuits comprenant des éléments (L) et (C) (inductance en série rallonge l'antenne et une capacité en série la raccourcit, ainsi pourra être obtenu l'accord de l'antenne en  $\lambda/4$  ou  $\lambda/2$ ).

#### ■ Antenne

Transforme l'énergie électrique en onde électromagnétique.

#### ■ Alimentation

Elle est reliée à tous les étages pour fournir l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement.

#### ■ Chaîne de modulation BF

Si l'émetteur travaille en AM celle-ci sera appliquée sur les étages de sortie, en général, sur l'amplificateur de puissance.

Si l'émetteur travaille en FM celle-ci sera appliquée sur l'oscillateur.



Les qualités d'un émetteur sont les suivantes :

– Stabilité

C'est l'aptitude à conserver le réglage sur la fréquence choisie s'exprime par le rapport  $\Delta F/f_0$ , glissement relatif de fréquence. La stabilité dépend essentiellement de l'oscillateur.

– Fidélité

C'est l'aptitude à transmettre l'information sans déformation. Elle dépend de la chaîne de modulation.

## II.6.2 Le Récepteur

### II.6.2.1 Principe du récepteur

Le schéma d'un récepteur simple, dit «à amplification directe», est donné en figure II.7.

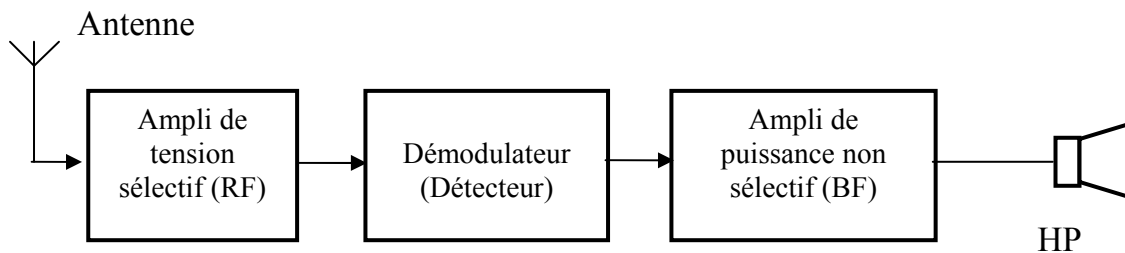


Fig II.7 : Schéma synoptique d'un récepteur direct

On amplifie d'abord, avant détection pour détecter des signaux d'amplitudes suffisamment élevées, cette amplification est sélective et permet d'obtenir une meilleure séparation entre stations voisines en fréquence.

On amplifie ensuite après détection pour fournir une certaine puissance au reproducteur sonore (HP). Cette amplification BF est non sélective.

Les qualités d'un récepteur sont les suivantes :

– Sensibilité

C'est l'aptitude à recevoir des signaux aussi faibles que possible, elle s'exprime par la valeur de la f.e.m à l'entrée, nécessaire pour obtenir une certaine puissance BF à la sortie.

– Sélectivité

C'est l'aptitude à séparer le signal désiré (utile) des signaux brouilleurs et parasites.

Cette qualité s'apprécie sur la courbe du gain en fonction de la fréquence. On évalue la largeur de bande  $\Delta f$  obtenue pour un affaiblissement imposé (en se fixe à la moitié du Gain max pour déterminer la largeur du bande). (fig.II.8)

La largeur de la bande  $\Delta f$  doit toujours être aussi étroite que le permet le spectre du signal à traiter.

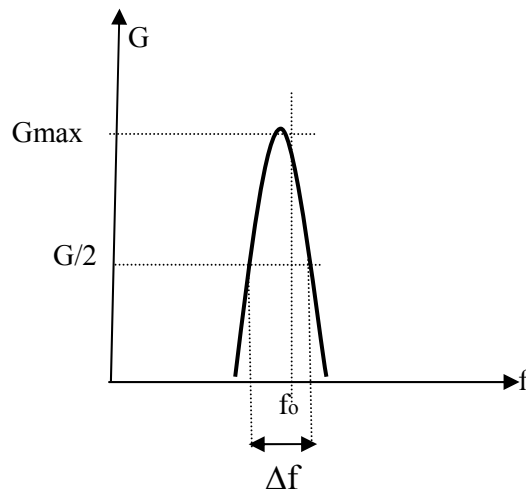


Fig II.8 : Sélectivité

#### - Fidélité

C'est l'aptitude à restituer l'information sans déformation gênante, elle dépend de la qualité de la démodulation et de la largeur de bande des différents amplificateurs situés avant et après le démodulateur.

#### - Stabilité

C'est l'aptitude à conserver le réglage sur une fréquence fixe soit dans le temps, soit malgré des variations des paramètres externes.

### **II.6.2.2 Principe du récepteur à changement de fréquence (récepteur superhétérodyne) :**

Le schéma du récepteur superhétérodyne est représenté dans la figure II.9.

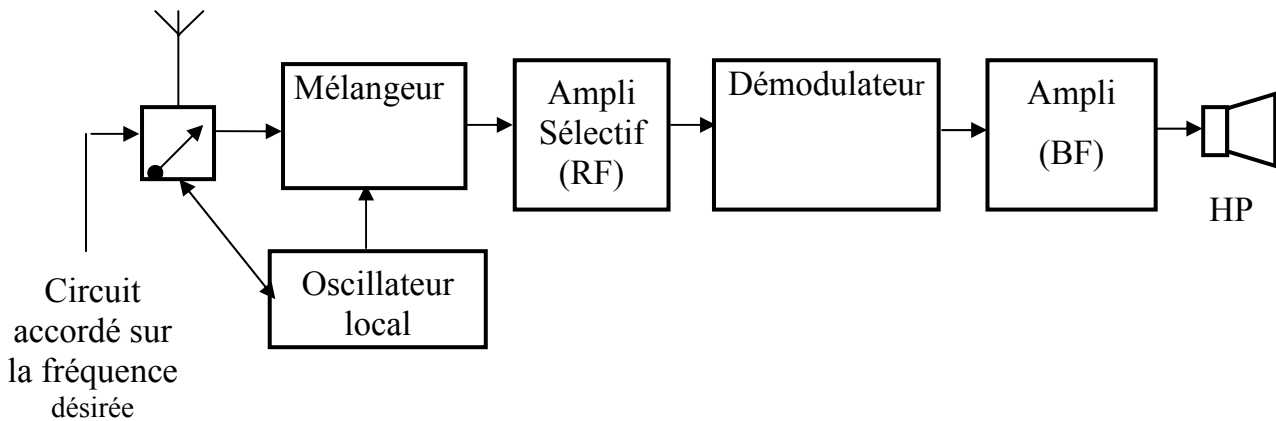


Fig II.9 : Récepteur superhétérodyne

Pour augmenter la sensibilité et la sélectivité d'un récepteur à amplificateur directe, on peut être tenté de multiplier les étages amplificateurs sélectifs.

Mais pour accorder le récepteur pour différentes fréquences, il faut alors faire varier le réglage de plusieurs étages amplificateurs, ce qui pose un problème.

D'autant plus que pour obtenir la meilleure courbe  $G = f(f)$ , on est amené à utiliser des circuits couplés auxquels il faut ajuster le couplage avec précision.

Si le récepteur doit recevoir des fréquences élevées (HF, VHF) des couplages parasites vont se produire d'autant plus facilement que la fréquence est élevée et la chaîne d'amplificateur peut entrer en oscillation.

Il est donc souhaitable d'amplifier une fréquence assez basse avec des circuits dont le réglage est fixe. Cependant les stations (les fréquences) à recevoir peuvent être différentes et de fréquences élevées.

Le récepteur à changement de fréquence (superhétérodyne) permet de satisfaire ces conditions.

#### ■ Principe de récepteur superhétérodyne : (non sélectif)

A l'entrée du récepteur, se trouve un étage mélangeur qui réalise la différence entre la fréquence (ou le spectre de fréquence) reçue et une fréquence locale fabriquée par un oscillateur local interne.

La fréquence (ou le spectre de fréquence) qui en résulte (la fréquence intermédiaire  $FI = fr - fL$ ) est amplifiée par un amplificateur sélectif.

Si le récepteur est accordé sur une autre fréquence (station), on fait varier également la fréquence de l'oscillateur local pour que la fréquence différentielle soit toujours de même valeur.

Par ce mélange on transpose la fréquence (le spectre) reçue sur une fréquence (un spectre) de valeur inférieure et constante. Un amplificateur sélectif (ou généralement une chaîne d'amplificateurs) travaillant sur une bande étroite de fréquence invariable et assez basse peut donner au récepteur une meilleure sensibilité et sélectivité.

### III. GENERALITES SUR LES FILTRES

#### III.1 Introduction

Le démodulateur que nous allons étudier dans le chapitre IV comporte principalement des filtres numériques, pour cette raison nous consacrons ce chapitre à la technique de filtrage.

Pour de raisons multiples, l'information utile peut être dissimulée au sein d'un signal complexe. Dès lors que le spectre de l'information est suffisamment isolé de vis-à-vis des composantes indésirables, il est possible de l'extraire par filtrage.

Le filtrage en fréquence fut historiquement l'une des premières fonctions utilisées en radiofréquence. Aujourd'hui, on trouve des filtres dans de nombreux équipements électroniques. La tendance actuellement est de remplacer les structures analogiques par des versions numériques, de caractéristiques plus précises et plus reproductibles. On conserve cependant des solutions analogiques en électronique de puissance et dans les systèmes haute fréquence.

#### III.2 Généralités

##### III.2.1 Filtre idéaux

Le cas idéal est un filtrage qui élimine totalement les bandes indésirables sans transition et sans introduire de déphasage dans les bandes conservées.

Selon la bande rejetée, on rencontre les quatre grandes catégories de filtres décrites en figure III.1 où A représente l'atténuation apportée par le filtre sur une composante de fréquence f.

##### III.2.2 Filtre réels

En pratique, il n'est pas possible d'atteindre parfaitement les performances précédentes (atténuation infinie). Comme tout système linéaire, un filtre obéit à une équation différentielle linéaire de type :

$$a_n \frac{d^n(x(t))}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{d(x(t))}{dt} + a_0 y(t) = b_n \frac{d^n(x(t))}{dt^n} + \dots + b_1 \frac{d(x(t))}{dt} + b_0 y(t) \quad \text{III.1}$$

$a_n \dots a_0$  et  $b_n \dots b_0$  sont des coefficients réels.

En régime harmonique permanent, le signal d'entrée s'écrit :

$$x(t) = X_0 \sin(\omega t)$$

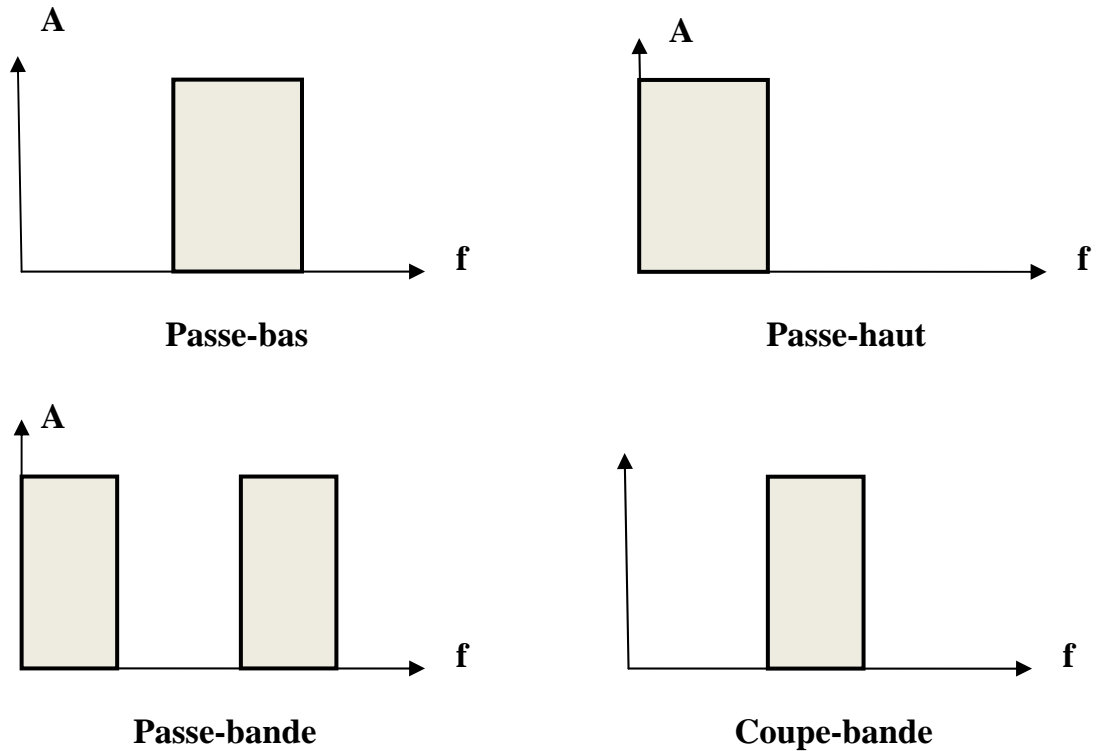


Fig. III.1 : Les quatre catégories de filtres idéaux

La solution de l'équation III.1, est du type

$$y(t) = Y_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

Le rapport  $\frac{Y_0}{X_0}$  représente l'action du filtre sur l'amplitude du signal d'entrée et  $\varphi$  représente le déphasage introduit par le filtre sur la composante de pulsation  $\omega$  (figure III.2).

L'ordre d'un filtre est donné par le degré du polynôme du dénominateur, c'est à dire  $n$ . C'est le degré de l'équation différentielle régissant le fonctionnement du filtre.

L'ordre du filtre définit le comportement asymptotique quand  $\omega$  tend vers zéro ou l'infini.

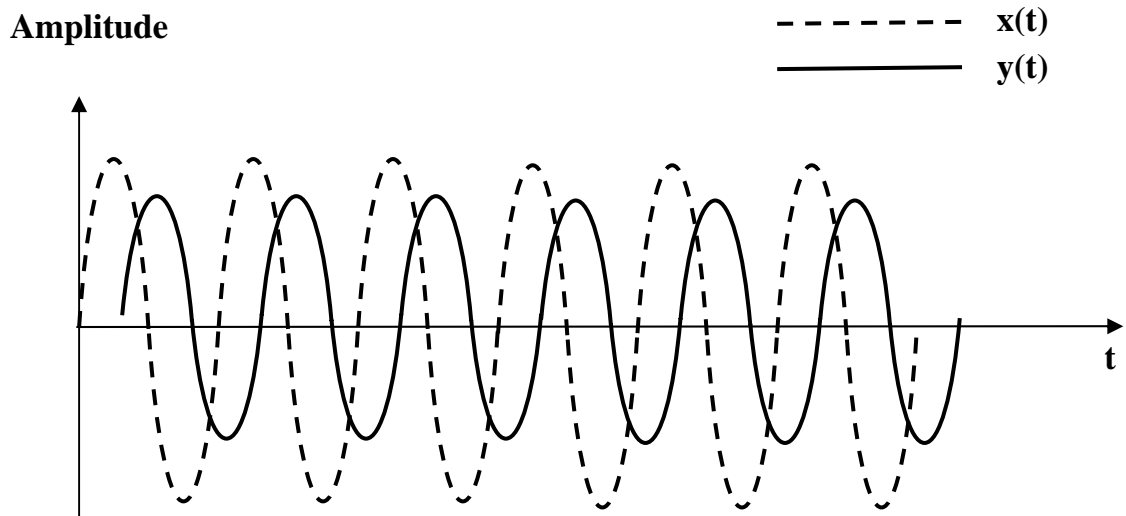


Fig. III.2 : Effet d'un filtre réel

### III.2.3 Fonction de transfert

Une des propriétés de la transformée de Laplace est de transformer une fonction dérivée en une fonction algébrique.

En notant  $F(p)$ , la transformée de Laplace d'une fonction  $f(t)$ ,  $p$  étant une variable complexe, la transformée de la fonction dérivée  $\frac{d^n f(t)}{dt^n}$  s'écrit  $p^n F(p)$  lorsqu'on ne tient pas compte des conditions initiales.

L'application de cette propriété aux deux membres de l'équation différentielle III.1 aboutit à la relation III.2.

$$Y(p) = [a_n p^n + \dots + a_0] = X(p) [b_m p^m + \dots + b_0] \quad \text{III.2}$$

On définit alors la fonction de transfert par le rapport :

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_m p^m + \dots + b_0}{a_n p^n + \dots + a_0}$$

III.3

La réponse en régime harmonique du filtre s'obtient en substituant  $j\omega$  à la variable  $p$ .

Cette réponse est une fonction complexe en  $\omega$  qui s'écrit :

$$H(p) = (Y(p))/(X(p)) = (b_m (j\omega)^m + \dots + b_0)/(a_n (j\omega)^n + \dots + a_0)$$

III.4

L'argument de  $H(j\omega)$  représente le déphasage  $\varphi(\omega)$  en régime harmonique entre la sortie et l'entrée :

$$x(t) = \sin(\omega t) \rightarrow y(t) = |H(j\omega)| \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\varphi(\omega) = \arg[H(j\omega)]$$

Le retard de phase est relié au déphasage par la relation :

$$\tau_g(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}$$

III.5

L'ordre d'un filtre est donné par le degré du polynôme du dénominateur, c'est à dire  $n$ . C'est le degré de l'équation différentielle régissant le fonctionnement du filtre.

L'ordre du filtre définit le comportement asymptotique quand  $\omega$  tend vers zéro ou l'infini.

Les filtres d'ordre deux et d'ordre un occupent une place de toute première importance, en effet un filtre d'ordre  $n$  quelconque peut être réalisé à partir d'un ensemble de filtres d'ordre deux et un si nécessaire.

La fonction de transfert d'un filtre passe-bas d'ordre deux est donc de la forme :

$$F(s) = A \frac{\omega_0^2}{(s^2 + (2\zeta\omega_0)/Q + \omega_0^2)}$$

Suivant la valeur de  $Q$  les filtres portent des noms différents, on distingue :

a)  $Q=0.707 \rightarrow$  Butterworth

b)  $Q=0.577 \rightarrow$  Bessel

c)  $Q=0.863 \rightarrow$  Chebyshev

$\Rightarrow$  Les filtres de Butterworth ont les courbes de réponse les plus plates dans la bande passante (pas de rebond), ce sont les filtres les plus utilisés.

$\Rightarrow$  Les filtres de Chebyshev sont caractérisés par une ondulation dans la bande passante (ripple band),

L'intérêt des filtres de Bessel réside dans la phase linéaire aux basses fréquences

### III.2.4 Réalisation des filtres analogiques

Pour réaliser les filtres analogiques, on utilise souvent des structures actives à base d'amplificateurs opérationnels. Ces structures utilisent des résistances et des condensateurs.

### III.3 Filtres numériques



### III.3.1 Définition d'un filtre numérique

Un filtre numérique effectue des traitements sur des signaux échantillonnés ou numériques. La transformée en  $z$  permet d'obtenir sa réponse fréquentielle.

Un filtre numérique est constitué d'un groupement de circuits logiques astreints à un processus de calcul qui confère à ce filtre une fonction déterminée (passe-bas, passe-bande, passe-haut réjecteur de bande, intégrateur,...). Le calcul porte sur une séquence de nombres introduites à son entrée et fournit une séquence numérique modifiée, c'est-à-dire « filtrée » ou traitée, à sa sortie. La plupart des modèles de filtre analogiques peuvent ainsi être reproduits sous forme numérique. Les éléments physiques ont en quelque sorte transposé en éléments logiques.

L'avantage majeur des processeurs de traitement du signal réside dans la rapidité des traitements ce qui permet pour des applications industrielles temps réel.

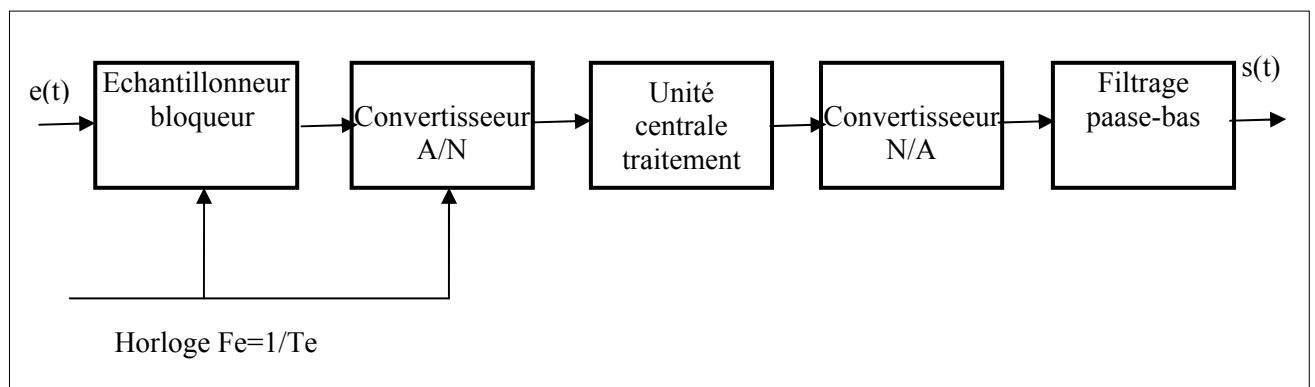
### III.3.2 Organisation d'un filtre numérique

Le paragraphe précédent précise qu'un filtre numérique est un algorithme de calcul.

Il faut:

- échantillonner à des instants périodiques  $T_e$  le signal d'entrée. (emploi d'un convertisseur analogique/numérique)
- traiter les informations et calculer (utilisation d'un micro contrôleur)
- sortir une valeur significative du point  $nT_e$  (utilisation d'un convertisseur numérique/analogique)
- bloquer la sortie du convertisseur pendant  $T_e$  pour obtenir une réponse proche de celle d'un filtre analogique (Utilisation d'un bloqueur)
- utiliser un filtre passe bas pour lisser le signal de sortie.

Le schéma fonctionnel d'un filtre numérique est le suivant (figure III.3) :



L'unité de traitement est constituée des éléments suivants :

- Un ou plusieurs organes de retard (ce sont des registres à décalage jouant le rôle de mémoires retardées), pilotés par une horloge.
- Des opérations arithmétiques (additionneurs et multiplieurs)
- Des registres fournissant les coefficients de pondération du filtre

La réalisation d'un filtre numérique consistera en fait à matérialiser l'algorithme de calcul pour la st

Fig III.3 : Schéma fonctionnel d'un filtre numérique

### **III.3.3 Caractéristiques des filtres numériques**

Les filtres numériques apportent une solution aux problèmes de :

- reproductibilité d'élément à élément.
- dérive en fonction de la température.
- dispersion des valeurs et vieillissement de composants.
- réglage de paramètres.
- évolution et adaptation du système.

Mais, le signal d'entrée étant échantillonné, des précautions doivent être prises pour ne perdre aucune information du spectre du signal utile. Le théorème de Shannon nous dit que:

La reconstitution d'un signal  $f(t)$  à partir d'échantillons prélevés à la fréquence  $f_e$  n'est possible que si la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  est supérieure à 2 fois la fréquence maximale des harmoniques de  $f(t)$ .

Le champ d'application du filtrage numérique est très vaste puisqu'il va des télécommunications au traitement de la parole, en passant par les systèmes d'asservissement, les radars...

## **III.4 Les principaux types de filtres numériques**

### **III.4.1 Filtres à réponse impulsionnelle finie (RIF)**

Dans la structure de filtres FIR (fig.III.4), on retarde légèrement une copie du signal d'entrée (d'une ou plusieurs périodes d'échantillonnage) et on combine le signal d'entrée retardé avec le nouveau signal d'entrée. Les filtres numériques basés sur ce fonctionnement sont dit à "Réponse Impulsionnelle Finie" ou RIF.

L'équation aux différences est donnée par :

$$y[n] = a_0 x[n] + a_1 x[n-1] + a_2 x[n-2] \dots + a_N x[n-N]$$

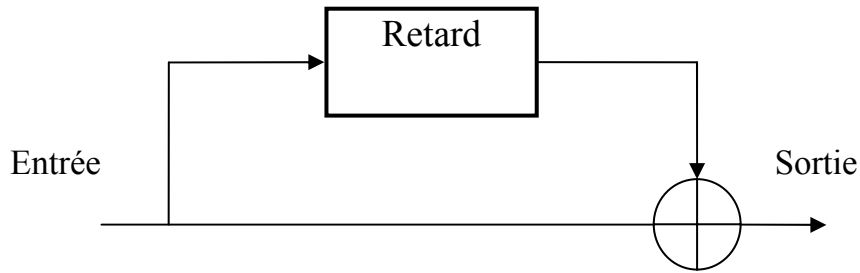


Fig III.4 : Structure d'un filtre RIF

### III.4.2 Filtrés à réponse impulsionnelle infinie (RII)

On retarde une copie du signal de sortie que l'on combine au nouveau signal d'entrée (fig.III.5). Les filtres numériques basés sur ce fonctionnement sont dit à "Réponse Impulsionnelle Infinie" ou RII. On les qualifie également de filtres récurrents ou à "feedback"

L'équation aux différences est donnée par :

$$y[n] = a_0 x[n] + a_1 x[n-1] + \dots + a_N x[n-N] - b_1 y[n-1] - b_2 y[n-2] - \dots - b_M y[n-M]$$

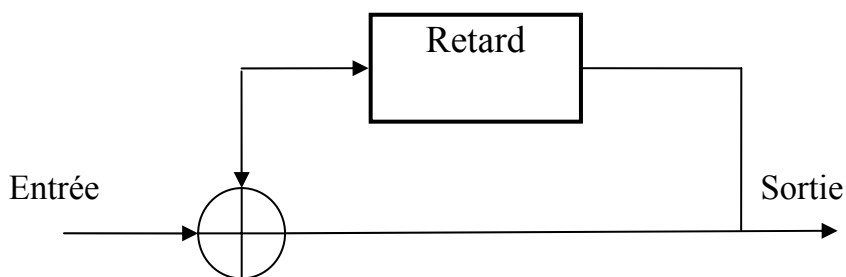


Fig III.5 : Structure d'un filtre RII

## III.5 Synthèse des filtres numériques

### III.5.1 Synthèse des filtres RII

Les coefficients  $a_j$  et  $b_i$  du filtre sont généralement obtenus à partir d'une fonction modèle. La fonction modèle utilisée est soit la réponse en fréquence soit la réponse impulsionnelle d'un filtre analogique connu, par exemple un filtre passe-bas de type Butterworth du 4ème ordre.

### III.5.2 Synthèse des filtres RIF

Le calcul des coefficients des filtres RIF repose sur l'utilisation de la transformée de Fourier numérique et des fenêtres spectrales (rectangulaire, Hamming, Hanning, ...).

Une comparaison des deux catégories de filtres RIF et RII est donné dans le tableau suivant :

Type de filtre	RII	RIF
méthode de calcul des coefficients	fonctions modèles ex : transformée bilinéaire	fenêtrage, ... (rectangulaire, Hamming ...)
avantages	peu de coefficients → rapidité de calcul → peu d'espace mémoire	phase linéaire → pas de déformation des signaux toujours stable
inconvénients	phase non linéaire risque d'instabilité	Nombre de coefficients élevé → temps de calcul long → espace mémoire important

Tableau comparatif des filtres IIR et FIR

## IV. ETUDE ET SIMULATION D'UN RECEPTEUR VOR NUMERIQUE

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire le fonctionnement du récepteur classique du VOR, ensuite nous analyserons le programme (de l'ENAC) de numérisation d'un récepteur VOR. Enfin, nous décrirons l'interface que nous avons conçue, permettant de visualiser tous les signaux du récepteur.

### IV.2 Description du récepteur classique du VOR

#### IV.2.1 Signal VOR

Le signal reçu en entrée d'un récepteur VOR peut se mettre sous la forme suivante :

$$s(t) = E_p [1 + m_1 \cos(\omega_0 t + m_f \sin(\alpha t)) + m_2 \text{identification} + m_3 \text{phonie} + m_4 \cos((t - \Omega))]$$

Les valeurs numériques des différents paramètres normalisés par l'OACI sont :

$E_p$ : amplitude du champ électrique, en limite de couverture

$\omega$ : pulsation de la porteuse, dans la bande [108-118 MHz]

$m_1$  : taux de modulation de la sous porteuse, 30% nominal

$\omega_0$ : pulsation de la sous porteuse, 9960 Hz ( $\pm 1\%$ )

$\Omega$ : pulsation des signaux 30 REF et 30 VAR, 30 Hz ( $\pm 1\%$ )

$m_f$  : indice de modulation,  $16 \pm 1$ , soit une excursion en fréquence  $\Delta f_0$  de l'ordre 480 Hz.

$m_2$  : taux de modulation de l'identification, 10 ou 5 % (tonalité 1020 Hz découpée suivant le code MORSE)

$m_3$  : taux de modulation crête de la phonie,  $< 30\%$  (bande spectrale limitée à 300-3000 Hz)

$m_4$  : taux de modulation du 30 VAR,  $m_4 = 30\%$ . L'angle  $\alpha$  représente le QDR.

#### IV.2.2 Spectre du signal VOR

Le spectre du signal VOR en bande de base (sans la modulation AM) est représenté en figure IV.1.

- Le spectre du signal d'identification se compose d'une raie à 1020 Hz et le spectre de la phonie s'étend sur la bande [300 3000Hz].
- Le signal 30VAR ( $E_p m_4 \cos(\Omega t - \alpha)$ ) signal sinusoïdal pur à la fréquence 30 Hz, possède un spectre formé d'une raie à 30 Hz.
- Le signal  $\cos(\tilde{\omega}_0 t + m_f \sin \Omega t)$  est un signal modulé en FM, donc il est composé d'un ensemble de raies espacées de 30 Hz. La majeure partie de la puissance de ce signal est située dans la bande de 9480 à 10440 Hz.

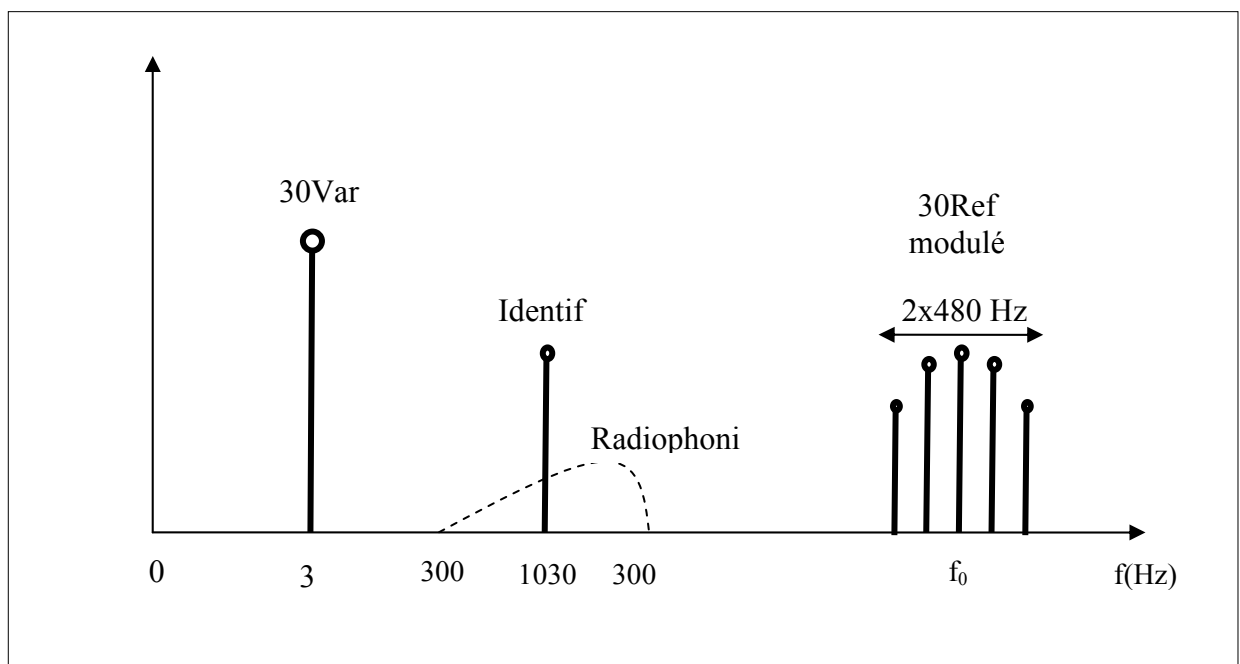


Fig IV.1 : Spectre du signal modulant VOR

### IV.2.3 Description du récepteur

Le schéma-bloc d'un récepteur classique est représenté en figure IV.2.

A la sortie du récepteur VHF qui est un démodulateur AM, on retrouve le signal en bande de base de la figure IV.1. Les signaux de référence et de position doivent être séparés, ceci est réalisé par :

- Pour le signal de référence, un filtre passe-bande centré sur la fréquence de 9960Hz suivi d'un démodulateur de fréquence et d'un filtre passe-bas pour lisser
- Pour le signal de position (variable), un filtre passe-bas de fréquence de coupure 30Hz.

La mesure du déphasage entre signal référence et position est alors conduite de la façon suivante :

Un déphaseur déphase le signal de référence (30Ref) de la quantité affichée à l'OBS (route sélectionnée). Il est ensuite comparé au signal position (30 Var).

Ce phasemètre élabore un signal d'écart qui apparaît sur la barre vertical de l'indicateur OBI (Omni Bearing Indicateur). La barre de tendance sera centrée pour un nul ou un déphasage de  $180^\circ$  entre des deux signaux c'est-à-dire l'aiguille (la barre) peut être centrée pour deux valeurs différentes de  $180^\circ$  (sur OBS). Il y a un doute de  $180^\circ$  qu'il faut lever.

Le lever de doute est effectué par une indication complémentaire To / From sur l'OBS ou l'apparition d'une pointe de flèche sur l'indicateur HSI et ceci comme suit :

Le signal de référence est déphasé de  $90^\circ$ . Le phasemètre (TO-FROM) n'a pas besoin de précision et mesure donc la différence de phase entre :

- signal de référence de la quantité affichée à l'OBS +  $90^\circ$
- signal de position.

On a un asservissement de l'aiguille du RMI monté sur l'axe d'un resolver déphaseur mené par un moteur : la queue de l'aiguille indique le QDR, la pointe le QDM.

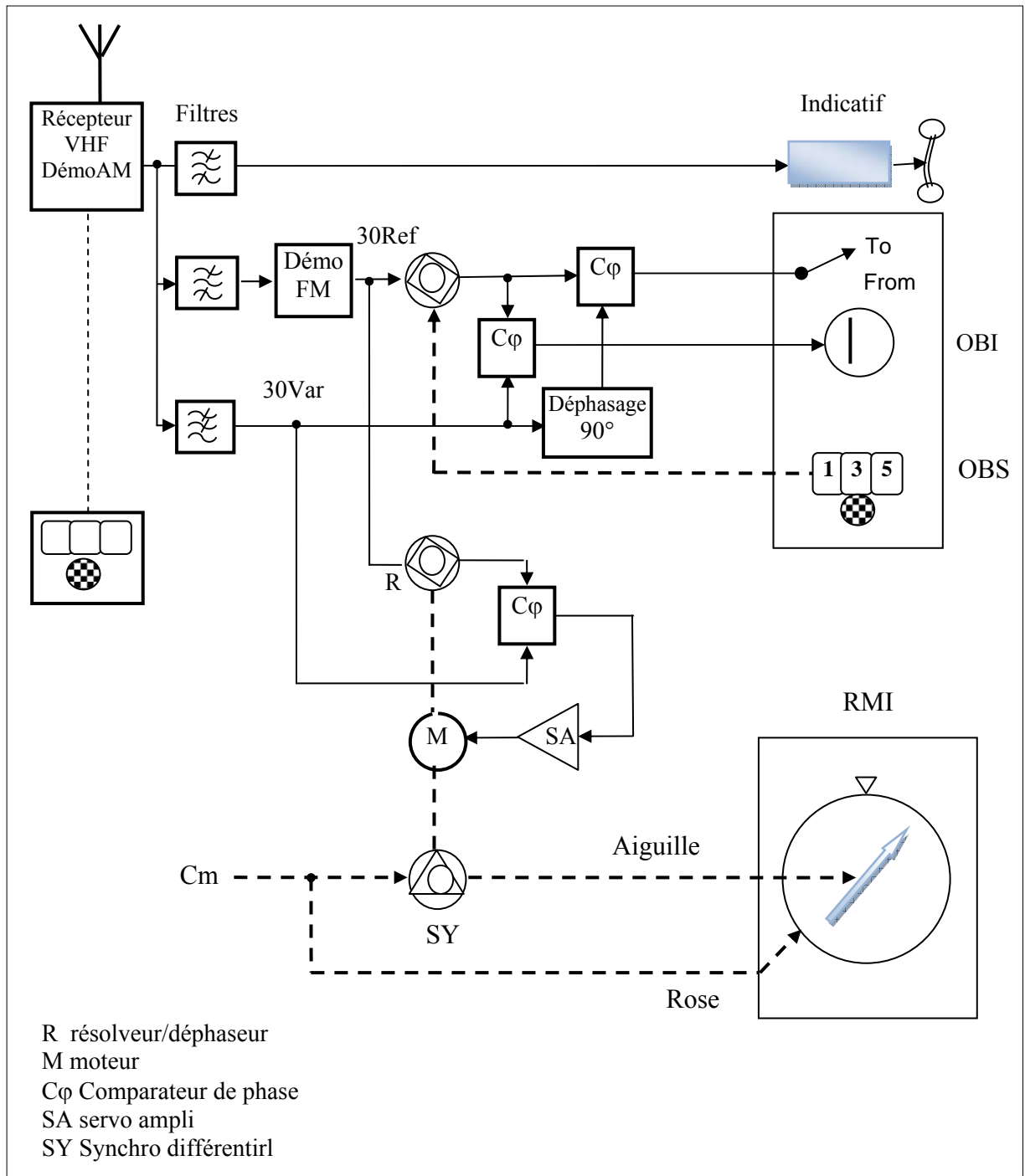


Fig IV.2 : Schéma-bloc du récepteur

### IV.3 Etude du récepteur numérique

On ne considère ici que le signal en bande de base en sortie du démodulateur AM et sans les signaux d'identification et de phonie :

$$e(t)=[1+0.3*\cos(\omega_0t+m_f.\sin \Omega t)+0.3*\cos(\Omega t+\Phi )]$$

avec  $\Phi$  entre 0 et  $360^\circ$   $\Phi \approx -\alpha$

Le récepteur numérique à programmer est représenté en figure IV.3.



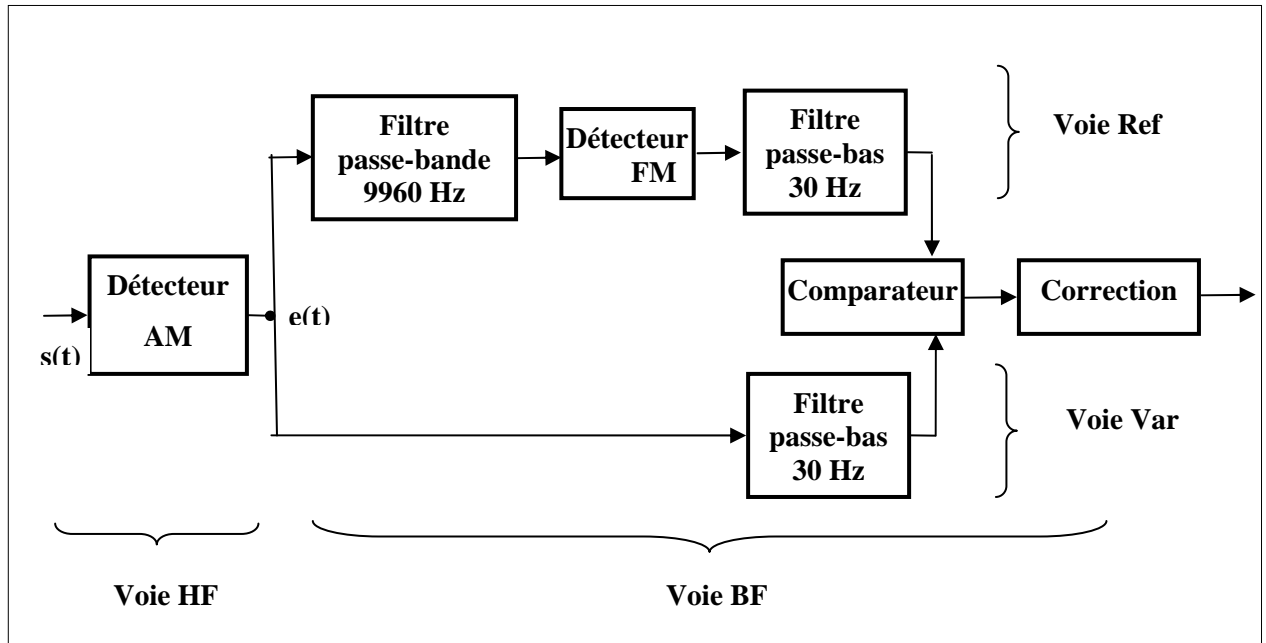


Fig IV.3 : Récepteur numérique

### IV.3.1 Choix de la fréquence d'échantillonnage

D'après le théorème de Shannon, on sait qu'il faut choisir une fréquence d'échantillonnage  $f_e$  supérieure à 2 fois la fréquence maximale du spectre  $E(f)$  pour que l'opération d'échantillonnage soit réversible. La fréquence maximale est égale à la fréquence maximale de la sous-porteuse modulée par le 30 REF. On choisit une fréquence  $f_e = 30$  kHz, soit d'environ 3 fois supérieure à cette fréquence maximale.

#### IV.3.1.1 Extraction du signal variable (30 VAR)

Pour obtenir le signal VAR, il suffit de filtrer la raie à 30 Hz, on utilise un filtre numérique passe bas de type RIF d'ordre 100 à phase linéaire et de fréquence de coupure 90 Hz. Il sera réalisé par la fonction « fir1 » de Matlab.

A la sortie de la voie VAR, on obtient la composante continue et le 30 VAR déphasé de  $\Phi_{PB}$ , déphasage appliqué à une sinusoïde à 30 Hz. On calcule ensuite la moyenne de ce signal : lors du calcul du déphasage, on travaillera sur les valeurs obtenues auxquels on retranchera la moyenne.

#### IV.3.1.2 Extraction du signal de référence (30 REF) modulé

Pour obtenir le signal 30REF il faut filtrer la bande spectrale [9960-480,9960+480]. Le signal initial est de la forme  $e(t) = 1+0.3*\cos(\omega_0.t+m_f.\sin(\Omega t))+0.3*\cos(\Omega.t+\Phi)$ . Or le signal portant l'information est en fait l'argument du signal modulé en fréquence. La méthode employée consiste à filtrer les composantes fréquentielles positives autour de 9960 Hz puis à récupérer l'argument grâce à la fonction « arctan » appliquée au couple (partie imaginaire, partie réelle).

Le résultat de ce filtrage est de la forme  $0.3*\exp[ j (\omega_0.t+n.\sin(\Omega.t+\phi_1) +\phi_2) ]$  où  $\phi_1$  et  $\phi_2$  sont des phases caractéristiques du filtre passe-bande qui seront explicitées par la suite.

La fonction « arctan » permet donc de récupérer l'argument de l'exponentielle complexe :  $\omega_0.t+m_f.\sin(\Omega t+\phi_1)+\phi_2$ .

Enfin en dérivant l'expression obtenue on aboutit à :

$$s(t) = \omega_0 + m_f.\Omega.\cos(\Omega.t+\phi_1), \text{ signal sinusoïdal à 30 Hz de moyenne } \omega_0.$$

Ensuite l'application du même filtre passe-bas que celui de la voie VAR (filtre RIF de fréquence de coupure 90Hz) permet de lisser la courbe et apporte un déphasage égal à  $\Phi_{PB}$ . Lors du calcul du déphasage, on travaillera sur les valeurs obtenues en auxquels on retranchera la moyenne.

### IV.3.2 Calcul du déphasage

Pour mesurer le déphasage entre les deux signaux reçus, la solution consiste à détecter les zéros de chaque signal (filtré et centré) sur un temps donné et à comparer leurs positions respectives.

Pour cela on détecte les changements de signe du signal puis pour minimiser l'effet du bruit on effectue une régression linéaire sur les 4 points entourant le changement de signe.

Les différentes étapes de l'algorithme de fonctionnement du récepteur sont décrites dans la figure IV.4.

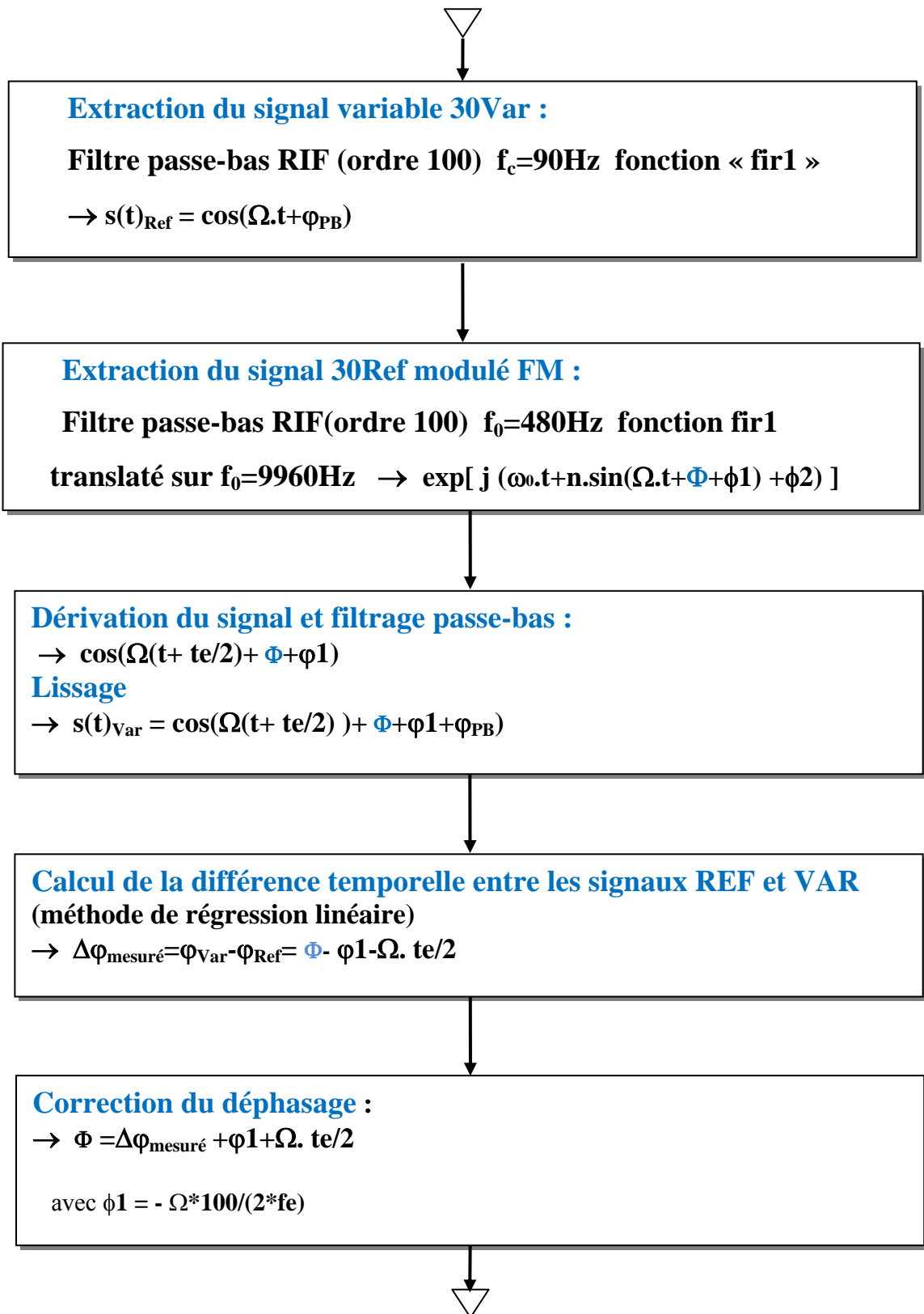


Fig. IV.4 Organigramme de calcul du déphasage

Pour dialoguer facilement avec le calculateur, nous avons conçu une interface réalisée à l'aide de l'outil « Guide de Matlab ».

L'utilisateur peut créer ses propres interfaces graphiques pour les applications. En effet, MATLAB prévoit un ensemble de commandes et fonctions dont l'utilisation est relativement aisée pour la création et la manipulation d'objets graphiques (fenêtres, menus, bouton de commande, cases à cocher, etc.)

L'élément de base d'une interface graphique est la fenêtre. Elle permet de grouper des outils graphiques dans un même cadre dans un but de clarté et de manipulation facile.

A une fenêtre, sont associées des propriétés modifiables telles que la taille, le nom, la position, le titre, la couleur, etc.

Nous allons donner un aperçu des outils de contrôles permettant de réaliser une interface.

Les contrôles sont des objets qui réagissent et provoquent une action lorsqu'ils sont manipulés par la souris ou le clavier.

Sous une interface graphique, la communication avec l'utilisateur est généralement établie à l'aide des contrôles tels que les groupes d'options, cases à cocher, boutons de commande, textes statiques et textes modifiables. Ainsi, les programmes offrent une meilleure convivialité, car il suffit d'un simple clic avec le pointeur de la souris pour définir, par exemple, de nouvelles valeurs.

- Les types de contrôles Bouton poussoir (pushButton) : réalisation d'une action (exécution)
- Bouton radio (Radio Button) : un groupe de boutons radio permet une sélection exclusive (un seul bouton activé à la fois). Lorsqu'on en a un seul, il permet la permutation entre deux états.
- Texte statique (StaticText) : affiche une ligne de texte d'information
- Texte éditable (EditText) : zone de texte éditable, permettant à l'utilisateur d'entrer une chaîne de caractères.
- Panneau (Panel) : affiche une bordure rectangulaire autour d'un ou plusieurs contrôles pour former un groupe logique. Les panneaux peuvent faciliter une interface utilisateur pour comprendre par des commandes relatives groupantes visuellement.

- Barre de défilement (Slider) : permet à l'utilisateur de choisir une valeur dans un intervalle donné (en glissant un curseur).
- Menu instantané (Pop-up menu) s'ouvre pour montrer une liste de choix quand l'utilisateur clique sur la flèche.
- Bouton à bascule (Toggle Button) : ces boutons produisent une action et indiquent s'ils sont « on » ou « off ». Cependant, à la différence d'un bouton-poussoir, le bouton à bascule reste enfoncé jusqu'à ce que qu'on clique une deuxième fois.

## IV.5 Description des l'interfaces

Pour présenter notre travail, nous avons créé deux interfaces :

### IV.5.1 Interface « EMETTEUR »

Cette interface sert à visualiser les signaux en différents points de l'émetteur VOR.

L'interface que nous proposons comprend 4 zones distinctes (figure IV.5) :

#### ➤ 1<sup>ère</sup> zone

Elle est située en haut et à gauche de la fenêtre. C'est la zone réservée à la lecture de la donnée concernant le radial sur lequel est situé l'avion, c'est la valeur qui doit être déterminée par le récepteur. Elle utilise un composant de type « slider ».

#### ➤ 2<sup>ème</sup> zone

Cette zone située en haut, à droite de la fenêtre montre une image du schéma-bloc de l'émetteur avec les différents points de test.

#### ➤ 3<sup>ème</sup> zone

Cette zone située au centre, à droite permet de sélectionner les 7 signaux à visualiser. Elle utilise un groupe de « radiobutton »

#### ➤ 4<sup>ème</sup> zone

Cette zone située en bas, à droite sert à visualiser les signaux.

Un bouton de type « pushbutton » permet d'activer l'interface.

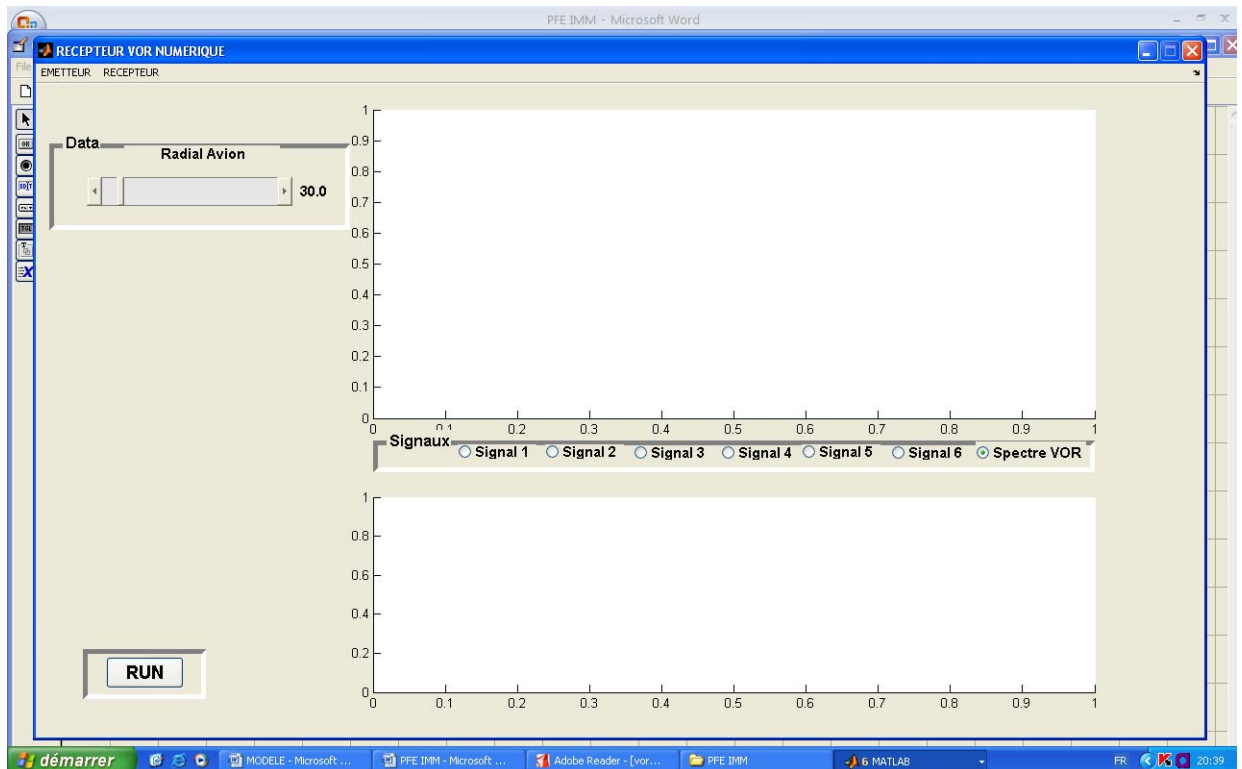


Fig. IV.5 Inteface « Emetteur »

#### IV.5.2 Interface « RECEPTEUR »

Cette interface sert à visualiser les différents signaux et leurs spectres en différents points du récepteur du VOR..

L'interface que nous proposons comprend 5 zones distinctes (figure VI.6):

➤ **1<sup>ère</sup> zone**

Elle est située en haut, à droite de la fenêtre. Elle est utilisée pour montre une image du schéma-bloc du récepteur avec les différents points de test.

➤ **2<sup>ème</sup> zone**

Cette zone située au centre, à droite permet de sélectionner les signaux à visualiser : caractéristiques des filtres passe-bas et passe-bande et les signaux 30Ref et 30Var détectés.

➤ **3<sup>ème</sup> zone**

Cette zone située en bas, à droite sert à visualiser les signaux.

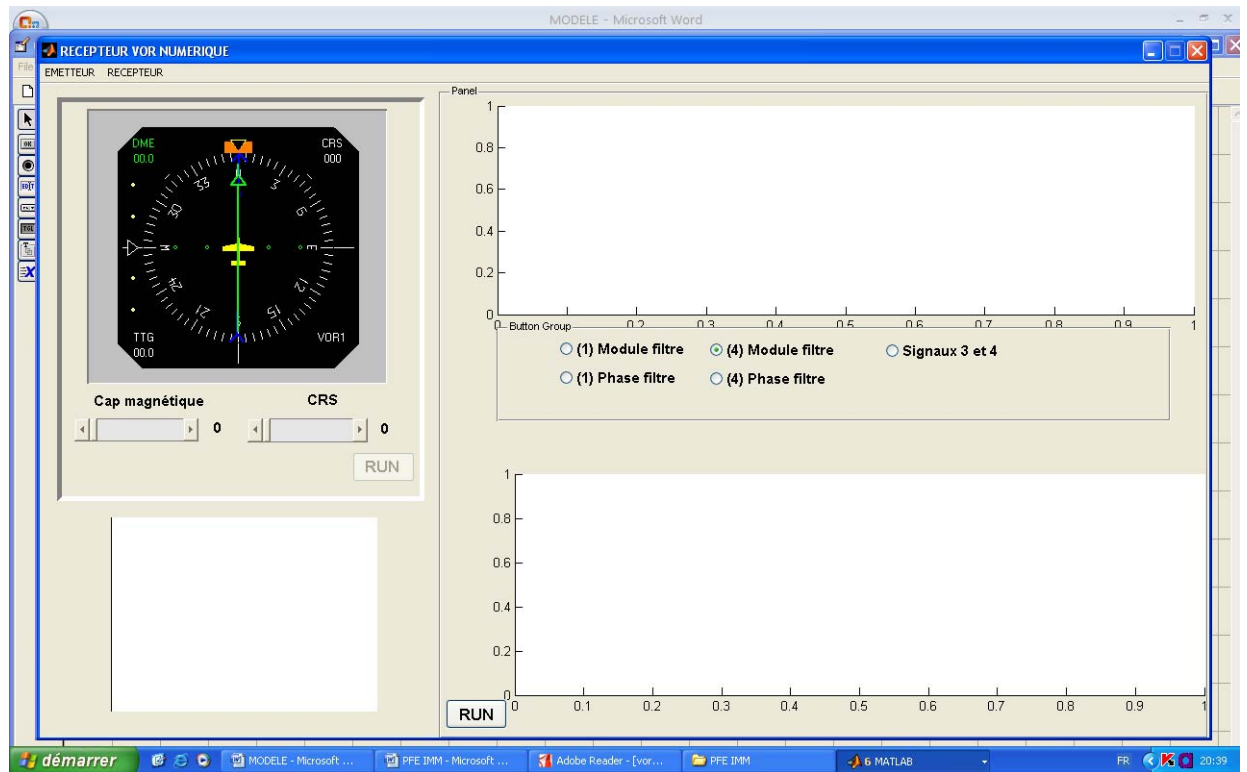


Fig. IV.6 Interface

➤ **4<sup>ème</sup> zone**

Dans cette zone, nous avons placé un indicateur de type HSI pour visualiser les résultats des calculs de l'azimut de l'avion. Nous avons utilisé le bouton « ActiveX control » pour sélectionner cet indicateur.

On peut introduire dans cette zone à l'aide de « sliders, le cap magnétique  $C_m$  de l'avion et le radial désirée CRS.

L'activation de l'HSI se fait à l'aide de l'instruction « set » pour commander la rotation de la rose avec la valeur de  $C_m$  et la barre de tendance avec les valeurs de CRS (radial sélectionné) et  $\Phi$  (le déphasage mesuré). Nous avons ajouté à l'HSI, un indicateur To/From. Ce la fonctionne comme suit (figure IV.7) :

Pour les indications To/From :

$$\begin{cases} \text{si } CRS - 90^\circ < \Phi < CRS + 90^\circ & \text{alors Indication FROM} \\ \text{si } CRS + 90^\circ < \Phi < CRS - 90^\circ & \text{alors Indication TO} \end{cases}$$

Pour la barre de tendance :

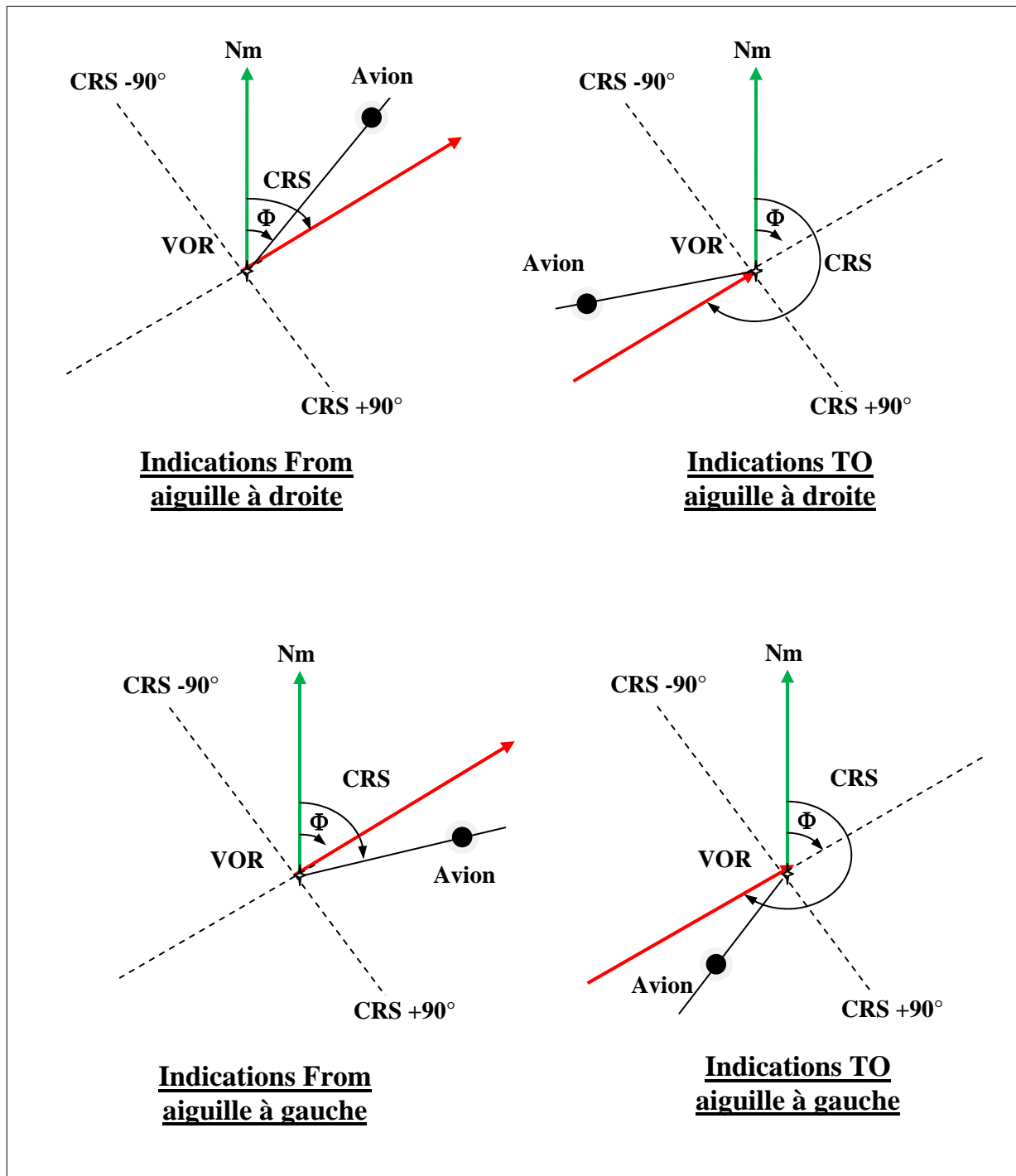


Fig.IV.7 : Indications VOR

➤ 5<sup>ème</sup> zone

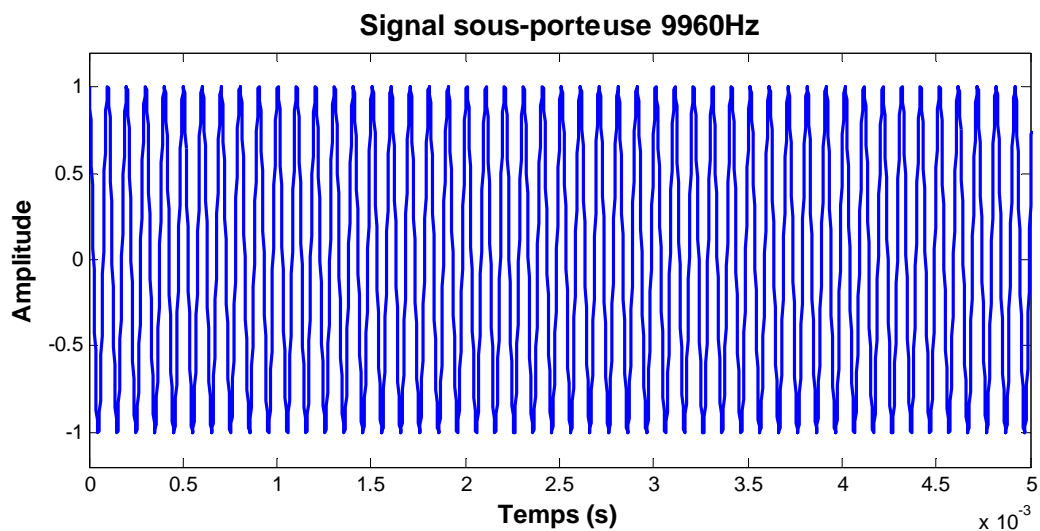
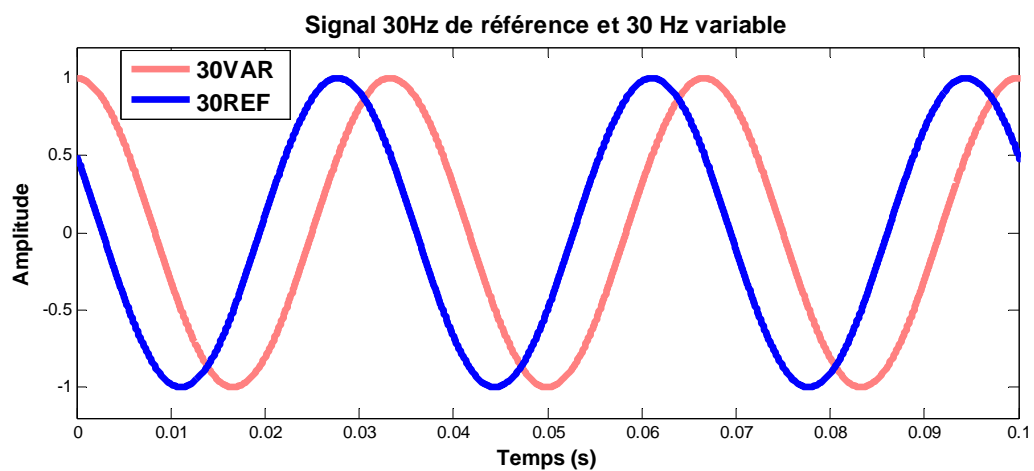


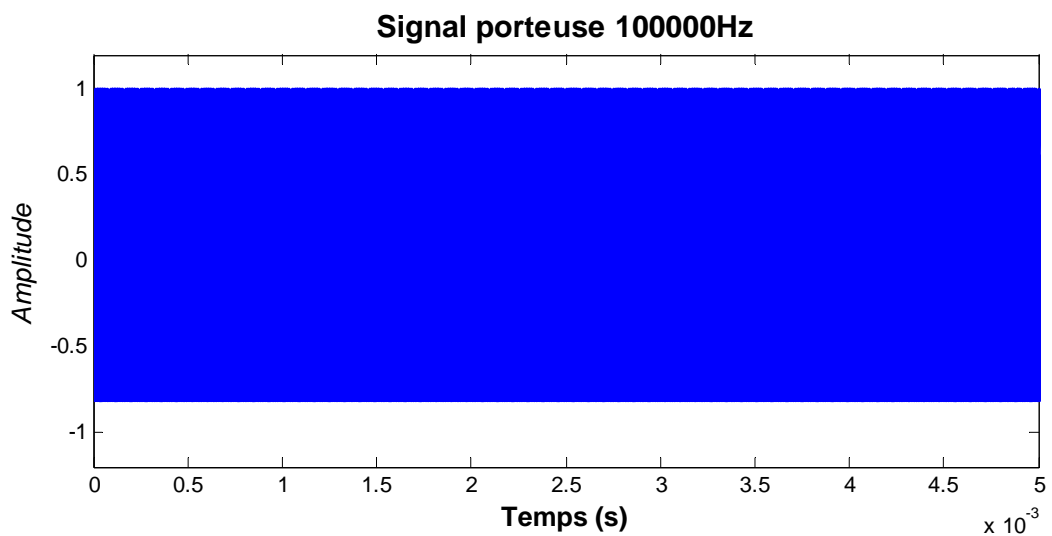
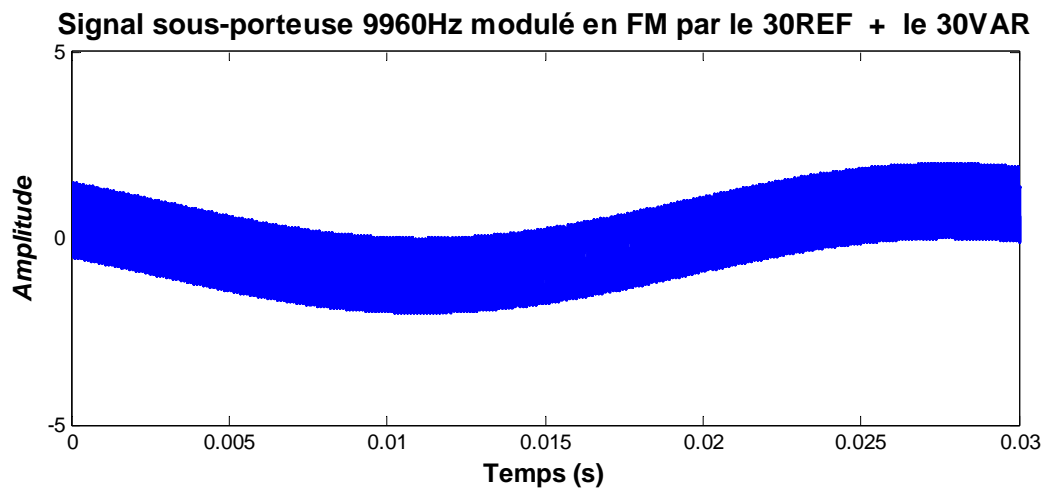
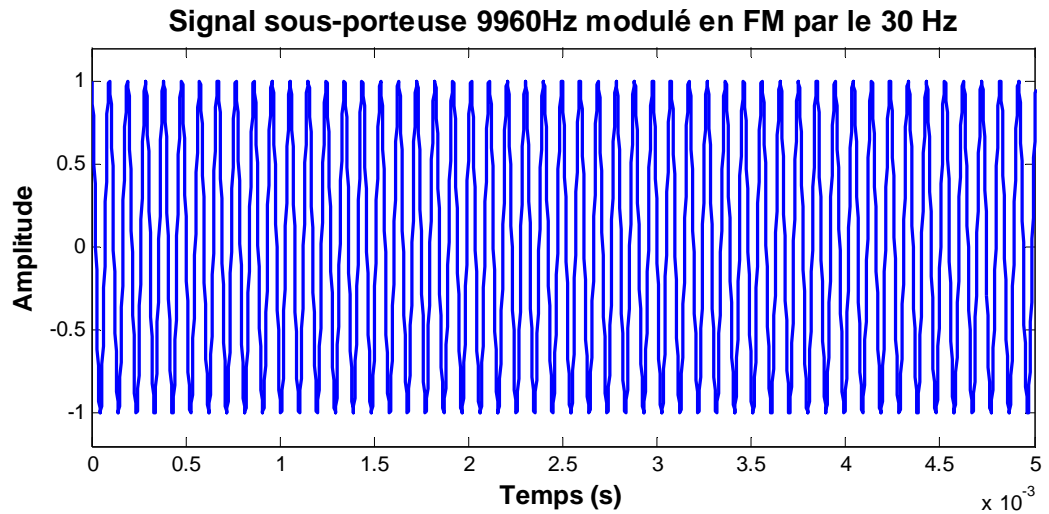
Dans cette zone, un dessin donne la situation de l'avion par rapport aux paramètres de simulation (cap, radial sélectionné et position).

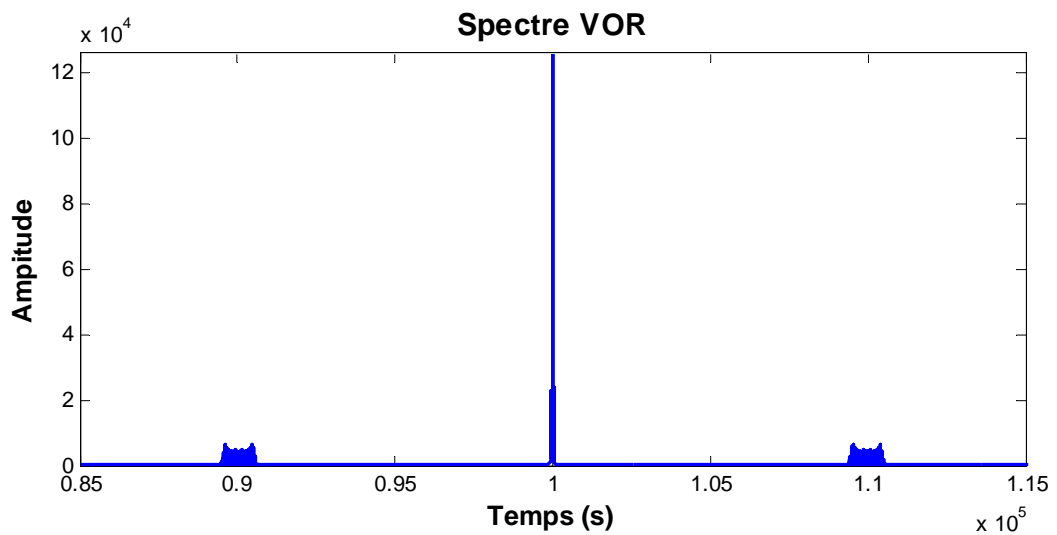
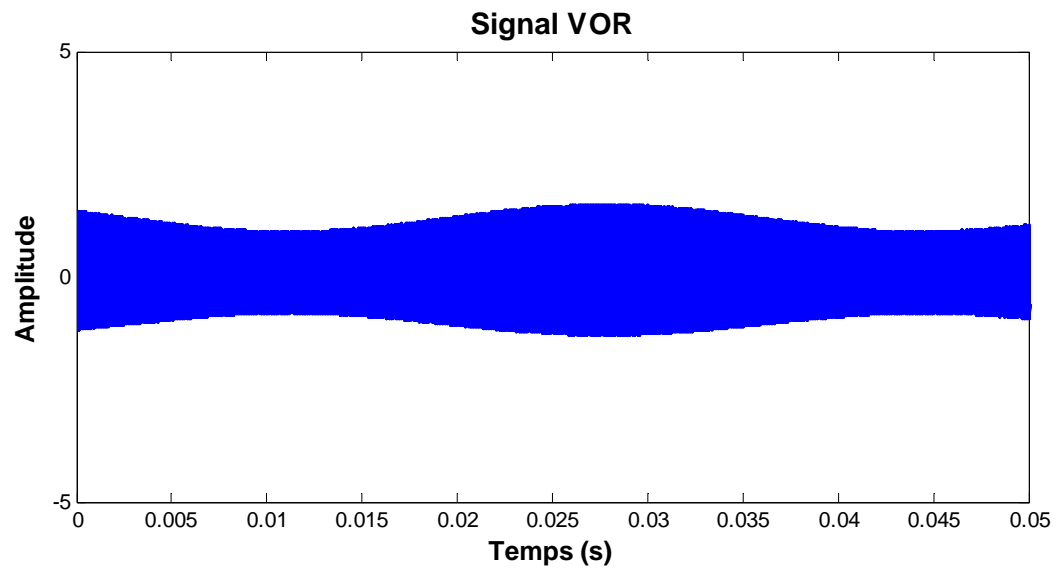
## IV.6 Simulations

### IV.6.1 Simulation interface EMETTEUR

Nous avons représenté dans les figures suivantes, les signaux en divers points de l'émetteur.



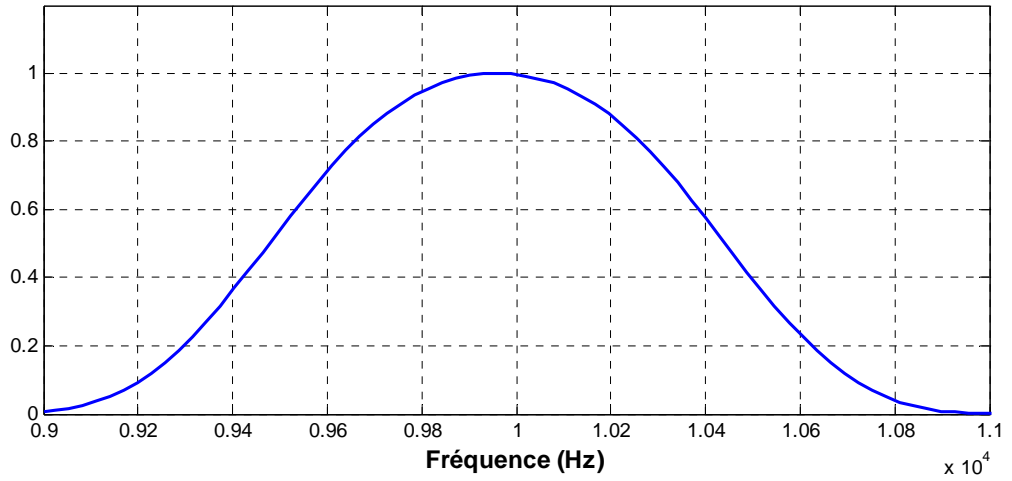




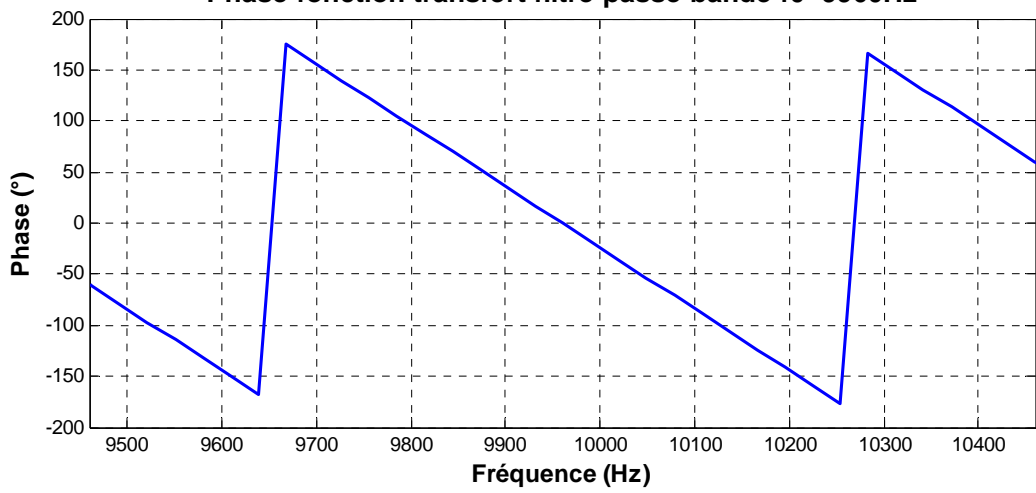
### IV.6.2 Simulation de l'interface RECEPTEUR

Nous avons représenté dans les figures suivantes, les signaux en divers points de récepteur.

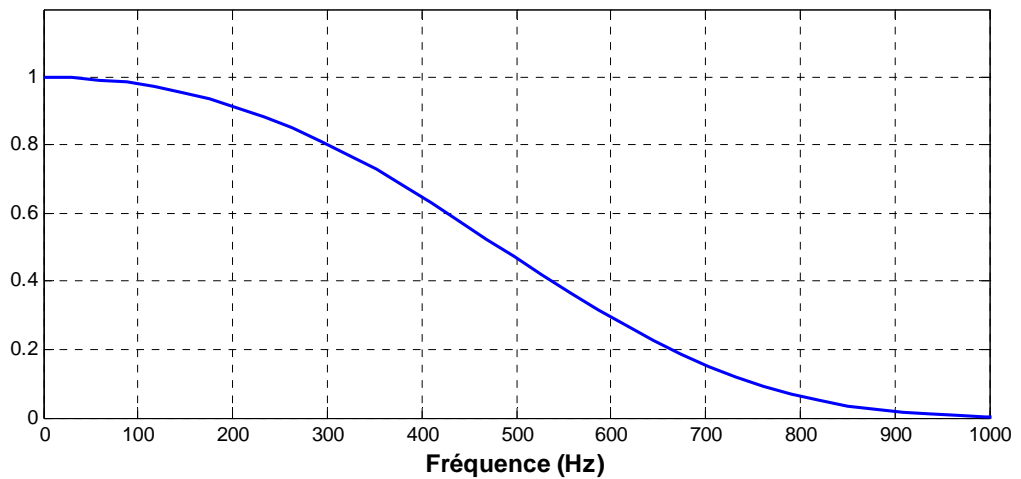
**Module filtre passe bande f0=9960Hz**

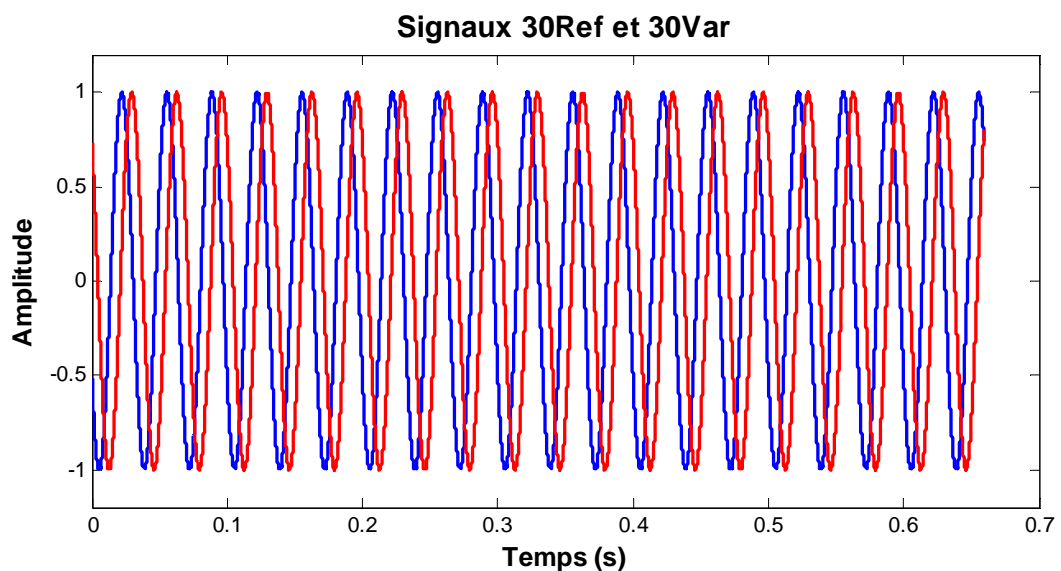
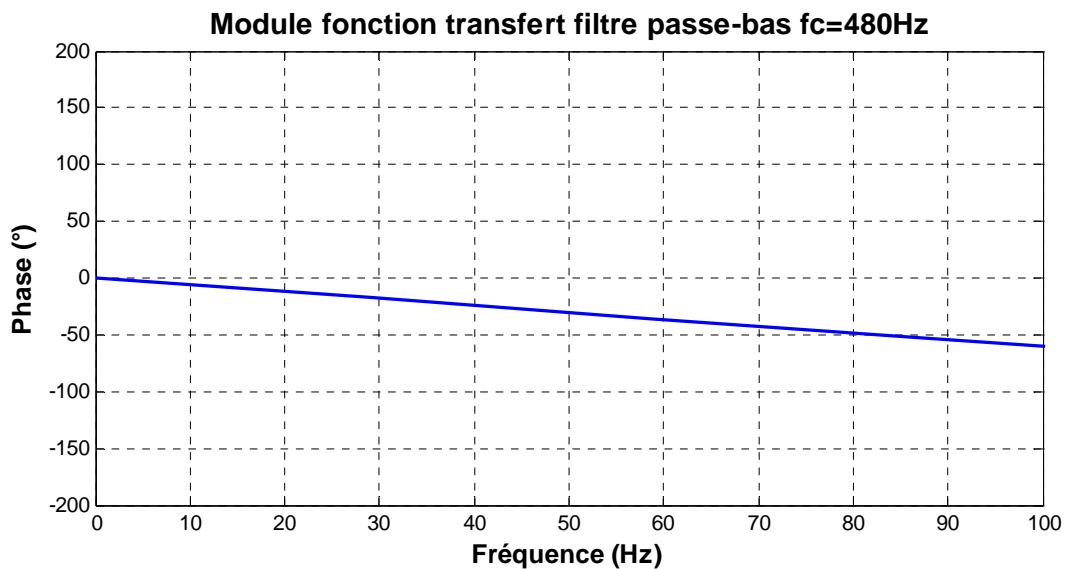


**Phase fonction transfert filtre passe bande f0=9960Hz**



**Module fonction transfert filtre passe-bas fc=480Hz**





Les figures suivantes montrent (IV.8 à IV.11), quatre configurations différentes de l'HSI et la position de l'avion :

- Figure IV.7 : cap  $75^\circ$ , radial selecté (CRS)  $60^\circ$ , radial avion  $59^\circ$
- Figure IV.8 : cap  $75^\circ$ , radial selecté (CRS)  $60^\circ$ , radial avion  $61^\circ$
- Figure IV.9 : cap  $75^\circ$ , radial selecté (CRS)  $60^\circ$ , radial avion  $339^\circ$
- Figure IV.10 : cap  $75^\circ$ , radial selecté (CRS)  $60^\circ$ , radial avion  $241^\circ$

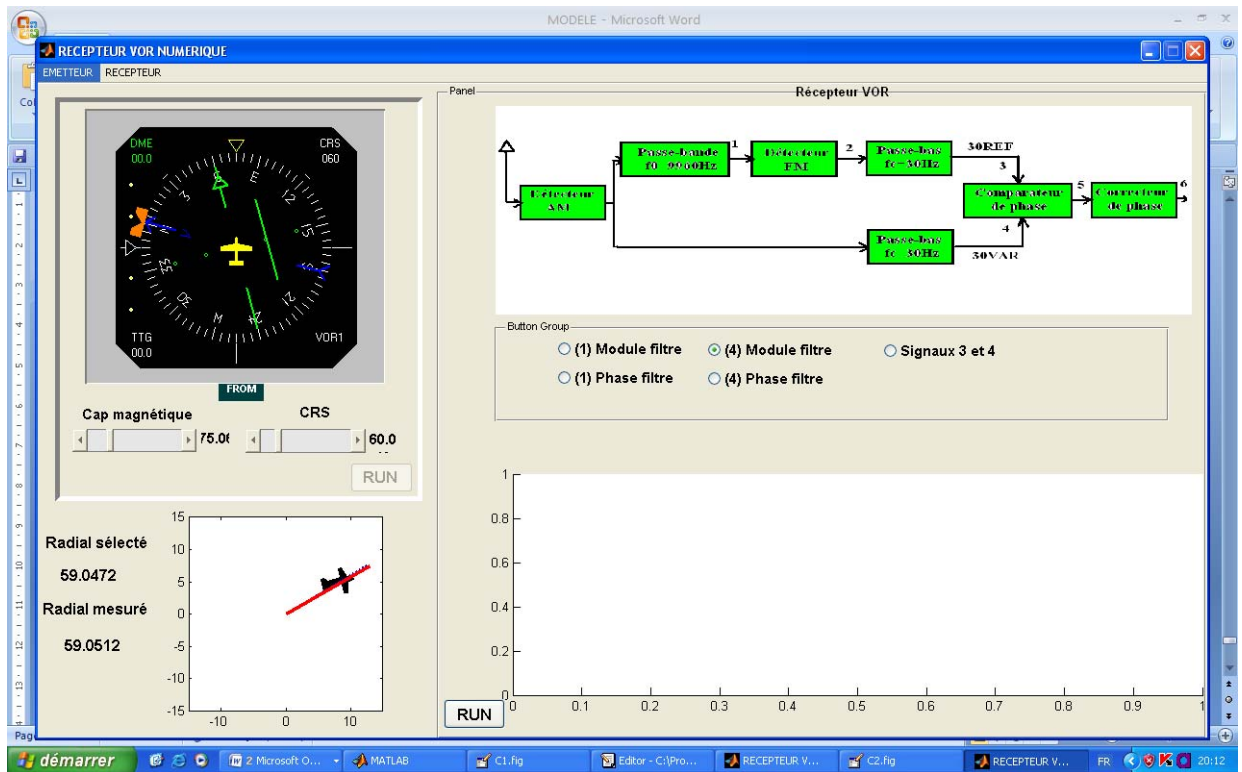


Figure IV.8 : CRS=60° radial=59°

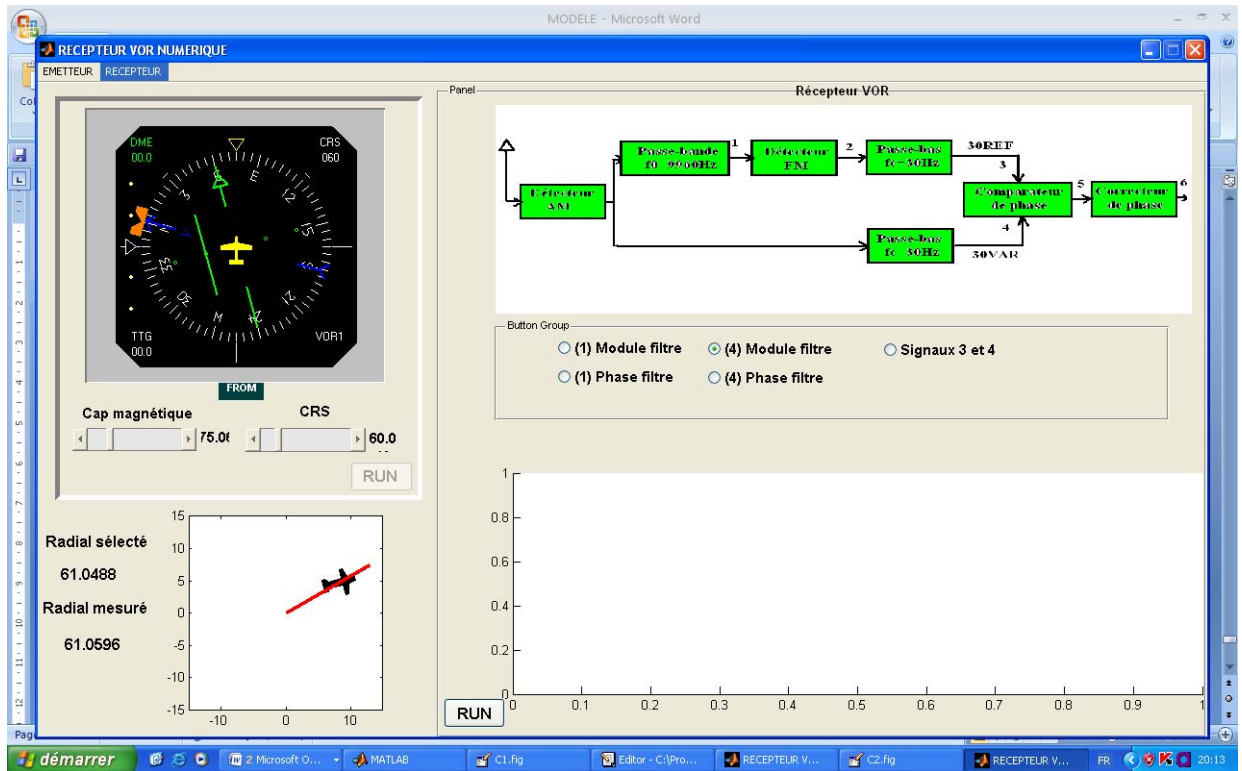


Figure IV.9 : CRS=60° radial=61°

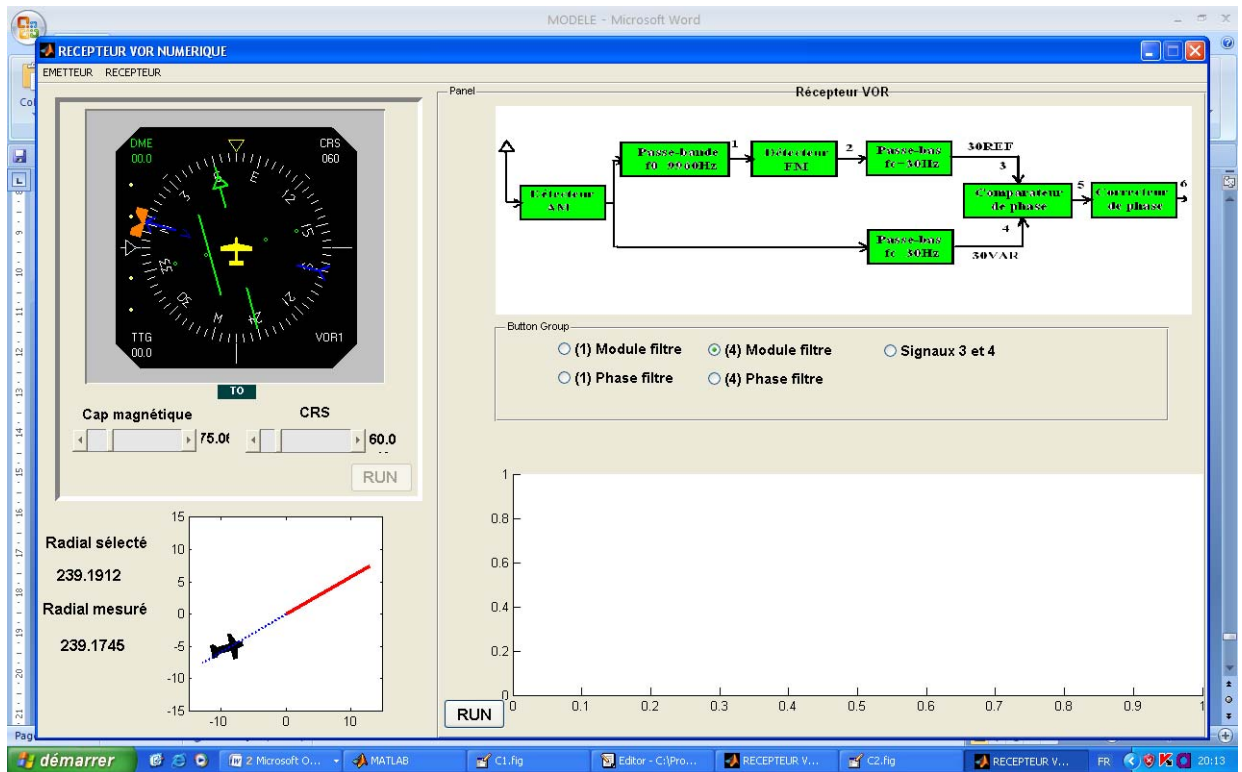


Figure IV.10: CRS=60° radial=339°

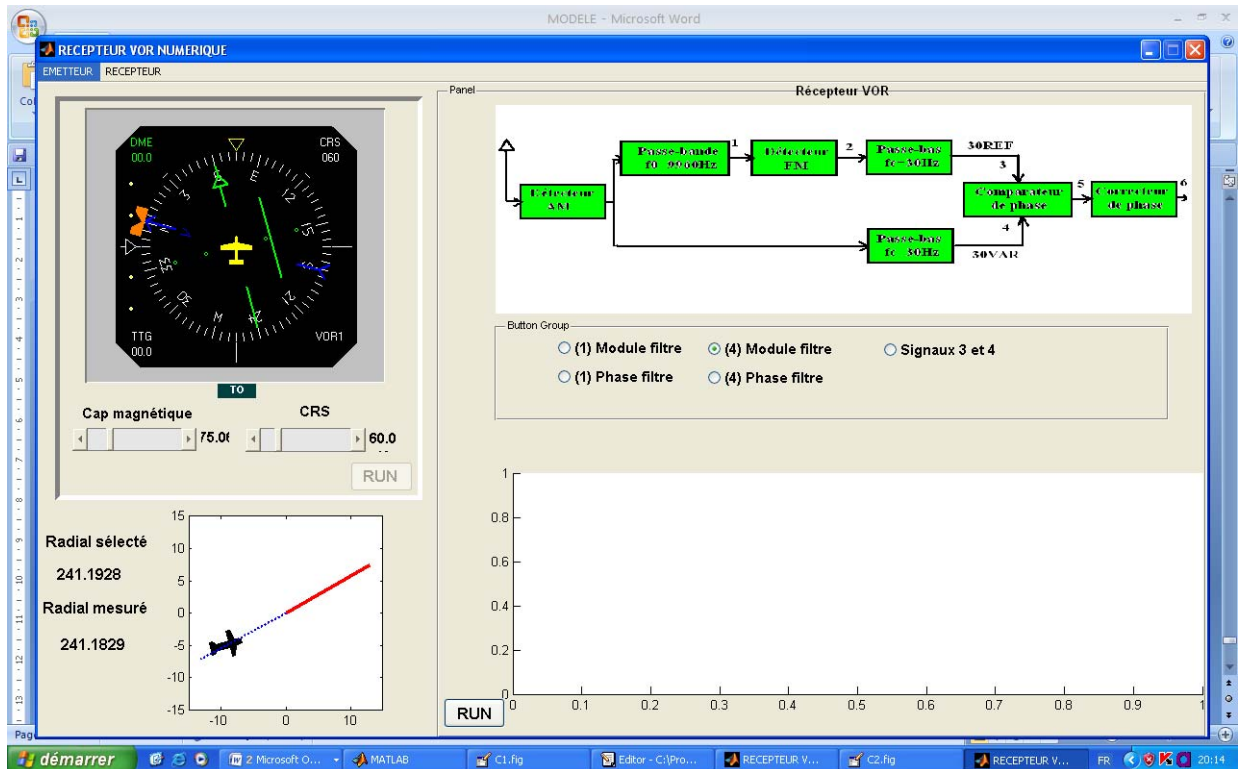


Figure IV.11: CRS=60° radial=241°

**IV.7 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce dernier chapitre, une description de l'algorithme de numérisation du récepteur et de l'interface. Les simulations nous ont permis de voir que le récepteur numérique est un système permettant d'obtenir des erreurs angulaires très petites de l'ordre de deux centièmes de degré.



## CONCLUSION GENERALE

Nous avons présenté dans ce mémoire une étude et une simulation des différentes fonctions d'un récepteur VOR basé sur des techniques numériques de traitement de signal.

Cet algorithme de calcul réalisé à l'ENAC de Toulouse nous a permis de comprendre les fonctions de filtrage numérique. Nous avons ajouté à cet algorithme les fonctions de l'émission. Nous avons développé une interface permettant de visualiser les signaux en différents points de l'émetteur et du récepteur et les caractéristiques des filtres utilisés. Nous avons ajouté un indicateur de type HSI à l'interface.

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les techniques de traitement numériques des signaux qui sont des techniques moins lourdes et plus souples que les techniques analogiques.

Ce travail nous a permis aussi de nous familiariser avec le logiciel de calcul « Matlab » et de l'outil « Guide » de création de fenêtres graphiques interactives.

Nous espérons que ce travail contribuera à comprendre mieux le mode de fonctionnement du VOR numérique.

## ANNEXE

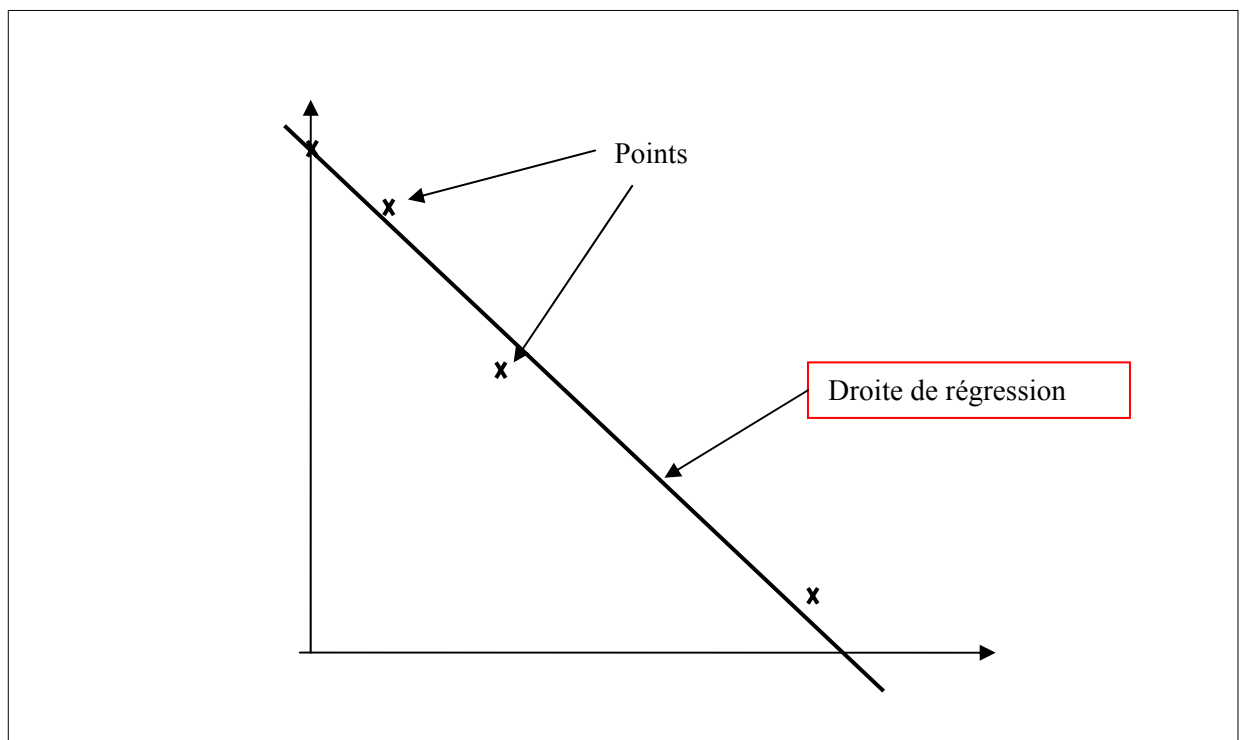
### Régression linéaire

De nombreuses quantités physiques sont reliées par des conditions du type  $y=ax+b$ . Par des expériences, on arrive à connaître des couples  $(x_i, y_i)$ , et on cherche à déterminer  $a$  et  $b$ . En général, en raison des erreurs de mesure, les points  $(x_i, y_i)$  ne sont pas alignés, mais sont "presque" sur une même droite. Il faut alors choisir  $a$  et  $b$  de sorte que la droite soit la meilleure possible.

Pour cela, il faut choisir une mesure de l'écart entre une droite  $y=ax+b$  et le nuage de points expérimentaux  $(x_i, y_i)$ . On choisit en général le carré de la différence entre le point théorique et le point expérimental, c'est-à-dire  $(y_i - (ax_i + b))^2$ . L'écart total est donc :

$$J(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2.$$

Effectuer une **régression linéaire**, c'est trouver la droite qui minimise l'écart précédent, c'est-à-dire la somme des carrés des différences : on parle de **droite des moindres carrés**.



## ANNEXE

L'étude mathématique est assez facile lorsqu'on connaît les fonctions de plusieurs variables. Un minimum d'une fonction de plusieurs variables ne peut se produire qu'en un point où les dérivées partielles s'annulent, c'est-à-dire :

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - ax_i - b) = 0, \\ \frac{\partial J}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n y_i - ax_i - b = 0. \end{cases}$$

On a un système linéaire d'ordre 2 en  $a$  et  $b$  à résoudre, et on trouve :

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \text{ et } b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] THOMAS Johan LUCAS Fabrice, Implémentation sur DSP d'un démodulateur numérique du signal aéronautique VOR, ENAC
- [2] Claude ALARI « Instrument de radionavigation », École National de l'Aviation Civile, 6<sup>ème</sup> édition 1992.
- [3] Jean-pierre QUIJANO et Didier FEMINIER, « Navigation aérienne des aides radio », Modulo Éditeur Nov.1987.
- [4] Notice descriptive, « Indication générales à VOR », THALES.
- [5] Manuel Technique LOC 4000, « description de l'équipement », tome1.
- [6] Freddy MUDRY, Filtrage analogique et numérique, ENSAE 2005

## ملخص

*VOR*  
*interface*

*matlab*

*. IHS*

## RESUME

**Le travail présenté dans le cadre de ce mémoire concerne l'étude de la numérisation du récepteur du système de radionavigation VOR et la réalisation d'une interface à des fins pédagogiques, sous 'guide' de « matlab » permettant de manipuler l'algorithme de calcul du récepteur afin de visualiser les informations des signaux en divers points du récepteur et la simulation d'un indicateur HSI.**